



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



Агроинженерия Agricultural Engineering (Moscow)

Том 28. № 4
ИЮЛЬ-АВГУСТ
2026

Подписной индекс агентства «Пресса России» 42252



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

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научный журнал

Том 28. № 4 / 2026

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

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

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

Основан в 2003 году

Периодичность: 6 номеров в год

Журнал «Вестник
федерального государственного
образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Московский государственный
агроинженерный университет
имени В.П. Горячина» 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 «ЭйПиСиПаблшинг»
127550, г. Москва,
Дмитровское ш., д. 45, корп. 1, оф. 8
Тел.: +7 (499) 976-51-84, (985) 109-44-19

Подписано в печать 21.08.2026
Формат 60 84/8
Тираж 500 экз.

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

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

Редакционная коллегия:

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

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 мелиоративных и строительных машин, 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. Бужако, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>, vzaginajlov@rgau-msha.ru

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

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

Ирэна Веньяминовна 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

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.avramenka@bsatu.by

Снежан Иванов Божков, канд. техн. наук, проф., Институт почвоведения, агротехнологий и защиты растений им. Н. Пушкарлова, 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



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

AGRICULTURAL ENGINEERING (MOSCOW)

Scientific Journal

Vol. 28(4)/2026

Founder and Publisher:

**Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy**

Address of Founder and Publisher:
49, Timiryazevskaya str., Moscow,
127434, Russian Federation

The mass media registration certificate
ПИ No. ФС 77-78053 of March 6, 2020

Founded in 2003

Publication Frequency:

Bimonthly

Scientific Journal "Vestnik of Federal State
Educational Institution of Higher Professional
Education "Moscow State Agroengineering
University named after V.P. Goryachkin"
[Vestnik FGOU VPO "Moskovskiy
gosudarstvenniy 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 21.08.2026

Format – 60 84/8

Circulation – 500 copies.

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

Science Editor-in-Chief

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

Deputy Science Editor-In-Chief:

Aleksei S. Dorokhov, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor, Director Deputy for Science and Organizational Work, Federal State Budgetary Research Institution – Federal Scientific Agroengineering Center (VIM) (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>, dorokhov.vim@yandex.ru

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

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

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.devyanin@rgau-msha.ru

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

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

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

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

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. Storcheyov, 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.storcheyov@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

Aytzhan M. Abdymov, 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.avramenko@bsatu.by

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

А.С. Дорохов, М.Н. Ерохин, А.В. Сибирёв, М.А. Мосяков, Д.Н. Кынев Автоматизированный модуль сепарации клубней картофеля от почвенных примесей: разработка и исследование	4
В.В. Гордеев, Т.Ю. Миронова, Т.И. Гордеева, С.В. Ковалёв, В.Е. Хазанов Алгоритм проектирования водосберегающих технико-технологических решений на молочной ферме КРС	14
В.А. Смелик, А.М. Захаров, А.Н. Перекопский Уборка зерновых культур при вероятностном характере внешних условий: оптимизация технологического процесса	24
М.Е. Чаплыгин, К.А. Степанов, А.С. Чулков, А.Л. Мнацаканян Определение параметров перемещения семян зерновых и зернобобовых культур в центробежном распределителе селекционной сеялки	32
А.Н. Зинцов, М.М. Ковалев, Г.А. Перов, В.И. Шинкарев Исследование структурных параметров стеблевого слоя при вспушивании лент льна: новые аспекты	42
Ю.В. Саенко, В.Ю. Страхов, К.В. Казаков Дробилка пророщенного высушенного зерна: конструктивные параметры и режимы работы	51
М.С. Назаров Обоснование типа дозатора органических удобрений в виде пеллет для комбинированного почвообрабатывающего агрегата	59

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

В.М. Корнеев, Д.И. Петровский, И.Н. Кравченко, Н.В. Корнеев Исследование управляющего воздействия на процесс очистки деталей от загрязнений в ультразвуковом поле	66
Г.Н. Темасова, А.Г. Арженовский, В.К. Зимогорский, Я.К. Зимогорский, В.С. Бондарев Обоснование рационального количества измерений для обеспечения точности при проверке погрешности нутромеров на ремонтном предприятии	74
А.В. Лапаев, О.М. Мельников, Н.В. Серов, А.Г. Гамидов, А.В. Серов Ремонтный комплект для восстановления герметичности и повышения ресурса уплотнительных соединений валов	84

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Д.А. Тихомиров, А.В. Хименко, А.В. Кузьмичев Физическое моделирование теплового режима животноводческого помещения с комбинированной системой электротеплоаккумуляционного обогрева	93
---	----

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Т.П. Коваленок, Л.В. Занфирова, Л.И. Назарова, Е.Н. Козленкова, А.Н. Волкова, А.А. Большаков Метакогнитивная включенность в деятельность как основа формирования профессиональной компетентности будущих агроинженеров	102
П.Ф. Кубрушко, И.Ф. Кривчанский, А.С. Симан, В.В. Жилыева, М.В. Шингарева, Ю.А. Атапина Диагностика уровня готовности преподавателей аграрного профиля к профессиональной деятельности в электронной информационно-образовательной среде вуза	110

CONTENTS

FARM MACHINERY AND TECHNOLOGIES

A.S. Dorokhov, M.N. Erokhin, A.V. Sibirev, M.A. Mosyakov, D.N. Kynev Automated module for the separation of potato tubers from soil impurities: designing and testing	4
V.V. Gordeev, T.Yu. Mironova, T.I. Gordeeva, S.V. Kovalev, V.E. Khazanov Design algorithm for water-saving technical and technological solutions for a dairy cattle farm	14
V.A. Smelik, A.M. Zakharov, A.N. Perekopskiy Grain crop harvesting under probabilistic external conditions: optimization of the technological process	24
M.E. Chaplygin, K.A. Stepanov, A.S. Chulkov, A.L. Mnatsakanyan Parameters of moving grain and leguminous crop seeds in a centrifugal distributor of a breeding seeder	32
A.N. Zintsov, M.M. Kovalev, G.A. Perov, V.I. Shinkarev Investigation of the structural parameters of the stem layer during fluffing of flax ribbons: new aspects	42
Yu.V. Saenko, V.Yu. Strakhov, K.V. Kazakov Sprouted dried grain crusher: design parameters and operating modes	51
M.S. Nazarov On feasibility of a pelleted organic fertilizer dispenser for the tillage implement	59

TECHNICAL SERVICE IN AGRICULTURE

V.M. Korneev, D.I. Petrovsky, I.N. Kravchenko, N.V. Korneev Research on the possibility of controlling the cleaning process of parts in an ultrasonic field	66
G.N. Temasova, A.G. Arzhenovskiy, V.K. Zimogorskiy, Ya.K. Zimogorskiy, V.S. Bondarev Rationalizing the number of measurements to ensure accuracy in checking the error of bore gauges at a repair facility	74
A.V. Lapaev, O.M. Melnikov, N.V. Serov, A.G. Gamidov, A.V. Serov Repair kit for restoring sealing integrity and increasing the service life of shaft seal assemblies	84

POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

D.A. Tikhomirov, A.V. Khimenko, A.V. Kuzmichev Physical modeling of the thermal mode of a livestock building with a combined electric thermal storage heating system	93
--	----

THEORY AND METHODOLOGY OF PROFESSIONAL EDUCATION

T.P. Kovalenok, L.V. Zanfirova, L.I. Nazarova, E.N. Kozlenkova, A.N. Volkova, A.A. Bolshakov Metacognitive involvement in activities as a basis for the professional competence development of future agricultural engineers	102
P.F. Kubrushko, I.F. Krivchanskiy, A.S. Siman, V.V. Zhilyaeva, M.V. Shingareva, Y.A. Atapina Readiness of agricultural university teachers for professional activity in the electronic information and educational environment: An assessment study	110

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.356.46:004.8

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-4-13>

Автоматизированный модуль сепарации клубней картофеля от почвенных примесей: разработка и исследование

А.С. Дорохов¹, М.Н. Ерохин², А.В. Сибирёв^{3✉}, М.А. Мосяков⁴, Д.Н. Кынев⁵^{1,3,4,5} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ dorokhov.vim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>² er.mihn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>³ sibirev2011@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>⁴ maks.mosyakov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5151-7312>⁵ dnkynev@mail.ru

Аннотация. Качество выполнения уборочной операции определяется сохранением товарной продукции с минимальным количеством почвенно-растительных примесей. С целью повышения качества процесса уборки картофеля разработан и изготовлен автоматизированный модуль сепарации картофеля от почвенных примесей. Автоматизированный модуль сепарации позволяет получать изображения движущихся биологических объектов, распознавать и обрабатывать их, формировать изображения в образы с последующей классификацией их по уровням (картофель и комок почвы), разделять клубни картофеля и комки почвы потоком сжатого воздуха. Разработанная оптическая система идентификации биологических объектов сочетает модуль подачи и оптическую систему идентификации с системой подсвечивания. Модуль подачи продукции представляет собой конвейер с регулируемой скоростью подачи от 0,5 до 3,0 м/с. Оптическая система идентификации включает в себя техническое зрение и блок управления с системой подсвечивания биологических объектов. Система технического зрения предусматривает наличие камеры с разрешением не менее 5400 пикселей и режимами работы в диапазоне спектров RGB+RGB или NIR+RGB. Лабораторно-полевые испытания автоматизированного модуля сепарации картофеля от почвенных примесей выполнили на уборке картофеля сорта Прайм с урожайностью 236,0 ц/га при глубине хода подкапывающих рабочих органов картофелеуборочного комбайна до 20 см. Поступательная скорость движения комбайна варьировалась в диапазоне 1,0...1,8 м/с, поступательная скорость движения полотна пруткового элеватора достигала 1,55...1,67 м/с. Установили, с ростом поступательной скорости движения элеватора от 1,0 до 1,8 м/с увеличиваются повреждаемость клубней картофеля от 1,2 до 1,9% и полнота сепарации клубненосного вороха от 94,5 до 98,8%. Показатели качества уборочной операции при глубине хода рабочих органов 14,9 см не превысили требований технического задания: полнота сепарации картофеля составила 97,1%, потери клубней картофеля – 2,9%, количество клубней в составе вороха – 80,3%. Результаты исследований послужат в качестве основы для дальнейшего совершенствования автоматизированных систем уборки картофеля и разработки рекомендаций по оптимизации процессов сепарации и повышению качества продукции.

Ключевые слова: комбайн; картофель; клубни картофеля; автоматизированный модуль сепарации; оптическая система идентификации; техническое зрение; потери клубней; полнота сепарации

Для цитирования: Дорохов А.С., Ерохин М.Н., Сибирёв А.В., Мосяков М.А., Кынев Д.Н. Автоматизированный модуль сепарации клубней картофеля от почвенных примесей: разработка и исследование // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 4. С. 4-13. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-4-13>

ORIGINAL ARTICLE

Automated module for the separation of potato tubers from soil impurities: designing and testing

A.S. Dorokhov¹, M.N. Erokhin², A.V. Sibirev^{3✉}, M.A. Mosyakov⁴, D.N. Kynev⁵

^{1, 3, 4, 5} Federal Scientific Agricultural Engineering Center VIM; Moscow, Russia

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

¹ dorokhov.vim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

² er.mihn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>

³ sibirev2011@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>

⁴ maks.mosyakov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5151-7312>

⁵ dnkynev@mail.ru

Abstract. Harvest quality is primarily determined by the ability to preserve marketable produce while minimizing soil and plant impurities. To address this challenge, the authors have designed and manufactured an automated separation module for potato harvesting that distinguishes tubers from soil clods using machine vision and pneumatic ejection. The module captures real-time images of moving biological objects, processes and classifies them via an integrated optical system, and removes impurities with compressed air jets. The system comprises a feeding conveyor with adjustable speeds ranging between 0.5 and 3.0 m/s, an optical identification unit with integrated illumination, and a machine vision subsystem. The latter includes a high-resolution camera (at least 5400 pixels) capable of operating in RGB+RGB or NIR+RGB spectral modes. Laboratory and field trials were conducted during the harvest of the Prime potato variety, with a yield of 236.0 cwt/ha and digging depth of up to 20 cm. The forward speed of the harvester ranged between 1.0 and 1.8 m/s, while the rod elevator web operated at 1.55-1.67 m/s. Results showed that increasing elevator speed from 1.0 to 1.8 m/s raised tuber damage from 1.2% to 1.9%, but improved separation completeness of the tuber-bearing heap from 94.5% to 98.8%. At an optimal working depth of 14.9 cm, all quality indicators remained within technical specifications: separation completeness reached 97.1%, tuber loss was 2.9%, and the tuber content in the heap amounted to 80.3%. The findings provide a foundation for further advancements in automated potato harvesting systems and support the development of recommendations for optimizing separation processes and enhancing product quality. Future research will focus on implementing advanced image processing and filtering methods, as well as machine learning algorithms, to improve recognition accuracy, reduce tuber losses, minimize mechanical damage, and boost the overall efficiency of harvesting equipment.

Keywords: combine harvester; potatoes; potato tubers; automated separation module; optical identification system; machine vision; tuber losses; separation completeness

For citation: Dorokhov A.S., Erokhin M.N., Sibirev A.V., Mosyakov M.A., Kynev D.N. Automated module for the separation of potato tubers from soil impurities: designing and testing. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(4):4-13. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-4-13>

Введение

Для развития отрасли картофелеводства посредством интенсивных и ресурсосберегающих технологий производства необходима разработка отечественных систем машин, в том числе с технологической поддержкой машинных комплексов с цифровым оборудованием. При этом необходима интерпретация полученной техническими средствами информации для изменения исходного состояния объекта воздействия и контроля качества выполнения определенной технологической операции.

Эффективность выполнения уборочной операции определяется сохранением товарной продукции с минимальным количеством почвенно-растительных примесей при закладке на хранение. Наличие почвенных примесей в клубненосном ворохе способствует провоцированию заболеваний хранимой продукции

и увеличению себестоимости ее производства. К тому же недостаточная степень очистки систем сепарации комбайна требует дополнительного применения ручного труда при закладке товарной продукции.

Полнота и качество сбора продукции и, соответственно, экономический эффект производства зависят от технологии уборки и конструктивного исполнения технических средств для ее осуществления [1, 2]. Существующие конструкции уборочных машин с различными системами подкапывания, сепарации и схемами очистки, отличающимися повышенной материалоемкостью и массой, в процессе уборки существенно уплотняют почвенный слой [3, 4].

Современные машины для уборки корнеплодов и клубней картофеля [5-7] отличаются в основном конструктивным исполнением сепарирующих рабочих органов (рис. 1).



Рис. 1. Типичные модели комбайнов для уборки корнеплодов:

а – картофелекопатель с системой очистки;

б – комбайн Grimme SE 140 для уборки картофеля с системами очистки и выгрузки

Fig. 1. Typical configurations of three root crop harvester types:

(a) potato digger with cleaning system; (b) digging-and-shaking harvester with a separation unit

Конструкция отечественного комбайна для уборки картофеля [8, 9] отражает основные направления его совершенствования в части оптимизации показателей качества работы в основном за счет повышения материалоемкости основных функционирующих элементов: подкапывающих устройств [10, 11], систем первичной и вторичной сепарации. Однако данные технические решения не в полной мере обеспечивают снижение потери клубней и их повреждение [12-14]. Для устранения указанных недостатков необходимо разработать сепарирующий рабочий орган картофелеуборочного комбайна с элементами автоматизированного контроля и управления технологического процесса очистки товарного картофеля от различных по физико-механическому составу почвенных примесей. В связи с этим повышение качества выполнения технологического процесса уборки картофеля возможно при дальнейшей интеграции существующих методологий и решений, направленных на объединение передовых технологий, компьютерного зрения и алгоритмов искусственного интеллекта.

Цель исследований: разработать автоматизированный модуль сепарации картофелеуборочного комбайна для повышения качества очистки клубней картофеля от почвенных комков.

Материалы и методы

Разработанная лабораторная установка с автоматизированным модулем сепарации (рис. 2) позволяет идентифицировать разделяемые биологические объекты (клубни картофеля/комки почвы) в потоке поступательного движения.

Лабораторная установка представляет собой инспекционный стол 1 с бесконечной транспортной лентой 2, привод движения которой осуществляется от электродвигателя 3 с питанием от сети

переменного тока. Над рабочей поверхностью инспекционного стола 1 установлен блок оптической системы идентификации 4, состоящий из технического зрения и блока управления с системой подсвечивания разделяемых биологических объектов. Установка режима освещения на временной промежуток, а также порядок работы отсекающих 5, приводимых в действие от электроцилиндра 6, осуществляются с помощью программируемого микроконтроллера, установленного в шкафу управления 7. Отсекающие 5 обеспечивают направление разделяемых клубней картофеля/комков почвы в соответствующие лотки (на рисунке не показаны) после воздействия на них потоком сжатого воздуха из пневматической форсунки 8. Привод пневматических форсунок осуществляется от компрессора 9, который обеспечивает рабочее давление 8 бар и производительность 3650 л/мин.

Система технического зрения включает в себя камеру с разрешением не менее 5400 пикселей и режимами работы в диапазоне спектров RGB+RGB или NIR+RGB, установленную в защитном блоке над транспортером. Система освещения, используемая при разработке системы идентификации, включает в себя кварцевую вольфрамово-галогенную (QTH) лампу мощностью 150 Вт с широкополосным излучением от 400 до 2500 нм (спектральный диапазон VIS и NIR) в вариантах с вольфрамовым галогенным источником излучения HL-2000, помимо этого – лазерные диоды и модули. Вольфрамовый галогенный источник излучения HL-2000 является универсальным источником излучения, оптимизированным для видимого и ближнего ИК-диапазонов (360...2000 нм).

Картофелеуборочный комбайн с автоматизированным модулем сепарации и оптической системой идентификации (рис. 3) выполняет технологический процесс уборки при поступательном движении

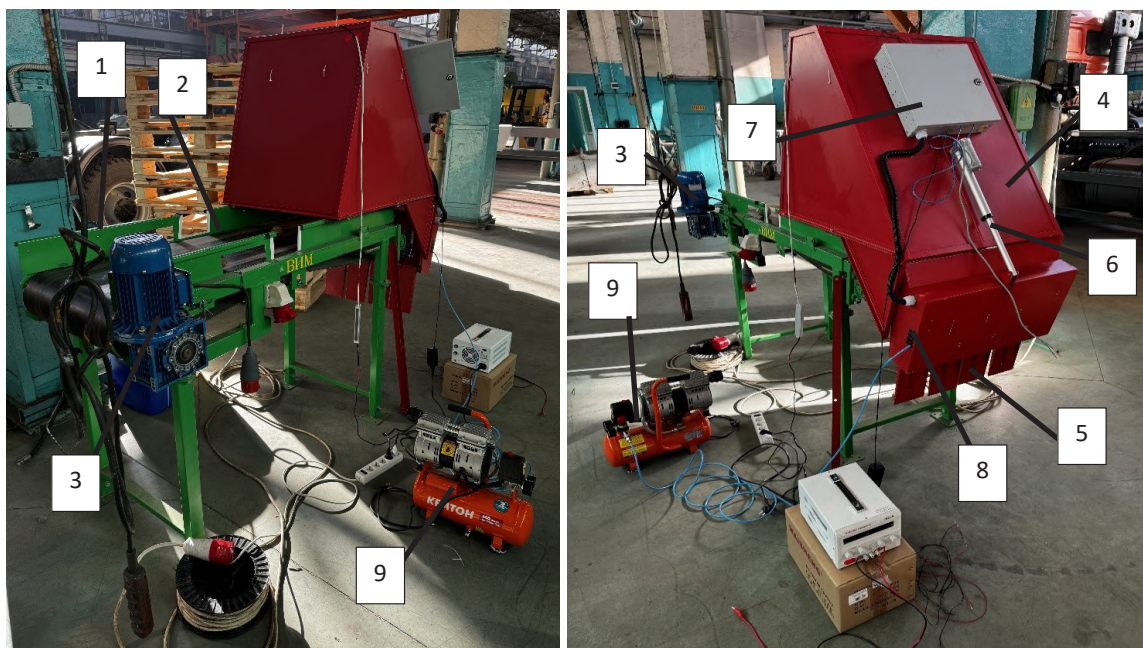


Рис. 2. Лабораторная установка по идентификации картофеля и почвенных примесей с автоматизированным модулем сепарации:

1 – стол инспекционный; 2 – лента транспортерная; 3 – электродвигатель; 4 – блок оптической системы идентификации; 5 – отсекатели; 6 – электроцилиндр; 7 – шкаф управления; 8 – пневматическая форсунка; 9 – компрессор

Fig. 2. Laboratory unit for identifying potato tubers and soil impurities with an automated separation module:

1 – inspection table; 2 – conveyor belt; 3 – electric motor; 4 – optical identification system unit; 5 – shut-off valves; 6 – electric cylinder; 7 – control cabinet; 8 – pneumatic nozzle; 9 – compressor

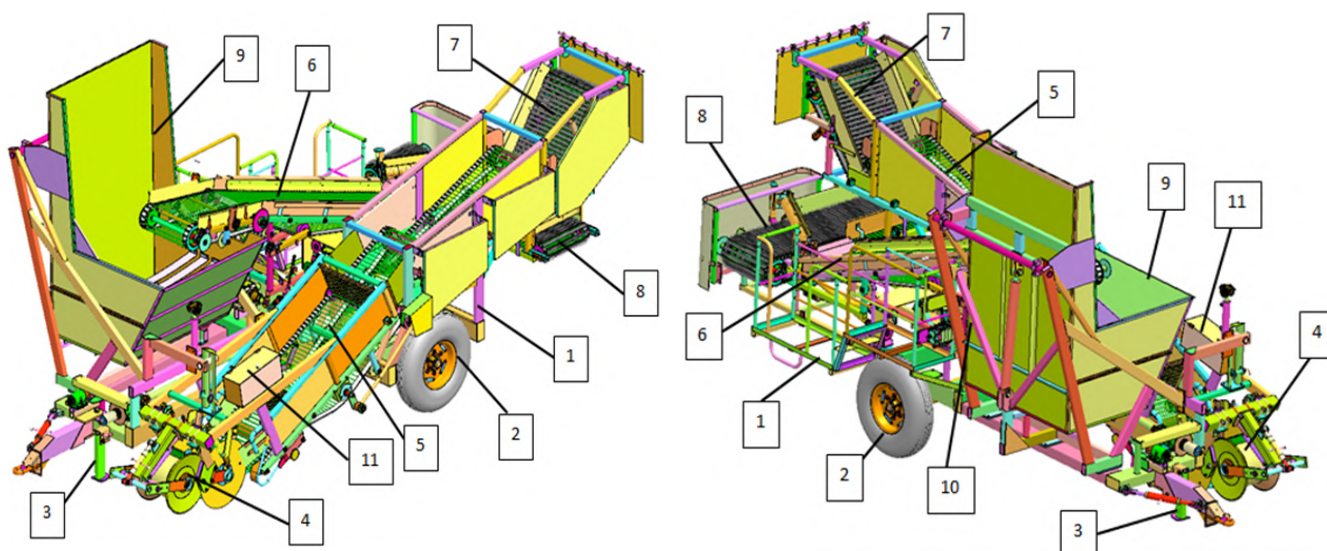


Рис. 3. 3D-модель комбайна для уборки картофеля с автоматизированным модулем сепарации картофеля от почвенных примесей:

1 – рама; 2 – колеса опорные; 3 – опора стояночная; 4 – секция подкапывающая; 5 – приемный элеватор; 6 – основной элеватор; 7 – игольчатый транспортер; 8 – транспортер поперечный; 9 – бункер приемный; 10 – система гидравлическая; 11 – модуль оптической системы идентификации

Fig. 3. 3D model of a potato harvester with an automated module for separating potatoes from soil impurities:

1 – frame; 2 – support wheels; 3 – parking support; 4 – digging section; 5 – intake elevator; 6 – main elevator; 7 – pin slide; 8 – transverse conveyor; 9 – intake hopper; 10 – hydraulic system; 11 – optical identification system module

в пределах одной борозды. Подкапывающая секция 4, установленная на рамную конструкцию 1 комбайна, извлекает клубненосное гнездо, далее направляет его

на приемный 5 и основной 6 элеваторы для последовательной очистки и идентификации проходящего вороха оптической системой 11. Управляющий

сигнал передается на автоматизированный модуль сепарации (не показан на рисунке) для отбраковки клубней картофеля от комков почвы. Вторичная система сепарации комбайна представлена игольчатым транспортером 7, который очищает клубни картофеля от мелких механических примесей. Далее товарная продукция транспортируется на поперечный транспортер 8 с последующим укладыванием клубней картофеля в приемный бункер 9, подъем в рабочее положение которого осуществляется приводом от гидравлической системы 10.

Для проверки функционирования автоматизированного модуля сепарации с идентификацией картофеля и почвенных комков проведены экспериментальные исследования в производственных условиях по установлению оптимальных параметров работы разрабатываемой сепарирующей системы картофелеуборочного комбайна.

Экспериментальные исследования автоматизированного модуля сепарации картофелеуборочного комбайна в агрегате с трактором МТЗ-82.1 проводили на полях с. Подвьязь Рязанской области при уборке сорта картофеля Прайм с урожайностью 236,0 ц/га с учетом варьирования исследуемых факторов в пределах: поступательная скорость движения машины для уборки картофеля $v_k = 1,0 \dots 1,8$ м/с; поступательная скорость движения полотна пруткового элеватора $v_{эл} = 1,55 \dots 1,67$ м/с.

Условия испытаний характеризовались как засушливые. Влажность почвы в 25-сантиметровом слое не превышала 14,4% и была значительно ниже требуемых по ТЗ (18...26%). Твердость почвы при этом составляла

1,8...4,5 МПа и превышала требования ТЗ (не более 2,5 МПа). При проведении исследований использовали приборы и оборудование, представленные в таблице.

Автоматизированный модуль сепарации (рис. 4) является частью комбайна для уборки картофеля с оптической системой идентификации биологических объектов (клубней картофеля и комков почвы) (рис. 5).

Технологический процесс очистки клубней картофеля от почвенных комков картофелеуборочным комбайном с автоматизированным модулем сепарации осуществляется следующим образом. Клубневое гнездо картофеля, извлеченное из почвы подкапывающим устройством (на рисунке не показано), по приемному транспортеру 1 поступает через систему сепарирующих поверхностей комбайна (основной элеватор, игольчатый транспортер, поперечный транспортер) (рис. 3) и направляется в бункер 6 товарной продукции, проходя последовательно через блок оптической системы идентификации 3 при фиксировании системой технического зрения клубней картофеля и комков почвы с последующей передачей управляющего сигнала через микроконтроллер на пневматические форсунки 7, осуществляющие привод отсекающих устройств 4, которые обеспечивают направление комков почвы в бункер 5, а клубней картофеля – в бункер 6. После заполнения бункера 5 почвенными комками и примесями его извлекают из рабочего пространства бункера 6 и выгружают.

Оптическая система идентификации (рис. 5) устанавливается с возможностью перемещения над поверхностью транспортерно-сортировочного адаптера.

Таблица

Приборы и оборудование при проведении лабораторно-полевых исследований комбайна для уборки картофеля с автоматизированным модулем сепарации

Table

Instruments and equipment used in laboratory and field studies of the potato harvester with an automated separation module

Характеристика, параметр	Марка оборудования или прибора, его номер, ГОСТ
Конструктивные параметры машины (габаритные размеры, дорожный просвет)	Рулетка измерительная металлическая, Р20УЗК, № 1, ГОСТ 7502-98
Скорость движения агрегата	Секундомер СОСпр-26-2, № 8387, ГОСТ 5072-79; мерный циркуль, № 2
Рельеф поля (уклон)	Нивелир оптический RGK C-20, № W1785846
Твердость почвы	Твердомер Ревякина, № 224
Влажность почвы	Весы неавтоматического действия DL-612, № 200310411; сушильный шкаф СШ-3
Урожайность Полнота выкапывания Потери, состав вороха Повреждение клубней	Весы медицинские ВМ-20, № 9552
Ширина междурядий, характеристика гнезда	Линейка, 0-750 мм, № 470

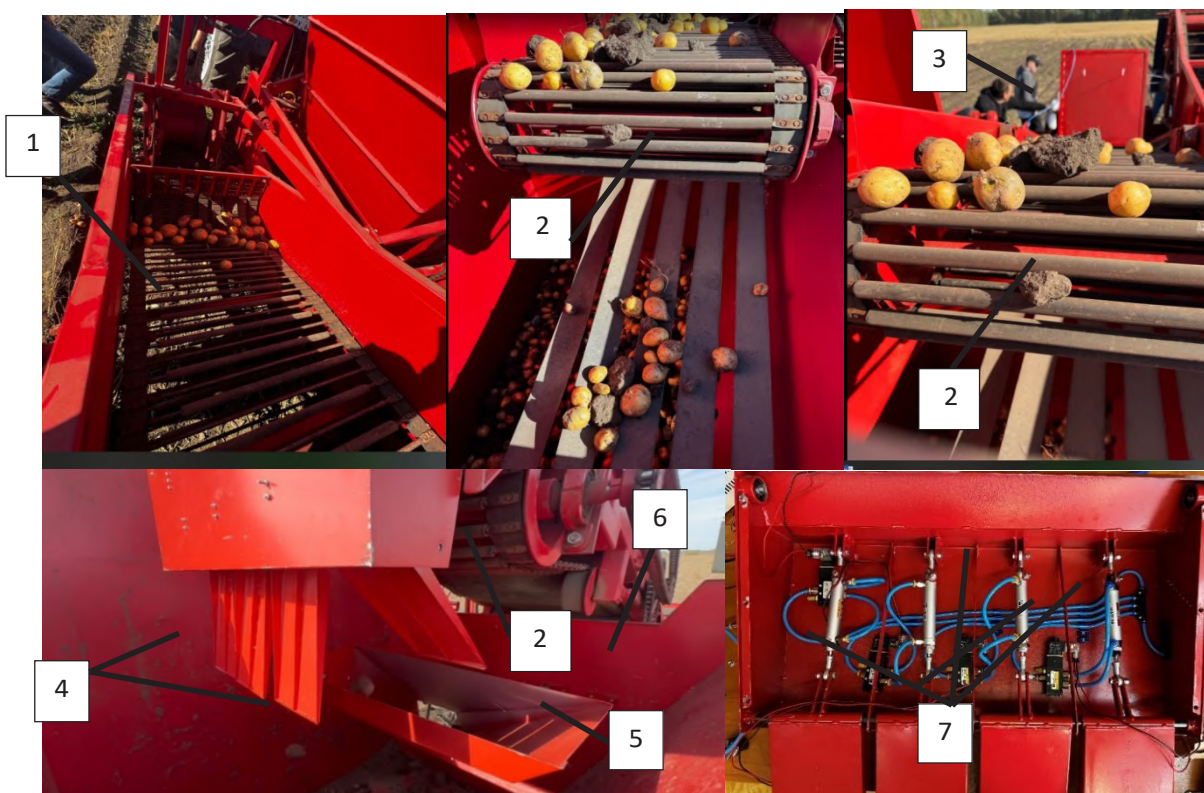
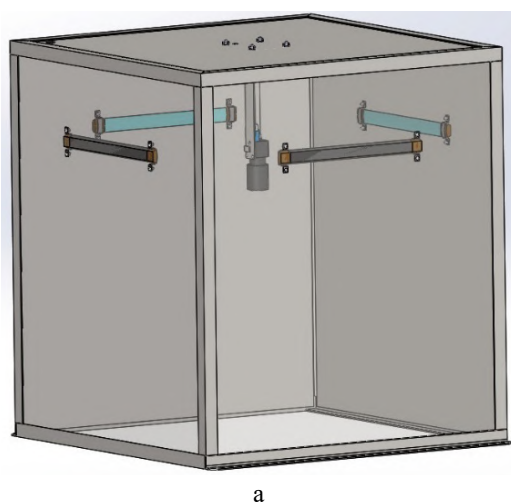


Рис. 4. Автоматизированный модуль сепарации картофеля:

1 – приемный транспортер; 2 – поперечный транспортер; 3 – блок оптической системы идентификации; 4 – отсекатели; 5 – бункер для примесей; 6 – бункер товарной продукции; 7 – форсунки пневматические

Fig. 4. Automated potato separation module:

1 – intake conveyor; 2 – transverse conveyor; 3 – optical identification system unit; 4 – separators (shut-off units); 5 – hopper for impurities; 6 – hopper for marketable products; 7 – pneumatic nozzles



а



б

Рис. 5. Защитный блок оптической системы идентификации:

а – 3D-модель защитного блока; б – общий вид защитного блока

Fig. 5. Protective unit of the optical identification system:

а – 3D model of the protective unit; б – general view of the protective unit

Результаты и их обсуждение

Оптическая система идентификации обеспечивает получение изображений движущихся биологических объектов (клубень картофеля и комок почвы), распознавание и обработку полученных

изображений (рис. 6), опорожнение транспортера с фракциями «Клубень картофеля» и «Комок почвы».

Анализ качественных показателей уборки (полнота сепарации и повреждение клубней картофеля) в зависимости от поступательной $v_{эл}$ скорости

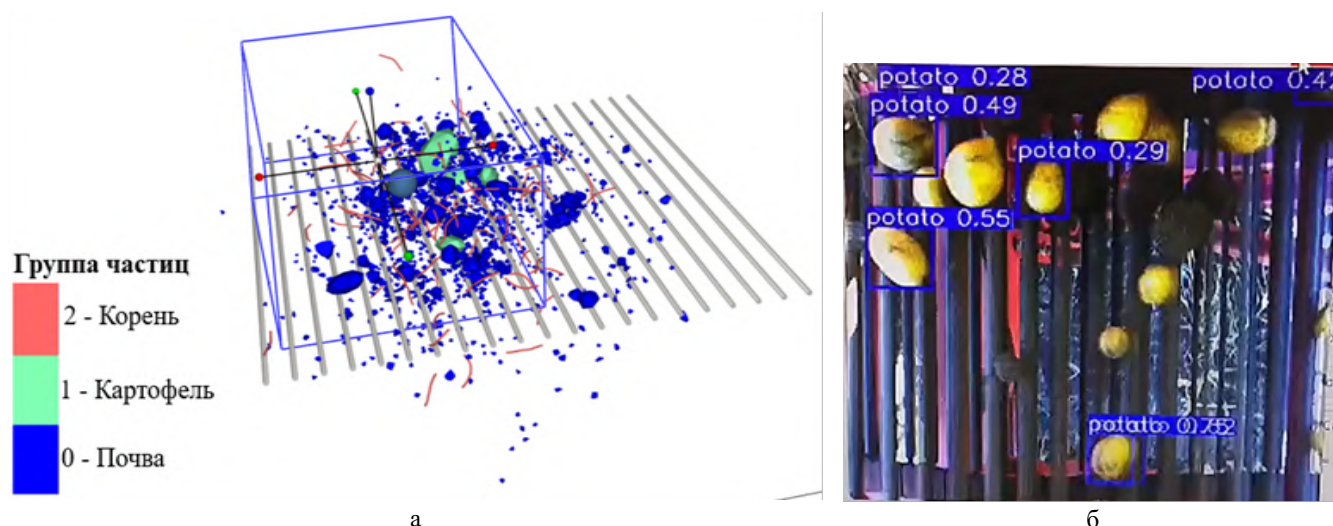


Рис. 6. Распознавание клубней картофеля:

а – моделирование процесса сепарации клубней картофеля и комков почвы; б – фрагмент изображения

Fig. 6. Potato tuber recognition:

а – simulation of tuber and soil clod separation; б – image fragment

движения пруткового элеватора показывает, что полнота сепарации и повреждение клубней возрастают с увеличением исследуемого технологического параметра (рис. 7).

Графические зависимости (рис. 7) свидетельствуют о качественном выполнении технологического процесса работы комбайна с автоматизированным модулем сепарации при исследовании поступательной скорости движения пруткового элеватора и глубине хода подкапывающих рабочих органов до 20 см.

Повышение поступательной скорости движения пруткового элеватора в интервале от 1,0 до 1,8 м/с приводит к увеличению повреждений клубней картофеля (П) от 1,2 до 1,9%, что обусловлено повышением ударных нагрузок на клубни и снижением почвенной прослойки при перемещении клубней картофеля по рабочей поверхности транспортера.

Полнота сепарации клубненосного вороха (v) в интервале исследуемых скоростей увеличивается прямо пропорционально величине повреждений клубней картофеля (П) в корреляционной прямолинейной зависимости от 94,5 до 98,8%, что выражается аналитической зависимостью:

$$\begin{cases} v = 2,8409 \ln v_{\text{эл}} + 94,18; \\ \text{П} = 2,8409 \ln v_{\text{эл}} + 1,1487. \end{cases} \quad (1)$$

Анализ системы выражений (1) свидетельствует о корреляционной зависимости между исследуемым технологическим параметром картофелеуборочного комбайна и качественными показателями уборки – полнотой сепарации и повреждением клубней.

Выводы

1. Разработанная оптическая система идентификации биологических объектов сочетает модуль подачи, оптическую систему идентификации с системой подсвечивания. Модуль подачи продукции представляет собой конвейер с регулируемой скоростью подачи от 0,5 до 3,0 м/с. Оптическая система идентификации, имеющая возможность перемещаться над поверхностью транспортерно-сортировочного адаптера, включает в себя техническое зрение и блок управления с системой подсвечивания биологических объектов. Система технического зрения, установленная в защитном блоке над транспортером, предусматривает наличие камеры с разрешением не менее 5400 пикселей и режимами работы в диапазоне спектров RGB+RGB или NIR+RGB.

2. Экспериментальные исследования автоматизированного модуля сепарации картофелеуборочного комбайна показали, что с ростом поступательной скорости движения пруткового элеватора в интервале от 1,0 до 1,8 м/с увеличиваются повреждение клубней картофеля от 1,2 до 1,9% и полнота сепарации клубненосного вороха от 94,5 до 98,8%.

3. Внедрение дополнительных методов обработки и фильтрации изображений, применение машинного обучения для улучшения точности распознавания и разделения объектов позволят снизить потери клубней, уменьшить повреждаемость и повысить общую эффективность уборочной техники.

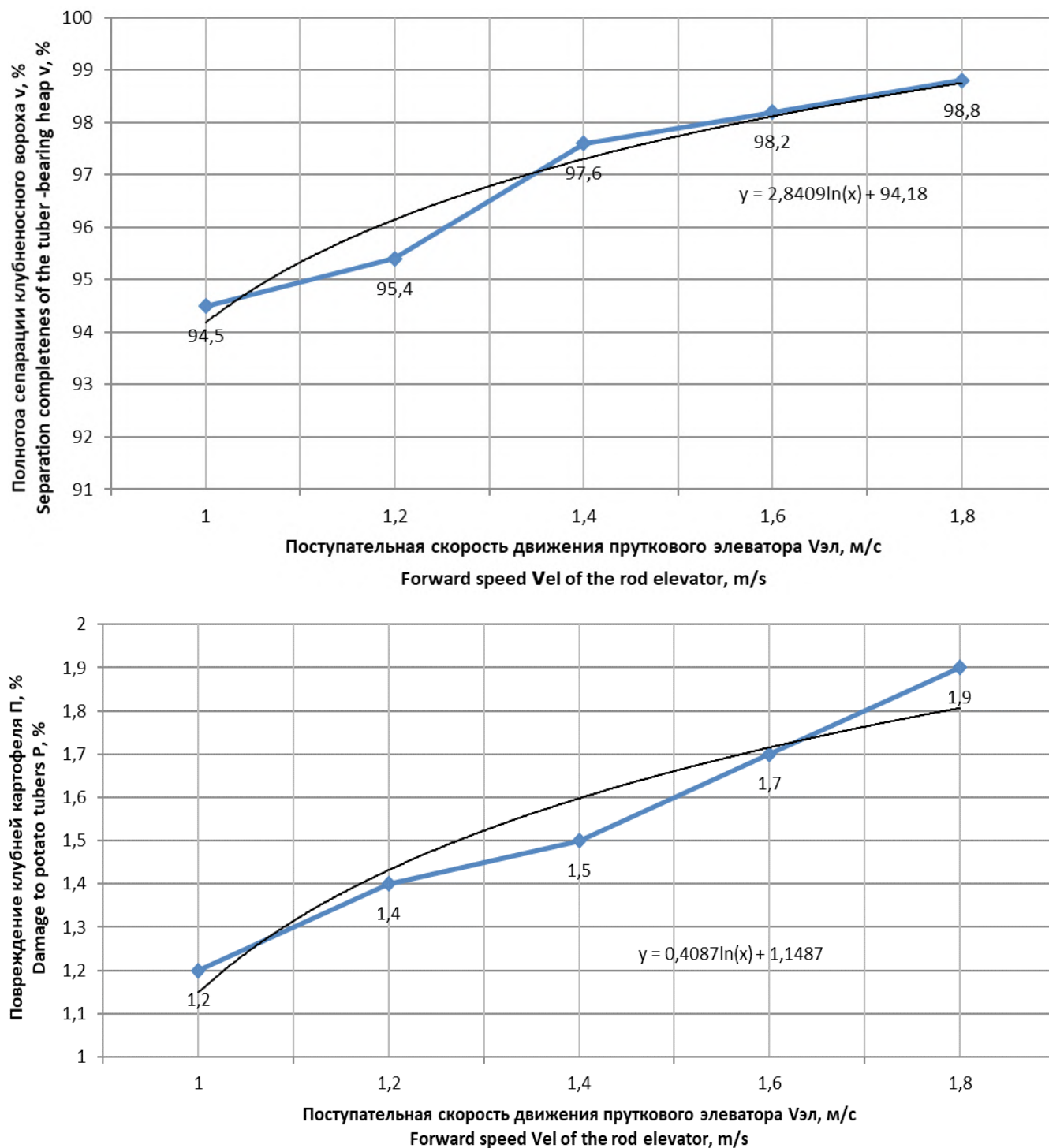


Рис. 7. Зависимость полноты сепарации v , %, и повреждений клубней картофеля P , %, от поступательной $v_{эл}$ скорости движения пруткового элеватора

Fig. 7. Relationship between the separation completeness v (%), tuber damage P (%), and the forward speed $v_{эл}$ of the rod elevator

Список источников

1. Петухов С.Н. Состояние технического и технологического обеспечения селекции и оригинального семеноводства картофеля // Агротехника и энергообеспечение. 2018. № 4. С. 76-84. EDN: YVECCT
2. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве

References

1. Petukhov S.N. The state of technical and technological support of potato breeding and original seed production. *Agrotekhnika i energoobespechenie supply*. 2018;4:76-84. (In Russ.)
2. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S. Principles of forming machine and technology systems for integrated mechanization and automation of technological processes in crop production. *Agri-*

// Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16, № 4. С. 4-12. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12>

3. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 4. С. 6-10. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>

4. Лобачевский Я.П., Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Аспекты цифровизации системы технологий и машин // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. № 3. С. 40-45. EDN: RLCDHO

5. Казаков С.С., Живаев О.В., Никулин А.В. Конструкционные пути снижения повреждаемости клубней посадочного картофеля при работе цепочно-ложечного высаживающего аппарата // Тракторы и сельхозмашины. 2019. № 3. С. 29-34. EDN: ARTNCV

6. Abd El-Rahman M.M.A. Development and performance evaluation of a simple grading machine suitable for onion sets. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*. 2011;2(2):213-226.

7. Dandekar I., Joshi A., Patil V. A review paper based on design and development of an onion harvesting machine. *Journal of Information and Computational Science*. 2020;9(12):333-337.

8. Jothi Shanmugam C., Senthilkumar G. Indigenous development of low cost harvesting machine. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017;12:4489-4490.

9. Bachche S. Deliberation on design strategies of automatic harvesting systems: A survey. *Robotics*. 2015;4(2):194-222.

10. Cao T., Wang Y., Chen J. Analysis and simulation of potato combine harvesting machine. Communications, Signal Processing, and Systems. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2022;879:556-563. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0386-1_70

11. Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С. Комбинированный агрегат для обработки почвы импульсным воздействием ударной волны // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17, № 4. С. 62-67. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-4-62-67>

12. Zhang Z.J., Jia H.L., Sun J.Y. Review of application of biomimetics for designing soil-engaging tillage implements in Northeast China. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2016;9(4):12-21. URL: <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/1437> (дата обращения: 20.04.2026)

13. Альт В.В., Исакова С.П. Планирование работ при возделывании зерновых культур: программные компоненты // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17, № 4. С. 12-18. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-4-12-18>

14. Дорохов А.С., Сибирёв А.В., Мосяков М.А. и др. Концептуальные основы создания автоматизированного комбайна для уборки картофеля с цифровой системой идентификации почвенных комков и их отделения от товарной продукции // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2023. № 5. С. 98-104. <https://doi.org/10.31857/2500-2082/2023/5/98-104>

15. Дорохов А.С., Сибирёв А.В., Аксенов А.Г., Мосяков М.А. Метод комплексной оценки качества выполнения технологических операций энергоресурсосберегающей технологии уборки корнеплодов и картофеля // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 1. С. 12-16. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-1-12-16>

16. Дорохов А.С., Сибирёв А.В., Аксенов А.Г., Мосяков М.А. Экспериментальные исследования по разработке автоматизированной системы регулирования плотности почвы посевной машины // Агроинженерия. 2021. № 2. С. 9-15. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-9-15>

17. Jia B., Sun W., Zhao Z. et al. Design and field test of a remotely controlled self-propelled potato harvester with

cultural Machinery and Technologies. 2022;16(4):4-12. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12>

3. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):6-10. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>

4. Lobachevsky Ya.P., Bylis V.M., Tsench Yu.S. Digitalization aspects of the system of technologies and machines. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2019;3:40-45. (In Russ.)

5. Kazakov S.S., Zhivaev O.V., Nikulin A.V. Structural ways to reduce the damage of planting potatoes bulbs when using a chain-spoon planting machine. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2019;3:29-34. (In Russ.)

6. Abd El-Rahman M.M.A. Development and performance evaluation of a simple grading machine suitable for onion sets. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*. 2011;2(2):213-226.

7. Dandekar I., Joshi A., Patil V. A review paper based on the design and development of an onion harvesting machine. *Journal of Information and Computational Science*. 2020;9(12):333-337.

8. Jothi Shanmugam C., Senthilkumar G. Indigenous development of low cost harvesting machine. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017;12:4489-4490.

9. Bachche S. Deliberation on design strategies of automatic harvesting systems: A survey. *Robotics*. 2015;4(2):194-222. (In Russ.)

10. Cao T., Wang Y., Chen J. Analysis and simulation of potato combine harvesting machine. Communications, Signal Processing, and Systems. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2022;879:556-563.

11. Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S. Combined unit for tillage with pulsed shock wave action. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(4):62-67. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-4-62-67>

12. Zhang Z.J., Jia H.L., Sun J.Y. Review of application of biomimetics for designing soil-engaging tillage implements in Northeast China. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2016;9(4):12-21. (In Russ.)

13. Alt V.V., Isakova S.P. Optimizing work planning for grain crop cultivation: software components. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(4):12-18. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-4-12-18>

14. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Mosyakov M.A., et al. Conceptual frameworks for creating an automated potato harvester with a digital system for identifying soil lumps and separating them from commercial potato products. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2023;5:98-104. <https://doi.org/10.31857/2500-2082/2023/5/98-104>

15. Dorokhov A.S., Sibiryov A.V., Aksekov A.G., Mosyakov M.A. Comprehensive assessment of the technological performance quality of energy-and-resource-saving technology of root and potato harvesting. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(1):12-16. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-1-12-16>

16. Dorokhov A.S., Sibiryov A.V., Aksekov A.G., Mosyakov M.A. Experimental studies on the development of an automated system for regulating the soil density used in a seeding machine. *Agricultural Engineering*, 2021;2:9-15. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-9-15>

17. Jia B., Sun W., Zhao Z. et al. Design and field test of a remotely controlled self-propelled potato harvester with manual sorting platform. *American Journal of Potato Research*. 2023;100:193-209. <https://doi.org/10.1007/s12230-023-09909-3>

manual sorting platform. *American Journal of Potato Research*. 2023;100:193-209. <https://doi.org/10.1007/s12230-023-09909-3>

18. Ценч Ю.С., Годлевская Е.В. Математическое моделирование как инструмент проектирования сельскохозяйственных машин и агрегатов (применительно к истории развития научной школы Южного Урала) // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17, № 2. С. 4-12. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-2-4-12>

19. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Медведев Г.В. Разработка экспериментального фитотрона и его применение в исследованиях по энергоэкологии светокультуры // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17, № 2. С. 40-48. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-2-40-48>

Информация об авторах

¹Дорохов Алексей Семёнович, академик РАН, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник; dorokhov.vim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>; SPIN-код: 6711-8971

²Ерохин Михаил Никитиевич, академик РАН, д-р техн. наук, профессор; m.erokhin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>; SPIN-код: 3499-4405

³Сибирёв Алексей Викторович, д-р техн. наук, главный научный сотрудник; sibirev2011@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>; SPIN-код: 1726-5356

⁴Мосяков Максим Александрович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; maks.mosyakov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5151-7312>; SPIN-код: 3196-9443

⁵Кынев Дмитрий Николаевич, младший научный сотрудник, аспирант; dnkynev@mail.ru; SPIN-код: 7681-9750

^{1, 3, 4, 5} Федеральний научний агроінженерний центр ВІМ; 109428, Російська Федерація, г. Москва, 1-й Інститутський проїзд, 5

² Російський державний аграрний університет – МСХА імені К.А. Тимирязєва; 127434, Російська Федерація, г. Москва, Тимирязєвська ул., 49

Вклад авторов

А.С. Дорохов – формулирование основной концепции исследований;

М.Н. Ерохин – разработка методологии исследований;

А.В. Сибирёв – описание результатов и формирование выводов исследований, подготовка начального варианта текста;

М.А. Мосяков – представление результатов, подготовка графических материалов;

Д.А. Кынев – программная реализация алгоритма.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 14.02.2026, после рецензирования и доработки 23.06.2026, принята к публикации 03.07.2026

18. Tsench Yu.S., Godlevskaya E.V. Mathematical modeling as a aspect for designing agricultural machines and units (development history of southern urals scientific school). *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(2):4-12. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-2-4-12>

19. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Medvedev G.V. Development of an experimental phytotron and its application in the research on the energy-ecological efficiency of indoor plant lighting. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(2):40-48. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-2-40-48>

Author Information

Aleksei S. Dorokhov¹, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor; dorokhov.vim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>; Scopus Author ID: 57218106496

Mikhail N. Erokhin², Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor; er.mih@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>; Scopus Author ID: 57209270588

Alexei V. Sibirev³, DSc (Eng), Chief Research Engineer; sibirev2011@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>; Scopus Author ID: 57204101596

Maksim A. Mosyakov⁴, CSc (Eng), Lead Research Engineer; maks.mosyakov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5151-7312>; Scopus Author ID: 57204930522

Dmitriy N. Kynev⁵, Junior Research Engineer, postgraduate student; dnkynev@mail.ru

^{1, 3, 4, 5} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russia, Moscow, 1st Institutsky Proezd Str., 5

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49

Author Contribution

A.S. Dorokhov – conceptualization;

M.N. Erokhin – methodology;

A.V. Sibirev – data curation; validation; writing – original draft;

M.A. Mosyakov – formal analysis; validation; visualization;

D.A. Kynev – software.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and are responsible for plagiarism

Received 14.02.2026; Revised 23.06.2026; Accepted 03.07.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.22

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-14-23>

Алгоритм проектирования водосберегающих технико-технологических решений на молочной ферме КРС

В.В. Гордеев^{1✉}, Т.Ю. Миронова², Т.И. Гордеева³, С.В. Ковалёв⁴, В.Е. Хазанов⁵^{1, 2, 3, 4, 5} ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ; г. Санкт-Петербург, Россия¹ cow-sznii@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-6181-396X>² mironova-tat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6959-049X>³ tatianaktn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5466-6033>⁴ Kovalyov.sv@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-1310-4283>⁵ cow-sznii@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2370-0643>

Аннотация. Водосберегающие решения, направленные на снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду, не всегда применяются при проектировании ферм КРС. Разработка технико-технологических решений (ТТР) является весьма трудозатратной. Исследования проведены с целью разработки алгоритма проектирования водосберегающих технико-технологических решений на молочной ферме КРС, облегчающего выбор эффективной технологии и оборудования. Алгоритм разработан на основе теоретического анализа водосберегающих решений, ранее разработанного алгоритма расчета расхода воды и образования стоков и результатов экспериментальных исследований водосберегающих технических средств. Разработанный алгоритм проектирования водосберегающих технико-технологических решений позволяет оценить эффект от применения устройств и технологий на фермах КРС поголовьем от 50 до 3000 дойных коров с одним доильным залом и наиболее распространенными типами оборудования. Апробация алгоритма проведена для молочной фермы беспривязного содержания на 1200 гол. дойного стада со шлейфом и среднесуточной продуктивностью 28 кг/гол. при доении на доильной установке типа «Карусель». В предлагаемом ТТР с наименьшим расходом воды предусмотрены мытье поилок и очистка образующихся стоков техническим средством мытья поилок, их дальнейшее использование при поении животных. Предусмотрено водосберегающее оборудование: скребок предварительной уборки, мойка высокого давления для уборки пола доильного зала, пенообразующая установка для обработки копыт, скруббер для очистки сосков вымени. Рассчитали, что внедрение водосберегающей технологии и оборудования приведет к снижению объема используемой воды на 7,0 тыс. м³/год (на 10%) и стоков почти на 7,0 тыс. м³/год (на 64%), к снижению количества выбросов CO₂ на 12,3 т/год. При этом капитальные затраты снизятся на 14,8 млн руб., эксплуатационные – на 645 тыс. руб./год, а приведенные – более чем на 2,1 млн руб. Применение алгоритма снизит трудозатраты при проектировании молочных ферм КРС и подборе эффективной технологии и оборудования.

Ключевые слова: алгоритм проектирования водосберегающих технико-технологических решений; водосберегающие решения; расход воды; очистка образующихся стоков; поголовье; молочная ферма

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (тема № FGUN-2025-0010).

Для цитирования: Гордеев В.В., Миронова Т.Ю., Гордеева Т.И., Ковалёв С.В., Хазанов В.Е. Алгоритм проектирования водосберегающих технико-технологических решений на молочной ферме КРС // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 4. С. 14-23. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-14-23>

ORIGINAL ARTICLE

Design algorithm for water-saving technical and technological solutions for a dairy cattle farm

V.V. Gordeev^{1✉}, T.Yu. Mironova², T.I. Gordeeva³, S.V. Kovalev⁴, V.E. Khazanov⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} IAEF – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; St. Petersburg, Russia

¹ cow-sznii@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-6181-396X>

² mironova-tat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6959-049X>

³ tatianaktn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5466-6033>

⁴ Kovalyov.sv@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-1310-4283>

⁵ cow-sznii@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2370-0643>

Abstract. Water-saving solutions aimed at reducing anthropogenic pressure on the environment are often overlooked during the design of cattle farms, while the development of appropriate technical and technological solutions (TTS) remains a highly labor-intensive process. This study aimed to develop an algorithm for designing water-saving TTS for dairy cattle farms to facilitate the selection of efficient technologies and equipment. The algorithm was constructed based on a theoretical analysis of existing water-saving approaches, a previously established calculation model for water consumption and wastewater generation, and experimental data obtained from tests of water-saving technical means. The algorithm is designed to evaluate the performance of various technologies and equipment for cattle farms with herd sizes ranging from 50 to 3,000 dairy cows, operating with a single milking parlor and employing the most common types of equipment. The proposed algorithm was validated on a loose-housing dairy farm with a herd of 1,200 heads, including replacements, and an average daily milk yield of 28 kg per cow, milked using a “Carousel”-type milking installation. The lowest-water-consumption TTS variant included washing of drinking bowls, treatment of the resulting wastewater using a special device, and subsequent reuse of the treated water for animal watering. The algorithm also incorporates the use of the following water-saving equipment: a pre-cleaning scraper, a high-pressure washer for milking parlor floor cleaning, a foam-generating unit for hoof treatment, and a scrubber for cleaning teat cups. Calculations indicate that the implementation of the proposed water-saving technology and equipment would reduce total water consumption by 7.0 thousand m³/year (10%), decrease wastewater generation by nearly 7.0 thousand m³/year (64%), and lower CO₂ emissions by 12.3 t/year. Furthermore, capital expenditures would decrease by 14 million rubles, operating costs by 645 thousand rubles/year, and overall reduced costs by more than 2.1 million rubles. The application of the developed algorithm is expected to significantly reduce labor inputs in the design of dairy cattle farms and in the selection of efficient technological solutions and equipment, thereby supporting more sustainable and economically viable farm operations.

Keywords: design algorithm for water-saving technical and technological solutions; water-saving solutions; water consumption; wastewater treatment; herd size; dairy farm

Funding. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Theme No. FGUN-2025-0010).

For citation: Gordeev V.V., Mironova T.Yu., Gordeeva T.I., Kovalev S.V., Khazanov V.E. Design algorithm for water-saving technical and technological solutions for a dairy cattle farm. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(4):14-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-14-23>

Введение

Развитие молочного производства во всем мире в связи с ростом населения и потребления молочной продукции сопровождается увеличением расхода пресной воды как стратегического ресурса [1]. Рациональное использование воды, ее повторное использование, рециркуляция и опреснение являются наиболее перспективными решениями проблемы нехватки воды [2]. Проектирование современных молочных ферм КРС в соответствии с рекомендуемыми

нормами РД-АПК¹ и требованиями специалистов хозяйств по качеству выполнения операций является одной из важнейших задач. При выборе технических и технологических решений разработчики не всегда учитывают расход воды ввиду неограниченного доступа к артезианским скважинам и упускают из виду, что значительное количество образующихся

¹ Методические рекомендации по технологическому проектированию ферм и комплексов крупного рогатого скота. РД-АПК 1.10.01.01-18. М., 2018. 166 с.

стоков необходимо хранить, перерабатывать и утилизировать.

Снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду позволяют водосберегающие решения, основанные на сокращении расхода воды или оборотном использовании сточных вод. Например, помимо оборудования с минимальным расходом воды, внедряются системы сбора и хранения дождевой воды в зарубежном градостроительстве [3] и осуществляются разработки для отдельных территорий РФ [4] с достаточным количеством осадков. Снизить объем стоков позволяет повторное использование воды после мытья групповых поилок специальным техническим средством (ТСМП) [5]. Практикуется прогнозирование расхода воды и стоков с применением моделей, разработанных с помощью обучения искусственных нейронных сетей как в России [6], так и за рубежом [7-9].

Помимо сбережения артезианской воды, запасы которой согласно статистическим данным уменьшаются², обоснованные водосберегающие решения будут способствовать снижению объема образующегося на ферме КРС навоза и его влажности и, соответственно, снижению затрат на его переработку, хранение и транспортировку [10, 11].

Выбор технических средств с минимальным использованием воды и устройств по сбору, очистке и оборотному использованию сточных вод, базирующийся на расчете объема расходуемой воды и экономического эффекта от внедрения выбранных решений, позволит снизить техногенное воздействие и обеспечить экологическую устойчивость агроэкосистем [12]. Проектирование и выбор оптимального решения являются трудоемким процессом, поэтому целесообразно разработать алгоритм проектирования водосберегающих технико-технологических решений на молочной ферме КРС.

Цель исследований: разработка алгоритма проектирования водосберегающих технико-технологических решений на молочной ферме КРС поголовьем от 50 до 3000 дойных коров с одним доильным залом и наиболее распространенными типами оборудования для снижения трудозатрат при проектировании молочных ферм КРС.

Материалы и методы

Возможные к внедрению водосберегающие решения предложены на основе анализа применяемых технологий водосбережения на животноводческих предприятиях, различных методов и способов

очистки воды, а также существующих технико-технологических решений (ТТР) [13]. В качестве основного критерия принятия решений на этапах проектирования водосберегающих технологий молочных ферм КРС служит получение конкурентоспособной продукции при минимальном использовании ресурсов и сохранении экологической безопасности ферм.

Разработку алгоритма выполняли на основании результатов теоретического анализа водосберегающих решений, ранее разработанного алгоритма расчета расхода воды и образования стоков [14] и результатов экспериментальных исследований водосберегающих технических средств.

Результаты и их обсуждение

Разработка технико-технологических решений является одним из первых этапов при проектировании ферм КРС. На первом этапе принимаются технологические решения и выбирается оборудование на основании планируемого поголовья животных, производственной мощности и т.д. Для снижения трудозатрат на разработку ТТР и его обоснования разработан алгоритм проектирования водосберегающих технико-технологических решений (рис.). Алгоритм представляет собой последовательность вычислительных и логических операций: ввод исходных данных, расчет расхода воды на технологические нужды для базового ТТР, выбор водосберегающих решений и оборудования, расчет расхода воды на технологические нужды для разрабатываемого ТТР, определение экономического и экологического эффекта, выбор и вывод данных.

В начале работы алгоритма вводим исходные данные: поголовье дойных коров на молочной ферме (гол.), размер технологических групп (X_1 , гол.), продуктивность (кг/гол. в сут.), наличие молодняка, способ содержания, тип доильной установки.

Расчет расхода воды на молочной ферме для базового ТТР осуществляем по алгоритму расчета расхода воды на фермах КРС [14], где, помимо исходных данных и нормативно-справочной информации, учитываются общепринятые методы хозяйствования (периодичность выполнения операций, структура молодняка и т.д.).

Далее производим проверку:

$$\text{Доеение в доильном зале} = \text{да.} \quad (1)$$

При выполнении условия (1) проводим оптимизацию технологического решения доильного зала с минимальной площадью полов. На площадь доильного зала влияют размер технологической группы (X_1), размер (X_2) и тип (X_5) доильной установки, количество моек пола (X_3) и время разового доения (X_4) [15].

² О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2024 году: Государственный доклад. М.: Минприроды России; ФГБУ «ВНИИ Экология», 2025. 721 с.

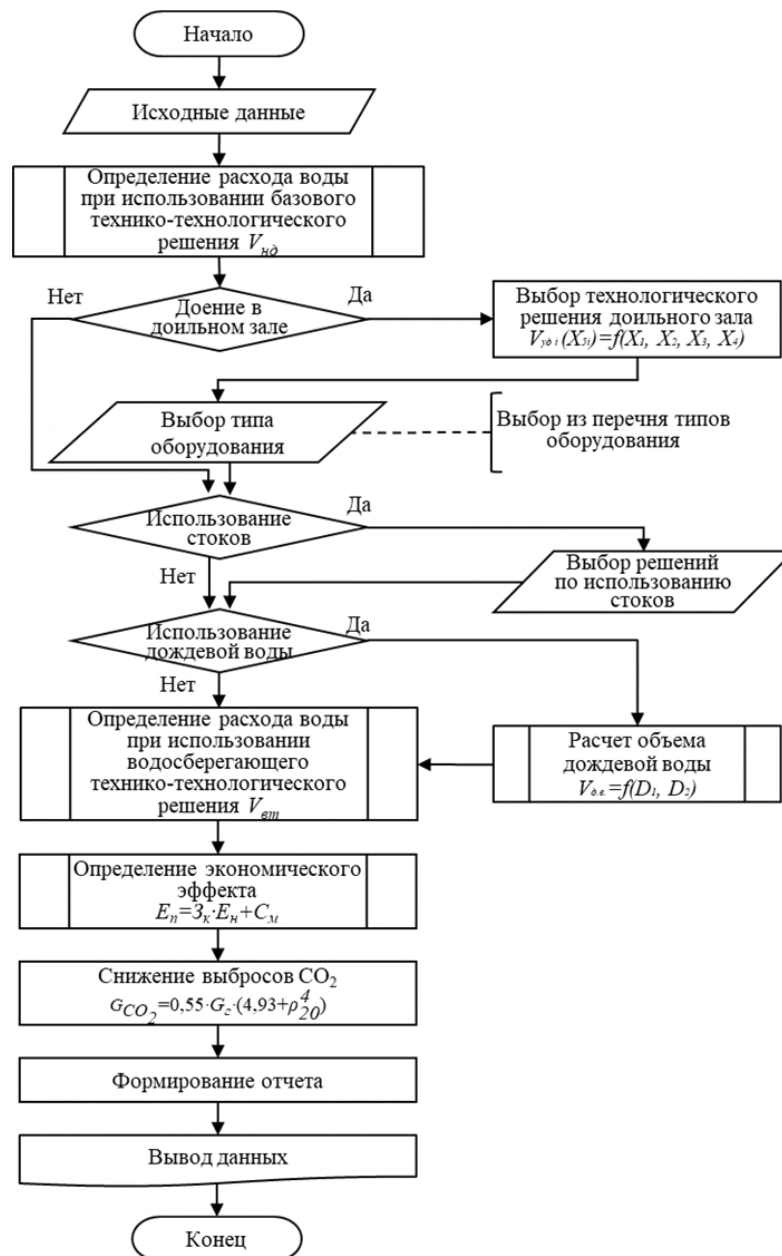


Рис. Блок-схема алгоритма проектирования водосберегающих технико-технологических решений на молочных фермах КРС:

V_{no} – объем расходуемой воды при базовом ТТР, м³/сут.; V_{yoi} – технологическое решение доильного зала;
 X_1 – размер технологической группы; X_2 – размер доильной установки; X_3 – количество моек пола;
 X_4 – время разового доения; X_5 – тип доильной установки; V_{em} – объем расходуемой воды при водосберегающем ТТР, м³/сут.;
 $V_{d.v.}$ – объем дождевой воды, собираемой с крыш, м³/сут.; D_1 – площадь крыш зданий и сооружений, м²;
 D_2 – норма выпадения осадков в разных климатических зонах, мм/год; E_n – экономический эффект, руб.;
 3_k – снижение капитальных затрат, руб.; E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;
 C_m – снижение себестоимости производства молока, руб.; G_{CO_2} – снижение выбросов CO₂, т/год;
 G_z – годовой расход моторного топлива, т/год; ρ_{20}^4 – относительная плотность моторного топлива

Fig. Block diagram of the algorithm for designing water-saving technical and technological solutions for dairy cattle farms:

V_{no} – volume of water consumed under the baseline TTS, m³/day; V_{yoi} – technological solution for the milking parlor;
 X_1 – size of the technological group; X_2 – size of the milking installation; X_3 – number of floor washings;
 X_4 – time of a single milking session; X_5 – type of milking installation; V_{em} – volume of water consumed under the water-saving TTS, m³/day; $V_{d.v.}$ – volume of rainwater collected from roofs, m³/day;
 D_1 – roof area of buildings and structures, m²; D_2 – precipitation rate in different climatic zones, mm/year;
 E_n – economic effect, rubles; 3_k – reduction in capital costs, rubles; E_n – standard efficiency coefficient of capital investments;
 C_m – reduction in milk production cost, rubles; G_{CO_2} – reduction in CO₂ emissions, t/year;
 G_z – annual consumption of motor fuel, t/year; ρ_{20}^4 – relative density of motor fuel

Затем выбираем тип водосберегающего оборудования для выполнения технологических операций по очистке сосков вымени, уборке пола доильного зала, обработке копыт (табл. 1).

При невыполнении условия (1) проводим проверку:

Использование очищенных стоков = да. (2)

При выполнении условия (2) выбираем решения по очистке сточных вод: утилизация стоков в теплице, очистка в локальных очистных сооружениях и использование на технологические нужды, очистка стоков от мытья поилок и повторное использование на технологические нужды, использование стоков первых циклов промывки доильного оборудования на поение телят.

При невыполнении условия (2) проводим проверку:

Использование дождевой воды = да. (3)

При выполнении условия (3) рассчитываем объем собираемой с крыш зданий и сооружений дождевой воды. На объем собираемой дождевой воды будут влиять площадь крыш зданий (D_1) и сооружений, норма выпадения осадков (D_2) в разных климатических зонах.

При невыполнении условия (3) определяем расход воды с учетом выбранных решений. Расчет выполняем по алгоритму расчета расхода воды на фермах КРС [14].

Определяем снижение объема используемой артезианской воды на молочной ферме за счет применения водосберегающих решений относительно базового ТТР, рассчитанного по нормативным данным:

$$\Delta_{вод} = V_{н.д.} - V_{в.т.}, \quad (4)$$

где $V_{н.д.}$ – объем расходуемой воды при базовом ТТР, м³/сут.; $V_{в.т.}$ – объем расходуемой воды для разрабатываемого ТТР, м³/сут.

Экономия денежных средств осуществляется за счет изменения капитальных затрат на строительство лагун для хранения навоза, стоимости внедряемого водосберегающего оборудования, изменения себестоимости производства молока, включающей в себя изменение амортизационных отчислений, затрат на электроэнергию, топливо, заработную плату и премии [16].

Экономический эффект в виде снижения приведенных затрат производства молока за счет применения водосберегающих решений относительно базового решения определим из выражения:

$$E_n = 3_k \cdot E_n + C_m, \quad (5)$$

где 3_k – снижение капитальных затрат, руб.; E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; C_m – снижение себестоимости производства молока, руб.

Снижение капитальных затрат на строительство лагун для хранения навоза, внедрение водосберегающего оборудования для разрабатываемого ТТР относительно базового определим из выражения:

$$3_k = 3_l - \Sigma 3_{об.i}, \quad (6)$$

где 3_l – снижение капитальных затрат на строительство лагун для хранения навоза, руб.; $\Sigma 3_{об.i}$ – стоимость i -го оборудования, используемого в разрабатываемом ТТР, руб.

Снижение капитальных затрат на строительство лагун хранения навоза для разрабатываемого ТТР относительно базового рассчитаем по формуле:

$$3_l = 365 \cdot \Delta_{вод} \cdot C_{стр}, \quad (7)$$

где 365 – коэффициент перевода дней в год; $\Delta_{вод}$ – снижение объема используемой артезианской воды на выполнение технологических операций, м³/сут.; $C_{стр}$ – стоимость строительства 1 м³ лагуны хранения навоза, руб/м³.

Таблица 1

Перечень типов оборудования для выполнения технологических операций

Table 1

List of equipment types required for performing technological operations

Операция	Оборудование	Расход воды, л/гол.	Объем образующихся стоков, л/гол.	Коэффициент влияния технологического оборудования на расход воды
Очистка сосков вымени	Ведро (норматив РД-АПК)	6	6	1
	Щетка-душ (норматив РД-АПК)	2	2	0,33
	Скруббер (технические характеристики)	0,15	0,3	0,03
	Одноразовые салфетки	0	0	0
Обработка копыт	Ванна (норматив РД-АПК)	2	2	1
	Гидродинамическая ванна (технические характеристики)	0,72	0,75	0,36
	Пенообразующая установка (технические характеристики)	0,59	0,6	0,3
...				

Снижение себестоимости производства молока для разрабатываемого ТТР относительно базового вычислим по формуле:

$$C_{cmp} = A_k + O_{TOuP} + \mathcal{E}_i + T_i + \mathcal{Z}_i, \quad (8)$$

где A_k – снижение амортизационных отчислений, руб/год; O_{TOuP} – снижение затрат на техническое обслуживание и ремонт оборудования, сооружений и т.д., руб/год; $\mathcal{E}_i$ – снижение затрат на электроэнергию, руб/год; T_i – снижение затрат на топливо, руб/год; $\mathcal{Z}_i$ – снижение затрат на заработную плату и премии, руб/год.

Снижение амортизационных отчислений (A_k , руб/год) для разрабатываемого ТТР относительно базового –

$$A_k = A_{\text{л}} - \Sigma A_{\text{об.}i}, \quad (9)$$

где $A_{\text{л}}$ – снижение амортизационных отчислений от лагун хранения навоза, руб/год; $\Sigma A_{\text{об.}i}$ – увеличение амортизационных отчислений от i -го оборудования, используемого в разрабатываемом ТТР, руб/год.

Снижение затрат на техническое обслуживание и ремонт оборудования, сооружений и т.д. для разрабатываемого ТТР относительно базового –

$$O_{TOuP} = O_{\text{л}} - \Sigma O_{\text{об.}i}, \quad (10)$$

где $O_{\text{л}}$ – снижение затрат на техническое обслуживание и ремонт лагун хранения навоза, руб/год; $\Sigma O_{\text{об.}i}$ – увеличение затрат на техническое обслуживание и ремонт от i -го оборудования, используемого в разрабатываемом ТТР, руб/год.

Снижение затрат на техническое обслуживание и ремонт можно рассчитать по формуле:

$$O_{\text{л}} = C \cdot n, \quad (11)$$

где C – стоимость оборудования, сооружений и т.д., руб.; n – норма годовых затрат на техническое обслуживание и ремонт оборудования, сооружений и т.д., %.

Снижение стоимости электроэнергии за счет уменьшения расхода воды и энергопотребления оборудования для разрабатываемого ТТР относительно базового –

$$\mathcal{E}_i = \Sigma \mathcal{E}_i \cdot u_{\text{э}}, \quad (12)$$

где $\mathcal{E}_i$ – снижение энергопотребления на ферме для i -го технологического решения, кВт·ч/сут.; $u_{\text{э}}$ – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб/(кВт·ч).

Снижение стоимости топлива за счет уменьшения объема образующихся стоков, транспортируемых с навозом на поля для разрабатываемого ТТР, относительно базового –

$$T_i = \Sigma T_i \cdot u_{\text{м}}, \quad (13)$$

где T_i – снижение расхода топлива на ферме для i -го технологического решения, л/сут.; $u_{\text{м}}$ – стоимость 1 л топлива, руб/л.

Снижение затрат на заработную плату и премии тракториста, оператора ТСМП для разрабатываемого ТТР относительно базового –

$$\mathcal{Z}_i = \Sigma (\mathcal{Z}_{\text{мр.}i \text{ нр.}} + \mathcal{Z}_{\text{мр.о.}}), \quad (14)$$

где $\mathcal{Z}_{\text{мр.}i \text{ нр.}}$ – снижение затрат на заработную плату и премии на ферме, руб/сут.; $\mathcal{Z}_{\text{мр.о.}}$ – снижение затрат на отчисления по заработной плате, руб/сут.

Величину выбросов углекислого газа от сжигания моторного топлива, расходуемого на транспортировку навоза на поля [17], в зависимости от расхода и плотности топлива можно рассчитать по формуле³:

$$G_{\text{CO}_2} = 0,55 \cdot G_{\text{г}} \cdot (4,93 + \rho_{20}^4), \quad (15)$$

где $G_{\text{г}}$ – годовой расход моторного топлива, т/год; ρ_{20}^4 – относительная плотность моторного топлива.

Годовой расход моторного топлива $G_{\text{г}}$ (т/год), используемого на транспортировку навоза на поля, –

$$G_{\text{г}} = \frac{G_{\text{ч}} \cdot \Delta_{\text{вод}} \cdot \rho_{\text{с}}}{1000 \cdot P_{\text{м}}}, \quad (16)$$

где $G_{\text{ч}}$ – часовой расход моторного топлива, кг/ч; $\rho_{\text{с}}$ – плотность стоков, поступающих в навоз, т/м³; $P_{\text{м}}$ – производительность транспортировки и внесения навоза, т/ч; 1000 – коэффициент перевода кг в т.

После вычисления показателей формируется отчет с использованием выбранных выводимых данных: разработанное технико-технологическое решение и эколого-экономический эффект разработанного ТТР.

Представленный алгоритм проектирования предназначен для разработки технико-технологических решений молочных ферм КРС поголовьем от 50 до 3000 дойных коров с одним доильным залом и наиболее распространенными типами оборудования.

Апробацию алгоритма проектирования водосберегающих технико-технологических решений проводили для молочной фермы беспривязного содержания на 1200 гол. дойного стада со шлейфом и среднесуточной продуктивностью 28 кг/гол. при доении на доильной установке типа «Карусель». В разработанном ТТР с наименьшим расходом воды предусмотрены мытье поилок и очистка образующихся стоков техническим средством мытья поилок (ТСМП) [5] для последующего использования на поение (табл. 2). Применено водосберегающее

³Голубева А.С., Магарил Е.Р. Экологическая безопасность эксплуатации автотранспорта: Учебное электронное текстовое издание. Екатеринбург: УрФУ, 2015. 26 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://docplayer.ru/33245005-Ekologicheskaya-bezopasnost-ekspluatatsii-avtotransporta.html> (дата обращения: 16.04.2025).

оборудование: скребок предварительной уборки, мойка высокого давления для уборки пола доильного зала, пенообразующая установка для обработки копыт, скруббер для очистки сосков вымени.

Применение водосберегающих решений позволяет снизить расход артезианской воды и выход стоков, тем самым снизить стоимость производства молока и антропогенную нагрузку на окружающую среду.

С помощью разработанного алгоритма проектирования проведен сравнительный анализ расхода артезианской воды и выхода стоков для базового и разработанного ТТР (табл. 3). Под базовым ТТР подразумевается использование воды без повторного ее направления в производство. Расход воды применяемыми техническими средствами указан в нормативных источниках⁴. Для разрабатываемого ТТР предусмотрены мытье поилок и очистка образующихся стоков для повторного использования. При расчете учитывали технические средства водосбережения: скребок и мойка высокого давления, пенообразующая установка, скруббер.

Использование скруббера позволило снизить расход артезианской воды для очистки сосков вымени

на 7,18 м³/сут. (99%). Применение пенообразующих установок на обработку копыт сократило расход воды на 0,60 м³/сут. (70%), а скребка и мойки высокого давления при уборке пола доильного зала – на 4,27 м³/сут. (60%). При этом на технологические нужды расход воды снизился на 40%, а общий расход воды на ферме – на 10%. Годовой объем используемой воды снизился на 7,0 тыс. м³, годовой выход стоков снизился почти на 7,0 тыс. м³, что ниже базового на 64%.

Помимо снижения расхода воды и объема образующихся стоков, уменьшится количество выбросов парникового газа CO₂ на 12,3 т/год, образующегося от сгорания топлива при транспортировке и внесении навоза на поля объемом 7,0 тыс. м³/год.

Оценка экономической эффективности разработанного ТТР выполнялась в сравнении с базовым вариантом. Заработная плата, стоимость электроэнергии и топлива рассчитывались исходя из средних показателей в сельскохозяйственной отрасли Ленинградской области на апрель 2025 г. Основные показатели экономической оценки ТТР представлены в таблице 4. Положительные значения показателей

Таблица 2

Разработанное водосберегающее ТТР молочной фермы на 1200 дойных коров со шлейфом

Table 2

Developed water-saving TTS for a dairy farm with 1,200 dairy cows including replacements

Технологический процесс					
Содержание	Кормление животных	Поение животных	Доеение коров	Охлаждение и хранение молока	Навозоудаление
Формирование технологических групп по 75 гол.	Компоненты рациона: силос, вода, комбикорм и т.д.	Подача воды до поилок насосом	Подгон коров в доильную установку автоподгонщиком со скребком	Предварительное охлаждение льдогенератором	Уборка навоза в коровниках скреперной установкой
Содержание коров и молодняка – беспривязное боксовое; телята – индивидуальная клетка	Взвешивание (дозирование) кормораздатчиком-смесителем	Подогрев воды с использованием групповых поилок с подогревом	Обработка сосков перед доением скруббером	Охлаждение и хранение в танке-охладителе	Уборка преддоильной площадки автоподгонщиком со скребком и мойкой высокого давления
	Смешивание кормораздатчиком-смесителем	Мытье поилок ТСМП	Доеение в доильной установке «Карусель»	Промывка танков-охладителей аппаратом промывки	Уборка доильного зала скребком и мойкой высокого давления
	Транспортировка и раздача кормораздатчиком-смесителем	Очистка стоков ТСМП	Обработка копыт пенообразующей установкой		Транспортировка насосом
		Использование очищенных стоков при поении	Промывка доильного оборудования аппаратом промывки		

⁴ Методические рекомендации по технологическому проектированию ферм и комплексов крупного рогатого скота. РД-АПК 1.10.01.01-18. М., 2018. 166 с.

соответствуют снижению затрат, отрицательные значения – увеличению.

Использование разработанного ТТР для фермы поголовьем 1200 дойных коров позво-

ляет снизить стоимость капитальных затрат на 14,8 млн руб., эксплуатационные затраты – на 645 тыс. руб/год, а приведенные затраты – более чем на 2,1 млн руб.

Таблица 3

Расход воды для базового и разработанного ТТР для фермы на 1200 гол. дойного стада со шлейфом

Table 3

Water consumption for the baseline and developed TTS for a farm with 1,200 heads of dairy herd including replacements

Технологические операции	Расход воды, м ³ /сут.	
	Базовый вариант	Предлагаемый вариант
Приготовление кормов для коров	7,48	7,48
Поение животных, в т.ч. очищенная вода	153,19 0	153,19 7,08
Мытье поилок	7,08	7,08
Приготовление ЗЦМ для телят	1,19	1,19
Мытье ведерок для выпойки телят	1,90	1,90
Санитарная дезинфекция клеток для телят	0,16	0,16
Очистка сосков вымени	7,20	0,02 (1%)*
Уборка пола доильного зала	7,12	2,85 (40%)*
Промывка доильного оборудования	4,50	4,50
Промывка молочных танков	1,26	1,26
Обработка копыт	0,86	0,26 (30%)*
Общий расход воды на ферме,	191,94	172,81 (90%)*
в т.ч. на технологические нужды	30,08	18,03 (60%)*

*В скобках указан расход воды относительно базового варианта, %.

Таблица 4

Эколого-экономические показатели эффективности разработанного ТТР

Table 4

Ecological and economic efficiency indicators of the developed TTS

Показатель	Значение
Снижение стоимости капитальных вложений, тыс. руб.,	14786,13
в т.ч. капитальные вложения на строительство лагун хранения навоза*	17456,13
стоимость технического средства мытья поилок	-500
стоимость скруббера	-1500
стоимость мойки высокого давления	-340
стоимость пенообразующей установки	-330
Снижение эксплуатационных затрат, тыс. руб/год,	645,39
в т.ч. амортизационные отчисления, общие	164,245
затраты на ТО и ремонт, общее	215,62
оплата труда, общее	-45,7
отчисления на заработную плату, общее	-12,69
топливо	313,98
электроэнергия, общее	0,40
Снижение приведенных затрат, тыс. руб/год	2124,00

*По данным специалистов строительной организации.

Выводы

1. Разработанный алгоритм проектирования водосберегающих технико-технологических решений для молочных ферм КРС позволяет рассчитать эффект от внедрения предлагаемого ТТР.

2. Для водосберегающего ТТР, предусматривающего мытье поилок и очистку образующихся стоков для повторного использования, применение скребка и мойки высокого давления,

пенообразующей установки и скруббера, расчет показал снижение расхода воды и объема образующихся стоков до 7 тыс. м³/год, уменьшение выбросов CO₂ на 12,3 т/год от сжигания топлива при транспортировке и внесении навоза на поля, снижение капитальных затрат на 14,8 млн руб., эксплуатационных затрат – на 645 тыс. руб/год, приведенных затрат – более чем на 2,1 млн руб.

Список источников

1. Al-Bahouh M., Osborne V., Wright T., Dixon M., VanderZaag A., Gordon R. Blue water footprints of Ontario dairy farms. *Water*. 2021;13(16):2230. <https://doi.org/10.3390/w13162230>
2. Hodúr C., Nagypál V., Fazekas Á., Mikó E. Blue and gray water footprint of some Hungarian milking parlors. *Water Practice and Technology*. 2022;17(7):1378-1389. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.073>
3. Садковская О.Е. Технологии эко-урбанизма как ответ на последствия изменения климата // Урбанистика. 2018. № 2. С. 98-122. EDN: OSRDRF
4. Крашенинников А.В., Садковская О.Е. Градостроительная реконструкция малых и средних городов с учетом изменения климата // Sciences of Europe. 2017. № 18-2. С. 3-12. EDN: ZHMUSH
5. Гордеев В.В., Ковалев С.В., Хазанов В.Е., Гордеева Т.И. Разработка технического средства для мытья групповых поилок КРС // Техника и технологии в животноводстве. 2025. Т. 15, № 4. С. 102-110. EDN: GLERIV
6. Рогачев Д.А. Цифровизация системного водораспределения: оптимизация, автоматизация, искусственный интеллект // Мелиорация и водное хозяйство. 2025. № 2. С. 34-38. EDN: KNJOGJ
7. Osaki M.R., Palhates J.C.P. and Aguiar F.G. *Bioscience Journal*. 2024;40:e40009. <https://doi.org/10.14393/BJ-v40n0a2024-68845>
8. Shine P., Murphy M.D., Upton J., Scully T. Machine-learning algorithms for predicting on-farm direct water and electricity consumption on pasture based dairy farms. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018;150:74-87. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.023>
9. Valle F., Anklam K., Döpfer D. Artificial intelligence – assisted monitoring of water usage for cooling cows on a dairy farm. *Animals*. 2025;15(23):3470. <https://doi.org/10.3390/ani15233470>
10. Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Папушин Э.А. Энергетический анализ технологии сушки навоза и помета // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 4. С. 101-112. EDN: SPZBEL
11. Слиган М.Е., Гордеев В.В. Сравнительная оценка систем навозоудаления на фермах КРС в условиях Северо-Запада России // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 3. С. 168-183. EDN: AUFQUE
12. Брюханов А.Ю., Попов В.Д., Васильев Э.В., Папушин Э.А. Концепция управления экологической безопасностью агроэкосистем // АгроЭкоИнженерия. 2022. № 4. С. 4-18. EDN: CMQXUA
13. Миронова Т.Ю., Ковалев С.В., Хазанов В.Е., Гордеева Т.И. Пути сокращения расхода воды при производстве молока на фермах КРС // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 1. С. 135-149. EDN: XYSJKY
14. Гордеев В.В., Гордеева Т.И., Миронова Т.Ю., Ковалев С.В. Алгоритм расчета расхода воды на молочной ферме КРС с привязным и беспривязным

References

1. Al-Bahouh M., Osborne V., Wright T., Dixon M., VanderZaag A., Gordon R. Blue water footprints of Ontario dairy farms. *Water*. 2021;13(16):2230. <https://doi.org/10.3390/w13162230>
2. Hodúr C., Nagypál V., Fazekas Á., Mikó E. Blue and gray water footprint of some Hungarian milking parlors. *Water Practice and Technology*. 2022;17(7):1378-1389. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.073>
3. Sadkovskaya O.E. Eco-urbanism technologies as a response to the effects of climate change. *Urban Studies*. 2018;2:98-122. (In Russ.) <https://doi.org/10.7256/2310-8673.2018.2.25641>
4. Krashenninikov A.V. Sadkovskaya, O.E. Reconstruction of the small cities of the Rostov region with consideration for climate change. *Sciences of Europe*. 2017;18-2:3-12. (In Russ.)
5. Gordeev V.V., Kovalev S.V., Khazanov V.E., Gordeeva T.I. Development of a technical means for cattle group drinkers' washing. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2025;15(4):102-110. (In Russ.)
6. Rogachev D.A. Digitalization of system water distribution: optimization, automation, artificial intelligence. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo*. 2025;2:34-38. (In Russ.)
7. Osaki M.R., Palhates J.C.P. and Aguiar F.G. *Bioscience Journal*. 2024;40:e40009. <https://doi.org/10.14393/BJ-v40n0a2024-68845>
8. Shine P., Murphy M.D., Upton J., Scully T. Machine-learning algorithms for predicting on-farm direct water and electricity consumption on pasture based dairy farms. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018;150:74-87. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.023>
9. Valle F., Anklam K., Döpfer D. Artificial intelligence – assisted monitoring of water usage for cooling cows on a dairy farm. *Animals*. 2025;15(23):3470. <https://doi.org/10.3390/ani15233470>
10. Briukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Papushin E.A. Energy analysis of drying technology of animal and poultry manure. *AgroEcoEngineering*. 2024;4:101-112. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-4121-101-112>
11. Sligan M.E., Gordeev V.V. Comparative evaluation of manure removal systems on cattle farms in the conditions of the North-west of Russia. *AgroEcoEngineering*. 2024;3:168-183. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-3120-168-183>
12. Briukhanov A.Yu., Popov V.D., Vasilev E.V., Papushin E.A. Management concept of ecological safety of agro-eco-systems. *AgroEkoInzheneriya*. 2022;4:4-18. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-4113-4-18>
13. Mironova T.Yu., Kovalev S.V., Khazanov V.E., Gordeeva T.I. Ways to reduce water consumption in milk production on cattle farms. *AgroEkoInzheneriya*. 2024;1:135-149. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-135-148>
14. Gordeev V.V., Gordeeva T.I., Mironova T.Y., Kovalev S.V. Algorithm of calculation of water consumption on dairy cattle farm with tied and loose housing at milking in milking parlors.

содержанием при доении в доильных залах // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024. Т. 25, № 6. С. 1179-1190. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.6.1179-1190>

15. Миронова Т.Ю., Гордеев В.В., Валге А.М. Способ минимизации выхода навозосодержащих стоков из доильного зала // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2019. № 56. С. 178-184. <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-13178>

16. Юхин Г.П., Мартынов В.М., Шахов В.А. и др. Производство молока на роботизированной молочной ферме // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2022. № 5. С. 150-153. EDN: XDYMID

17. Васильев Э.В. Обоснование рационального радиуса транспортировки органических удобрений // Молочнохозяйственный вестник. 2014. № 1. С. 49-55. EDN: SAYOYT

Информация об авторах

¹Гордеев Владислав Владимирович, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник; cow-sznii@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0001-6181-396X>; SPIN-код: 7547-0935

²Миронова Татьяна Юрьевна, канд. техн. наук, научный сотрудник; mironova-tat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6959-049X>; SPIN-код: 2491-9113

³Гордеева Татьяна Ивановна, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник; tatanaktn@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-5466-6033>; SPIN-код: 7137-5586

⁴Ковалёв Сергей Владимирович, младший научный сотрудник; Kovalyov.sv@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-1310-4283>; SPIN-код: 2654-9599

⁵Хазанов Виктор Евгеньевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; cow-sznii@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2370-0643>; SPIN-код: 8658-0774

^{1, 2, 3, 4, 5} ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ; 196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филтровское ш., 3

Вклад авторов

В.В. Гордеев – методология, руководство исследованиями; Т.Ю. Миронова – обзор источников литературы; Т.И. Гордеева – формирование структуры статьи, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование; С.В. Ковалёв – администрирование данных, визуализация, описание результатов и формирование выводов исследований, создание черновика рукописи; В.Е. Хазанов – концептуализация, постановка задачи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 27.02.2026, после рецензирования и доработки 06.07.2026, принята к публикации 08.07.2026

Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(6):1179-1190. (In Russ.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.6.1179-1190>

15. Mironova T.Yu., Gordeev V.V., Valge A.M. Method for minimizing the exit of manure containing sewage from the milking parlor. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2019;56:178-184. (In Russ.) <http://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-13178>

16. Yukhin G.P., Martynov V.M., Shakhov V.A. et al. Milk production on a robotic dairy farm. *Izvestia Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022;5:150-153. (In Russ.) <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-97-5-150-153>

17. Vasilev E.V. Basis of the rational radius of the manure transportation. *Molochnokhozyaystvenny vestnik*. 2014;1:49-55. (In Russ.)

Author Information

Vladislav V. Gordeev¹, CSc (Eng), Associate Professor, Lead Research Engineer; cow-sznii@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0001-6181-396X>; Scopus Author ID: 57197386387

Tatiana Yu. Mironova², CSc (Eng), Research Engineer; mironova-tat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6959-049X>

Tatiana I. Gordeeva³, CSc (Eng), Associate Professor, Senior Research Engineer; tatanaktn@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-5466-6033>

Sergey V. Kovalev⁴, Junior Research Engineer; Kovalyov.sv@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-1310-4283>

Viktor E. Khazanov⁵, CSc (Eng), Lead Research Engineer; cow-sznii@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2370-0643>
^{1, 2, 3, 4, 5} IAEF – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 196634, Russian Federation, St. Petersburg, Tyarlevo, Filtrovskoe Ave., 3

Author Contributions

V.V. Gordeev – methodology, research supervision; T.Yu. Mironova – literature review; T.I. Gordeeva – writing – original draft, review and editing of the manuscript; S.V. Kovalyov – data curation; visualization; formal analysis; validation; writing – original draft; V.E. Khazanov – conceptualization.

Conflict of interests

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

Received 27.02.2026; Revised 06.07.2026; Accepted 08.07.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.171:519.863

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-24-31>**Уборка зерновых культур при вероятностном характере внешних условий:
оптимизация технологического процесса****В.А. Смелик^{1✉}, А.М. Захаров², А.Н. Перекопский³**¹ Санкт-Петербургский государственный аграрный университет; г. Санкт-Петербург, Россия^{2,3} Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал Федерального научного агроинженерного центра ВИМ; г. Санкт-Петербург, Россия¹ smelik_va@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-5004-9457>² bauermw@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3501-0543>³ aperekopskii@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0998-2306>

Аннотация. Выбор эффективных технологий уборки и ресурсосберегающих способов подготовки фуражного зерна к скармливанию является важной задачей развития кормовой базы животноводства в регионах повышенного увлажнения. Технологическую и техническую политику уборки зерновых культур в условиях вероятностного характера прогноза изменяющихся погодных условий помогает построить математическое и компьютерное моделирование – в частности, Марковские цепи. Исследования проведены с целью разработки математической модели управления технологическим процессом уборки зерновых культур на основе использования Марковских цепей. В качестве резерва расширения уборочного периода фуражных посевов зерновых культур предложили применить технологии заготовки зерносенажа, уборки колосьев безобмолотным способом, плющения и консервирования зерна, осуществляемых в фазах молочной и восковой спелости. Разработаны оптимизационная математическая модель и программа определения рациональных площадей уборки зерновых культур, которые учитывают вероятность погодных условий и состояние спелости зерновых. Апробация модели и программы проведена для условий Северо-Западного региона Российской Федерации при заданной вероятности неблагоприятных погодных условий 0,6 и доле получаемого семенного зерна в объеме 10%. Частным решением модели предусмотрена заготовка зерносенажа на 56,8% площадей зерновых культур. Очесом колосьев безобмолотным способом планируется убрать 19,7%, на плющение и консервирование зерна придется 7,1%, на производство фуража сушкой остается 4,0% площадей. Разработанная модель показывает, сколько площадей зерновых культур можно довести до полной спелости с приемлемым риском потерь. Предлагаемая модель применима к группе полей, отдельным полям или их частям (с учетом микрорельефа), что актуально для точного земледелия. Предложенный подход оптимизации структуры урожая зерновых культур поможет осознанно управлять долей семенного и фуражного зерна с различными технологиями заготовки.

Ключевые слова: уборка зерновых культур; зерносенаж; очес; плющенное зерно; семена; фураж; Марковские цепи; математическая модель; оптимизация технологического процесса; состояние спелости зерновых

Для цитирования: Смелик В.А., Захаров А.М., Перекопский А.Н. Уборка зерновых культур при вероятностном характере внешних условий: оптимизация технологического процесса // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 4. С. 24-31. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-24-31>

ORIGINAL ARTICLE

Grain crop harvesting under probabilistic external conditions: optimization of the technological process

V.A. Smelik¹✉, A.M. Zakharov², A.N. Perekopskiy³

¹ St. Petersburg State Agrarian University; St. Petersburg, Russia

² Institute for Agroengineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; St. Petersburg, Russia

¹ smelik_va@mail.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-5004-9457>

² bauermw@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3501-0543>

³ aperekopskii@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0998-2306>

Abstract. The selection of effective harvesting technologies and resource-saving methods for preparing feed grain is a critical task for the development of the forage base in regions with high rainfall. Mathematical and computer modeling, particularly using Markov chains, can inform the technological and technical strategy for grain harvesting under probabilistically changing weather conditions. The study aimed to develop a mathematical model for managing the grain crop harvesting process based on Markov chain theory. To extend the harvesting window for forage grain crops, the following technologies were proposed: grain silage production, stripping of ears without threshing, and grain crimping with preservation, all of which are implemented during the milk and wax ripeness stages. An optimization mathematical model and a corresponding software package were developed to determine rational harvesting areas, accounting for the probability of weather conditions and the ripeness stage of the crops. The model and software were tested under the conditions of the Northwestern region of the Russian Federation, assuming a probability of unfavorable weather of 0.6 and a target seed grain share of 10%. A partial solution of the model allocated 56.8% of the grain crop area to grain silage production, 19.7% to ear stripping without threshing, 7.1% to grain crimping and preservation, and 4.0% to feed production by drying. The developed model estimates the area of grain crops that can attain full ripeness with an acceptable risk of losses. The model is applicable to groups of fields, individual fields, or their parts (accounting for their microrelief), making it relevant for precision agriculture. The proposed approach to optimizing the structure of grain crop harvest will enable informed management of the seed-to-feed grain ratio using various harvesting technologies.

Keywords: grain crop harvesting; grain silage; stripping; crimped grain; seeds; feed; Markov chains; mathematical model; technological process optimization; grain ripeness stage

For citation: Smelik V.A., Zakharov A.M., Perekopskiy A.N. Grain crop harvesting under probabilistic external conditions: optimization of the technological process. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(4):24-31. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-24-31>

Введение

Специфика зернового производства в сельскохозяйственных организациях Северо-Западного региона Российской Федерации, как в регионе повышенной увлажненности, заключается в его преимущественной ориентации на фураж (до 85...90%). Посевные площади зерновых культур заняты главным образом фуражными культурами – такими, как ячмень, тритикале и овес. В этой связи проблема выбора эффективных технологий уборки [1, 2] и ресурсосберегающих способов подготовки фуражного зерна к скармливанию является приоритетным направлением развития кормовой базы [3, 4].

Сроки уборки урожая зависят от биологической фазы созревания растений, динамики агроклиматических показателей, конструктивных особенностей и технологических настроек зерноуборочных комбайнов [5, 6]. Период массовой уборки (август-сентябрь)

сопряжен с действием лимитирующих факторов: высоким фоном увлажнения (сумма осадков – 150...170 мм), повышенной влажностью воздуха (70...85%) и пониженными температурами (+10 ... +15°C). На ранние сроки уборки зерновых культур приходится 15% уборочных сезонов, до 50% занимают сезоны со средними сроками уборки и до 30% – сезоны с поздними сроками уборки [7].

Для повышения эффективности использования технических средств и сохранения питательной ценности зерна уборку целесообразно начинать на ранних фазах развития, ориентируясь на фактическую степень созревания зерновых [8, 9]. Существенным резервом для пролонгации уборочного периода зерновых культур и максимизации объема урожая является внедрение технологий заготовки зерноуборочных культур и максимизации объема урожая является внедрение технологий заготовки зерноуборочных культур, уборки колосьев безобмолотным способом, плющения и консервации зерна [10-12].

Для формирования технологической и технической стратегии в условиях вероятностного характера изменяющихся погодных условий целесообразно применять математическое и компьютерное моделирование. При разработке модели уборки необходимо принять во внимание три ключевых аспекта: биологический, связанный с фазами спелости зерна (молочная, восковая, полная); технологический, подразумевающий наличие четырех технологий заготовки (на зерносеяж, безобмолотная уборка колосьев очесом, на плющение зерна, на сушку фуража и семян); метеорологический, учитывающий осадки и температуру воздуха, которые определяют количество «рабочих (благоприятных) дней».

Для моделирования процесса созревания и принятия решений об уборке целесообразно применить Марковскую цепь [13, 14] поскольку переход зерновой культуры из одной стадии (фазы спелости) в другую носит вероятностный характер и зависит от случайных факторов (погода, температура, влажность). Это модель случайного явления, в которой вероятность перехода в следующее состояние зависит только от текущего состояния, а не от предыдущих. Моделирование с помощью Марковских цепей^{1,2} имеет следующие преимущества: простота реализации и расчетов благодаря аналитическим формулам для вероятностей и ожидаемых значений; возможность учитывать различные сценарии и параметры процессов; встроенная возможность использования методов решения задач теории вероятностей – таких, как расчет стационарных распределений и цепей с поглощающими состояниями. Применение Марковских цепей в инженерии сводится к моделированию, анализу и оптимизации систем, эволюционирующих во времени случайным образом, где «будущее зависит только от настоящего». Марковские цепи являются инструментом для инженеров-исследователей, работающих с ненадежными компонентами, случайным трафиком, сложными процессами или необходимостью принятия решений в условиях неопределенности [15].

Марковские цепи могут применяться при моделировании уборочных процессов урожая с учетом неоднородности созревания участков, при оценке вероятности успешной уборки за определенный период, разработке оптимальных стратегий последовательных действий для достижения заданного уровня чистоты бункерного вороха.

Цель исследований: разработать математическую модель управления технологическим процессом уборки зерновых культур на основе использования Марковских цепей.

Материалы и методы

При формализации модели основной задачей уборки зерновых культур становится формирование семенного фонда, то есть площади, которая должна быть обязательно убрана в фазе полной спелости. Целью проектируемой модели являлось определение оптимального распределения площадей и очередности уборки для максимальной сохранности урожая (валового сбора фуражного зерна) при условии, что количество «рабочих (благоприятных) дней» в каждом временном интервале является случайной величиной с известным распределением.

При моделировании уборки зерновых культур принимаются следующие приоритеты:

- уборка семенных участков в узкое «окно» полной спелости. Если время упущено по из-за дождей, происходит потеря семенного фонда (или резкое падение всхожести и классности);

- уборка фуражных культур в фазе восковой спелости – плющение и консервирование как менее затратная технология по сравнению с сушкой фуражного зерна;

- уборка на зерносеяж на самых ранних этапах как объемных кормов для молочного стада или, наоборот, если кормоуборочная техника простаивает.

Модель может многократно «прогоняться» (по методу Монте-Карло). Результатом моделирования является распределение вероятностей: процент фуражного зерна, убранного вовремя; вероятность или риск потери семенного фонда; эффективность использования каждой из технологий при различной вероятности благоприятных погодных условий; и т.д.

Для оптимизации уборки зерновых культур применили Марковские цепи. При формализации модели определили состояние (фазу спелости) зерновой культуры на конкретном поле или на группе полей [16, 17] по шкале от 0 до 5 (рис. 1):

0 – молочная спелость – состояние, когда культуру целесообразно убирать на зерносеяж;

1 – поздняя молочная спелость – состояние, когда культуру можно убирать на зерносеяж и очес колосьев;

2 – молочно-восковая спелость – состояние, когда можно убирать на зерносеяж, очес колосьев и плющенное фуражное зерно;

3 – восковая спелость – состояние, подходящее для уборки на очес колосьев, плющенное зерно и фуражное зерно для сушки;

¹ Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. М., 2000. 294 с.

² Ногин В.Д., Протодяконов И.О., Евлампиев И.И. Основы теории оптимизации. М.: Высшая школа, 1986. 384 с.

4 – полная восковая спелость – состояние, когда возможна уборка на фуражное зерно для сушки;

5 – полная спелость – состояние, приемлемое для уборки на семена и продовольственное зерно (если таковые посевы имеют место).

Уборка урожая является поглощающим состоянием. После принятия решения об уборке культуры в определенной фазе (0...5) процесс для этого участка (периода) заканчивается. В схеме модели (рис. 1) присутствуют шесть поглощающих состояний: 6 – заготовка зерносе-нажа; 7 – заготовка очесанных колосьев ранней спелости; 8 – уборка зерна на плющение и консервирование; 9 – уборка фуражного зерна с сушкой и дроблением; 10 – уборка и послеуборочная доработка семенного материала; 11 – потери неубранного урожая.

Вероятности перехода состояний: P1 – вероятность перехода посевов в следующую фазу; P2...P12 – вероятность уборки по определенной технологии в определенную фазу спелости. Например, вероятность убранной площади на зерносе-наж составит: $P2 = 1 - P1$. Расчет других вероятностей перехода части урожая в следующее состояние представлен в таблице.

С вероятностью P1 общая площадь посева S0 перейдет в стадию S1, то есть

$$S1 = S0 \cdot P1. \quad (1)$$

С вероятностью P4 часть площади посева S1 будет убрана очесом колосьев, с вероятностью P3 часть площади посева S1 будет убрана на зерносе-наж. Разница между общей площадью посева S0 и площадью S1, с вероятностью P1, перейдет в S2 – состояние

молочно-восковой спелости. В состоянии молочно-восковой спелости часть площади S2 с вероятностью P5 может быть убрана на зерносе-наж, с вероятностью P6 – очесом колосьев, с вероятностью P7 – на плющенное консервированное зерно.

В полную восковую спелость перейдет площадь S3:

$$S3 = S1 - S2. \quad (2)$$

Площадь, которая не будет убрана по причине неблагоприятных погодных условий, будет равна S6.

В соответствии с данными рисунка 1 зерносе-наж можно убирать в состоянии посева S0, S1 и S2. Наибольшее количество се-нажа $X_1^{\max}$ достигается из условия:

$$\max \leq S0 \cdot P0 + S1 \cdot P3 + S2 \cdot P4. \quad (3)$$

Таблица

Вероятность перехода части урожая
в следующее состояние по погодным условиям

Table

Probability of partial crop transition
to the next state due to weather conditions

Номер узла состояния урожая	Запись вероятности перехода
0	$P1 + P2 = 1$
1	$P1 + P3 + P5 = 1$
2	$P1 + P4 + P6 + P8 = 1$
3	$P1 + P7 + P9 + P10 = 1$
4	$P1 + P11 = 1$
5	$P1 + P12 = 1$

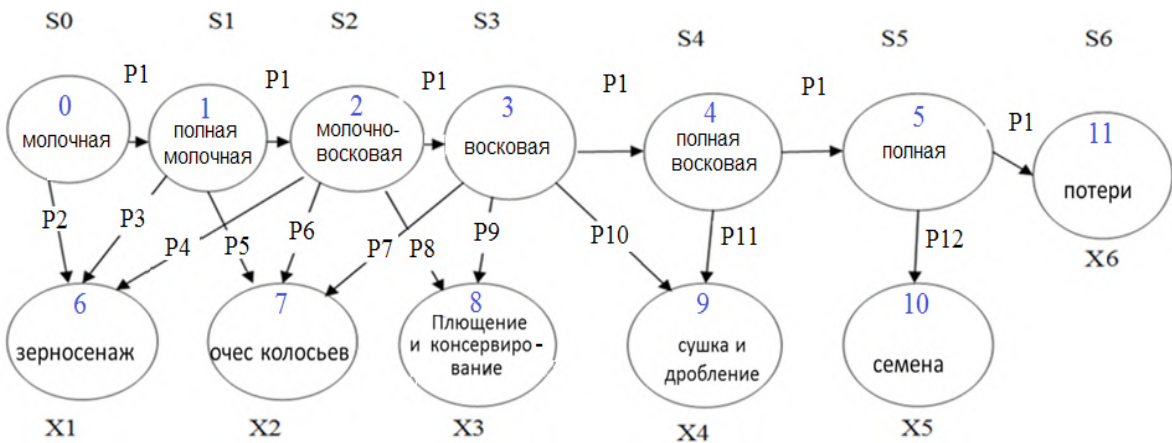


Рис. 1. Схема вероятностной модели уборки зерновых культур:

0...5 – состояние спелости зерновых; 6...10 – технология уборки зерновых; 11 – потери;

P1 – вероятность благоприятных погодных условий; P2...P12 – вероятность уборки зерновых по определенной технологии в определенную фазу спелости; S0...S6 – общая площадь уборки и площади, переходящие в соответствующие фазы спелости; X1...X6 – площади уборки зерновых по определенной технологии

Fig. 1. Schematic diagram of the probabilistic model of grain crop harvesting:

0 to 5 – grain ripeness stages; 6 to 10 – grain harvesting technologies; 11 – losses;

P1 – probability of favorable weather conditions; P2 to P12 – probability of harvesting grain crops using a specific technology at a specific ripeness stage; S0 to S6 – total harvesting area and areas transitioning to the corresponding ripeness stages; X1 to X6 – grain harvesting areas under specific technologies

Зерно, убранное очесом колосьев, получают на стадиях S1, S2 и S3.

Наибольшее количество зерна очесом можно получить, если

$$X_2^{\max} \leq S1 \cdot P5 + S2 \cdot P6 + S3 \cdot P7. \quad (4)$$

Зерно, подвергнутое плющению, получают на стадиях S2 и S3. Наибольшее количество такого зерна можно достичь при условии:

$$X_3^{\max} \leq S2 \cdot P8 + S3 \cdot P9. \quad (5)$$

Для фуража сушкой на стадиях S3 и S4 получаем:

$$X_4^{\max} \leq S3 \cdot P10 + S4 \cdot P11. \quad (6)$$

Максимум семенного зерна на стадии S5 получим при условии:

$$X_5^{\max} \leq S5 \cdot P12. \quad (7)$$

Наибольшее количество потерь составит:

$$X_6^{\max} \leq S5 \cdot P1. \quad (8)$$

Общая площадь, занятая посевами для заготовки кормов и семян, должна совпадать с общей площадью посева зерновых культур:

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 = S_0 \quad (9)$$

Чтобы создать поисковую область для каждой переменной, необходимо определить минимальные значения. Это может быть обосновано различными факторами, но в общем случае приемлемо установить:

$$\min \quad \frac{\quad}{\quad} \quad \max \quad (10)$$

Оптимальное распределение площадей под уборку различных видов кормов следует корректировать в зависимости от прогноза погодных условий, чтобы максимально эффективно использовать ресурсы и получить максимальное количество питательных веществ в кормах. Целевая функция для достижения этой цели может быть сформулирована следующим образом:

$$C_1 \cdot X_1 + C_2 \cdot X_2 + C_3 \cdot X_3 + C_4 \cdot X_4 = \max, \quad (11)$$

где $C_1 \dots C_4$ – содержание к.ед/га для видов кормов: зерносеяж, очес колосьев безобмолотным способом, плющенное зерно, высушенное фуражное зерно.

Объем семян должен быть не менее требуемого, а потери зерна – минимальными в любых условиях.

Результаты и их обсуждение

Для анализа Марковских цепей применим метод декомпозиции, который позволяет представить решение в виде набора матриц^{3,4}: матрицы вероятностей Q, матрицы переходов R, нулевой матрицы 0, единичной матрицы E [7]. Такая запись преобразует ис-

ходную матрицу в уравнение Колмогорова-Чепмена. Решение этого уравнения предоставляет различные характеристики стационарного состояния Марковской цепи. Для вычислений удобно использовать систему MathCAD2000, где все формулы записываются в матричной форме⁵.

Зерно, убранное по разным технологиям, имеет различную питательную ценность, поэтому необходимо выбрать оптимальный объем уборки в разных погодных условиях, чтобы получить максимальное количество питательных веществ. Для этого были созданы математическая модель и программа, которые рассчитывают рациональные площади уборки с учетом вероятности различных погодных сценариев. Математическая модель разработана в виде задачи математического программирования и реализована в системе Excel (рис. 2).

Для анализа воздействия вероятности благоприятных погодных условий на результаты уборки зерновых культур произвели расчеты для различных значений вероятностей в диапазоне от 0 до 1 с шагом 0,1 (рис. 3). Ввиду высокой вероятности неблагоприятных погодных условий в Северо-Западном регионе РФ увеличивается риск уборки и последующей обработки зерна полной спелости с повышенной влажностью.

Неблагоприятные погодные условия оказывают влияние на вероятности применения различных технологий уборки при целевой функции максимального сбора урожая (ц к.ед.) и «жестко» заданного объема семян 10%. Так, при заданных значениях вероятности неблагоприятных погодных условий $P = 0,6$ (рис. 3) и объеме семян 10,0% на зерносеяж планируется убрать 56,8% площадей зерновых культур, очесом будет убрано 19,7%, на плющенное зерно придется 7,1%, на фураж сушкой останется 4,0% площадей; потери зерна составят 2,4%. При $P > 0,6$ значительно возрастают потери. Модель показывает количество площадей, которое можно «довести» до полной спелости (S5) с приемлемым риском потерь.

При планировании логистики и ресурсов на уборку урожая представляется возможным принятие управленческих решений по прогнозированию распределения площадей по фазам спелости на несколько дней/недель вперед: оптимально распределить комбайны, транспорт, сушильные мощности

⁴Кельберт М.Я., Сухов Ю.М. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Т. 2. Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения. 2021. Ч. II. 320 с.

⁵Керимов М.А., Валге А.М. Оптимизация и принятие решений в агроинженерии. М.: КолосС, 2021. 502 с. EDN: GOIVYS.

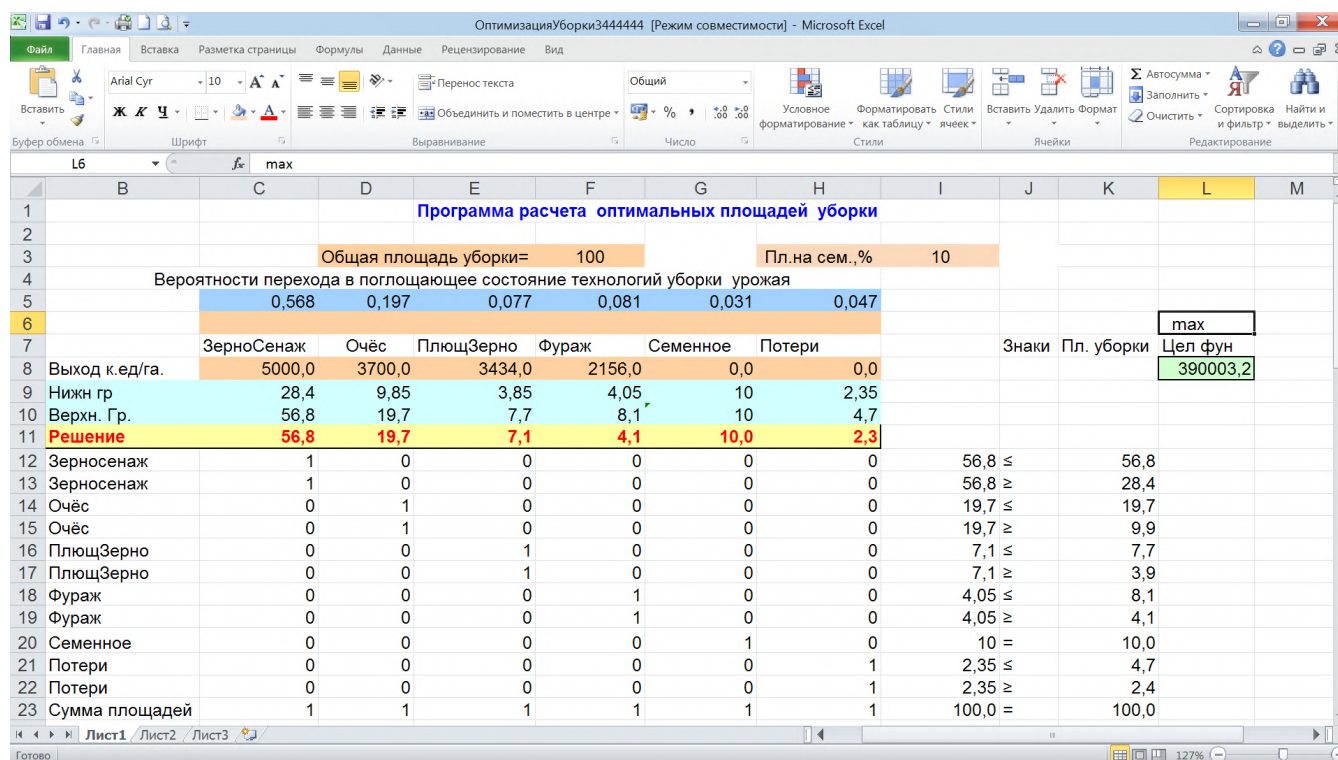


Рис. 2. Фрагмент программы определения рациональных площадей уборки зерновых культур

Fig. 2. Fragment of the software package for determining optimal grain harvesting areas

и рабочую силу. Решение «убирать» или «подождать» перестает быть интуитивным и получает математическое обоснование, основанное на ретроспективных данных и текущих погодных прогнозах (которые можно вносить в изменяющуюся матрицу).

Предлагаемую модель можно применять к группам полей, отдельным полям или даже к частям

полей (с учетом микрорельефа), что актуально для точного земледелия.

Таким образом, Марковская цепь превращает сложный биологический, климатический и технологический процесс в формальную стохастическую модель, которая служит основой для эффективного и прибыльного управления уборкой урожая зерновых культур.

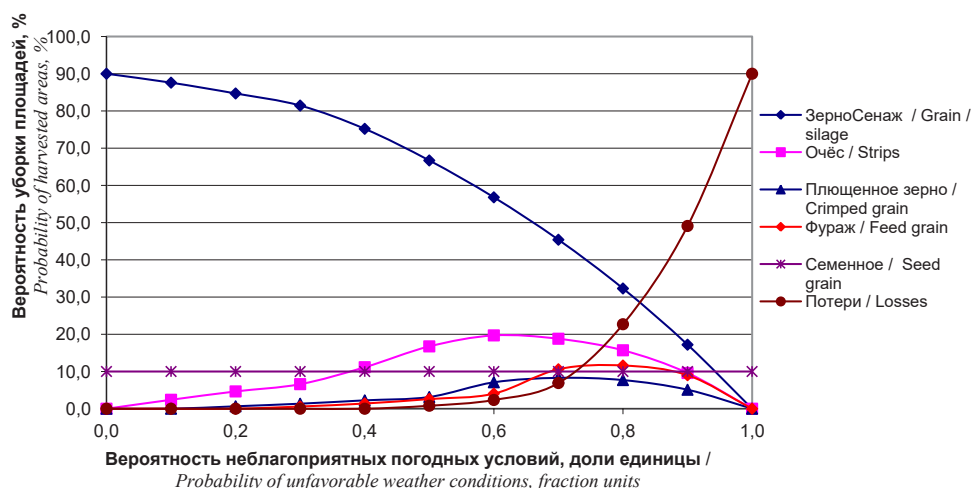


Рис. 3. Вероятность уборки зерновых культур в зависимости от погодных условий

Fig. 3. Probability of harvesting grain crops under adverse weather conditions

Выводы

1. Разработанная математическая модель управления технологическим процессом на основе использования Марковских цепей позволяет «про-

игрывать сценарии» определения рациональных площадей уборки зерновых культур на семена и фураж в зависимости от вероятностей погодных условий.

2. Аprobация математической модели управления процессом уборки при заданной вероятности неблагоприятных погодных условий в Северо-Западном регионе Российской Федерации, равной 0,6, и долей семенного зерна в объеме 10% показала, что на заготовку зерносенажа предусмотрено 56,8% площадей зерновых культур, очесом колосьев безобмолотным

способом можно убрать 19,7%, на площение и консервирование зерна придется 7,1%, на производство фуража сушкой останется 4,0%.

3. Предложенный подход оптимизации структуры урожая зерновых культур помогает осознанно управлять долей семенного и фуражного зерна с различными технологиями заготовки.

Список источников

1. Лобачевский Я.П., Лачуга Ю.Ф., Измаилов А.Ю., Шогенов Ю.Х. Научно-технические достижения агроинженерной науки в условиях цифровизации сельского хозяйства // Российская сельскохозяйственная наука. 2025. № 3. С. 45-53. EDN: FEDQXJ
2. Малков Н.Г., Чухина О.В., Демидова А.И. и др. Анализ технико-технологических решений производства фуражного ячменя в Северо-Западном регионе // АгроЭкоИнженерия. 2020. № 3 (104). С. 24-32. EDN: YXCETO
3. Асманкин Е.М., Кукаев Х.С., Ушаков Ю.А. и др. Форсированная технология переработки как реализация метода энергонасыщенного воздействия на зерновую массу // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 6 (104). С. 154-161. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-104-6-154-161>
4. Дианов Л.В., Смелик В.А., Ширяев А.С. Механизация сушки урожая зерновых и кормовых культур: Монография. Ярославль: Ярославская государственная сельскохозяйственная академия, 2005. 150 с. EDN: QKXMSZ
5. Хуссейн И., 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>
6. Chen X., Wu S., Li C., Liu F., Yuan L., Wang W. Design and experiment of feed rate monitoring system based on the action force of grain combine harvester reel. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025;230:109837. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109837>
7. Перекопский А.Н., Валге А.М., Сухопаров А.И. Моделирование уборки зерновых культур в зависимости от погодных условий // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве. 2011. С. 211-216. EDN: YRJDNH
8. Pakhomov V., Rudoy D., Kambulov S. et al. Research on energy intensity of wheat harvesting at different ripeness phases with a new stripping-threshing unit. *AgriEngineering*. 2024;6(3):3159-3173. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030180>
9. Перекопский А.Н., Чугунов С.В. Базовые технологии использования зерновых культур в качестве кормов и производства семян для хозяйств молочного направления Северо-Западного региона // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2014. № 85. С. 15-22. EDN: SYDQJJ
10. Смелик В.А., Фомин С.Д., Захаров А.М., Перекопский А.Н. Оценки технологической надежности машин для площения и консервирования органического фуражного зерна // Известия Нижегородского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2025. № 4 (82). С. 482-492. EDN: MIFHOV
11. Пахомов В.И., Брагинцев С.В., Бахчевников О.Н., Рудой Д.В. Особенности технологии производства корма из зернового вороха при ранней и сверхранней уборке // Техника и оборудование для села. 2021. № 1 (283). С. 16-19. EDN: AWTTCTZ

References

1. Lobachevsky Ya.P., Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Shogenov Yu.Kh. Scientific and technical achievements of agro-engineering science in the conditions of digitalization of agriculture. *Rossiiskaia Selskokhoziaistvennaia Nauka*. 2025;3:45-53. (In Russ.)
2. Malkov N.G., Chukhina O.V., Demidova A.I., et al. Analysis of technical and technological solutions of fodder barley production in the North-West Region. *Agroekoinzheneriya*. 2020;3:24-32. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2020-10250>
3. Asmankin E.M., Kukaev Kh.S., Ushakov Yu.A. et al. Forced processing technology as an implementation of the method of energy-saturated impact on grain mass. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2023;6:154-161. (In Russ.) <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-104-6-154-161>
4. Dianov L.V., Smelik V.A., Shiryayev A.S. Mechanization of drying grain and fodder crops. Yaroslavl: Yaroslavl State Agricultural Academy. 2005:150. (In Russ.)
5. Hussein I., 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>
6. Chen X., Wu S., Li C., Liu F., Yuan L., Wang W. Design and experiment of feed rate monitoring system based on the action force of grain combine harvester reel. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025;230:109837. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109837>
7. Perekopskiy A.N., Valge A.M., Suhoparov A.I. Model-based analysis of grain harvesting under various weather conditions. *Nauchno-tekhnicheskii progress v selskokhozyaystvennom proizvodstve*. Minsk: Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization. 2011:211-216. (In Russ.)
8. Pakhomov V., Rudoy D., Kambulov S., et al. Research on energy intensity of wheat harvesting at different ripeness phases with a new stripping-threshing unit. *AgriEngineering*. 2024;6(3):3159-3173. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030180>
9. Perekopskiy A.N., Chugunov S.V. Basic technologies of grain crops use for feeding and seed production on dairy farms in the NorthWest region. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2014;85:15-22. (In Russ.)
10. Smelik V.A., Fomin S.D., Zakharov A.M., Perekopskiy A.N. The assessment of the technological reliability of the machines for flattening and preservation of the organic fodder grain. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2025;4:482-492 (In Russ.)
11. Pakhomov V.I., Braginets S.V., Bakhchevnikov O.N., Rudoy D.V. Features of the process for fodder production of grain heap at early and very early harvesting. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;1:16-19. (In Russ.)
12. Rudoy D.V., Pakhomov V.I., Braginets S.V., Maltseva T.A., Sarkisian D.S. Study of the content of vitamins and minerals in wheat grain at different stages of ripeness. *Bulletin of the Ryazan*

12. Рудой Д.В., Пахомов В.И., Брагинцев С.В. и др. Исследование содержания витаминов и минеральных веществ в зерне пшеницы на разных стадиях спелости // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2023. Т. 15, № 3. С. 38-44. EDN: XDHALC
13. Ганичева А.В., Ганичев А.В. Математические методы и модели в агропромышленном комплексе: Монография. Тверь: Тверской государственный технический университет. 2019. 188 с. EDN: GZRZAD
14. Денисенко Т.И. Использование Марковских цепей при решении различных прикладных задач // Фундаментальные исследования. 2009. № 1. С. 27-28. EDN: KVFGBL
15. Назаревич С.А., Меркулова А.Ю. Марковские цепи для решения проблем управления технологическим процессом в производственной системе // Системный анализ и логистика. 2023. № 1 (35). С. 67-73. EDN: LNBUPF
16. Попов В.Д., Валге А.М., Сухопаров А.И. Оптимизация структуры кормов при заданной продуктивности коров // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 2 (99). С. 229-236. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10167>
17. Валге А.М., Перекопский А.Н. Вероятностная модель уборки зерновых культур в Северо-Западном регионе // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2012. № 4. С. 5-6. EDN: PDFSJT

Информация об авторах

- ¹ **Смелик Виктор Александрович**, д-р техн. наук, профессор кафедры технических систем в агробизнесе; smelik_va@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5004-9457>; SPIN-код: 2462-1130
 - ² **Захаров Антон Михайлович**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела «Агротехнологии в растениеводстве»; bauermw@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3501-0543>; SPIN-код: 1089-6040
 - ³ **Перекопский Александр Николаевич**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела «Агротехнологии в растениеводстве»; aperekopskii@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0998-2306>; SPIN-код: 5656-1108
- ¹ Санкт-Петербургский государственный аграрный университет; 196601, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, 2А
- ^{2,3} Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал Федерального научного агроинженерного центра ВИМ; 196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филитровское шоссе, 3

Вклад авторов

Смелик В.А. – методология, концептуализация, руководство исследованиями;
Захаров А.М. – администрирование проекта, создание черновика рукописи, визуализация, проведение исследований;
Перекопский А.Н. – создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 14.03.2026; после рецензирования и доработки 26.06.2026; принята к публикации 03.07.2026

State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2023;15(3):38-44. (In Russ.)

13. Ganicheva A.V., Ganichev A.V. Mathematical methods and models in the agro-industrial complex: Monograph. Tver: Tver State Technical University. 2019, 188 p. (In Russ.)

14. Denisenko T.I. Using Markov chains to solve various applied problems. *Fundamentalnye issledovaniya*. 2009;1:27-28. (In Russ.)

15. Nazarevich S.A., Merkulova A.Yu. Markov chains for solving problems of art-technological process control in a production system. *System Analysis and Logistics*. 2023;1:67-73. (In Russ.)

16. Popov V.D., Valge A.M., Sukhoparov A.I. Optimizing the feed composition for specified cow productivity. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2019;2:229-236. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10167>

17. Valge A.M., Perekopskiy A.N. Probabilistic model of harvesting grain crops in the North-Western region. *Vestnik Rossiyskoy akademii selskokhozyaystvennykh nauk*. 2012;4:5-6. (In Russ.)

Author Information

- Viktor A. Smelik**¹, DSc (Eng), Professor, the Department of Technical Systems in Agribusiness; smelik_va@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5004-9457>
- Anton M. Zakharov**², CSc (Eng), Lead Research Engineer, the Department of Agrotechnologies in Crop Production; bauermw@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3501-0543>; Scopus Author ID: 57222190573
- Aleksandr N. Perekopskiy**³, CSc (Eng), Lead Research Engineer, the Department of Agrotechnologies in Crop Production; aperekopskii@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0998-2306>; Scopus Author ID: 57221327928
- ¹ Saint Petersburg State Agrarian University; 2A Peterburgskoe Ave., Pushkin, Saint Petersburg, 196601, Russian Federation
- ^{2,3} Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3 Filitrovskoe Ave., Tyarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russian Federation

Author Contribution

Smelik V.A. – methodology; conceptualization; research supervision;
Zakharov A.M. – project administration; writing – original draft; visualization; investigation;
Perekopskiy A.N. – writing – review and editing of the manuscript

Conflict of interests

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

Received 14.03.2026; Revised 26.06.2026; Accepted 03.07.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.331.53

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-32-41>

Определение параметров перемещения семян зерновых и зернобобовых культур в центробежном распределителе селекционной сеялки

М.Е. Чаплыгин¹, К.А. Степанов², А.С. Чулков³, А.Л. Мнацаканян⁴^{1,2,3,4} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия¹ misha2728@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>² 89999878895@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-1511-4307>³ andrei.chulkov@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-1178-451X>⁴ anahit-mal@mail.ru

Аннотация. Разработка селекционных сеялок возможна при детальном изучении закономерности перемещения семян в центробежном распределителе на основе исследования скорости, времени и углового перемещения семян. Оптимальные параметры перемещения семян в центробежном распределителе должны обеспечить точное и бесперебойное распределение семян по патрубкам в семяпроводы для равномерного высева семян в борозду при рядовом посеве. Целью исследований являлось определение параметров перемещения семян в центробежном распределителе селекционной сеялки при взаимодействии его лопаток с потоком семян зерновых или зернобобовых культур. Методология исследований включала в себя анализ физико-математических зависимостей и имитационное моделирование процесса выпадения семян в центробежном распределителе сеялки типа Wintersteiger Plotseed S-ВИМ с частотой вращения распределителя до 3100 об/мин. Разработанная 3D-модель процесса движения семян в центробежном распределителе позволила установить нелинейную зависимость коэффициента трения семян о материал лопаток на динамику процесса. При увеличении коэффициента трения с 0,2 до 0,38 скорость семян при сходе с лопатки снижается с 8,59 до 6,3 м/с (на 36%), время движения по лопатке возрастает с 0,0065 до 0,0086 с (на 32%), а угловое перемещение увеличивается с 1,59 до 2,24 рад (на 40%). Дальнейший рост коэффициента трения до 0,57 приводит к дополнительному снижению скорости на 8% и увеличению времени движения на 54%. Угол схода семян линейно возрастал с 54 до 68 град. Установлено, что качественный посев семян зерновых и зернобобовых культур для сеялки Wintersteiger Plotseed S-ВИМ возможен при условии, когда коэффициент трения семян о материал лопатки равен 0,38, угол схода семени с лопатки соответствует 62,5 град. и скорость семени при сходе достигает 6,3 м/с. Разработанная 3D-модель процесса движения семян в центробежном распределителе поможет в дальнейшем разработать высевающий аппарат с электроприводом для сеялки 3-го этапа селекционных работ с роботизированным кассетным загрузочным устройством.

Ключевые слова: семя; семена; селекционная сеялка; электропривод; высевающий аппарат; центробежный распределитель; коэффициент трения семян; посев семян зерновых и зернобобовых культур

Финансирование. Исследования выполнены в рамках государственного задания FGUN-2025-0007 «Разработать научные основы создания цифровых интеллектуальных систем управления технологическими процессами, инновационные технические средства для селекции, семеноводства и производства зерновых, зернобобовых и масличных культур».

Для цитирования: Чаплыгин М.Е., Степанов К.А., Чулков А.С., Мнацаканян А.Л. Определение параметров перемещения семян зерновых и зернобобовых культур в центробежном распределителе селекционной сеялки // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 4. С. 32-41. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-32-41>

ORIGINAL ARTICLE

Parameters of moving grain and leguminous crop seeds in a centrifugal distributor of a breeding seeder

M.E. Chaplygin¹✉, K.A. Stepanov², A.S. Chulkov³, A.L. Mnatsakanyan⁴

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

¹ misha2728@yandex.ru✉; <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>

² 89999878895@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-1511-4307>

³ andrei.chulkov@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-1178-451X>

⁴ anahit-mal@mail.ru

Abstract. The development of breeding seeders is possible through a detailed study of seed movement patterns in a centrifugal distributor, based on the investigation of seed velocity, time, and angular displacement. The optimal parameters of seed movement in the centrifugal distributor should ensure accurate and uninterrupted distribution of seeds through the nozzles into the seed tubes for uniform seeding into the furrow during row sowing. The study aimed to determine the seed movement parameters in the centrifugal distributor of a breeding seeder during the interaction of its blades with the seed flow of grain or leguminous crops. The research methodology included an analysis of physical and mathematical relationships and simulation modeling of the seed release process in the centrifugal distributor of the Wintersteiger Plotseed S-VIM seeder, with a distributor speed of up to 3100 rpm. The developed 3D model of seed movement in the centrifugal distributor made it possible to establish a nonlinear dependence of the coefficient of friction between seeds and the blade material on the process dynamics. As the coefficient of friction increased from 0.2 to 0.38, the seed velocity at the blade exit decreased from 8.59 to 6.3 m/s (by 36%), the travel time along the blade increased from 0.0065 to 0.0086 s (by 32%), and the angular displacement increased from 1.59 to 2.24 rad (by 40%). A further increase in the coefficient of friction to 0.57 led to an additional 8% reduction in velocity and a 54% increase in travel time. The seed release angle increased linearly from 54 to 68 degrees. It was established that high-quality sowing of grain and leguminous crops for the Wintersteiger Plotseed S-VIM seeder is possible provided the coefficient of friction between seeds and the blade material is 0.38, the seed release angle is 62.5 degrees, and the seed velocity at release reaches 6.3 m/s. The developed 3D model of seed movement in the centrifugal distributor will facilitate the future development of an electric-driven seeding unit for a third-stage breeding seeder with a robotic cassette loading device.

Keywords: seeds; breeding seeder; electric drive; seeding unit; centrifugal distributor; seed friction coefficient; grain and leguminous crop seeding

Funding: The research was carried out as part of the fulfillment of the State Assignment FGUN-2025-0007 “Developing the scientific foundations for designing digital intelligent process control systems, innovative technical means for breeding, seed production and production of grain, leguminous and oilseeds.”

For citation: Chaplygin M.E., Stepanov K.A., Chulkov A.S., Mnatsakanyan A.L. Parameters of moving grain and leguminous crop seeds in a centrifugal distributor of a breeding seeder. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(4):32-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-32-41>

Введение

Интеллектуальные технологии и роботизированные средства применяются при разработке посевных машин [1-3]. Так, с их помощью определены конструктивно-технологические параметры высевяющего аппарата конусного типа с центральным распределением семян [4] и осуществляется разработка данного высевяющего аппарата с электроприводом для сеялки 3-го этапа селекционных работ с роботизированным кассетным загрузочным устройством [5, 6].

Высевяющий аппарат селекционной сеялки на 3-м этапе работ включает в себя центробежный распределитель, который направляет поступающий поток семян по патрубкам в семяпроводы. Согласованная

работа центробежного распределителя в соответствии с ОСТ 46 73-78 должна обеспечить качественный рядовой посев семян зерновых и зернобобовых культур с количеством высеваемых рядов от 3 до 10 и длиной селекционной делянки от 2 до 20 м.

Разработка селекционных сеялок требует детального изучения закономерности перемещения семян в рабочих органах на основе исследования скорости, времени и углового перемещения семян. Закономерности перемещения семян в центробежных распределителях исследовали X.P. Cheng [7], A.A. Shwartz [8], S.R. Cool [9], M. Ou [10], V. Bivainis [11], Z. Guan [12], В.А. Черновол [13] и др., однако в этих работах не рассмотрены современные методы визуализации параметров перемещения семенного материала.

Научная новизна данных исследований заключается в установлении количественных зависимостей параметров движения семян (скорости, времени, угловых перемещений) от коэффициента трения семян о лопатки с использованием имитационного моделирования, что позволяет обосновать конструктивные решения в проектируемых роботизированных сеялках.

Цель исследований: определение параметров перемещения семян в центробежном распределителе селекционной сеялки для 3-го этапа работ при взаимодействии его лопаток с потоком семян зерновых или зернобобовых культур.

Материалы и методы

Параметры перемещения определены на основе известных физико-математических зависимостей и технологического процесса работы центробежного распределителя сеялки. Рассмотрено перемещение семян при падении и отбрасывании тарелкой с лопатками в направлении патрубков, соединенных с семяпроводами.

Ученые ФГБНУ ФНАЦ ВИМ осуществляют разработку роботизированной сеялки путем интеграции в сеялку Wintersteiger Plotseed S-ВИМ¹ (рис. 1) роботизированного кассетного загрузочного устройства. В связи с этим расчет параметров перемещения семян в центробежном распределителе производили для данной модели. Для определения параметров перемещения семян при посеве рассмотрим более подробно его центробежный распределитель.

При посеве семена, сходящие с конуса высевающего аппарата центрального распределения,



Рис. 1. Селекционная сеялка Wintersteiger Plotseed S-ВИМ

Fig. 1. Wintersteiger Plotseed S-VIM breeding seeder

¹ Селекционная сеялка Plotseed S – ВИМ Wintersteiger – ВИМ: сайт ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. <https://vim.ru/product/technics/9/242/>

поступают в центробежный распределитель, откуда по лопаткам перемещаются в семяпроводы, из которых попадают в открытые сошниками борозды и заделываются почвой при помощи загортателей. В распределителе семена совершают сложное движение, которое может изменяться в зависимости от условий движения. Описание этих условий и самого движения применительно к распределителю селекционной сеялки является задачей текущего исследования.

Для вращения центробежного распределителя используется электродвигатель с частотой вращения до 3100 об/мин.

3D-модель распределителя представлена на рисунке 2. В корпусе распределителя 1 с патрубками, в подшипнике 2 фланца 3 размещено вращающееся основание 4, на котором закреплена тарелка с лопатками 5, отвечающая за распределение семян по патрубкам 6, через входные окна которых семена попадают в семяпроводы сеялки. Попадание семян точно в патрубки без ударений о промежуточные стенки корпуса является ключевым показателем равномерности распределения семян.

3D-модель тарелки распределителя с лопатками 5, наклоненными вперед по направлению движения, изображена на рисунке 3. Конструктивное расстояние от конуса до лопаток тарелки исследуемой сеялки – $h_k = 0,2$ м.

Схема сил, действующих на семена при движении по наклоненной вперед лопатке, и параметры углового перемещения семени массой $m_c = 4 \cdot 10^{-6}$ кг по диску центробежного распределителя с наружным

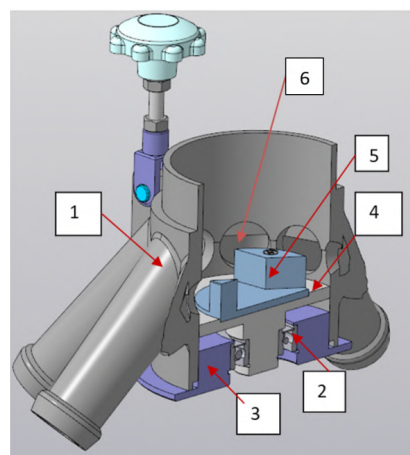


Рис. 2. Общий вид центробежного распределителя селекционной сеялки Wintersteiger Plotseed S-ВИМ:

1 – распределитель; 2 – подшипник; 3 – фланец; 4 – вращающееся основание; 5 – тарелка с лопаткой; 6 – входное окно патрубков распределителя

Fig. 2. General view of the centrifugal distributor of the Wintersteiger Plotseed S-VIM breeding seeder:

1 – distributor; 2 – bearing; 3 – flange; 4 – rotating base; 5 – disc with a blade; 6 – inlet port of the distributor pipes

радиусом $R = 0,3$ м, вращающегося с угловой скоростью $\omega = 324$ рад/с (3100 об/мин), представлена на рисунке 4.

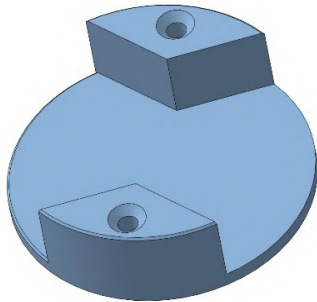


Рис. 3. 3D-модель конструкции тарелки распределителя с наклоненными вперед лопатками

Fig. 3. 3D model of the distributor disc design with forward-inclined blades

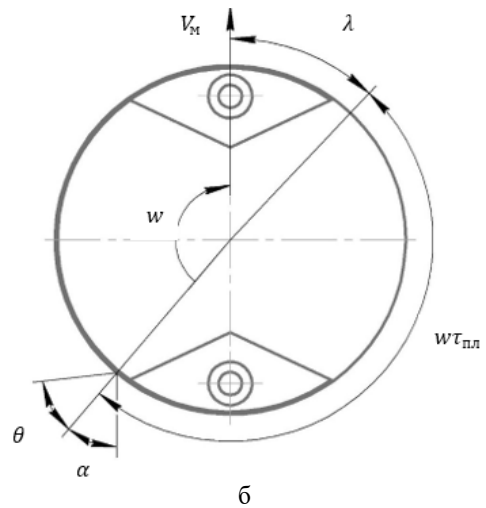
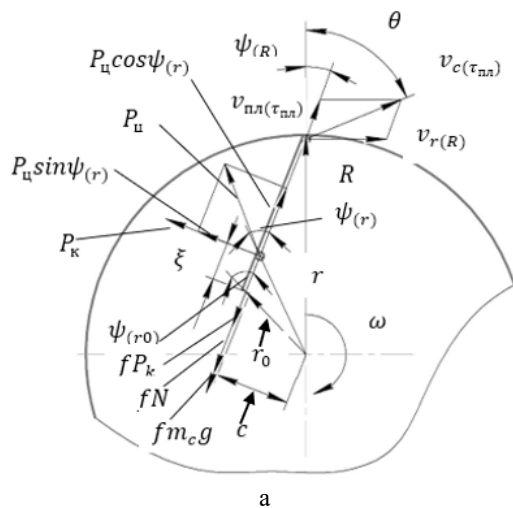


Рис. 4. Схема сил (а) и параметры углового перемещения семян по диску центробежного распределителя (б):
 R – наружный радиус диска распределителя; ω – угловая скорость вращения диска; r_0 – точка-радиус столкновения семян;
 r – текущая точка-радиус семян; c – расстояние от плоскости лопатки до оси вращения диска;
 v_m – вектор скорости движения сеялки; ξ – линейное движение семян по лопатке; λ – угол столкновения семян к вектору v_m ;
 $f \cdot m_c \cdot g$ – сила трения, возникающая от действия силы тяжести семян; P_k – Кориолисова сила инерции;
 $f \cdot P_k$ – сила трения, возникающая от Кориолисовой силы инерции; P_u – центробежная сила инерции;
 $\psi_{(r)}$ – угол наклона радиус-вектора от оси вращения до точки схода семян с лопаткой к поверхности лопатки;
 $P_u \cdot \cos \psi_{(r)}$ – касательная реакция; $P_u \cdot \sin \psi_{(r)}$ – нормальная реакция; $v_{пл(\tau_{пл})}$ – скорость семян при движении по лопатке;
 $v_{r(R)}$ – окружная скорость семян после их схода с лопатки; $v_{c(\tau_{пл})}$ – абсолютная скорость семян после их схода с лопатки;
 $w \cdot \tau_{пл}$ – угловое перемещение по диску; θ – угол схода семян с лопатки;
 α – угол, соответствующий углу схода семян с лопатки относительно вектора скорости движения машины v_m

Fig. 4. Force diagram (a) and parameters of angular movement of seeds on the centrifugal distributor disc (b):

R – outer radius of the distributor disc; ω – angular velocity of disc rotation; r_0 – collision radius point of seeds;
 r – current radius point of seeds; c – distance from the blade plane to the disc rotation axis; v_m – vector of the seeder travel speed;
 ξ – linear movement of seeds along the blade; λ – angle of seed collision relative to vector v_m ;
 $f \cdot m_c \cdot g$ – friction force arising from the action of seed gravity; P_k – Coriolis inertial force;
 $f \cdot P_k$ – friction force arising from the Coriolis inertial force; P_u – centrifugal inertial force; $\psi_{(r)}$ – angle of inclination of the radius vector from the rotation axis to the point of seed discharge from the blade relative to the blade surface;
 $P_u \cdot \cos \psi_{(r)}$ – tangential reaction; $P_u \cdot \sin \psi_{(r)}$ – normal reaction; $v_{пл(\tau_{пл})}$ – seed velocity during movement along the blade;
 $v_{r(R)}$ – peripheral velocity of seeds after their discharge from the blade;
 $v_{c(\tau_{пл})}$ – absolute velocity of seeds after their discharge from the blade; $w \cdot \tau_{пл}$ – angular displacement along the disc;
 θ – angle of seed discharge from the blade; α – angle corresponding to the angle of seed discharge from the blade relative to the machine travel speed vector v_m

Результаты и их обсуждение

Оптимальные параметры перемещения семян (скорость, угол схода) в разрабатываемом центробежном распределителе должны обеспечить точное и бесперебойное распределение семян по патрубкам в семяпроводах для равномерного высева семян в борозду при рядовом посеве.

Рассмотрим взаимодействие потока семян с лопатками центробежных распределителей. Точка столкновения лопатки с семенами имеет координаты: $r_0 = 0,02$ м и угол $\psi_{(r_0)}$. Здесь $\psi_{(r_0)}$ – угол наклона радиус-вектора от оси вращения до точки столкновения семян с лопаткой к поверхности лопатки.

Семена массой m_c сталкиваются с лопаткой под углом λ ($0,17$ рад, или $\sim 10^\circ$) к вектору скорости сеялки v_m . После удара семена перемещаются вдоль лопатки на расстояние ξ_{lim} (м) с относительной

скоростью $v_{нл(t)}$ (м/с). При этом на семена действуют следующие силы:

- центробежная сила инерции $P_u = m_c \cdot \omega^2 \cdot R$ (Н);
- ее составляющая $P_u \cos \psi_{(r)}$ (Н) и нормальная реакция $N = P_u \sin \psi_{(r)}$ (Н);
- сила Кориолиса $P_k = 2m_c \cdot \omega^2 \cdot v_{\xi}(t^*)$ (Н);
- силы трения скольжения от силы тяжести $F_{mp,g} = f \cdot m_c \cdot g$ (Н), от нормальной реакции $F_{mp,N} = f \cdot N$ (Н) и от силы Кориолиса $f \cdot P_k$, (Н), где f – коэффициент трения скольжения.

Лопатка в процессе взаимодействия с семенами поворачивается на угол $\omega \cdot \tau_{нл}$ (рад). Затем семена сходят с лопатки. Положение точки схода характеризуется углом ψ между радиус-вектором (от оси вращения до точки схода) и поверхностью лопатки: $\psi_{(R)} \approx 1$ рад ($\sim 57,5^\circ$). Абсолютная скорость семян в момент схода образует с радиус-вектором угол θ (рад), который равен углу схода семян относительно вектора скорости сеялки v_m .

Таким образом, основным параметром перемещения семян в центробежном распределителе рационально принять время $\tau_{ип}$ (с):

$$\tau_{ип} = \tau_n + \tau_{нл} + \tau_{ол}, \quad (1)$$

где τ_n – время прохождения семян вертикального участка семяпровода от основания конуса до дна центробежного распределителя, с; $\tau_{нл}$ – время движения по лопатке распределителя, с; $\tau_{ол}$ – время пролета семян от лопатки до одного из отверстий патрубков распределителя, с.

Время падения семян τ_n (с) в вертикальном семяпроводе длиной h_k определяется по формуле:

$$\tau_n = \sqrt{2 \cdot h_k / g}, \quad (2)$$

где h_k – высота падения семян от конуса до лопаток распределителя, $h_k = 0,2$ м; g – ускорение свободного падения, $g \approx 9,81$ м/с².

Время выброса крыльчаткой центробежного распределителя всех семян, поступивших из загрузочного стакана, в каналы должно совпадать со временем прохождения сеялкой длины делянки L_d (м).

Время движения семени по лопатке $\tau_{нл}$ до схода можно определить графически. Для этого строят график зависимости перемещения семени от времени $\xi_{нл(\tau_{нл})}$ и находят на нем точку, в которой $\xi_{нл(\tau_{нл})} = \xi_{lim}$. Абсцисса этой точки равна искомому $\tau_{нл}$. Точка пересечения графиков в проекции оси времени позволит определить время движения семян по лопатке. Рассчитывается ξ_{lim} (м) по формуле:

$$\xi_{lim} = R \cdot \cos \psi_{(r)} - r_0 \cdot \cos \psi_{(r_0)}, \quad (3)$$

где R – наружный радиус на диске при дальней точке лопатки, м ($R = 0,03$ м); $\psi_{(r)}$ – угол наклона радиус-вектора от оси вращения до точки схода семян с лопаткой к поверхности лопатки. Тогда $\xi_{lim} = 0,018$ м.

Условие начала движения семян по лопатке, наклоненной вперед по ходу движения, запишем следующим образом:

$$\psi_{(r_0)} < 1,57 - \varphi. \quad (4)$$

$\psi_{(r_0)}$ (рад) определяется по формуле:

$$\psi_{(r_0)} = \arcsin\left(\frac{c}{r_0}\right), \quad (5)$$

где c – расстояние от плоскости лопатки до оси вращения диска, м ($c = 0,016$ м).

Угол трения φ (рад) –

$$\varphi = \arctg f. \quad (6)$$

Значения коэффициента трения скольжения f семян по материалу лопаток (алюминий, пластик) выбраны в диапазоне $0,2 \dots 0,57$. Такой диапазон охватывает типичные значения для семян зерновых (пшеница, ячмень) и зернобобовых (соя) культур [14, 15]. Варьирование коэффициента трения в модели соответствует различным сочетаниям культур и материалов лопаток (например, для сои по алюминию коэффициент может составлять $0,26 \dots 0,39$ [14]).

На движущееся по лопатке семя действуют внешние силы и их составляющие (рис. 4б). Если условие соблюдается, то линейное перемещение по лопатке $\xi_{нл(\tau_{нл})}$ и угловое перемещение по диску $\omega \cdot \tau_{нл}$ как в момент условно введенного времени $\tau_{нл}^* = 0,001$ с, так и в любой другой момент времени движения $\tau_{нл}$ приближенно можно описать траекторией архимедовой спирали [16]. Тогда линейное движение по лопатке (ξ , м/с) можно записать в виде уравнения:

$$\xi = \left(r_0 \cdot \frac{\cos(\psi_{(r_0)} + \varphi)}{\cos \varphi} - \frac{f \cdot g}{\omega^2} \right) \times \left(\frac{(-1) \frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega \cdot e^{\frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega \cdot t}}{\cos \varphi} - \frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega \cdot e^{\frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega \cdot t} \right) \times \left(\frac{(-1) \frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega - \frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega}{(-1) \frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega - \frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega} \right). \quad (7)$$

Зависимость скорости перемещения семян $v_{нл(\tau_{нл})}$ (м/с) вдоль лопатки от времени –

$$v_{нл(\tau_{нл})} = \left(r \cdot \frac{\cos(\psi_{(r)} + \varphi)}{\cos \varphi} - \frac{f \cdot g}{\omega} \right) \times \left(\frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega (-) \cdot \frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega \cdot \left(e^{\frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega \cdot \tau_{нл}} - e^{(-) \frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega \cdot t} \right) \right) \times \left((-) \cdot \frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega - \frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega \right). \quad (8)$$

Величина абсолютной скорости семян $v_{с(\tau_{нл})}$ (м/с) после их схода с лопатки определяется

по приведенной ниже зависимости. При этом действием силы тяжести можно пренебречь:

$$v_{c(\tau_{пл})} = \frac{v_{пл(\tau_{пл})} \cdot \sin \psi_{(r)} + v_{r(R)}}{\sin \theta}. \quad (9)$$

Угол θ (рад) между вектором абсолютной скорости $v_{c(\tau_{пл})}$ и радиус-вектором R определяется по формуле:

$$\theta = \arctg \frac{v_{r(R)}}{v_{пл(\tau_{пл})} \cdot \cos \psi_{(R)}}. \quad (10)$$

Для визуализации движения семян введем угол α , рад, соответствующий углу схода семян с лопатки относительно вектора скорости движения машины v_m . Тогда согласно рисунку 4

$$\alpha = \lambda + w \cdot \tau_{пл} + \theta - \pi, \quad (11)$$

где $w \cdot \tau_{пл}$ – угловое перемещение семян в абсолютном движении до момента схода с лопатки, рад:

$$w \cdot \tau_{пл} = \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \cdot \ln \frac{2 \cdot (r_0 \cdot \cos(\varphi + \psi_{(r0)}) + \xi_{пл} \cdot \cos \varphi)}{r_0 \cdot (1 + \sin \varphi) \cdot \cos(\varphi + \psi_{(r0)})}. \quad (12)$$

Таким образом, изменение перемещения семени вдоль вращающейся лопатки, скорость и углы схода семян с лопатки следует считать дополнительными параметрами перемещения семян, которые согласно уравнениям (1)–(12) существенно зависят от коэффициента трения семян и материала лопаток f .

Условие попадания семени во входное окно патрубка (для сеялки Wintersteiger Plotseed S-ВИМ) заключается в том, что угловое перемещение $w \cdot \tau_{пл}$ и угол схода θ должны находиться в следующих пределах:

$$w \cdot \tau_{пл} \in [\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]; \quad (13)$$

$$\theta \in [\theta_{\min}, \theta_{\max}]. \quad (14)$$

В соответствии с формулой (2) время падения семян $\tau_{п}$ в вертикальном семяпроводе составляет

$$\tau_{п} = \sqrt{2 \cdot 0,2 / 9,81} = 0,2 \text{ с}$$

Угол наклона радиус-вектора от оси вращения до точки столкновения семян с лопаткой к поверхности лопатки $\psi_{(r0)}$ можно рассчитать по формуле (5):

$$\psi_{(r0)} = \arcsin \left(\frac{0,016}{0,02} \right) \approx 0,92 \text{ рад } (54^\circ).$$

По формуле (6) при $f = 0,2$

$$\varphi = \arctg(0,2) = 0,19 \text{ рад } (11^\circ);$$

при $f = 0,38$

$$\varphi = \arctg(0,38) = 0,36 \text{ рад } (21^\circ);$$

при $f = 0,57$

$$\varphi = \arctg(0,57) = 0,51 \text{ рад } (29^\circ).$$

Тогда согласно формуле (4) условие движения выполняется:

при $f = 0,2$

$$0,92 < 1,57 - 0,19 = 1,38;$$

при $f = 0,38$

$$0,92 < 1,57 - 0,36 = 1,21;$$

при $f = 0,57$

$$0,92 < 1,57 - 0,51 = 1,06.$$

Наконец, определим длину участка движения семян по лопатке $\xi_{\lim}$ согласно формуле (3):

$$\xi_{\lim} = 0,3 \cdot \cos(1) - 0,02 \cdot \cos(0,92) = 0,018 \text{ м}.$$

Для нахождения времени перемещения семян по лопатке $\tau_{пл}$ воспользуемся уравнением (7) с заданными коэффициентами трения f и построим линии перемещения в зависимости от времени t (рис. 5). Коэффициент трения может меняться в зависимости от шероховатости семян (культура, сорт, положение в пространстве, форма) и износа материала лопаток. Зная длину пути семян по лопатке $\xi_{\lim}$, спроецируем ее значение на график рисунка в виде прямой линии. Точки пересечения с линиями $\tau_{пл}(f)$ дадут искомое

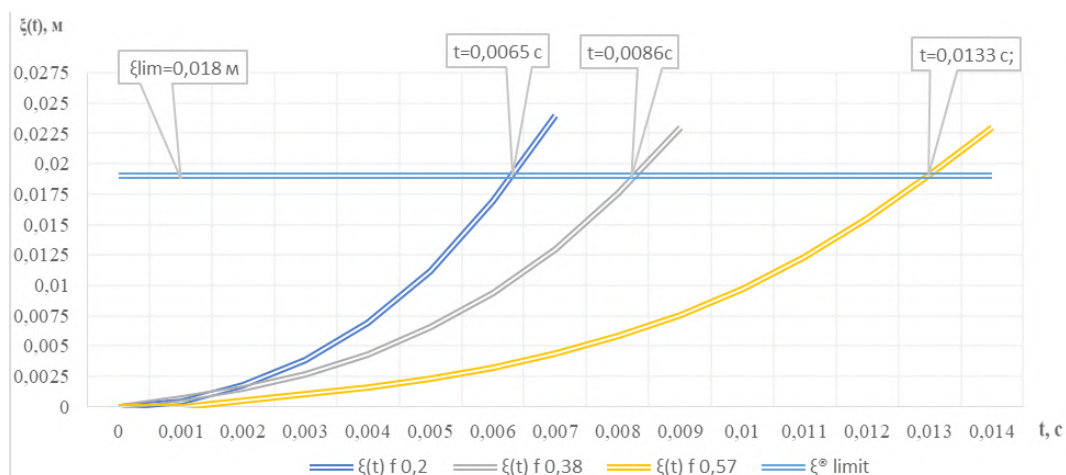


Рис. 5. Пройденный семенами путь по лопатке $\xi_{пл(t)}$ в зависимости от времени и коэффициента трения f

Fig. 5. Path traveled by seeds along the blade $\xi_{пл(t)}$ as a function of time and friction coefficient f

значение $\tau_{пл}$. На основании данных рисунка 5 изменение времени движения по лопатке $\tau_{пл}$ в зависимости от коэффициента трения f можно представить в виде графика (рис. 6). Точками показаны расчетные значения, сплошная линия – аппроксимация – квадратичной функцией.

Формулу времени движения по лопатке $\tau_{пл}$ (с) можно описать нелинейной зависимостью:

$$\tau_{пл} = 0,007 - 0,01 \cdot f + 0,03 \cdot f^2. \quad (15)$$

Изменение скорости $v_{пл(\tau_{пл})}$ от времени $\tau_{пл}$ при различных коэффициентах трения, определяемое по формуле (8) и данным рисунка 5, показано на рисунке 7.

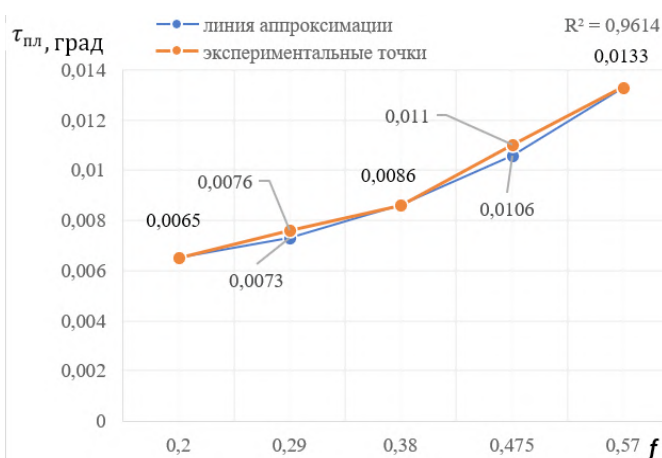


Рис. 6. Изменение времени движения семян по лопатке $\tau_{пл}$ в зависимости от коэффициента трения f

Fig. 6. Change in seed travel time along the blade $\tau_{пл}$ as a function of friction coefficient f

Согласно рисункам 5-7 при коэффициенте трения $f=0,2$ семена проходят расстояние $\xi_{lim}=0,018$ м за время $\tau_{пл}=0,0065$ с, достигая скорости $v_{пл(\tau_{пл_{lim}})}=8,59$ м/с; при $f=0,38$ $\tau_{пл}=0,0086$ с, а $v_{пл(\tau_{пл_{lim}})}=6,3$ м/с; при $f=0,57$ $\tau_{пл}=0,013$ с, $v_{пл(\tau_{пл_{lim}})}=5,83$ м/с.

Аналогично скорость семян при сходе с лопатки $v_{пл(\tau_{пл})}$ (м/с) можно описать нелинейной зависимостью на основании данных рисунка 6 и формулы (8):

$$v_{пл(\tau_{пл})} = 13,24 - 28,78 \cdot f + 27,7 \cdot f^2. \quad (16)$$

Результаты изменения углового перемещения семян в абсолютном движении до схода с лопатки $w \cdot \tau_{пл}$ в зависимости от коэффициента трения f представлены на рисунке 8. Точками показаны расчетные значения, сплошная линия – аппроксимация – квадратичной функцией.

Основываясь на данных рисунка 7, формулу (13) изменения $w \cdot \tau_{пл}$ (град.) с предложенными исходными данными можно описать нелинейной зависимостью:

$$w \cdot \tau_{пл} = 99,51 - 169,37 \cdot f + 646,43 \cdot f^2. \quad (17)$$

Изменение угла схода семян с лопатки θ в зависимости от коэффициента трения f с учетом формулы (17) показано на рисунке 9.

Изменение угла схода семян с лопатки θ (рад) представим в линейном виде:

$$\theta = 47,02 + 37,75 \cdot f. \quad (18)$$

3D-модель процесса выпадения семян в центробежном распределителе, разработанная по формулам (16)-(18) с помощью имитационного моделирования, (рис. 10) показывает выпадение семян на тарелку распределителя, движение по лопаткам, сход

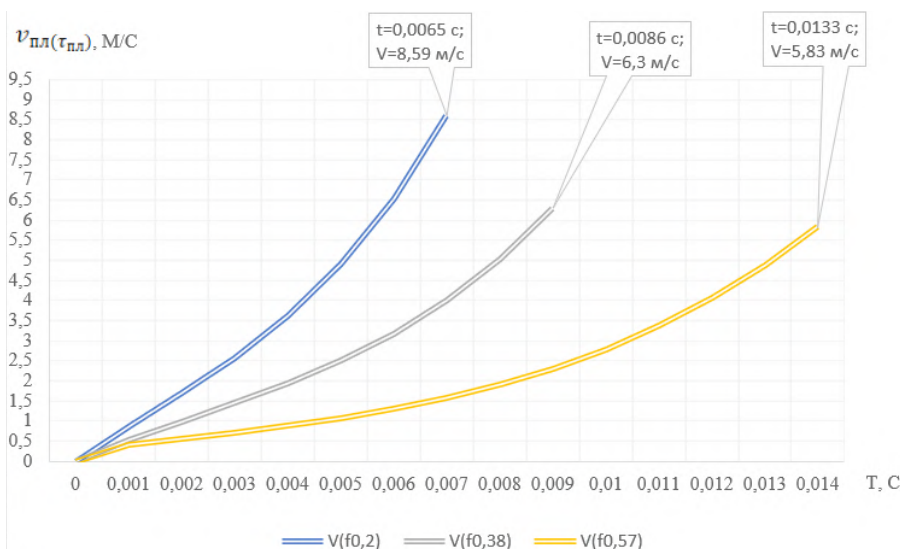


Рис. 7. Изменение скорости семян $v_{пл(\tau_{пл})}$ в зависимости от времени движения его по лопатке распределителя $\tau_{пл}$ при различных коэффициентах трения f

Fig. 7. Change in seed velocity $v_{пл(\tau_{пл})}$ as a function of travel time along the distributor blade $\tau_{пл}$ at various friction coefficients f

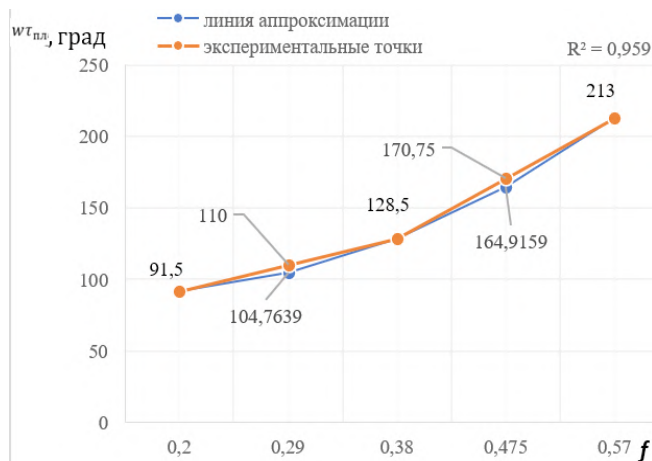


Рис. 8. Изменение углового перемещения семян в абсолютном движении $w_{тн}$ до момента схода с лопатки в зависимости от коэффициента трения f

Fig. 8. Change in angular displacement of seeds in absolute motion $w_{тн}$ up to the moment of discharge from the blade as a function of friction coefficient f

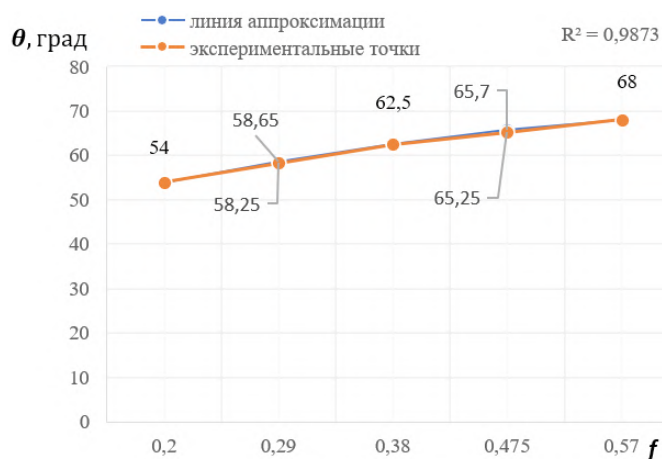


Рис. 9. Изменение угла схода семян с лопатки θ от коэффициента трения f

Fig. 9. Change in the seed discharge angle from the blade θ as a function of friction coefficient f

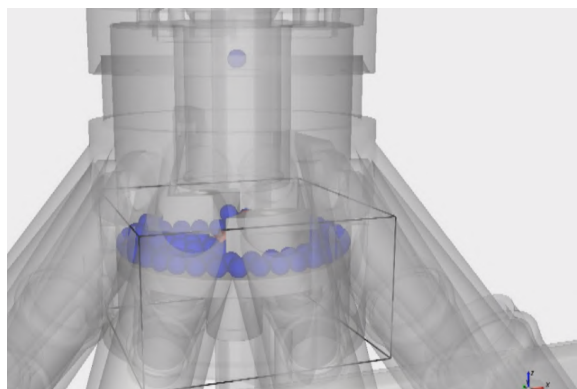


Рис. 10. Фрагмент с работы имитационной модели выпадения семян в центробежном распределителе

Fig. 10. Fragment of the simulation model operation for seed fallout in the centrifugal distributor

семян с лопаток при различных коэффициентах трения. На рисунке 10 цветом выделены семена, оставшиеся на лопатке после схода с нее.

Визуализация результатов работы имитационной модели представлена на рисунке 11. Заштрихованная область на тарелке соответствует области перемещения семян при радиусе подачи 0,019 м. По форме этой области можно сделать вывод о том, что при увеличении коэффициента трения с 0,2 до 0,38 угловое перемещение семян до схода с лопатки увеличивается с 1,59 рад (91,5°, траектория «а») – до 2,24 рад (128,5°, траектория «б»), а угол схода с лопатки увеличивается с 0,94 рад (54°, траектория «а») до 1,09 рад (62,5°, траектория «б»). При увеличении коэффициента трения до 0,57 угловое перемещение семян увеличивается до 3,71 рад (213°), а угол схождения с лопатки – до 1,19 рад (68°) (траектория «в»).

Анализ изменения скорости, времени, углового перемещения семян при сходе с лопатки от коэффициента трения семян зерновых, зернобобовых культур и материала лопаток показал увеличение коэффициента трения семян о лопатки с 0,2 до 0,38, что приводит к снижению скорости на 36%, увеличивает время перемещения семян на 32% и угловое перемещение на 40%. При коэффициенте трения 0,57 скорость снижается еще на 8%, а время перемещения семян и угловое перемещение увеличивается

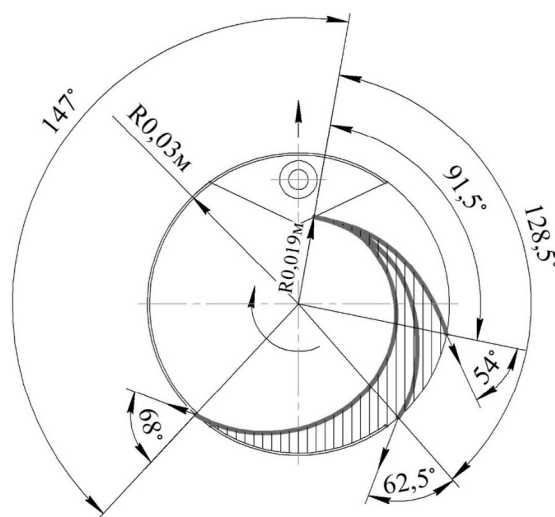


Рис. 11. Визуализация перемещения семян при их взаимодействии с лопаткой

в зависимости от коэффициента трения f : линия а – при $f = 0.2$; линия б – при $f = 0.38$; линия в – при $f = 0.57$; заштрихованная площадь – область выпадения семян при радиусе подачи 0,019 м

Fig. 11. Visualization of seed movement during their interaction with the blade as a function of friction coefficient f :

line a – at $f = 0.2$; line b – at $f = 0.38$; line c – at $f = 0.57$; shaded area – seed fallout zone at a feed radius of 0.019 m

на 54 и 65% соответственно. Отметим, что при коэффициенте трения 0,38 (траектория «б»), угле схода 62,5 град. и скорости 6,3 м/с семена попадают в окно патрубка, а при 0,2 и 0,57 семена не попадают в окна и возвращаются на лопатку. Следовательно, при коэффициенте трения 0,38 для попадания семян в окно патрубка рекомендуем использовать частоту вращения диска 3100 об/мин.

Выводы

1. Посев семян зерновых и зернобобовых культур на 3-м этапе селекционных работ зависит от параметров перемещения семян в центробежном распределителе – таких, как скорость семян при сходе с лопатки, время движения и угловое перемещение семени по лопатке.

Список источников

1. Измайлов А.Ю. Интеллектуальные технологии и роботизированные средства в сельскохозяйственном производстве // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89, № 5. С. 536-538. <https://doi.org/10.31857/S0869-5873895536-538>. EDN: UKKACW
2. Бейлис В.М., Ценч Ю.С., Коротченя В.М., Старовытов С.И., Кынев Н.Г. Тенденции развития прогрессивных машинных технологий и техники в сельскохозяйственном производстве // Вестник ВИЭСХ. 2018. № 4. С. 150-156. EDN: YTHPID
3. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 4. С. 6-10. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
4. Чулков А.С., Шайхов М.М. Математическое моделирование работы конусного высевающего аппарата селекционной сеялки // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 4. С. 40-46. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-4-40-46>
5. Чулков А.С., Чаплыгин М.Е., Шайхов М.М. Роботизированное кассетное загрузочное устройство карусельного типа для селекционной сеялки // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2024. Т. 17, № 3. С. 99-107. EDN: UREWAC
6. Чулков А.С., Чаплыгин М.Е., Шайхов М.М. Обоснование параметров работы роботизированного кассетного загрузочного устройства карусельного типа для селекционной сеялки // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 4. С. 549-562. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.549-562>
7. Cheng X.P., Li H.W., He J. et al. Optimization of operating parameters of seeding device in plot drill with seeding control system. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021;14(3):83-91. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211403.6218>
8. Шварц А.А., Беседин Б.П., Колесников Е.Ю. Конструктивные особенности и результаты работы разбрасывателя органико-минеральных удобрений // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 7. С. 186-188. EDN: YIKNIV
9. Cool S.R., Pieters J.G., Seatovic D. et al. Development of a stereovision-based technique to measure the spread

2. Коэффициент трения семян о материал лопатки нелинейно влияет на параметры перемещения семян; увеличение коэффициента трения семян с 0,2 до 0,57 приводит к снижению скорости семян при сходе на 44%, углового перемещения – на 65% и к увеличению времени перемещения семян на 54%.

3. Качественный посев семян зерновых и зернобобовых культур возможен при коэффициенте трения семян о материал лопатки 0,38, угле схода семени с лопатки 62,5 град. и скорости семени при сходе 6,3 м/с.

4. Разработанная 3D-модель процесса движения семян в центробежном распределителе поможет в дальнейшем разработать высевающий аппарат с электроприводом для сеялки 3-го этапа селекционных работ с роботизированным кассетным загрузочным устройством.

References

1. Izmaylov A.Yu. Intelligent technologies and robotic means in agricultural production. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2019;89(5):536-538. (In Russ.)
2. Beylis V.M., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M., Starovoytov I.S., Kynev N.G. Trends in the development of advanced machine technologies and techniques in agricultural production. *Vestnik VIESKH*. 2018;4:150-156. (In Russ.)
3. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):6-10. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
4. Chulkov A.S., Shaikhov M.M. Mathematical modeling of the operation of a cone-type seeding unit of a crop breeding seeder. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(4):40-46. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-4-40-46>
5. Chulkov A.S., Chaplygin M.E., Shaykhov M.M. Carousel type robotic cassette loading device for breeding seeder. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2024;17(3):99-107. (In Russ.)
6. Chulkov A.S., Chaplygin M.E., Shaykhov M.M. Justifying the operation parameters of a robotic cassette loading device of the carousel type for a selection seeder. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):549-562. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.549-562>
7. Cheng X.P., Li H.W., He J. et al. Optimization of operating parameters of seeding device in plot drill with seeding control system. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021;14(3):83-91. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211403.6218>
8. Shvarts A.A., Besedin B.P., Kolesnikov E.Yu. Design features and performance characteristics of an organic and mineral fertilizer spreader. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2015;7:186-188. (In Russ.)
9. Cool S.R., Pieters J.G., Seatovic D. et al. Development of a stereovision-based technique to measure the spread patterns of granular fertilizer spreaders. *Sensors*. 2017;17(6):1396. <https://doi.org/10.3390/s17061396>
10. Ou M., Wang G., Lu Y. et al. Structure optimization and performance simulation of a double-disc fertilizer spreader based on EDEM-CFD. *Agronomy*. 2025;15(5):1025. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051025>

patterns of granular fertilizer spreaders. *Sensors*. 2017;17(6):1396. <https://doi.org/10.3390/s17061396>

10. Ou M., Wang G., Lu Y. et al. Structure optimization and performance simulation of a double-disc fertilizer spreader based on EDEM-CFD. *Agronomy*. 2025;15(5):1025. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051025>

11. Bivainis V., Jotautienė E., Lekavičienė K. et al. Theoretical and experimental verification of organic granular fertilizer spreading. *Agriculture*. 2023;13(6):1135. <https://doi.org/10.3390/agriculture13051135>

12. Guan Z., Mu S., Jiang T. et al. Development of centrifugal disc spreader on tracked combine harvester for rape undersowing rice based on DEM. *Agriculture*. 2022;12(4):562. <https://doi.org/10.3390/agriculture12040562>

13. Черноволов В.А., Хижняк В.И., Несмиян А.Ю. и др. Методика расчета угла бросания удобрений и семян центробежным аппаратом с отклоненными от радиуса лопатками как функции случайных координат точки подачи // Вестник аграрной науки Дона. 2022. Т. 15, № 2. С. 17-28. EDN: AELVMJ

14. Мальцев П.С. Разработка и исследование высевающего аппарата избыточного давления для точного поштучного дозирования семян сои // Агроэкоинфо. 2023. № 3. С. 25. EDN: ICADFN

15. Марвко И.А., Новиков В.И., Зубрилина Е.М. и др. Методика и результаты определения коэффициента трения семенного материала с использованием автоматизированного устройства // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2019. № 147. С. 10-20. EDN: BKHDXF

16. Черноволов В.П., Ужахов Т.М. Моделирование процессов распределения минеральных удобрений центробежными аппаратами: Монография. Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2011. 264 с. EDN: QLCEQF

11. Bivainis V., Jotautienė E., Lekavičienė K. et al. Theoretical and experimental verification of organic granular fertilizer spreading. *Agriculture*. 2023;13(6):1135. <https://doi.org/10.3390/agriculture13051135>

12. Guan Z., Mu S., Jiang T. et al. Development of centrifugal disc spreader on tracked combine harvester for rape undersowing rice based on DEM. *Agriculture*. 2022;12(4):562. <https://doi.org/10.3390/agriculture12040562>

13. Chernovolov V.A., Khizhnyak V.I., Nesmiyan A.Yu. et al. Method of calculating the throwing angle of fertilizers and seeds by a centrifugal apparatus with blades displaced from the radius as a function of random coordinates of the feed point. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2022;15(2):17-28.

14. Maltsev P.S. Development and research of an overpressure seeding apparatus for precise piece-by-piece dosing of soybean seeds. *AgroEkoInfo*. 2023;3:25. (In Russ.)

15. Marvko I.A., Novikov V.I., Zubrilina E.M. et al. Methods and results of the seed material friction coefficient determining using an automated device. *Polythematic online electronic Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2019;147:10-20. (In Russ.)

16. Chernovolov V.P., Uzhakhov T.M. Modeling the distribution of mineral fertilizers by centrifugal units. Monograph. Zernograd, FGOU VPO ACHGAA, 2011. 264 p. (In Russ.)

Информация об авторах

¹ Чаплыгин Михаил Евгеньевич, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук; misha2728@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>; SPIN-код: 2268-6927

² Степанов Кирилл Александрович, канд. техн. наук; 89999878895@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-1511-4307>; SPIN-код: 6831-0519

³ Чулков Андрей Сергеевич, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук; andrei.chulkov@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0009-0002-1178-451X>; SPIN-код: 1726-9749

⁴ Мнацаканян Анаит Леоновна, магистрант; anahit-mal@mail.ru; SPIN-код: 2096-6644

^{1,2,3,4} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Вклад авторов

М.Е. Чаплыгин – научное руководство, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; К.А. Степанов – создание черновика рукописи, администрирование данных;

А.С. Чулков – методология, ресурсы;

А.Л. Мнацаканян – проведение расчетов, ресурсы.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 23.01.2026; после рецензирования и доработки 16.07.2026; принята к публикации 03.07.2026

Author Information

Mikhail E. Chaplygin¹, CSc (Eng); misha2728@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>; Researcher ID: AAZ-6056-2020

Kirill A. Stepanov², CSc (Eng); 89999878895@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-1511-4307>

Andrey S. Chulkov³, CSc (Eng); andrei.chulkov@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0009-0002-1178-451X>; Researcher ID: JOZ-1910-2023

Anahit L. Mnatsakanyan⁴, MSc student; anahit-mal@mail.ru^{1,2,3,4} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russia, Moscow, 1st Institutsky Proezd Str., 5

Author Contributions

M.E. Chaplygin – research supervision, conceptualization; writing – review and editing of the manuscript;

K.A. Stepanov – writing – original draft, review and editing of the manuscript; data curation;

A.S. Chulkov – methodology, resources;

A.L. Mnatsakanyan – data curation; formal analysis; resources.

Conflict of interests

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

Received 23.01.2026; Revised 16.07.2026; Accepted 03.07.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 633.521:631.358

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-42-50>

Исследование структурных параметров стеблевого слоя при впускивании лент льна: новые аспекты

А.Н. Зинцов¹, М.М. Ковалев², Г.А. Перов³, В.И. Шинкарев⁴^{1,4} Костромская государственная сельскохозяйственная академия; п. Караваево, Россия^{2,3} Федеральный научный центр лубяных культур; г. Тверь, Россия¹ zintsov_a@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3443-2015>² m.kovalev@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2424-4205>³ g.perov@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>⁴ Vladimir12321863@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0005-9902-3118>

Аннотация. Существующие впускиватели лент льна, несмотря на высокую производительность и надежность, не способствуют увеличению выхода длинного волокна. Исследования проведены с целью оценки влияния способа впускивания на структурные параметры слоя стеблей и разработки рекомендаций для повышения эффективности процесса впускивания. Созданный новый двухпоточный впускиватель лент льна ВЛ-2К лишен недостатков серийных машин. Сравнительные исследования структурных параметров слоя стеблей показали минимальное изменение относительной растянутости стеблей при работе впускивателя ВЛ-2К по сравнению с серийной машиной ВЛ-3, у которой этот показатель почти на 2 п.п. превышает допустимые значения. Вероятность перекашивания стеблей впускивателем ВЛ-2К составила $P(>28^\circ) = 0,004$, в то время как угловая дезориентация стеблей, произведенная серийной ворошилкой ВЛ-3, с вероятностью нарушения агротребований достигла $P(>28^\circ) = 0,21$. Однако для увеличения выхода длинного волокна необходимо добиться снижения растянутости и перекашивания стеблей при выполнении операции впускивания лент. Поскольку возможность эффективного уменьшения растянутости зависит от угловой дезориентации стеблей, для повышения пригодности слоя к последующей выработке длинного волокна необходимо сначала минимизировать имеющиеся перекосы стеблей, а потом приступить к устранению растянутости слоя. Для профилактики возникновения перекосов стеблей целесообразно соблюдать следующие условия: перемещать ленту стеблей льна над подбирающим барабаном с показателем кинематического режима его работы, равным единице; пальцы подбирающего барабана впускивателя должны свободно выходить из впускиваемой ленты под действием беговой дорожки; льноуборочные машины должны выполнять расстил лент льна принудительно и максимально близко к поверхности поля; не допускать необоснованного уплотнения стеблевой массы в лентах тресты. Растянутость стеблей в слое можно снизить комлеподбиванием. Соблюдение рекомендаций поможет добиться увеличения выхода длинного волокна на льнозаводах.

Ключевые слова: лен; впускиватель лента льна; процесс впускивания; перекосы стеблей; растянутость стеблей; выход длинного волокна; пригодность слоя

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания ФГБНУ ФНЦ ЛК № FGSS-2022-0005.

Для цитирования: Зинцов А.Н., Ковалев М.М., Перов Г.А., Шинкарев В.И. Исследование структурных параметров стеблевого слоя при впускивании лент льна: новые аспекты // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 4. С. 42-50. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-42-50>

ORIGINAL ARTICLE

Investigation of the structural parameters of the stem layer during fluffing of flax ribbons: new aspects

A.N. Zintsov¹, M.M. Kovalev², G.A. Perov³✉, V.I. Shinkarev⁴

^{1,4} Kostroma State Agricultural Academy; Karavaevo, Russia

^{2,3} Federal Research Center for Bast Fiber Crops; Tver, Russia

¹ zintsov_a@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3443-2015>

² m.kovalev@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2424-4205>

³ g.perov@fncl.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>

⁴ Vladimir12321863@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0005-9902-3118>

Abstract. The existing flax ribbon fluffers, despite their high productivity and reliability, do not contribute to increasing the yield of long fiber. The study aimed to evaluate the effect of the fluffing method on the structural parameters of the stem layer and to develop recommendations for improving the fluffing efficiency. The newly developed two-stream flax ribbon fluffer VL-2K eliminates the disadvantages of serial machines. Comparative studies of the structural parameters of the stem layer showed minimal changes in the relative elongation of stems during operation of the VL-2K fluffer compared to the serial VL-3 machine, in which this indicator exceeds the permissible values by almost 2 percentage points. The probability of stem misalignment with the VL-2K fluffer was $P(>28^\circ) = 0.004$, whereas the angular disorientation of stems produced by the serial VL-3 fluffer reached a probability of violating agrotechnical requirements of $P(>28^\circ) = 0.21$. However, to increase the yield of long fiber, it is necessary to reduce stem elongation and misalignment during the fluffing process. Since the possibility of effectively reducing elongation depends on the angular disorientation of stems, to improve the suitability of the layer for subsequent long-fiber processing, it is first necessary to minimize existing stem misalignments and only then proceed to eliminate layer elongation. To prevent stem misalignment, it is advisable to observe the following conditions: move the flax stem ribbon over the pickup drum with a kinematic mode index equal to unity; make sure that the pickup drum fingers freely exit the fluffed ribbon under the action of the raceway; make sure that flax harvesting machines spread flax ribbons forcibly and as close as possible to the field surface; avoid unnecessary compaction of stem mass in the ribbons of the retted straw. Stem elongation in the layer can be reduced by butt-end beating. Compliance with these recommendations will help achieve an increase in the yield of long fiber at flax processing facilities.

Keywords: flax; flax ribbon fluffer; fluffing; stem misalignment; stem elongation; long fiber yield; layer suitability

Funding: The research was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the State assignment for Federal Research Center for Bast Fiber Crops No. FGSS-2022-0005.

For citation: Zintsov A.N., Kovalev M.M., Perov G.A., Shinkarev V.I. Investigation of the structural parameters of the stem layer during fluffing of flax ribbons: new aspects. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(4):42-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-42-50>

Введение

Переход от термовлажностного способа приготовления тресты на льнозаводе к технологии росной мочки в естественных условиях обусловлен стремлением экономии энергоресурсов и экологизации производства [1, 2]. Однако при вылежке в естественных условиях на поверхности льнища существенно различается динамика биологических процессов, происходящих в верхних и нижних слоях лент стеблей льна. Чаще всего различия проявляются в годы с неустойчивыми погодными условиями во время

приготовления тресты. Обильные осадки в этот период в сочетании с недостатком солнечной радиации и низкой температурой воздуха, высокая урожайность тресты и присутствие сорняков на поверхности поля снижают темпы мацерации и повышают вероятность развития гнилостных процессов в нижних слоях переувлажненных лент. Наиболее активно гниение стеблей с заметным понижением качества волокнистой продукции происходит в лентах, прибитых дождями к поверхности льнища и пророщенных сорняками^{1,2} [3].

¹ Боярченкова М.М., Быков Н.Н. Эффективность оборачивания тресты // Лен и конопля. 1974. № 9. С. 30-31.

² Сизов В.И., Сизов И.В. Разработка оборачивателей льна: тенденции и перспективы // Интенсификация машинных технологий производства и переработки льнопродукции: Материалы Международной научно-практической конференции (г. Тверь, 15-16 июля 2004 г.). М.: Изд-во ВИМ, 2004. Ч. 1. С. 155-162.

Обзор научных исследований и производственный опыт позволили выделить два основных способа сохранения и повышения качества волокнистой продукции: периодическое оборачивание и впусшивание лент стеблей³ [2, 3].

Оборачивание ленты создает равные условия вылежки как для верхнего, так и для нижнего слоев, и способствует увеличению однородности льно-тресты по всем технологическим показателям [2, 4]. Однако существующие оборачиватели, выполненные по однопоточной технологической схеме (ОСН-1, ОЛЛ-1, ОЛС-1, ОЛ-140) с постоянным зазором оборачивающего канала, являются недостаточно производительными и отличаются низкой технологической надежностью⁴. Кроме того, при работе подборщиков-оборачивателей усиливаются кривизна лент, растянутость и угловая дезориентация в них стеблей. При каждом последующем оборачивании значения данных структурных параметров увеличиваются в среднем на 5%-ных пунктов. Поэтому выход длинного волокна на льнозаводах редко превышает 8...10%, хотя его содержание в растениях достигает 30...33% [5].

Впусшиватели (ворошилки) с двух- или трехпоточной технологической схемой (ВЛ-2, ВЛ-3, ВВЛ-3, ВЛК-3Ч, ВЛН-4,5 и др.) более производительны, надежны и имеют простую конструкцию, однако еще больше перепутывают стебли во впущенном слое,

усугубляя ситуацию, заключающуюся в низком выходе длинного волокна на льнозаводе⁵. Процесс впусшивания происходит в пространстве между ворошилками с пружинными зубьями и поверхностью почвы [6] (рис. 1). За счет того, что концы пружинных зубьев в зоне подбора работают с некоторым запаздыванием относительно поступательной скорости движения агрегата, стеблевая масса подгребаются с беспорядочным смещением различных участков стеблей в вертикальном направлении и в направлении движения агрегата. Впущенные таким образом ленты льна довольно быстро подсыхают, однако после размотки рулона структурные параметры полученного слоя ухудшаются, и существенно снижается его пригодность к выделению длинного волокна. Другим недостатком серийных впусшивателей (ворошилок) является невысокая чистота подбора (от 90%)⁶.

Несмотря на низкое качество работы впусшивателей, большинство льноводов выбирают операцию впусшивания лент стеблей. Такое обстоятельство требует от ученых и конструкторов решения проблемы повышения эффективности процесса впусшивания.

Цель исследований: оценка влияния способов впусшивания на структурные параметры слоя стеблей и разработка рекомендаций для повышения эффективности процесса впусшивания.



Рис. 1. Ворошилка лент льна ВЛ-3

Fig. 1. Flax ribbon agitator VL-3

³ Яблоков А.А., Смирнов Н.А. Обзор впусшивателей лент льна // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: Материалы 60-й Международной научно-практической конференции. Кострома: КГСХА, 2009. Т. 3. С. 84-85.

⁴ Смирнов Н.А., Зинцов А.Н., Смирнов С.В., Соколов В.Н. Анализ работы ворошилок лент льна // Научное обеспечение производства прядильных культур: состояние, проблемы и перспективы: Сборник научных трудов. Тверь: Тверской государственный университет, 2018. С. 242-247. EDN: VUSHQJ.

⁵ Смирнов Н.А., Зинцов А.Н., Смирнов С.В., Соколов В.Н. Анализ работы ворошилок лент льна // Научное обеспечение производства прядильных культур: состояние, проблемы и перспективы: Сборник научных трудов. Тверь: Тверской государственный университет, 2018. С. 242-247. EDN: VUSHQJ.

⁶ Колчина Л.М., Крюков И.В. Технологии и технические средства для возделывания, уборки и первичной переработки льна-долгунца: Каталог-справочник. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2003. 132 с.

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели проанализировали инновационные технические разработки и результаты научных исследований, направленные на повышение эффективности вспушивания лент тресты льняной.

Разработанные белорусскими учеными и конструкторами инновационные вспушиватели В-1 (ПО «Бобруйскагромаш») и ТПЛ-1 (ПО «Гомсельмаш»)⁷ в отличие от существующих аналогов перемещают ленты стеблей над подбирающим барабаном с максимальным сохранением исходных структурных параметров слоя стеблей. Однако при повышенных скоростях движения эти вспушиватели допускают недостаточно высокую чистоту подбора (полноту вспушивания). Кроме того, вспушиватели В-1 и ТПЛ-1 выполнены по однопоточной схеме, что в совокупности с отмеченным недостатком приводит к заметному снижению их производительности.

Ученые Костромской ГСХА предложили схему нового двухпоточного вспушивателя лент льна [7, 8] с показателем кинематического режима работы, равным единице (патент № 2694887) [7]. В конструкции подбирающих аппаратов нового вспушивателя (патент № 2658387) [8, 9] подпружиненные подбирающие пальцы работают независимо друг от друга и совершают движения по специальной траектории. Совокупность новых технических решений должна уменьшить вероятность подгребания стеблевой массы в направлении движения агрегата, тем самым повышая пригодность вспушенного слоя стеблей к выделению длинного волокна трепанием. По заказу Минсельхоза России учеными Костромской ГСХА изготовлен опытный образец инновационного двухпоточного вспушивателя ВЛ-2К (рис. 2).

В 2022 г. на опытном поле Костромской ГСХА при участии ученых Федерального научного центра лубяных культур (г. Тверь) проведен сравнительный эксперимент с целью количественной оценки изменений структурных параметров стеблевого слоя под воздействием рабочих органов серийной ворошилки ВЛ-3 и опытной машины ВЛ-2К [10].

Согласно программе исследований был вытерблен лен льноуборочным комбайном ЛК-4А с расстилом стеблевой массы в ленту на поверхность льнища. Полученные ленты стеблей оставляли на три недели в поле для росистой вылежки и прорастания

травой. После завершения вылежки ленты готовой тресты вспушивали серийной и опытной машинами. Далее собирали первичную информацию об основных структурных параметрах слоя стеблей в исходной ленте до прохода агрегатов и после выполнения вспушивания. Наибольший интерес представляли изменения растянутости λ и перекосов α стеблей (угловой дезориентации) во вспушенных лентах. По данным А.М. Ипатова⁸, увеличение параметра λ на 0,3 м снижает пригодность слоя к выработке длинного волокна до 86%. Если же стебли в ленте перекошены с отклонениями от перпендикуляра к направлению движения агрегата до $\alpha = 45^\circ$, то пригодность такого слоя падает до 77%. Учеными установлено, что только за счет уменьшения растянутости и устранения перекосов стеблей в слое можно увеличить выход длинного волокна на 5 процентных пунктов⁹.

Для оценки влияния различных способов вспушивания на изменение растянутости стеблей в ленте отбирали по 10 горстей стеблей с каждой реализации до прохода агрегата и после вспушивания. В каждой горсти измеряли горстевую длину и среднюю длину стеблей. Увеличение растянутости стеблей в слое после вспушивания лент по отношению к растянутости в исходной ленте оценивали в процентных пунктах:

$$\Delta\lambda = \frac{h_b}{\bar{l}_{ст.}} 100 - \frac{h_{и}}{\bar{l}_{ст.}} 100,$$

где h_b , $h_{и}$ – горстевая длина стеблей во вспушенной и исходной лентах, м; $\bar{l}_{ст.}$ – средняя длина стеблей в горсти, м.



Рис. 2. Опытный образец инновационного двухпоточного вспушивателя ВЛ-2К

Fig. 2. Prototype of the innovative two-flow fluffer VL-2K

⁷ Колчина Л.М., Крюков И.В. Технологии и технические средства для возделывания, уборки и первичной переработки льна-долгунца: Каталог-справочник. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2003. 132 с.

⁸ Ипатов А.М. Теоретические основы механической обработки стеблей лубяных культур. М.: Легпромбытиздат, 1989.

⁹ Петраченко Д.А., Коропченко С.П. Влияние подготовительных операций в процессе формирования слоя на выход длинного волокна // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2014. № 5-6.

Количественную оценку угловой дезориентации стеблей α выполняли в сечениях ленты длиной $L = 200$ м с шагом дискретизации 0,5 м. Таким образом, получили 400 значений углов α . Перекосы стеблей $\alpha(L)$ оценивали по основным статистическим характеристикам: размаху R , математическому ожиданию m и среднему квадратическому отклонению σ .

Результаты и их обсуждение

Внешний вид лент тресты льняной, вспушенных серийной ворошилкой ВЛ-3 и опытным вспушивателем ВЛ-2К, представлен на рисунке 3.

В результате воздействий подбирающих зубьев ворошилки ВЛ-3 относительная растянутость стеблей в ленте возросла на 6,9 п.п. (табл. 1), что почти на 2 п.п. превышает допустимые значения для вспушивателей ($\Delta\lambda_{\text{доп.}} \leq 5$ п.п.). Опытный вспушиватель лент льна ВЛ-2К оказал минимальное влияние на изменение растянутости стеблей.

Результаты статистической обработки первичной информации об угловой дезориентации стеблей в исходной и вспушенных лентах представлены в таблице 2. При расчетах принимали во внимание допуски на перекосы стеблей в лентах при работе льноуборочных машин. Агротехнические требования к работе льноуборочных комбайнов допускают максимальные значения перекоса относительно перпендикуляра к направлению движения агрегата $\alpha_{\text{доп.}} \leq 20^\circ$, а для вспушивателей – $\alpha_{\text{доп.}} \leq 8^\circ$. Таким образом, суммарный перекос стеблей в ленте, сформированной льноуборочным комбайном, после работы вспушивателей не должен превышать $\Sigma\alpha_{\text{доп.}} \leq 28^\circ$.

Анализ полученных результатов показал, что во всех вариантах значения математических ожиданий не превышают агротехнического допуска $m_\alpha \leq 28^\circ$. Вместе с тем, с учетом возможного расширения диапазона рассеивания значений относительно математического ожидания m_α на величину $+3\sigma_\alpha$



Рис. 3. Вспушенные ленты тресты льняной:
I – ленты тресты после работы серийной ворошилкой ВЛ-3; II – ленты тресты после работы опытного вспушивателя ВЛ-2К

Fig. 3. Fluffed flax stem ribbons:
I – flax stem ribbons after operation of the VL-3 serial trowel;
II – flax stem ribbons after the operation of the experimental VL-2K fluffer

Относительная растянутость стеблей

Таблица 1
Table 1

Вариант агрегата	Растянутость стеблей в ленте, %		
	до вспушивания	после вспушивания	$\Delta\lambda$, п.п.
Серийная ворошилка ВЛ-3	140,7	147,6	6,9
Образец вспушивателя ВЛ-2К	138,1	138,9	0,8

Таблица 2
Статистические характеристики угловой дезориентации стеблей $\alpha(L)$, град.

Table2

Statistical characteristics of the angular disorientation of stems $\alpha(L)$, degree			
Вариант	Размах, R	Математическое ожидание, m_α	Среднее квадратическое отклонение, σ_α
Исходный (до вспушивания)-	25,2	10,13	5,72
ВЛ-3	39,0	16,12	9,41
ВЛ-2К	28,3	11,17	5,77

за пределами допуска оказывается угловая дезориентация стеблей, произведенная серийной ворошилкой ВЛ-3, с вероятностью нарушения агротребований $P(> 28^\circ) = 0,21$ [10]. При этом вероятность такого перекашивания стеблей опытным вспушивателем ВЛ-2К составила всего $P(> 28^\circ) = 0,004$, и нарушение суммарного допуска новой машиной можно отнести к категории невозможных событий.

Несмотря на то, что инновационная машина ВЛ-2К сохраняет исходные значения растянутости и перекосов стеблей во вспушенной ленте, пригодность слоя к выделению длинного волокна после вспушивания все-таки понижается, поскольку структурные параметры стеблевого слоя не улучшаются. Кроме того, в реальных производственных условиях¹⁰ и во время проведения опытов значения растянутости стеблей в исходных лентах существенно превышают допустимые значения агротехнических требований к работе льноуборочного комбайна $\lambda_{\text{доп.}} \leq 120\%$ (табл. 1), и после обработки вспушивателями данный параметр не улучшается. При этом перекосы стеблей во всех вариантах также близки к предельным значениям, что в совокупности с избыточной растянутостью заметно снижает вероятность выделения длинного волокна. Поэтому для повышения выхода длинного волокна недостаточно сохранить исходные структурные параметры слоя стеблей во вспушенных лентах – необходимо изыскать пути снижения растянутости и перекосов стеблей при выполнении операции вспушивания лент.

Известно, что избыточную растянутость или продольный сдвиг стеблей в слое (ленте) можно устранить комлеподбиванием, то есть путем нанесения ударов плоской поверхностью по комлям стеблей в направлении их осей [11]. При этом максимальный эффект может иметь только прямой удар, у которого вектор силы сонаправлен осям стеблей. Поскольку в указанном направлении слой стеблей обладает слабым сопротивлением деформации, то в данном случае удар можно считать неупругим с коэффициентом восстановления $k \rightarrow 0$. Это означает, что подавляющая часть кинетической энергии такого воздействия будет расходоваться на преодоление сопротивлений продольному смещению стеблей в слое относительно друг друга, то есть на уменьшение растянутости. Эта энергия будет затрачена на выполнение полезной работы. Такое состояние слоя представляет собой идеальный вариант (рис. 4а): все стебли параллельны друг другу и расположены перпендикулярно направлению движения льноуборочного агрегата, а их перекосы отсутствуют ($\alpha = 0$). Известно также [12], что в реальных производственных условиях до 10% разостланных лент льна имеют различные дефекты, половина из которых характеризуется перекосами α стеблей более 20° (рис. 4б).

При появлении отклонений α стеблей в ленте от перпендикуляра к направлению движения агрегата удар становится косым ($\alpha \neq 0$). В таком случае вектор силы косого удара относительно осей стеблей приобретает вторую составляющую, направленную перпендикулярно этим осям, что увеличивает

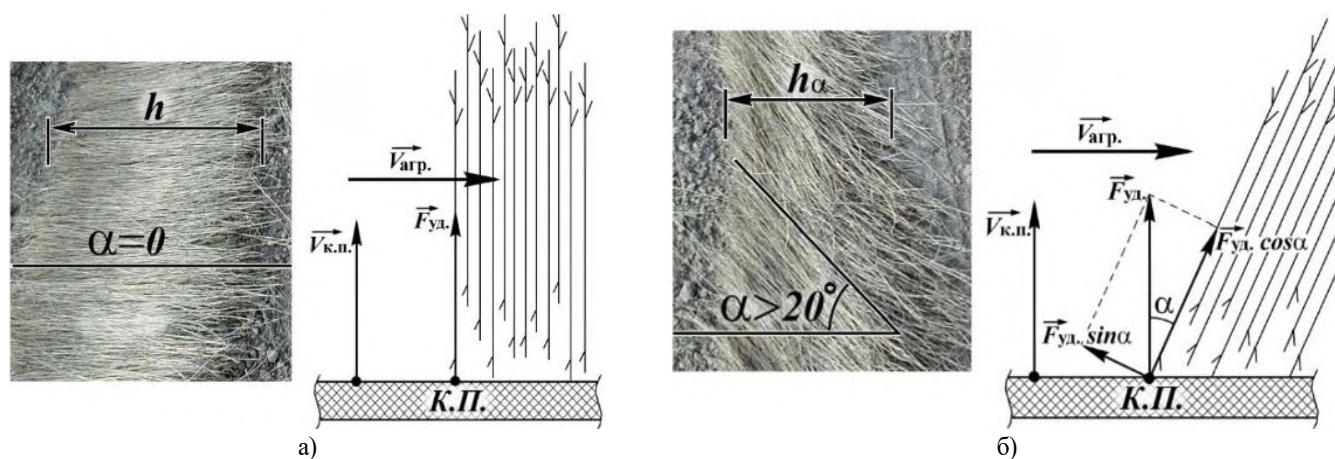


Рис. 4. Схемы комлеподбивания стеблей в ленте:

а) стебли параллельны друг другу и расположены перпендикулярно направлению движения агрегата; б) перекося стеблей $\alpha > 20^\circ$; $V_{\text{агр.}}$ – скорость агрегата; $V_{\text{к.п.}}$ – скорость комлеподбивающей поверхности; $F_{\text{уд.}}$ – сила удара; К.П. – комлеподбивающая поверхность

Fig. 4. Diagrams of stem butt-end beating in the ribbon:

stems are parallel to each other and located perpendicular to the direction of the unit movement; б) distortion α of the stems is more than 20° ; $V_{\text{агр.}}$ – speed of the unit; $V_{\text{к.п.}}$ – speed of the crushing surface; $F_{\text{уд.}}$ – force of impact; К.П. – crushing surface

¹⁰ Лурье А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1981. 382 с.

перекос и повреждение стеблей в слое. Величина перпендикулярной составляющей силы пропорциональна $\sin \alpha$. Эта часть кинетической энергии удара будет затрачена на выполнение вредной работы, и эффективность силы удара в направлении осей стеблей снизится пропорционально $\cos \alpha$ (рис. 4б).

Поскольку возможность устранения избыточной растянутости зависит от степени угловой дезориентации стеблей, то необходимо соблюдать очередность воздействий: в первую очередь исправить имеющиеся перекосы стеблей, а потом устранять избыточную растянутость слоя. Для профилактики образования перекосов стеблей в исходных лентах в льноуборочных машинах применяют различные устройства для принудительного расстила стеблевой массы⁹ [12-15].

Необходимость устранения перекосов стеблей продиктована также тремя важными аспектами. Во-первых, агротехнические требования допускают отклонения стеблей в ленте от нормали к направлению движения агрегата на угол не больше 20° . В основу такого ограничения положено значение коэффициента трения скольжения сухих стеблей по металлической поверхности пальцев $\mu = 0,38$ ¹¹, что соответствует углу их трения $\varphi = 20,8^\circ$. Поэтому при работе льноподборщиков на лентах с параметром $\alpha > \varphi$ подбирающие пальцы в месте контакта с перекошенными стеблями начнут скользить по их поверхности в осевом направлении. Такое взаимодействие еще больше усилит перекос стеблей и увеличит их потери на поле. Во-вторых, любые перекосы стеблей уменьшают ширину ленты с величины h до h_α (рис. 4 а, б), что повышает вероятность «промахов» или случайных отклонений подбирающего аппарата от ленты

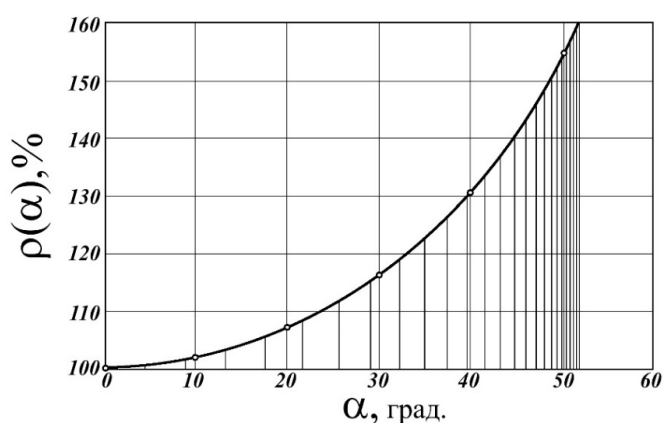


Рис. 5. Зависимость плотности ρ стеблевой массы от угла α

Fig. 5. Relationship between the density ρ of the stem mass and the angle α

¹¹ Ковалев Н.Г., Хайлис Г.А., Ковалев М.М. Сельскохозяйственные материалы (виды, состав, свойства) // Журнал «Аграрная наука». М.: ИК «Родник», 1998. 208 с.

стеблей льна в горизонтальной плоскости, причем размер «мишени» для льноподборщиков уменьшается по закону косинуса: $h_\alpha = h \cdot \cos \alpha$. В-третьих, увеличение перекоса стеблей вызывает прогрессивное уплотнение стеблевой массы (ρ) (рис. 5). При этом количество стеблей на единице площади ленты и размер «мишени» связаны обратно пропорциональной зависимостью, шт/м² ленты:

$$\rho(h_\alpha) = \frac{n}{L_k \cdot h_\alpha},$$

где n — количество растений на контрольном отрезке ленты, шт.; L_k — длина контрольного отрезка, м.

Прогрессивный характер зависимости $\rho(\alpha)$ наглядно демонстрирует негативное влияние перекосов на плотность ленты. При увеличении перекоса α в пределах агротехнических требований с 0 до 20° плотность ленты возрастает на 6,4%, а при 50° — более чем в 1,5 раза. Повышенная плотность ленты льна затрудняет движение воздуха между стеблями и препятствует проникновению солнечного света внутрь слоя растений. В таких условиях волокнистая продукция заметно теряет свое качество от избытка влаги и чрезмерной активности процессов гниения.

На основе анализа полученных результатов выделим следующие рекомендации для повышения эффективности вспушивания лент льна:

- ленту стеблей льна при вспушивании следует перемещать над подбирающим барабаном с показателем кинематического режима его работы, равным единице, для уменьшения вероятности подгребания стеблей с перекосом;
- пальцы подбирающего барабана вспушивателя должны свободно выходить из вспушенной ленты под действием беговой дорожки, что также исключает смещение различных участков стеблей в направлении движения агрегата;
- для уменьшения растянутости стеблей в ленте необходимо выполнять комлеподбивание во вспушенном слое стеблей;
- для повышения эффективности комлеподбивания следует предварительно уменьшать перекосы стеблей в ленте;
- для профилактики образования перекосов стеблей в исходных лентах при организации уборочных работ следует отдавать предпочтение льноуборочным машинам, выполняющим расстил лент льна принудительно и максимально близко к поверхности поля [12].

Выводы

1. Современные вспушиватели ухудшают растянутость и дезориентацию стеблей в ленте, отвечающих

за пригодность слоя к выделению длинного волокна при переработке тресты на льнозаводе.

2. При работе серийной ворошилки ВЛН-3 увеличивается относительная растянутость стеблей в ленте $\Delta\lambda$ на 6,9 п.п. и усиливается дезориентация стеблей с вероятностью нарушения агротребований $P(>28^\circ) = 0,21$. Конструкция разработанной инновационной машины ВЛ-2К позволяет максимально сохранить исходные значения основных структурных параметров стеблевого слоя с показателями $\Delta\lambda = 0,8$ п.п. и $P(>28^\circ) = 0,004$.

3. Для повышения выхода длинного волокна необходимо сначала исправить имеющиеся перекосы,

а потом устранять избыточную растянутость стеблей в слое. Для профилактики образования перекосов стеблей в лентах целесообразно в льноуборочных машинах применять устройства для принудительного расстила стеблевой массы, ленту стеблей льна перемещать над подбирающим барабаном с показателем кинематического режима его работы, равным единице. При этом пальцы подбирающих барабанов должны иметь пружинное исполнение, работать независимо друг от друга и двигаться по особой траектории. Растянутость стеблей в слое можно снизить комбеподбиванием.

Список источников

1. Akin D.E. Linen most useful: Perspectives on structure, chemistry, and enzymes for retting flax. *International Scholarly Research Notices*. 2013;2013:186534. PMID: 25969769
2. Ростовцев Р.А., Черников В.Г., Ушаповский И.В., Попов Р.А. Основные проблемы научного обеспечения льноводства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14, № 3. С. 45-52. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52>
3. Ковалев М.М., Перов Г.А., Перов М.Г. Интенсификация процесса вспушивания лент льна // *Техника и оборудование для села*. 2015. № 12. С. 24-29. EDN: VCQHAN
4. Mańkowski J., Maksymiuk W., Spychalski G. et al. Research on new technology of fiber flax harvesting. *Journal of Natural Fibers*. 2018;15(1):53-61. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1302390>
5. Зинцов А.Н., Билан М.М. О необходимости совершенствования процесса вспушивания лент тресты льняной // *Аграрный вестник Нечерноземья*. 2022. № 2. С. 38-44. EDN: BASIXY
6. Цветков А.О., Смирнов Н.А. Анализ работы вспушивателей лент тресты льняной // *Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии*. 2016. № 85. С. 132-136. EDN: WLDRWT
7. Вспушиватель лент льна: Патент № 2694887 Российская Федерация, МПК A01D45/06 / Н.А. Смирнов, В.Н. Соколов, А.А. Яблоков, С.В. Смирнов; заявл. 22.12.2016; опубл. 18.07.2019; Бюл. № 20. EDN: RRSNRH
8. Подбирающий аппарат для стеблей сельскохозяйственных культур: Патент № 2658387 Российская Федерация, МПК A01D89/00 / Н.А. Смирнов, В.Н. Соколов, С.В. Смирнов; заявл. 14.02.2017; опубл. 21.06.2018; Бюл. № 18. EDN: AABYRY
9. Зинцов А.Н., Соколов В.Н. Новый процесс вспушивания лент льнотресты // *Тракторы и сельхозмашины*. 2020. № 6. С. 91-100. EDN: YONHPV
10. Зинцов А.Н., Ковалев М.М., Перов Г.А. и др. Влияние процессов вспушивания ленты стеблей льна на структурные параметры слоя // *Инженерные технологии и системы*. 2023. Т. 33, № 4. С. 542-557. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.542-557>
11. Зинцов А.Н., Ковалев М.М., Перов Г.А. Вероятностная модель кинематики устройства для уменьшения растянутости стеблей льна-долгунца в ленте // *Инженерные технологии и системы*. 2022. Т. 32, № 1. С. 126-144. EDN: LFNKCT
12. Зинцов А.Н., Билан М.М., Добрецов В.А. Исследование и профилактика дефектов лент льна-долгунца // *Аграрный вестник Нечерноземья*. 2022. № 3. С. 56-63. EDN: OSGWED

References

1. Akin D.E. Linen Most Useful: Perspectives on Structure, Chemistry, and Enzymes for Retting Flax. *International Scholarly Research Notices*. 2013;2013:186534. PMID: 25969769
2. Rostovtsev R.A., Chernikov V.G., Ushchapovsky I.V., Popov R.A. The main problems of scientific support of flax growing. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(3):45-52. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52>
3. Kovalev M.M., Perov G.A., Perov M.G. Intensification of flax strips fluffing process. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2015;12:24-29. (In Russ.)
4. Mańkowski J., Maksymiuk W., Spychalski G. et al. Research on new technology of fiber flax harvesting. *Journal of Natural Fibers*. 2018;15(1):53-61. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1302390>
5. Zintsov A.N., Bilan M.M. On the need to improve the process of fluffing flax linen ribbons. *Agrarian Bulletin of the Non-Chernozem Area*. 2022;2:38-44. (In Russ.)
6. Tsvetkov A.O., Smirnov N.A. Analysis of operation of a fluffer of flax ribbons. *Trudy Kostromskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2016;85:132-136. (In Russ.)
7. Smirnov N.A., Sokolov V.N., Yablokov A.A., Smirnov S.V. Flutter of flax tapes: Patent, No. 2694887 Russian Federation, IPC A01D45/06 (2006.01); applied on December 22, 2016; issued on July 18, 2019. (In Russ.)
8. Smirnov N.A., Sokolov V.N., Smirnov S.V. Picking apparatus for stems of crops: Patent, No. 2658387 Russian Federation, IPC A01D89/00 (2006.01); applied on February 14, 2017; issued on June 21, 2018. (In Russ.)
9. Zintsov A.N., Sokolov V.N. New process for fluffing rotted straw. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2020;6:91-100. (In Russ.)
10. Zintsov A.N., Kovalev M.M., Perov G.A. et al. Influence of the processes of fluffing the flax stem strips on the structural parameters of the layer. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(4):542-557. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.542-557>
11. Zintsov A.N., Kovalev M.M., Perov G.A. Probabilistic model of the kinematics of the device for reducing elongation of flax fiber stems in the tape. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(1):126-144. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.126-144>
12. Zintsov A.N., Bilan M.M., Dobretsov V.A. Investigation and prevention of defects in flax tapes annotation. *Agrarian Bulletin of the Non-Chernozem Area*. 2022;3:56-63. (In Russ.)
13. Zubanov V.V., Zintsov A.N., Kovalev M.M., Smirnov N.A., Sokolov V.N. Apparatus for forced spreading of flax strip

13. Устройство для принудительного расстила ленты к льноуборочным машинам: Патент № 2193301 Российская Федерация, МПК A0145/06 / В.В. Зубанов, А.Н. Зинцов, М.М. Ковалев, Н.А. Смирнов, В.Н. Соколов; заявл. 19.07.1999; опубл. 27.11.2002; Бюл. № 33. EDN: LASIZC

14. Устройство для перемещения ленты растений: Патент № 2221361 Российская Федерация, МПК A0145/06 / Н.А. Смирнов, А.Н. Зинцов, В.Н. Соколов; заявл. 03.01.2002; опубл. 20.01.2004; Бюл. № 2. EDN: ZOCONN

15. Расстилочное устройство к льноуборочным машинам: Патент № 2834953 Российская Федерация, МПК A0145/06 / А.Н. Зинцов; заявл. 10.01.2024; опубл. 19.02.2025; Бюл. № 5. EDN: GSXIMA

Информация об авторах

¹Зинцов Александр Николаевич, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой автомобилей, тракторов и технических систем; zintsov_a@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3443-2015>; SPIN-код: 2073-8846

²Ковалев Михаил Михайлович, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник; m.kovalev@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2424-4205>; SPIN-код: 6189-8619

³Перов Геннадий Анатольевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; g.perov@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>; SPIN-код: 4478-4991

⁴Шинкарев Владимир Игоревич, аспирант, кафедра автомобилей, тракторов и технических систем; Vladimir12321863@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0005-9902-3118>; SPIN-код: 1163-7054

^{1,4}Костромская государственная сельскохозяйственная академия; 156530, Российская Федерация, Костромская область, пос. Караваево, ул. Учебный городок, 34

^{2,3}Федеральный научный центр лубяных культур; 170041, Российская Федерация, г. Тверь, Комсомольский пр-т, 17/56

Вклад авторов

А.Н. Зинцов – концептуализация, руководство исследованиями, проведение исследований, формальный анализ, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование; М.М. Ковалев – методология и администрирование проекта; Г.А. Перов – проведение исследований, формальный анализ и верификация данных, создание черновика рукописи и ее редактирование; В.И. Шинкарев – проведение исследований, формальный анализ и верификация данных, создание черновика рукописи.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 12.03.2026, после рецензирования и доработки 02.06.2026; принята к публикации 03.07.2026

in flax harvester: Patent, No. 2193301 Russian Federation, IPC A0145/06 (2000.01); applied on July 19, 1999; issued on November 27, 2002. (In Russ.)

14. Smirnov N.A., Zintsov A.N., Sokolov V.N. Apparatus for transportation of plant tape: Patent, No. 2221361 Russian Federation, IPC A0145/06 (2000.01); applied on January 03, 2002; issued on January 20.01.2004. (In Russ.)

15. Zintsov A.N. Spreading device for flax harvesting machines: Patent, No. 2834953 Russian Federation, IPC A0145/06 (2006.01); applied on January 10, 2024; issued on February 19, 2025. (In Russ.)

Author Information

Aleksandr N. Zintsov¹, DSc (Eng), Associate Professor, Head of the Department of Automobiles, Tractors and Technical Systems; zintsov_a@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3443-2015>

Mikhail M. Kovalev², DSc (Eng), Professor, Chief Research Engineer; m.kovalev@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2424-4205>

Gennady A. Perov³, CSc (Eng), Lead Research Engineer; g.perov@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>

Vladimir I. Shinkarev⁴, postgraduate student, Department of Automobiles, Tractors and Technical Systems; Vladimir12321863@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0005-9902-3118>

^{1,4}Kostroma State Agricultural Academy; 156530, Russian Federation, Kostroma region, Karavaevo, Uchebny gorodok Str., 34.

^{2,3}Federal Scientific Center for Bast Crops; 17/56, Komsomolskiy Ave., Tver, 170041, Russian Federation

Author Contribution

A.N. Zintsov – conceptualization; research supervision; investigation; formal analysis; writing – review and editing of the manuscript; M.M. Kovalev – methodology; project administration; G.A. Perov – investigation; formal analysis; data curation; writing – original draft; V.I. Shinkarev – investigation; formal analysis; data curation; writing – original draft.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and are responsible for plagiarism.

Received 12.03.2026; Revised 02.06.2026; Accepted 03.07.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.363:636.086.5

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-51-58>**Дробилка пророщенного высушенного зерна:
конструктивные параметры и режимы работы****Ю.В. Саенко^{1✉}, В.Ю. Страхов², К.В. Казаков³**^{1,2,3} Белгородский ГАУ имени В.Я. Горина; п. Майский, Россия¹ yuriy311300@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2750-7090>² strakhov_vy@belgau.ru; <https://orcid.org/0009-0003-7559-3154>³ kazakov_kv@belgau.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9907-3936>

Аннотация. Измельченное пророщенное зерно целесообразно использовать в качестве витаминной добавки к кормам. Разработана дробилка пророщенного высушенного зерна с двумя соосно расположенными барабанами. Внешний барабан оснащен молотками, а внутренний – ножами. Исследования проведены с целью определения конструктивных параметров дробилки и оптимальных параметров режима ее работы для получения модуля помола зерна 1,2...1,3 мм. Измельченную массу из пророщенных высушенных зерен ячменя и пшеницы просеивали на расसेве У1-ЕРЛ. В результате просеивания массы ячменя получили 90,26% требуемой фракции, 9,6% недоизмельченной фракции и 0,14% потерь. После просеивания пророщенной пшеницы получили 92,19% требуемой фракции, 7,6% недоизмельченной фракции и 0,21% потерь. Полученный состав фракций частиц ячменя достигнут в результате пропускной способности дробилки 510...518 кг/ч; при измельчении пшеницы производительность дробилки достигала 520...535 кг/ч. В результате регрессионного моделирования установлены факторы, влияющие на модуль помола зерна. В частности, для достижения требуемого модуля помола зерна 1,2...1,3 мм необходимо обеспечить: частоту вращения внешнего барабана 2550...2580 мин⁻¹; диаметр внешнего барабана 0,6...0,62 м; толщину молотков 0,002...0,003 м; частоту вращения барабана с ножами 2820...2840 мин⁻¹; расстояние между ножами 0,012...0,014 м; угол заточки ножа 14...15 град. Полученные значения конструктивно-режимных параметров помогут в дальнейшем разработать агрегаты для измельчения неоднородных продуктов путем дробления и резания.

Ключевые слова: дробилка пророщенного высушенного зерна; пророщенное зерно; корм; дробилка; барабан; модуль помола; производительность дробилки; конструктивные параметры; частота вращения барабана

Для цитирования: Саенко Ю.В., Страхов В.Ю., Казаков К.В. Дробилка пророщенного высушенного зерна: конструктивные параметры и режимы работы // *Агроинженерия*. 2026. Т. 28, № 4. С. 51-58. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-51-58>

ORIGINAL ARTICLE

Sprouted dried grain crusher: design parameters and operating modes**Yu. V. Saenko^{1✉}, V. Yu. Strakhov², K. V. Kazakov³**^{1,2,3} Belgorod State Agrarian University named after V. Ya. Gorin; Mayskiy, Russia¹ yuriy311300@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2750-7090>² strakhov_vy@belgau.ru; <https://orcid.org/0009-0003-7559-3154>³ kazakov_kv@belgau.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9907-3936>

Abstract. The use of crushed sprouted grain as a vitamin-enriched feed supplement is highly advisable. The paper presents the design of a crusher for sprouted dried grain, featuring two coaxially arranged drums: an outer drum equipped with hammers and an inner drum fitted with knives. The study aimed to determine the crusher's optimal design and operational parameters to achieve a grain grinding module within the range of 1.2 to 1.3 mm. Experimental sieving of crushed sprouted dried barley and wheat was conducted using a U1-ERL sieving machine. For barley, the sieving yielded 90.26% of the target fraction, 9.6% of an under-ground fraction, and 0.14% material losses. For sprouted wheat, the corresponding values were 92.19%, 7.6%, and 0.21%, respectively. The desired particle size distribution for barley was attained at a crusher's throughput capacity of 510 to 518 kg/h, while wheat crushing showed a value of 520-535 kg/h. Through regression modeling, key factors affecting the grinding module were identified. To secure the required modulus of 1.2 to 1.3 mm, the following parameters should be maintained: outer drum speed of 2550 to 580 min⁻¹, outer drum diameter of 0.6 to 0.62 m, hammer thickness of 0.002 to 0.003 m,

knife spacing of 0.012 to 0.014 m, and knife sharpening angle of 14 to 15°. The derived design and operational values provide a useful reference for manufacturing units intended for crushing and cutting heterogeneous products.

Keywords: sprouted dried grain crusher; sprouted grain; feed; crusher; drum; grinding module; crusher performance; design parameters; drum speed

For citation: Saenko Yu.V., Strakhov V.Yu., Kazakov K.V. Sprouted dried grain crusher: design parameters and operating modes. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(4):51-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-51-58>

Введение

В современных свиноводческих и птицеводческих комплексах поголовью выдают витаминные добавки к кормам [1]. Перед отечественными производителями кормов стоит задача получения простой дешевой кормовой добавки из отечественного, широко распространенного сырья [2, 3]. Замечено, что зерно при проращивании обогащается питательными веществами, витаминами и ферментами. При проращивании зерна запускаются мощные биохимические процессы. Питательные вещества, находящиеся в составе зерна, расщепляются: в результате химических реакций сложные углеводы превращаются в простые сахара, белки – в аминокислоты, а жиры – в жирные кислоты. Питательные вещества переходят в легкоусвояемую форму [1, 3]. В связи с этим пророщенное зерно целесообразно использовать в качестве витаминной добавки к кормам.

Особенностью пророщенного зерна является высокая влажность (более 50%), поэтому его можно хранить в течение не более 2-3 ч. Чтобы продлить срок хранения пророщенного зерна, его необходимо высушить, а затем измельчить.

Измельчение зерна считается одной из основных технологических операций по подготовке кормов¹, влияющей на усвояемость кормов, привесы животных и в целом на рентабельность отрасли животноводства и птицеводства. При измельчении зерна основная задача заключается в разрушении наружной оболочки и обеспечении доступности питательных веществ для пищеварительных ферментов² животных [4]. Прочная наружная оболочка зерновки препятствует попаданию внутрь пищеварительных ферментов, поэтому часть зерна не переваривается. В соответствии с номами³ размер частиц комбикорма для свиней должен составлять 0,9...1,5 мм.

¹ Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. Л.: Колос, 1978. 560 с.

² Долгов И.А. Уборочные сельскохозяйственные машины (конструкция, теория, расчет). Ростов-на-Дону, 2003. 706 с. EDN: QKVYPX

³ Шейко И.П., Смирнов В.С. Свиноводство. Минск: Новое знание, 2005. 384 с. EDN: CZCIWQ

Цель исследований: определить конструктивные параметры дробилки и установить параметры режима работы для получения модуля помола зерна 1,2...1,3 мм.

Материалы и методы

В экспериментальной дробилке для измельчения пророщенного зерна (рис. 1) используются два вида рабочих органов: молотки и ножи (рис. 2) [5].

На внешнем барабане установлены молотки, а на внутреннем – ножи⁴. Подачу пророщенного



Рис. 1. Дробилка пророщенного высушенного зерна:

- 1 – камера измельчения; 2 – бункер центральный;
- 3 – бункер боковой; 4 – электродвигатель для привода барабана с молотками; 5, 10 – кожух;
- 6 – опора подшипниковая; 7 – остов;
- 8 – рукав для выгрузки; 9 – электродвигатель для привода барабана с ножами; 11 – передача ременная

Fig. 1. Sprouted dried grain crusher:

- 1 – grinding chamber; 2 – central hopper; 3 – side hopper;
- 4 – electric motor for driving a drum with hammers;
- 5, 10 – casing; 6 – bearing support; 7 – frame;
- 8 – discharge sleeve; 9 – electric motor for driving a drum with knives; 11 – belt drive

⁴ Трубилин Е.И. Машины для уборки сельскохозяйственных культур (конструкция, теория, расчет). 2-е изд., перераб. и доп. Краснодар: КГАУ, 2010. 325 с. EDN: VUMACT.

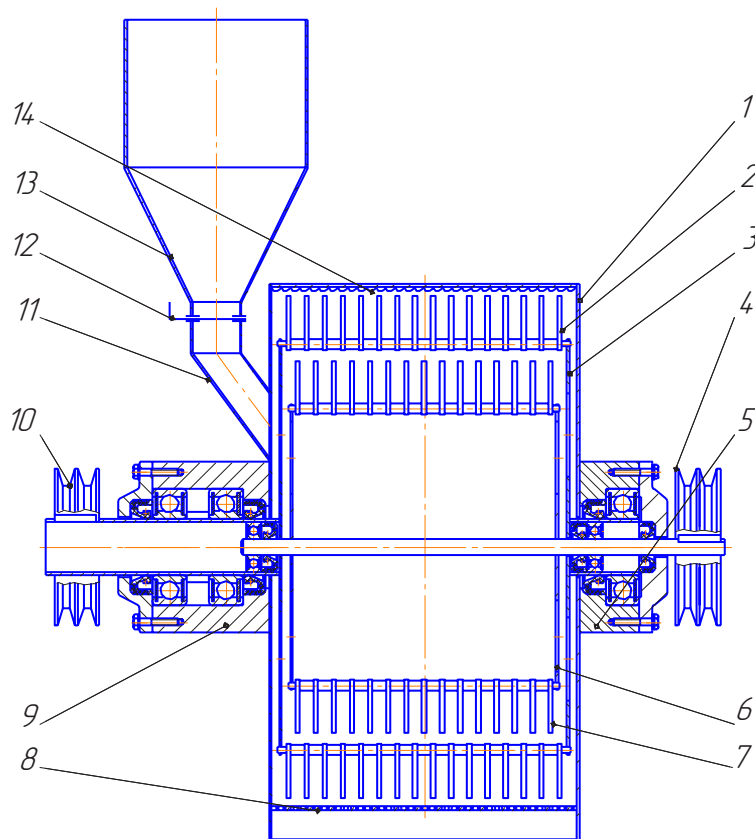


Рис. 2. Камера измельчения:

1 – корпус; 2 – молоток; 3 – барабан внешний; 4 – шкив внутреннего барабана; 5 – подшипниковый узел малый; 6 – барабан внутренний; 7 – нож; 8 – решето; 9 – подшипниковый узел большой; 10 – шкив внешнего барабана; 11 – горловина; 12 – заслонка; 13 – бункер; 14 – дека

Fig. 2. Grinding chamber:

1 – body; 2 – hammer; 3 – external drum; 4 – inner drum pulley; 5 – small bearing assembly; 6 – inner drum; 7 – knife; 8 – sieve; 9 – large bearing assembly; 10 – outer drum pulley; 11 – neck; 12 – flap; 13 – hopper; 14 – deck

зерна осуществляют через боковой бункер 3 в центр камеры измельчения 1 [6, 7].

В центре камеры измельчения масса пророщенного зерна вступает в механический контакт с барабанами 3 и 6. В большей степени масса контактирует с внутренним барабаном 6, на котором установлены ножи 7. В результате такого воздействия происходит отделение зерновки от ростка. При этом зерновке и ростку передается энергия, и они получают одинаковую начальную скорость, но имеют различные физические параметры, в том числе массу. Зерновка обладает большей массой по сравнению с ростком, поэтому имеет большую кинетическую энергию [7, 8]. В то же время зерновка имеет меньшее миделевое сечение по сравнению с ростком. Поэтому за единицу времени способна переместиться дальше от центра камеры измельчения в радиальном направлении. Росток, наоборот, перемещается на меньшее расстояние от центра камеры измельчения в радиальном направлении. Таким образом, получаются два потока, вращающиеся внутри камеры измельчения на разном расстоянии от центра и медленно

движущиеся по направлению к периферии. Измельчение ростков осуществляется ножами, а измельчение зерновок – молотками. После измельчения масса удаляется из камеры измельчения через решето. Предварительно экспериментально определили, что диаметр отверстий решета должен составлять 3 мм.

В качестве функции отклика использовали модуль помола [9, 10]. В результате предварительных экспериментов установлены факторы, влияющие на модуль помола зерна при работе внешнего барабана (табл. 1).

Экспериментально установили факторы, оказывающие влияние на модуль помола зерна при работе внутреннего барабана (табл. 2).

Методика определения крупности частиц. В расसेве У1-ЕРЛ по порядку снизу вверх установили решета с диаметром отверстий 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 мм. Сверху на верхнем решете размещена крышка, не допускающая, чтобы измельченная масса вышла за пределы решет в процессе вибрации. Навеску измельченного в дробилке пророщенного зерна массой 50 г помещали на верхнее решето и включали рассев

Таблица 1

Факторы, оказывающие воздействие на модуль помола пророщенного зерна при работе внешнего барабана

Table 1

Factors affecting the grinding module during the operation of the external drum

Фактор/Обозначение	Уровни варьирования факторов		
	-1	0	+1
Частота вращения барабана с молотками n_M , мин ⁻¹ / X_1	2000	2500	3000
Толщина молотка h_M , м / X_2	0,002	0,003	0,004
Диаметр барабана D_M , м / X_3	0,6	0,65	0,7

Таблица 2

Факторы, влияющие на модуль помола пророщенного зерна при работе внутреннего барабана

Table 2

Factors affecting the grinding module during the operation of the inner drum

Фактор/Обозначение	Уровни варьирования факторов		
	-1	0	+1
Угол заточки лезвия ножа γ_H , град. / X_1	10	20	30
Расстояние между ножами b_H , мм / X_2	7	14	21
Частота вращения барабана с ножами n_H , мин ⁻¹ / X_3	2000	2500	3000

на 12 мин. В процессе вибрации самая мелкая фракция проходит сквозь решета на тарелку 2, наиболее крупная остается на верхнем решете 7, на остальных решетах отсева остаются частицы в зависимости от своего размера (рис. 3). С учетом известной начальной массы навески и массы фракции с каждого решета определяли процентное соотношение каждой фракции и распределение массы по фракциям [8, 11].

Результаты и их обсуждение

В экспериментальной дробилке измельчали пророщенные высушенные зерна ячменя и пшеницы. Результаты просеивания (распределение по решетам) измельченного пророщенного ячменя изображены на рисунке 4, а пророщенной измельченной пшеницы – на рисунке 5.

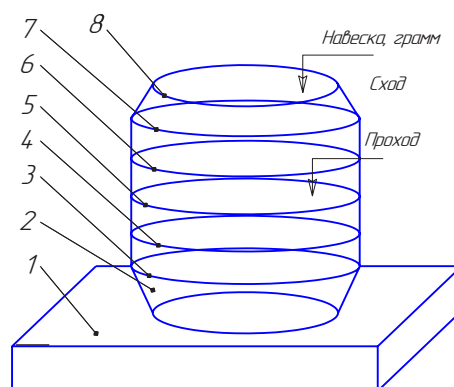


Рис. 3. Схема работы отсева:

1 – платформа; 2 – тарелка;
3, 4, 5, 6, 7 – решето; 8 – крышка

Fig. 3. Sieving operation diagram:

1 – platform; 2 – plate; 3, 4, 5, 6, 7 – sieve; 8 – lid

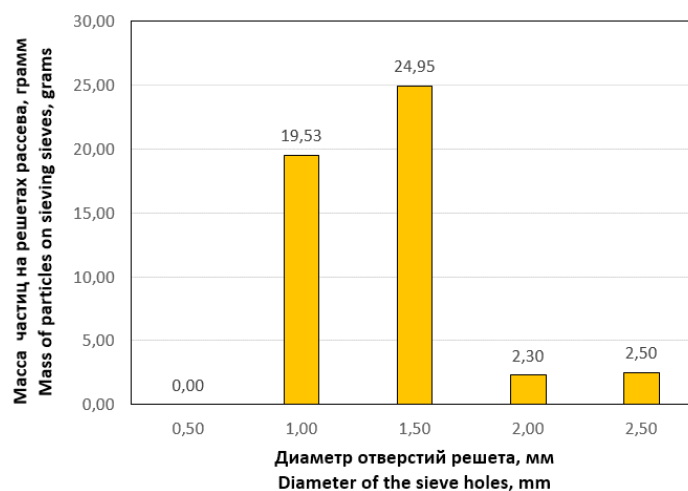


Рис. 4. Результаты просеивания массы измельченного пророщенного ячменя по решетам

Fig. 4. Results of sifting crushed sprouted barley by sieves

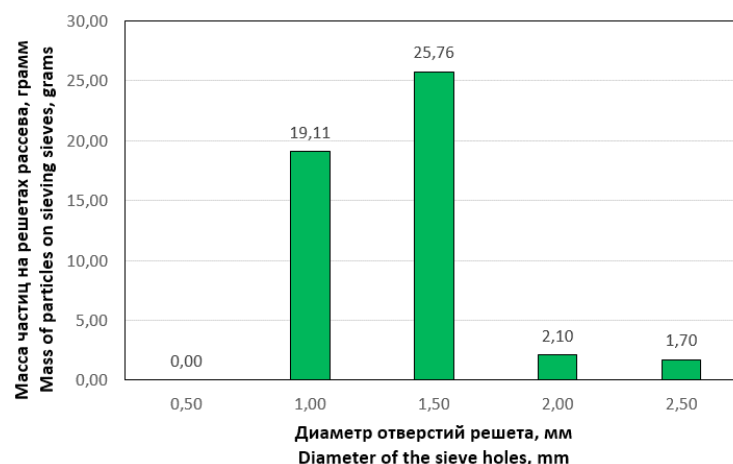


Рис. 5. Результаты просеивания массы измельченной пророщенной пшеницы по решетам

Fig. 5. Results of sifting crushed sprouted wheat by sieves

Анализируя данные рисунка 4, можно отметить, что 19,53 г пророщенного измельченного ячменя оказалось на решете с диаметром отверстий 1 мм, 24,95 г – на решете с диаметром отверстия 1,5 мм, что составило 90,26% от общей массы. Недоизмельченная фракция массой 4,8 г составила 9,6%. Потери составили около 0,14%.

Анализируя данные рисунка 5, отметим, что 19,11 г пророщенной измельченной пшеницы оказалось на решете с диаметром отверстий 1 мм, 25,76 г – на решете с диаметром отверстий 1,5 мм, что составило 92,19% от общей массы. Недоизмельченная фракция массой 3,8 г составила 7,6%, потери – около 0,21%.

В процессе разрушения зерна получают несколько фракций: рекомендуемые размеры, недоизмельченные, переизмельченные и потери. Для оценки конечного размера измельченных частиц руководствовались требованиями к кормам, предъявляемыми зоотехниками. Размер частиц⁵ должен находиться в интервале 0,9...1,5 мм. Содержание полученных фракций в измельченной массе ячменя и пшеницы отражено на рисунке 6.

Показанный на рисунке 6 состав фракций частиц ячменя получен в результате пропускной способности дробилки 510...518 кг/ч; в случае измельчения пшеницы производительность дробилки соответствовала 520...535 кг/ч.

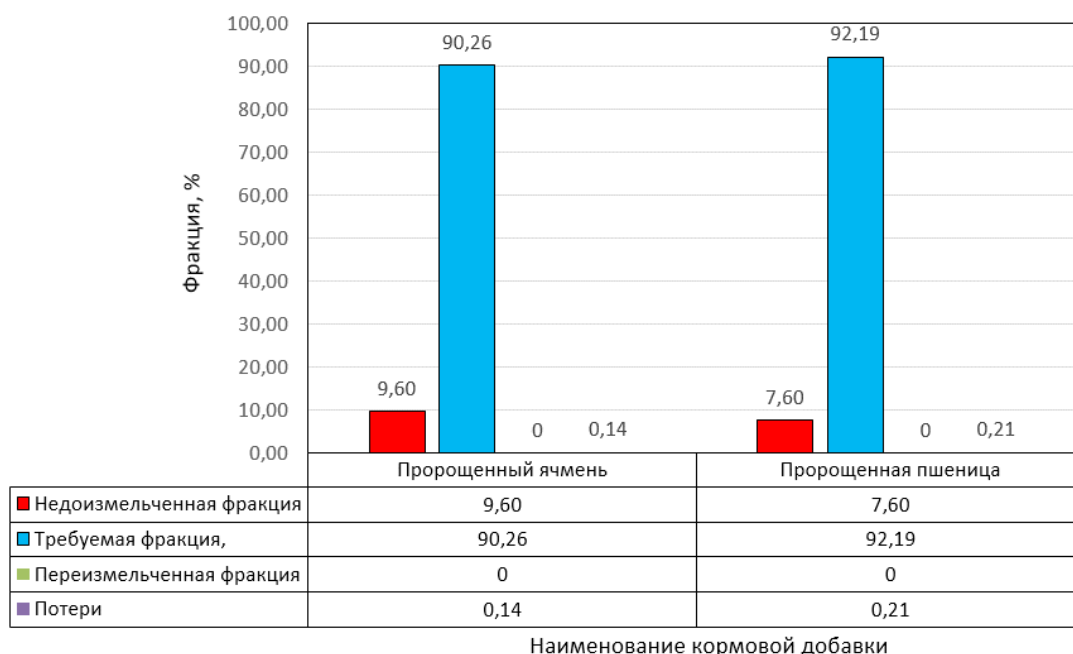


Рис. 6. Результаты просеивания измельченных частиц по фракциям

Fig. 6. Results of sieving the crushed particles into fractions

⁵ Шейко И.П., Смирнов В.С. Свиноводство. Минск: Новое знание, 2005. 384 с. EDN: CZCIWQ.

Конструктивные параметры дробилки определяли с учетом варьирования частоты вращения барабана с молотками (n_M), толщины молотка (h_M) и диаметра барабана (D_M). Получили модель, описывающую связь между указанными факторами, их влиянием на функцию отклика по завершении измельчения барабаном с молотками. Уравнение регрессии с коэффициентом корреляции $R = 87,27\%$ имеет следующий вид:

$$M_{M1} = -18,08 + 0,00069n_M + 9,97h_M + 0,569D_M + 0,0000002n_M^2 - 0,000279n_Mh_M - 0,0000649n_MD_M + 4,759h_M^2 - 0,149h_MD_M - 0,0029D_M^2. \quad (1)$$

Расчетное значение критерия Фишера 8,38 оказалось больше табличного значения 2,95, что подтверждает корректность предложенной модели и достоверность проведенных экспериментов^{6,7}.

Регрессионное моделирование уравнения (1) позволило установить необходимые параметры внешнего барабана для достижения модуля помола 1,2...1,3 мм: частоту вращения внешнего барабана (n_M) 2550...2580 мин⁻¹; диаметр внешнего барабана (D_M) 0,6...0,62 м, толщину молотков (h_M) 0,002...0,003 м.

Зависимость модуля помола зерна с учетом толщины молотков и частоты вращения барабана с молотками представлена на рисунке 7.

Согласно представленной на рисунке 7 зависимости достигнуть необходимый модуль помола 1,2...1,3 мм можно при использовании молотков

толщиной 2...3 мм и вращении внешнего барабана с частотой 2250...2670 мин⁻¹.

Определение конструктивных параметров дробилки выполняли также с учетом варьирования угла заточки лезвия ножа (γ_H), расстояния между ножами (b_H) и частоты вращения ножевого барабана (n_H).

Уравнение регрессии (2) с коэффициентом корреляции $R = 88,52\%$ показывает высокую корреляцию между влиянием отдельных факторов и их совокупным влиянием на функцию отклика:

$$M_{H2} = 1,0769 - 0,000849n_H + 0,0329b_H + 0,099\gamma_H + 0,0000002n_H^2 - 0,00000379\omega_b b_H - 0,0000169\omega_b \gamma_H - 0,00099b_H^2 - 0,00099b_H\gamma_H - 0,001099\gamma_H^2. \quad (2)$$

При верификации адекватности модели получили $F_p = 9,427 > F_{табл} = 2,95$, что подтверждает корректность предложенной модели и достоверность выполненных исследований.

В результате моделирования уравнения регрессии (2) определили показатели значимых параметров внутреннего барабана для получения модуля помола 1,2...1,3 мм: частота вращения барабана с ножами (n_H) – 2820...2840 мин⁻¹; расстояние между ножами (b_H) – 12...14 мм; угол заточки лезвия ножа (γ_H) соответствовал 14...15 град.

Изменение величины модуля помола в зависимости от частоты вращения барабана с ножами и угла заточки ножа изображено на рисунке 8.

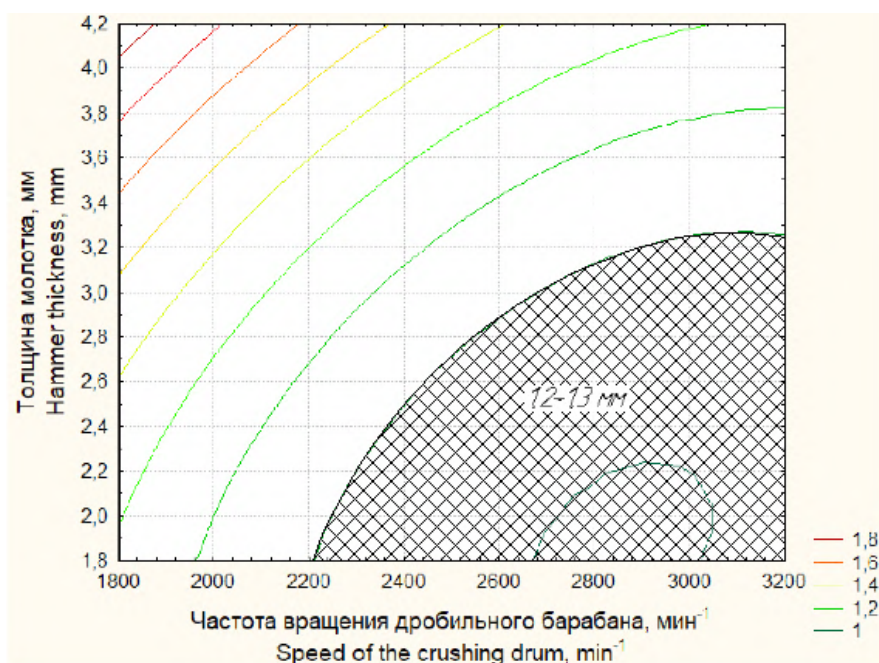


Рис. 7. Зависимость модуля помола зерна с учетом толщины молотков и частоты вращения барабана с молотками
Fig. 7. Relationship between the grain grinding module, the hammer thickness, and the speed of the drum with hammers

⁶ Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментальных исследований и обработка опытных данных. М.: Колос, 1976. 159 с.

⁷ Белокопытов В.И. Организация, планирование и обработка результатов эксперимента. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2020. 132 с

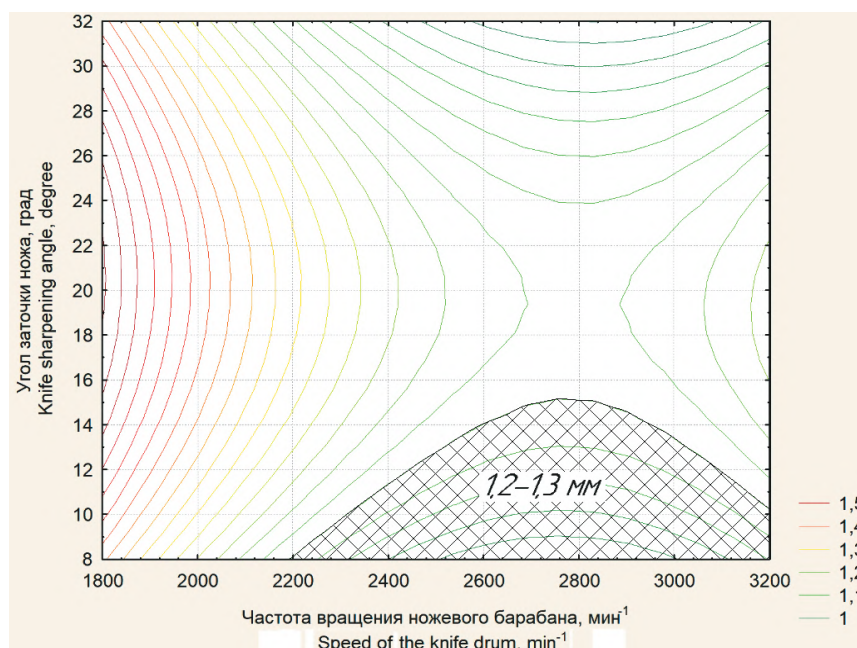


Рис. 8. Поверхность отклика модуля помола пророщенного зерна в зависимости от угла заточки ножа и частоты вращения ножевого барабана

Fig. 8. Response surface of the sprouted grain grinding module as a function of knife sharpening angle and drum speed

Согласно представленной на рисунке 8 зависимости оптимальные условия для достижения необходимого модуля помола 1,2...1,3 мм могут быть получены, если использовать нож с углом заточки лезвия 12...16 град., а частота вращения барабана с ножами составит 2200...3000 мин⁻¹.

Выводы

1. Размещение двух барабанов с ножами и молотками соосно в одной камере измельчения позволило измельчить пророщенное зерно размером 25...30 мм до требуемого размера частиц 1,2...1,3 мм. Такая конструкция позволила сократить габаритные размеры камеры измельчения и исключить затраты энергии на транспортировку измельчаемого продукта от одних рабочих органов до других.

Список источников

1. Мысик А.Т., Походня Г.С., Косов А.В. и др. Влияние скармливания высушенного пророщенного зерна ячменя свинкам на их воспроизводительную функцию // Зоотехния. 2023. № 4. С. 6-9. EDN: AIRBOV
2. Бахарев Г.Ф., Дролова Л.И., Емельянова Л.Н. Исследование процесса суточного проращивания зерна на корм животным // Достижение науки и техники. 2007. № 1. С. 30-31. EDN: IRGIYB
3. Походня Г.С., Вендин С.В., Саенко Ю.В. Апробация применения пророщенного зерна ячменя в рационах свиней // Зоотехния. 2019. № 12. С. 9-13. EDN: ZHFIFE
4. Вольвак С.Ф., Бахарев Д.Н., Вертий А.А., Корчагина Е.Е. Теоретическое обоснование затрат мощности на измельчение стебельчатых кормов измельчителем с шарнирно подвешенными комбинированными ножами // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2017. № 1. С. 23-32. EDN: WIADHR

2. При измельчении пророщенного ячменя в дробилке производительностью 510...518 кг/ч получили 90,26% требуемой фракции и 9,6% недоизмельченной фракции. Общие потери массы составили 0,14%.

3. При измельчении пророщенной пшеницы в дробилке производительностью 520...535 кг/ч получили 92,19% требуемой фракции и 7,6% недоизмельченной фракции. Общие потери массы составили 0,21%.

4. Для достижения требуемого модуля помола продукта 1,2...1,3 мм необходимо обеспечить частоту вращения внешнего барабана 2550...2580 мин⁻¹, диаметр внешнего барабана 0,6...0,62 м, толщину молотков 0,002...0,003 м; частоту вращения барабана с ножами 2820...2840 мин⁻¹, расстояние между ножами 0,012...0,014 м, угол заточки ножа 14...15 град.

References

1. Mysik A.T., Pokhodnya G.S., Kosov A.V. et al. The effect of feeding dried sprouted barley grain to sows on their reproductive function. *Zootekhnika*. 2023;4:6-9. (In Russ.) <https://doi.org/10.25708/ZT.2023.97.66.002>
2. Bakharev G.F., Drolova L.I., Yemelyanova L.N. Investigation of the process of daily germination of grain for animal feed. *Achievements of Science and Technology*. 2007;1:30-31. (In Russ.)
3. Pokhodnya G.S., Vendin S.V., Saenko Yu.V. Approbation of application of sprouted barley grain in pig diets. *Zootekhnika*. 2019;12:9-13. (In Russ.) <https://doi.org/10.25708/ZT.2019.11.28.003>
4. Volvak S.F., Bakharev D.N., Vertiy A.A. et al. Theoretical basis of costs for power feed grinding stalk shredders is pivotally suspended combined with knives. *Innovations in Agricultural Complex: Problems and Perspectives*. 2017;1:23-32. (In Russ.)
5. Vendin S.V., Saenko Yu.V., Kazakov K.V., Semernina M.A. Grinding plant of sprouted dried grains: Pat. 2692559

5. Дробилка пророщенного высушенного зерна: Патент № 2692559 Российская Федерация C1 МПК B02C13/00, B02C18/00, B02C9/00, B02C23/00, СПК B02C13/00, B02C18/00, B02C9/00, B02C23/00 / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, К.В. Казаков, М.А. Семернина; заявл. 09.10.2018, опубл. 25.06.2019. Бюл. № 18. 13 с. EDN: GEZPWL

6. Вендин С.В., Саенко Ю.В. Разработка средств механизации для измельчения пророщенного зерна на витаминный корм свиньям // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2017. № 3. С. 33-38. EDN: ZMJMFV

7. Саенко Ю.В., Семернина М.А., Страхов В.Ю. Обоснование конструктивных и режимных параметров дробилки с двумя типами рабочих органов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2025. Т. 18, № 3. С. 38-47. EDN: VICVVT

8. Вендин С.В., Саенко Ю.В. Разработка средств механизации для измельчения пророщенного зерна на витаминный корм свиньям // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2016. № 4. С. 61-66. EDN: WTRMJP

9. Гулевский В.А., Вертий А.А. Математическое моделирование работы измельчителя кормов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. № 3. С. 120-128. EDN: VMNUNQ

10. Гулевский В.А., Вертий А.А. Усовершенствование технологии измельчения грубых стебельчатых кормов измельчителем с шарнирно подвешенными комбинированными ножами // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2019. Т. 12, № 1. С. 73-81. EDN: XSKVXA

11. Искендеров Р.Р., Лебедев А.Т. Молотковые дробилки: достоинства и недостатки // Вестник АПК Ставрополя. 2015. № 1. С. 27-30. EDN: TXGEBB

Информация об авторах

¹Саенко Юрий Васильевич, д-р техн. наук, доцент, профессор инженерного факультета; yuriy311300@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2750-7090>; SPIN-код: 5264-5448

²Страхов Владимир Юрьевич, канд. техн. наук, старший преподаватель инженерного факультета; strakhov_vy@belgau.ru; <https://orcid.org/0009-0003-7559-3154>; SPIN-код: 4362-2616

³Казаков Константин Владимирович, канд. техн. наук, доцент, доцент инженерного факультета; kazakov_kv@belgau.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9907-3936>; SPIN-код: 2187-5543

^{1,2,3} Белгородский ГАУ имени В.Я. Горина; 308503, Россия, Белгородская область, Белгородский район, п. Майский, ул. Вавилова, 1

Вклад авторов

Саенко Ю.В. – методология, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

Страхов В.Ю. – создание черновика рукописи, проведение экспериментов, формальный анализ;

Казаков К.В. – визуализация.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 02.03.2026; после рецензирования и доработки 29.06.2026; принята к публикации 03.07.2026

Russian Federation C1 IPC B02C13/00, B02C18/00, B02C9/00, B02C23/00, SEC B02C13/00, B02C18/00, B02C9/00, B02C23/00. No. 2018135786, applied on 09.10.2018, issued on 25.06.2019. (In Russ.)

6. Vendin S.V., Saenko Yu.V. The development of germinated grains grinding mechanization tools for pigs' vitamin feed. *Vestnik vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*. 2017;3:33-38. (In Russ.)

7. Saenko Yu.V., Semernina M.A., Strakhov V.Yu. Justification of the design and operating parameters of a fodder grinder with two types of working bodies. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2025;18(3):38-47. (In Russ.) https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2025_3_38

8. Vendin S.V., Saenko Yu.V. Development of mechanization tools for grinding sprouted grain for vitamin feed for pigs. *Vestnik vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*. 2016;4:61-66. (In Russ.)

9. Gulevsky V.A., Vertiy A.A. Mathematical modeling of forage cutter operation. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2018;3:120-128. (In Russ.) <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2018.3.120>

10. Gulevsky V.A., Vertij A.A. Improvements of technology of rough stalk forage grinding by chopper equipped with free-swinging combined knives. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2019;12(1):73-81. (In Russ.) <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2019.1.73>

11. Iskenderov R.R., Lebedev A.T. Hammer crushers: advantages and disadvantages. *Agricultural Bulletin of Stavropol Region*. 2015;1:27-30. (In Russ.)

Author Information

Yury V. Saenko¹, DSc (Eng), Associate Professor, Professor of the Faculty of Engineering; yuriy311300@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2750-7090>

Vladimir Yu. Strakhov², CSc (Eng), Senior Lecturer, the Faculty of Engineering; strakhov_vy@belgau.ru; <https://orcid.org/0009-0003-7559-3154>

Konstantin V. Kazakov³, CSc (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Faculty of Engineering; kazakov_kv@belgau.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9907-3936>

^{1,2,3} Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin; 308503, Russia, Belgorod Region, Belgorod District, Maysky, Vavilova Str., 1

Author Contribution

Saenko Yu.V. – methodology; writing – review and editing of the manuscript;

Strakhov V.Yu. – writing – original draft; investigation; formal analysis;

Kazakov K.V. – visualization.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and are responsible for plagiarism

Received 02.03.2026; Revised 29.06.2026; Accepted 03.07.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.333.53

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-59-65>**Обоснование типа дозатора органических удобрений в виде пеллет для комбинированного почвообрабатывающего агрегата***М.С. Назаров*

Нижегородский государственный агротехнологический университет имени Л.Я. Флорентьева; г. Нижний Новгород, Россия
bulldogmix99@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0000-3524-6244>

Аннотация. Повысить эффективность возделывания картофеля можно с помощью фрезерного почвообрабатывающего агрегата с одновременным внесением органических удобрений в виде пеллет, но для этого нужен специализированный дозатор. Исследования проведены с целью определения типа и конструкции дозирующего устройства органического удобрения в виде пеллет для комбинированного почвообрабатывающего агрегата. Предварительные исследования дозаторов показали, что шнековый дозирующий аппарат по сравнению с катушечным вариантом более простой по конструкции и менее энергоемкий при использовании. Производительность спроектированного шнекового дозирующего аппарата определяли в стационарных условиях на стенде согласно ГОСТ 28714-2007. Исследовали пропускную способность пеллет при 9 частотах вращения вала дозатора. Средние значения по каждой частоте вращения дозирующего вала не превысили заданную неравномерность между повторностями. Установлена функциональная зависимость частоты вращения шнекового вала от заданной дозы и скорости движения фрезерного почвообрабатывающего агрегата. Полученная математическая функция и экспериментальные данные имеют удовлетворительные статистике согласованности, что позволяет использовать полученную зависимость при настройке агрегата к работе. Установлено, что спроектированный дозатор способен вносить под картофель необходимую максимальную дозу птичьего помета в виде пеллет 4 т/га при движении фрезерного почвообрабатывающего агрегата в пределах 5 км/ч. Других норм внесения удобрений можно добиться путем снижения частоты вращения шнекового вала дозатора. Дальнейшие исследования будут направлены на достижение равномерности внесения удобрений шнековым дозирующим аппаратом как по ширине захвата, так и по длине работы машины.

Ключевые слова: комбинированный почвообрабатывающий агрегат; дозатор; удобрение в виде пеллет; картофель; помет; вал шнековый; шнековый дозирующий аппарат; частота вращения шнекового вала

Для цитирования: Назаров М.С. Обоснование типа дозатора органических удобрений в виде пеллет для комбинированного почвообрабатывающего агрегата // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 4. С. 59-65.
<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-59-65>

ORIGINAL ARTICLE

On feasibility of a pelleted organic fertilizer dispenser for the tillage implement*M.S. Nazarov*

Nizhny Novgorod State Florentyev Agrotechnological University; Nizhny Novgorod, Russia
bulldogmix99@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0000-3524-6244>

Abstract. The efficiency of potato cultivation can be improved using a rotary tillage implement with simultaneous application of pelleted organic fertilizers. However, this requires a specialized dispenser. The study aimed to determine the type and design of a dispenser for pelleted organic fertilizer for a combined tillage implement. Preliminary research on dispensers showed that, as compared to the fluted-roller type, the auger-type dispenser is simpler in design and less energy-intensive to operate. The throughput capacity of the designed auger-type dispenser was determined under stationary conditions on a test bench in accordance with GOST 28714-2007. The flow rate of pellets was investigated at nine speeds of the dispenser shaft. The mean values for each speed did not exceed the specified variability between replicates. A functional relationship was established between the auger shaft speed and the specified application rate and forward speed of the rotary tillage implement. The obtained mathematical function and experimental data show satisfactory statistical consistency, allowing the derived relationship to be used for adjusting the implement prior to operation. It was established that the designed dispenser meets the required maximum application rate of pelleted poultry manure for potatoes of 4 t/ha when the rotary tillage implement operates within a forward speed of 5 km/h. Other fertilizer application rates can be achieved

by reducing the speed of the auger shaft. Further research will focus on achieving uniformity of fertilizer application by the auger-type dispenser, both across the working width and along the length of machine travel.

Keywords: combined tillage implement; dispenser; pelletized fertilizer; potato; poultry manure; auger shaft; auger-type dispenser; auger shaft speed

For citation: Nazarov M.S. On feasibility of a pelleted organic fertilizer dispenser for the tillage implement. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(4):59-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-59-65>

Введение

Нижегородская область является одним из регионов-лидеров по производству картофеля¹. В Приволжском федеральном округе к 1 октября 2025 г. было собрано 4,078 млн т картофеля, из них 352,3 тыс. т – в Нижегородской области².

Внесение удобрений под картофель является необходимым условием для получения высокого и качественного урожая во всех почвенно-климатических зонах страны. В условиях роста цен на минеральные удобрения и больших затрат на внесение органического удобрения (коровьего навоза) все более актуальным становится поиск альтернативных источников для восполнения и повышения почвенного плодородия и урожайности сельскохозяйственных культур. Таким источником могут быть удобрения, полученные путем переработки куриного помета. Например, органическое удобрение, полученное при термической обработке куриного помета, улучшает урожайность картофеля за счет увеличения доли крупных клубней, повышает содержание крахмала, витамина С и растворимых углеводов³. Множество компаний в России – таких, как «Биоорганика» (г. Казань), «Биогран» (г. Калуга), «СХП Арел» (г. Уфа) и другие, предлагают данные удобрения в виде пеллет.

Еще одним условием, обеспечивающим получение высоких урожаев картофеля, является создание мощного, рыхлого, хорошо аэрируемого пахотного слоя почвы. При обработке почвы улучшаются физические и химические свойства, уничтожаются сорняки, вредители, возбудители болезней, вносятся органические и минеральные удобрения. Обработка почвы под картофель дифференцируется в зависимости от почвенной

разности, мощности гумусового горизонта и видов сорняков. Многие исследователи отмечают, что фрезерование улучшает продуктивные свойства почвы [1] и влияет на урожайность картофеля [2-4].

Фрезерование можно использовать одновременно с внесением органических удобрений в виде пеллет, что положительно скажется на развитии картофеля. Анализ источников литературы показал⁴ [5-7], что для внесения пеллет отсутствуют специализированные машины, а следовательно, требуется разработка агрегата для выполнения данного процесса. В первую очередь требуется создание дозирующего устройства.

Цель исследований: обосновать тип дозирующего аппарата для комбинированного почвообрабатывающего агрегата с одновременным внесением органических удобрений в виде пеллет и определить его пропускную способность.

Материалы и методы

В результате исследований физико-механических свойств пеллет, в том числе аэродинамических [8], установили, что органическое удобрение в виде пеллет по физическим свойствам ближе к минеральным удобрениям, но значительно превышает размер частиц минеральных удобрений. Минеральные удобрения в основном вносят от 0,1 до 2,0 т на 1 га, а дозировка внесения пеллет варьируется в диапазоне от 2,8 до 4 т на 1 га⁵. Используемое оборудование, соответственно, не отвечает требованиям эффективного внесения пеллет.

На основе анализа аппаратов для дозирования, используемых в сеялках, культиваторах-растения-питателях и в других машинах [9-11], и результатов проделанных опытов [12] сделали вывод о том, что для дозирования пеллет в комбинированном агрегате больше подходит катушечный и шнековые высевальные аппараты. Изготовленные рабочие органы – прототипы высевальных аппаратов – представлены на рисунках 1, 2. Схема работы высевальных аппаратов представлена на рисунке 3.

⁴ Александров В.А., Козьмин С.Ф., Шоль Н.Р., Александров А.В. Механизация лесного хозяйства и садово-паркового строительства: Учебник. СПб.: Лань, 2025. 528 с.

⁵ Вильдфлуш И.Р. и др. Применение органических удобрений в интенсивном земледелии: Рекомендации. Горки: БГСХА, 2015. 50 с.

¹ Картофелеводство Нижегородской области // Картофельная Система: Электронный журнал. 2020. 6 июня. URL: <https://potatosystem.ru/kartofelevodstvo-nizhegorodskoj-oblasti/> (дата обращения: 22.07.2025).

² Орехова Е. Где больше всего в РФ собрали картофеля в организованном секторе к 1 октября // Агроэксперт: Сайт делового федерального СМИ. 2025. 21 октября. URL: <https://agroexpert.press/rasteniya/kartofelya-v-rf-v-organizovanom-sektore-k-1-oktyabrya-nakopano-pochti-58-mln-tonn-ross-tat/> (дата обращения: 24.02.2025).

³ Молодые исследователи агропромышленного и лесного комплексов – регионам: Учебное пособие. Т. 3. Биологические науки. Вологда: ВГМХА им. Н.В. Верещагина, 2021. Ч. 1. 343 с.



Рис. 1. Вал шнековый

Fig. 1. Auger shaft



Рис. 2. Вал катушечный

Fig. 2. Roller shaft

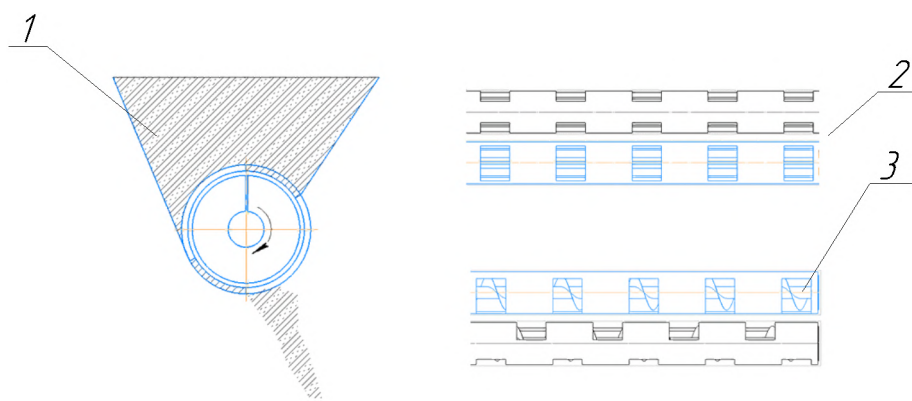


Рис. 3. Схема дозатора:

1 – расположение бункера и дозирующего механизма;
2 – катушечный дозирующий механизм; 3 – шнековый дозирующий механизм

Fig. 3. Dispenser diagram:

1 – position of the hopper and the dispenser; 2 – roller-type dispenser; 3 – auger-type dispenser

Результаты и их обсуждение

Для оценки энергетической эффективности определили значение крутящего момента на валу высевающего аппарата. Установили, что при повороте вала шнекового аппарата крутящий момент был практически в 4 раза меньше, чем у катушечного аппарата. При испытании дозирующего катушечного аппарата существенное влияние оказывал активный слой удобрения (пеллет), захватываемый при вращении катушек. Из этого можно сделать вывод о том, что повышение крутящего момента при работе дозатора требует увеличения металлоемкости, а следовательно, усложнения его конструкции.

В шнековом аппарате наблюдается режим скользящего резания при ограничении порции удобрений. Винтовая поверхность шнека выступает в роли лезвия, движущегося по материалу не перпендикулярно

собственной режущей кромке, а под определенным углом, что обеспечивает проскальзывание лезвия вдоль поверхности разрезаемого материала и в большей степени проталкивает удобрение (пеллеты), чем их перерезает. Данный эффект использовали при проектировании загрузочного окна шнекового аппарата. Загрузочное окно, выполненное в виде щели, расположено по всей длине конструкции. Ширина щели определена из условия отсутствия сводообразования при питании дозатора⁶. В результате выбрали шнековый дозирующий аппарат. Новизна конструктивного решения подтверждена патентом на полезную модель № 241846 «Аппарат для дозирования твердых сухих органических удобрений».

⁶Зенков Р.Л., Гриневич Г.П., Исаев В.С. Бункерные устройства. Москва: Машиностроение, 1977. 223 с.

Спроектированный аппарат для дозирования твердых сухих органических удобрений в виде пеллет (рис. 4) состоит из бункера 1, включающего в себя обойму 4, образованную круглой трубой с единым продольным загрузочным окном 2 с одной стороны и пятью выгрузными окнами прямоугольного сечения 6 – с противоположной. Окна расположены равномерно вдоль выходной рабочей зоны обоймы. Внутри обоймы установлен винтовой вращающийся вал 3 и шесть вертикальных круглых ограничительных шайб 5, размещенных на одинаковом расстоянии друг от друга по внутренним границам правых поперечных кромок выгрузных окон 6. Крайняя левая ограничительная шайба размещена во внутреннем закрытом пространстве обоймы.

Ограничительные шайбы 5 позволили получить приемлемую равномерность высева по выгрузным окнам. Без них существенная доля удобрений выходила из последнего окна по ходу вращения шнека, в первом же окне высев был незначительным. По конструкционным соображениям ширина захвата разработанного нами бункера составила 1 м.

Пропускную способность дозирующего аппарата определили в соответствии с прокручиванием подающих рабочих органов на стенде⁷. В качестве минимального времени измерения приняли 1 мин (по ГОСТ 28714-2007 – не менее 30 с). Испытания проводили на максимальной, минимальной и нескольких промежуточных частотах вращения вала дозатора. Результаты девяти опытов представлены в таблице 1.

Пропускная способность (табл. 1) дает представление только о производительности дозатора

в зависимости от скорости вращения шнекового вала. На практике при внесении удобрений необходимо оперировать понятием нормы внесения удобрений на 1 га (кг/га или т/га). В связи с этим необходимо выявить зависимость дозы внесения удобрений (т/га) от скорости движения агрегата и частоты вращения вала дозатора при работе комбинированного почвообрабатывающего агрегата с одновременным внесением удобрений.

Компоновочное решение (вид спереди) данной машины представлено на рисунке 5. В качестве базовой машины выбрана фреза для трактора тягового класса 1,4 кН рабочей шириной захвата 2 м (1GQN-200 УРАЛЕЦ), соответственно на ней располагаются два дозирующих аппарата с бункерами. Предлагаемый

Таблица 1
Пропускная способность пеллет шнековым дозирующим аппаратом

Table 1
Pellet-carrying capacity in the auger-type dispenser

Частота вращения шнекового вала n , мин ⁻¹	Пропускная способность q , кг/(мин м)
739	33,70
603	34,15
505	34,15
392	30,40
375	30,00
302	28,30
194	23,20
115	15,65
36	6,25

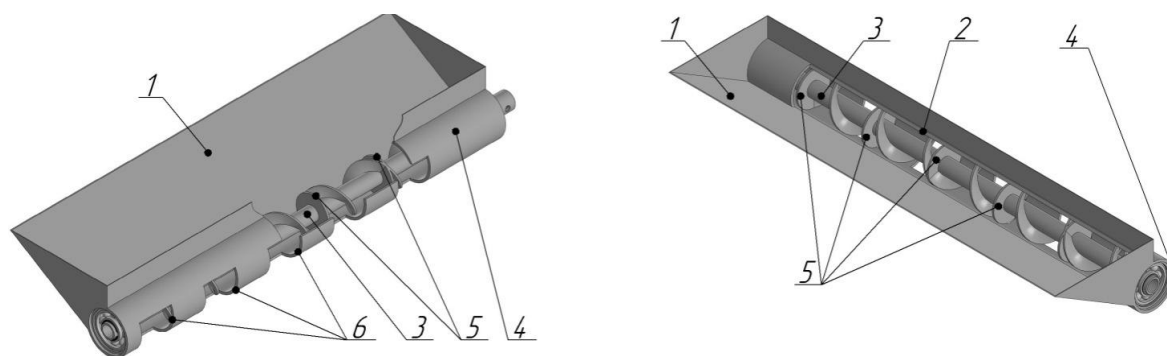


Рис. 4. Дозирующий аппарат с бункером:

1 – бункер; 2 – загрузочное окно; 3 – вал с винтовой поверхностью; 4 – обойма дозирующего аппарата; 5 – ограничительные шайбы; 6 – выгрузные окна

Fig. 4. Dispenser device with a hopper:

1 – hopper; 2 – loading door; 3 – spiral shaft; 4 – dispenser device casing; 5 – restriction orifice; 6 – unloading door

⁷ГОСТ 28714-2007. Машины для внесения твердых минеральных удобрений. Методы испытаний: Межгосударственный стандарт. Издание официальное: введ. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 октября 2008 г. № 289-ст в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 января 2009: введ. взамен ГОСТ 28714-90. М.: Стандартинформ, 2008.

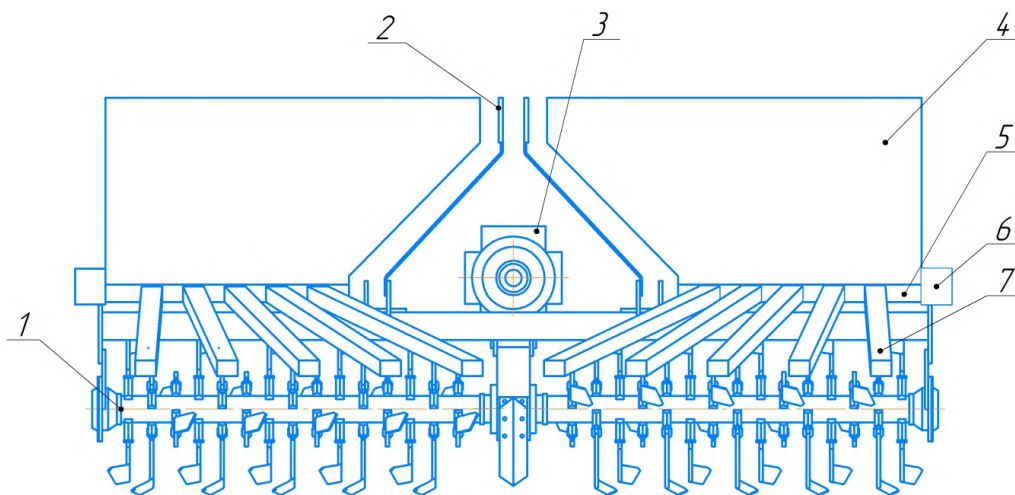


Рис. 5. Комбинированная почвообрабатывающая машина:

1 – фреза; 2 – сцепное устройство; 3 – редуктор фрезы; 4 – бункер для удобрений;
5 – дозирующее устройство; 6 – привод вала дозатора; 7 – распределяющее устройство

Fig. 5. Combined soil cultivation machine:

1 – rotavator; 2 – hitching device; 3 – rotavator gearbox; 4 – fertilizer hopper;
5 – dispenser; 6 – dispenser shaft drive; 7 – distribution unit

комплексный агрегат (рис. 5) сцепным устройством 2 соединяется с трактором. Фреза приводится в движение от вала отбора мощности последнего. Частота вращения дозирующего аппарата 5 регулируется приводом дозатора 6, пеллеты, вышедшие из окон дозатора, распределяются по ширине устройствами 7.

Поступательная скорость фрезерного агрегата при обработке почвы⁸ может составлять не более 1,5 м/с. При этом для задернелых и легких почв со скоростью резания 9 м/с поступательная скорость агрегата обычно находится в диапазоне 0,6...1,5 м/с, а для старопахотных, залежных, средних и среднетяжелых почв⁹ – 0,6...0,8 м/с.

Норма внесения шнекового дозатора, т/га, определяется по формуле:

$$Q = 0,6 \frac{q}{V}, \quad (1)$$

где q – пропускная способность дозатора, кг/(мин·м);
 V – скорость движения агрегата, км/ч.

Результаты расчетов нормы внесения удобрений по формуле 1 сведены в таблицу 2.

Формула (1) не дает ответа на вопрос о том, какую частоту вращения вала задавать дозатору при реальной скорости движения агрегата и заданной дозе внесения пеллет. На основании данных таблиц 1, 2

Норма внесения удобрений в зависимости от скорости движения агрегата и пропускной способности дозатора

Таблица 2

Table 2

Relationship between the fertilizer application rate, the unit speed, and the dispenser capacity

Пропускная способность q , кг/(мин·м)	Скорость движения агрегата V , км/ч									
	2,16	2,52	2,88	3,24	3,60	3,96	4,32	4,68	5,04	5,40
34,15	9,49	8,13	7,11	6,32	5,69	5,17	4,74	4,38	4,07	3,79
34,15	9,49	8,13	7,11	6,32	5,69	5,17	4,74	4,38	4,07	3,79
30,40	8,44	7,24	6,33	5,63	5,07	4,61	4,22	3,90	3,62	3,38
30,00	8,33	7,14	6,25	5,56	5,00	4,55	4,17	3,85	3,57	3,33
28,30	7,86	6,74	5,90	5,24	4,72	4,29	3,93	3,63	3,37	3,14
23,20	6,44	5,52	4,83	4,30	3,87	3,52	3,22	2,97	2,76	2,58
15,65	4,35	3,73	3,26	2,90	2,61	2,37	2,17	2,01	1,86	1,74

⁸ Александров В.А., Козьмин С.Ф., Шоль Н.Р., Александров А.В. Механизация лесного хозяйства и садово-паркового строительства: Учебник. СПб.: Лань, 2025. 528 с.

⁹ Там же

установим зависимость частоты вращения вала дозатора от заданной нормы внесения удобрений и реальной скорости движения агрегата. За основу приняли уравнение нелинейного оценивания:

$$n = a + b_1 V + b_2 Q + c_1 V^2 + c_2 Q^2 + dVQ, \quad (2)$$

где a, b_1, b_2, c_1, c_2, d – коэффициенты.

При обработке данных использовали пакет STATISTICA с выбранным вычислительным методом Левенберга-Марквардта и получили уравнение регрессии:

$$z = -112,3 \cdot x + 9,8 \cdot x^2 + 38,3 \cdot y \cdot x, \quad (3)$$

где z – частота вращения шнекового вала, мин⁻¹; x – заданная норма внесения, т/га; y – скорость движения агрегата, км/ч.

Коэффициенты модели принимаются на уровне значимости $\alpha = 0,05$. При этом $p < \alpha$, то есть коэффициенты модели значимы.

Для оценки качества полученной модели использовали коэффициент детерминации R^2 и критерий Фишера. Коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,844$. Это свидетельствует о том, что 84,4% вариации частоты вращения шнекового вала объясняется варьированием нормы внесения удобрений Q и скорости движения агрегата V . Коэффициент множественной корреляции $R = 0,919$ указывает на сильную связь между фактическими и предсказанными значениями.

Для проверки адекватности модели рассчитан F -критерий Фишера $F_{\text{рас}} = 119,1$. При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и степенях свободы $df_1 = 3$ и $df_2 = 66$ табличное значение $F_{\text{табл}} = 2,74$. Поскольку $F_{\text{рас}} = 119,1 > F_{\text{табл}} = 2,74$, нулевая гипотеза о незначимости модели отклоняется. Следовательно, полученное уравнение регрессии адекватно экспериментальным данным и может быть использовано для прогнозирования частоты вращения шнекового вала в зависимости от заданной нормы внесения удобрений и скорости движения агрегата.

График функции (рис. 6) и значения оценки параметров модели показывают, что модель адекватна результатам наблюдения.

Таким образом, зная реальную скорость движения комбинированного почвообрабатывающего агрегата с одновременным внесением удобрений в виде пеллет и заданную норму внесения удобрений, тракторист-машинист выставляет необходимую частоту вращения вала дозатора по вышеустановленной зависимости.

Список источников

1. Ивенин В.В., Ивенин А.В., Строкин В.Л. Адаптация и модернизация голландской системы обработки почвы под различные сорта картофеля на светло-серых лесных почвах

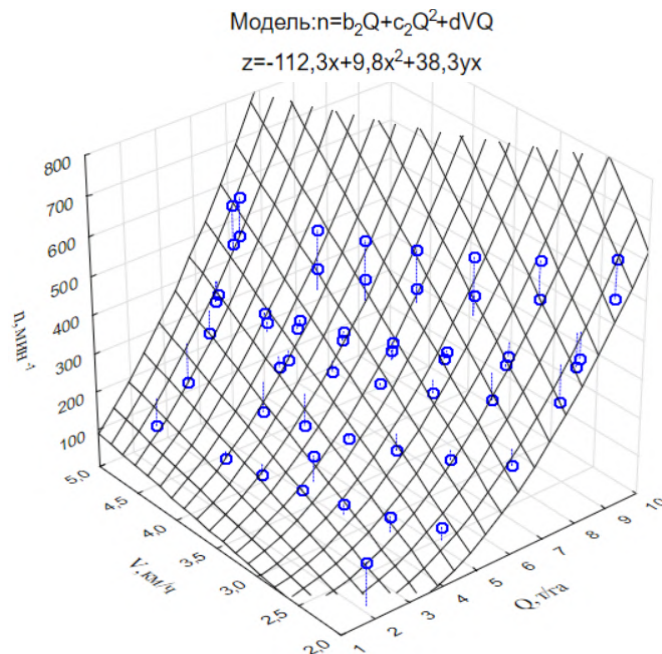


Рис. 6. Трехмерная диаграмма рассеивания: поверхность – подогнанная функция; точки – значение данных; n – частота вращения дозирующего вала, мин⁻¹; V – скорость движения агрегата, км/ч; Q – заданная норма внесения удобрений, т/га

Fig. 6. 3-D spreading diagram: surface – fitted function; dots – data value; n – rotation rate of the dispenser shaft, min⁻¹; V – machine velocity, km/h; Q – preset manure application rate, t/h

Выводы

1. В комбинированном почвообрабатывающем агрегате при фрезеровании и одновременном внесении органических удобрений (птичьего помета) в виде пеллет целесообразно применять дозатор со шнековым рабочим органом.

2. Установленная функция определения частоты вращения вала шнека дозатора от его скорости движения и заданной нормы внесения удобрения и экспериментальные данные имеют удовлетворительные статистике согласованности при заданной компоновке фрезерного почвообрабатывающего агрегата. Полученную зависимость можно применять при настройке агрегата к работе.

3. Спроектированный дозатор способен вносить под картофель необходимую максимальную дозу птичьего помета в виде пеллет 4 т/га при движении фрезерного почвообрабатывающего агрегата в пределах 5 км/ч. Других норм внесения удобрений можно добиться путем снижения частоты вращения шнекового вала дозатора.

References

1. Ivenin V.V., Ivenin A.V., Strokin V.L. Adaptation and improvement of the Dutch system of soil tillage for different potato varieties of light-grey forest soils of Volg-Vyat

Волго-Вятского региона // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 2. С. 31-35. EDN: YZHOYP

2. Кулыгин В.А. Влияние фрезерования почвы на условия вегетации и урожайность картофеля при орошении // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2005. № 13. С. 56-60. EDN: JWXOMJ

3. Рыжих Л.Ю. Влияние различных вариантов обработки почвы на урожайность картофеля // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2013. Т. 8, № 3. С. 122-125. EDN: REJNND

4. Сурикова Н.В., Шуравилин А.В., Пивень Е.А., Кой Камссу. Урожайность и качество продукции картофеля при промышленной (голландской) технологии возделывания в условиях юго-востока Московской области // Природообустройство. 2019. № 1. С. 84-91. EDN: ULGHKX

5. Шварц А.А., Беседин Б.П., Колесников Е.Ю. Обоснование конструктивно-режимных параметров рабочего органа низкорамного разбрасывателя удобрений // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2015. № 3. С. 203-207. EDN: UOGVMB

6. Бричагина А.А., Кузьмин А.Е. Обзор технических средств, применяемых для внесения органических удобрений // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. 2011. № 42. С. 51-57. EDN: NDKXRX

7. Юнин В.А., Захаров А.М., Кузнецов Н.Н. и др. Способ и техническое средство для локального внесения твердых органических удобрений при посадке картофеля // АгроЭкоИнженерия. 2020. № 105. С. 62-79. EDN: CARRVZ

8. Пасин А.В., Кошелев Р.В., Никулин А.В. и др. Определение аэродинамических свойств пеллет органического удобрения // Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 3. С. 100-106. EDN: RAMEJQ

9. Костенко М.Ю., Успенский И.А., Юхин И.А. и др. Разработка шнекового дозирующего устройства минеральных удобрений // Техника и оборудование для села. 2023. № 5 (311). С. 16-21. EDN: YQUMVR

10. Дёмшин С.Л. Разработка туковой сеялки с дозирующим устройством на базе гибкого односпирального шнека // Молочно-хозяйственный вестник. 2018. № 3. С. 104-115. EDN: YLWXAD

11. Канаев М.А., Парфенов О.М., Карпов О.В. и др. Неравномерность дозирования минеральных удобрений шнековыми туковысевающими аппаратами // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 3. С. 121-127. EDN: QSEQAV

12. Назаров М.С., Костерин А.А. Проектирование и испытание катушки высевающего аппарата для дозирования органических удобрений в виде пеллет // Вестник науки. 2025. Т. 4, № 5. С. 2071-2080. EDN: EPOWQK

Информация об авторе

Назаров Михаил Сергеевич, аспирант, Нижегородский государственный агротехнологический университет имени Л.Я. Флорентьева; 603107, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 97; bulldogmix99@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0000-3524-6244>; SPIN-код: 9510-9803

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов и несет ответственность за плагиат

Статья поступила 02.03.2026, после рецензирования и доработки 29.06.2026; принята к публикации 03.07.2026

region. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2017;2:31-35. (In Russ.)

2. Kulygin V.A. Effect of rotary tillage on vegetation conditions and potato yield under irrigation. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2005;13:56-60. (In Russ.)

3. Ryzhikh L.Y. Effect of different tillage options on potato yield. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2013;8(3):122-125. (In Russ.)

4. Surikova N.V., Shuravilin A.V., Piven E.A., Koj Kamssu. Yield and quality of potato products for industrial (Dutch) technology of cultivation in South-East Moscow region. *Prirodoobustroystvo*. 2019;1:84-91. (In Russ.)

5. Shwartz A.A., Besedin B.P., Kolesnikov E.Y. Justification of design and operating parameters of the low fertilizer spreader tool. *The Bulletin of Michurinsk State Agrarian University*. 2015;3:203-208. (In Russ.)

6. Brichagina A.A., Kuzmin A.E. Overview of the technical means used for organic fertilization. *Vestnik IRGSHA*. 2011;42:51-57. (In Russ.)

7. Yunin V.A., Zakharov A.M., Kuznetsov N.N., Slizkov A.M., Zykov A.V. Method and device for local application of solid organic fertilisers in potato planting. *AgroEkoInzheneriya*. 2020;105:62-79. (In Russ.)

8. Passin A.V., Koshelev R.V., Nikulin A.V., Nazarov M.S., Kosterin A.A. Identifying aerodynamic properties of organic fertilizer pellets. *Vestnik Nizhegorodskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2025;3:100-106. (In Russ.)

9. Kostenko M.Yu., Uspensky I.A., Yukhin I.A., Lipatov N.V., Teterin V.S., Pekhnov S.A. Screw dosing device for solid mineral fertilizers. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;5:16-21. (In Russ.)

10. Dyemshin S.L. The development of a seed cum fertilizer drill with a dosing device based on a flexible single helix auger. *Molochnohozyaystvenny Vestnik*. 2018;3:104-115. (In Russ.)

11. Kanaev M.A., Parfenov O.M., Karpov O.V., Denisov S.V., Baimishev R.Kh. Uneven dosing of mineral fertilizers by auger fertilizer spreaders. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2023;3:121-127. (In Russ.)

12. Nazarov M.S., Kosterin A.A., Koshelev R.V. Design and testing of seeding machine coil for dispensing organic fertilizers in form of pellets. *Science Bulletin*. 2025;4(5):2071-2080. (In Russ.)

Author Information

Mikhail S. Nazarov, postgraduate student, Nizhny Novgorod State Florentyev Agrotechnological University; 97 Gagarina Ave., Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation, bulldogmix99@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0000-3524-6244>

Conflict of interests

The author declares no conflict of interest and is responsible for plagiarism

Received 02.03.2026; Revised 29.06.2026; Accepted 03.07.2026

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.436

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-66-73>

Исследование управляющего воздействия на процесс очистки деталей от загрязнений в ультразвуковом поле

В.М. Корнеев^{1✉}, Д.И. Петровский², И.Н. Кравченко³, Н.В. Корнеев⁴

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

⁴ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия

¹ tmo@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8945-9875>

² petrovsky@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8162-1789>

³ kravchenko-in@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>

⁴ swy16@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8405-1195>

Аннотация. В ремонтном производстве процесс очистки деталей двигателя от нагара осложнен в связи с высокой степенью адгезии нагароотложений к поверхности деталей и устойчивостью их к воздействию моющей жидкости. Исследования проведены с целью обоснования способа удаления нагароотложений и установления оптимального режима очистки выпускных клапанов газораспределительного механизма двигателя. Нагароотложения целесообразно удалять с помощью акустической кавитации. Это связано с тем, что кавитация сопровождается образованием гидродинамических микроударов, под воздействием которых углеродистые отложения разрушаются. Эксперимент по очистке выпускных клапанов газораспределительного механизма двигателя провели в ультразвуковой ванне ODA-DS100. Активность акустической кавитации измеряли кавитометром. Влияние параметров технологического режима очистки – таких, как концентрация моющего средства, температура моющего раствора и продолжительность очистки, на эффективность удаления нагара определяли при последовательном изменении их значений. Качество очистки, оцениваемое по остаточной загрязненности (г/см^2), определяемой весовым способом, приняли в качестве критерия оптимальности. Так, качество очистки определяли при концентрации моющего средства Контраст-107 в растворе 10, 20, 30, 40, 50 г/л, температуре моющего раствора 40, 50, 60, 70, 80°C и продолжительности очистки 5, 10, 15, 20, 25 мин. Отметим, что наибольшая активность кавитации достигнута при частоте колебаний 25 кГц. Установили оптимальный режим очистки выпускных клапанов: концентрация моющего средства – 20 г/л, температура моющего раствора – 60°C, продолжительность очистки – 15 мин. Управлять процессом очистки деталей можно посредством изменения частоты ультразвуковых колебаний, концентрации моющего средства и температуры моющего раствора. В дальнейших исследованиях можно изучить влияние на качество очистки геометрической формы детали.

Ключевые слова: процесс очистки деталей; нагар; загрязнения; активность акустической кавитации; качество очистки; режим очистки; концентрация моющего средства; температура моющего раствора; продолжительность очистки

Для цитирования: Корнеев В.М., Петровский Д.И., Кравченко И.Н., Корнеев Н.В. Исследование управляющего воздействия на процесс очистки деталей от загрязнений в ультразвуковом поле // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 4. С. 66-73. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-66-73>

ORIGINAL ARTICLE

Research on the possibility of controlling the cleaning process of parts in an ultrasonic field

V.M. Korneev¹✉, D.I. Petrovsky², I.N. Kravchenko³, N.V. Korneev⁴

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

⁴ Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia

¹ tsmo@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-8945-9875>

² petrovsky@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8162-1789>

³ kravchenko-in@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>

⁴ swy16@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8405-1195>

Abstract. In repair production, cleaning engine parts from carbon deposits presents a significant challenge due to the high adhesion of carbonaceous residues to component surfaces and their low susceptibility to detergent solutions. The study aimed to justify a method for carbon deposit removal and to establish an optimal cleaning mode for exhaust valves in engine valve gear. Acoustic cavitation is a good solution for carbon deposit removal, as it generates hydrodynamic micro-impacts that effectively disintegrate carbonaceous deposits. The authors conducted experiments on cleaning exhaust valves in an ODA-DS100 ultrasonic bath, with cavitation activity measured using a cavitometer. The influence of key process parameters – detergent concentration, solution temperature, and cleaning duration – on carbon removal efficiency was assessed by sequentially varying each parameter. Cleaning quality, evaluated by residual contamination (g/cm²) determined gravimetrically, was adopted as the optimality criterion. Specifically, cleaning performance was examined at Kontrast-107 detergent concentrations of 10, 20, 30, 40, and 50 g/L; solution temperatures of 40, 50, 60, 70, and 80°C; and cleaning durations of 5, 10, 15, 20, and 25 minutes. The highest cavitation activity was observed at an oscillation frequency of 25 kHz. The following cleaning mode was identified as optimal for exhaust valves: detergent concentration of 20 g/L, solution temperature of 60°C, and cleaning duration of 15 minutes. The cleaning process can be controlled by adjusting the ultrasonic frequency, detergent concentration, and solution temperature. Future research may explore the influence of component geometry on cleaning efficiency.

Keywords: cleaning of machine parts; carbon deposits; contamination; acoustic cavitation activity; cleaning quality; cleaning mode; detergent concentration; cleaning solution temperature; cleaning duration

For citation: Korneev V.M., Petrovsky D.I., Kravchenko I.N., Korneev N.V. Research on the possibility of controlling the cleaning process of parts in an ultrasonic field. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(4):66-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-66-73>

Введение

Сельскохозяйственная техника, поступающая в ремонт, имеет на поверхностях деталей разнообразные загрязнения, различающиеся по условиям формирования и физико-механическим свойствам. Загрязнения являются причиной снижения производительности труда и культуры производства, точности измерительного контроля геометрических параметров деталей при их дефектации, интенсивного износа рабочих поверхностей деталей при их приработке и ресурса отремонтированных агрегатов. Таким образом, высокая степень очистки деталей необходима для качественного ремонта машин. Под термином «очистка» понимается процесс удаления с наружных и внутренних поверхностей деталей эксплуатационных и технологических загрязнений до регламентированного уровня их чистоты [1-3].

Исследованиями установлено, что наиболее трудноудаляемыми загрязнениями являются нагары

и асфальтосмолистые отложения [4-6]. Нагары представляют собой углеродистые вещества, откладывающиеся на стенках камер сгорания головки цилиндров, клапанах, днищах поршней, свечах зажигания, распылителях форсунок, выпускных трубопроводах. Эти загрязнения обладают высокой механической прочностью и большой степенью адгезии к очищаемой поверхности детали. Асфальтосмолистые отложения являются продуктами окисления и полимеризации топливно-смазочных материалов. Они образуются на стенках картеров, щеках коленчатых валов, распределительных шестернях, масляных насосах, фильтрах и маслопроводах. Поскольку эти загрязнения характеризуются высокой поверхностной активностью и прочно удерживаются на поверхности, выбор способа очистки должен базироваться на дифференцированном подходе к каждому изделию с учетом его конструктивных особенностей, геометрических параметров, вида и характера загрязнений.

Известно, что наиболее перспективным и ресурсосберегающим способом очистки деталей от прочных загрязнений является применение ультразвука [7, 8]. Ультразвуковой способ очистки металлических поверхностей позволяет удалять загрязнения с деталей сложной конфигурации, из труднодоступных полостей и каналов [9, 10]. Однако высокий интерес вызывает определение оптимального режима ультразвуковой очистки при удалении нагароотложений, образующихся на поверхностях деталей двигателей внутреннего сгорания под воздействием высоких температур на топливо-смазочные материалы.

Цель исследований: обоснование выбора способа удаления углеродистых отложений и оптимального режима очистки клапанов газораспределительного механизма двигателя

Материалы и методы

Ультразвуковая очистка заключается в воздействии на моющий раствор механических колебаний с частотой более 20 кГц при удельной акустической мощности 2...3 Вт/см², приводящих к образованию кавитации. Акустическая кавитация представляет собой физический процесс образования пузырьков (пустот) в жидких средах с последующим их схлопыванием и высвобождением большого количества энергии [11, 12].

Общеизвестно, что необходимым условием эффективности ультразвуковой очистки в моющей жидкости является создание в ней кавитационного процесса, возникающего при превышении интенсивности ультразвуковых колебаний определенного значения.

Рассмотрим механизм возникновения явления кавитации на поверхностях очищаемых деталей, помещенных в ванну с моющим раствором. При воздействии на жидкость ультразвуковых колебаний в ней образуются упругие волны. При распространении продольных волн в жидкости образуются области сжатия и разрежения, чередующиеся с ультразвуковой частотой. При разрежении жидкость не выдерживает созданного ультразвуком напряжения. Силы, действующие на молекулы, начинают превышать силы межмолекулярного сцепления, и жидкость разрывается. В местах разрывов возникает множество мельчайших пузырьков, наполненных парами жидкости и растворенными в ней газами. Кавитационные пузырьки, попадая в область высокого давления жидкости (область сжатия), схлопываются с образованием ударных волн, характеризующихся большими значениями давления, температуры и скорости. Под действием гидравлических ударов загрязнения

на поверхности детали разрушаются и удаляются вместе с моющим раствором [12].

Кроме кавитации, существенное влияние на процесс ультразвуковой очистки оказывают звукокапиллярный эффект, акустические течения и звуковое давление. Звукокапиллярный эффект способствует проникновению моющей жидкости в микротрещины или микропоры частиц загрязнений, обеспечивая при этом нарушение связей между ними. Акустические течения жидкости образуют вихревые гидродинамические потоки, осуществляющие процесс отделения и удаления загрязняющих веществ. С повышением звукового давления возрастает количество кавитационных пузырьков в объеме жидкости и увеличивает концентрация кавитационных областей [13].

Таким образом, эффективность ультразвуковой очистки в моющей жидкости зависит как от оптимального значения частоты колебаний, так и от оптимизации параметров технологического режима очистки. В связи с этим при обосновании оптимального режима очистки следует учитывать конструктивные характеристики очищаемых деталей, вид и свойства загрязнения, химическую активность моющей жидкости.

Проверку научной гипотезы о возможности управления процессом ультразвуковой очистки, оптимизации его применительно к объекту очистки и виду загрязнения проводили на экспериментальной установке, схема которой представлена на рисунке 1.

Для изучения активности акустической кавитации использовали ультразвуковую ванну ODA-DS100 размером 300 x 240 x 150 мм с аналоговым управлением и рабочим объемом 10 л. Ванна снабжена четырьмя пьезоэлектрическими излучателями 2 с суммарной ультразвуковой мощностью 320 Вт. Рабочая частота ультразвуковых колебаний – 37 кГц. В ультразвуковой ванне 3 высокочастотные электрические колебания с генератора 1 подаются на пьезокерамический преобразователь, который преобразует их в упругие механические колебания. Под воздействием ультразвуковых колебаний в моющей жидкости возникает кавитационный процесс. В эксперименте активность кавитации измеряли кавитометром 4 (рис. 1).

Объект очистки – клапаны газораспределительного механизма двигателя Д-243, имеющие на рабочих поверхностях головок углеродистые отложения (нагар). Нагар характеризуется высокой механической прочностью и степенью адгезии к металлической поверхности детали. Выбор объекта обусловлен негативным влиянием загрязненных клапанов на работоспособность механизма газораспределения и двигателя в целом. Клапаны двигателя, загрязненные углеродистыми отложениями, неплотно прилегают

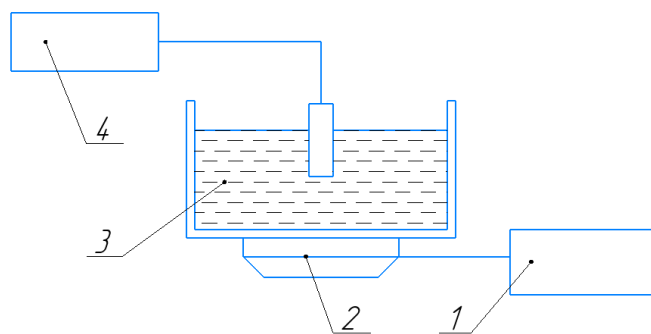


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – ультразвуковой генератор; 2 – пьезокерамический излучатель; 3 – ванна с моющим раствором; 4 – кавитометр

Fig. 1. Experimental installation diagram:

1 – ultrasonic generator; 2 – piezoceramic emitter; 3 – bath with cleaning solution; 4 – cavitation meter

к клапанам гнездам. При этом нарушается процесс смесеобразования в камерах сгорания, что приводит к падению мощности двигателя, неравномерной его работе и неполному сгоранию топлива. В этой связи задача достижения нормативной степени чистоты поверхности клапанов после их очистки при ремонте двигателя имеет большое практическое значение.

Эксперимент проводили на пяти выпускных клапанах двигателя Д-243 для каждого значения исследуемого параметра.

Каждый клапан взвешивали трижды до очистки и после нее, результаты усреднялись. Статистическая обработка включала в себя расчет среднего значения и стандартного отклонения (не более 5%). Эксплуатационная наработка клапанов составляла 4000...6000 моточасов, что соответствует типичным для ремонтного производства загрязнениям.

Исследованиями в области повышения эффективности ультразвуковой очистки установлена зависимость кинетики процесса удаления загрязнений в ультразвуковом поле от вида применяемого моющего средства и технологического режима очистки [14, 15].

Для удаления нагара применяли техническое моющее средство «Контраст-107» производства НПП ООО «Щебекинская индустриальная химия», рекомендуемое производителем для удаления углеродистых отложений.

Процесс очистки деталей характеризуется следующими технологическими параметрами: частота ультразвуковых колебаний; концентрация моющего средства в растворе; температура моющего раствора; продолжительность процесса очистки [16].

В результате предыдущих исследований [16, 17] и предварительных опытов установлено, что при концентрации менее 10 г/л и более 50 г/л, температуре

ниже 40°C и выше 80°C, а также времени менее 5 мин и более 25 мин эффективность очистки не достигает удовлетворительных значений (составляет менее 40%). С учетом вышесказанного и рекомендаций производителя моющего средства эксперимент проводили при концентрации моющего средства в растворе 10, 20, 30, 40, 50 г/л, температуре моющего раствора 40, 50, 60, 70, 80°C, продолжительности очистки 5, 10, 15, 20, 25 мин.

Предварительно взвешенные на лабораторных весах МАССА ВК-300.1 клапаны помещали в пластиковую сетчатую корзину в горизонтальном положении. Корзину погружали в ванну с моющим раствором и проводили очистку.

После очистки на исследуемом режиме клапаны снова взвешивали. Эффективность очистки оценивали величиной остаточной загрязненности (мг/см²) на поверхности клапана, которую определяли по формуле:

$$K_{\text{ост}} = \frac{m_1 - m_2}{S},$$

где m_1 – масса клапана до очистки, мг; m_2 – масса клапана после очистки, мг; S – площадь очищаемой поверхности клапана, см².

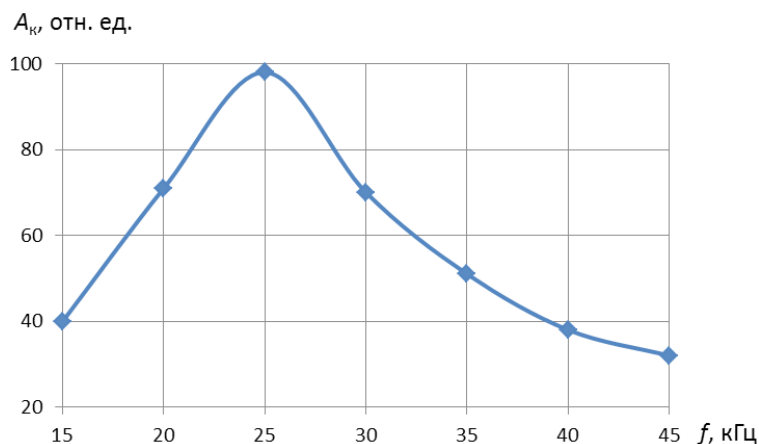
Метод оценки ультразвуковой очистки основан на спектральном анализе кавитационного шума. Акустический сигнал, генерируемый кавитационным шумом, фиксируется датчиком кавитометра и преобразуется в электрический сигнал, который в свою очередь обрабатывается электронным блоком. Значение активности кавитации выводится на индикатор.

Из ремонтной практики известно, что для очистки сильно загрязненных деталей более предпочтительным является применение ультразвуковых колебаний с частотой 15...40 кГц [17]. Оптимальное значение частоты колебаний, соответствующее максимальному уровню активности акустической кавитации, определяли с помощью кавитометра ICA-4D [18].

Результаты и их обсуждение

Экспериментально исследована активность акустической кавитации в зависимости от частоты колебаний (рис. 2).

Установлено, что максимальная активность кавитации возникала на частоте 25 кГц. Полученное значение использовали в качестве рабочей частоты при исследовании влияния концентрации моющего средства, температуры моющего раствора и времени кавитационного воздействия моющей жидкости на качество очистки загрязненных поверхностей клапанов.

Рис. 2. Зависимость активности кавитации A_k от частоты колебаний f Fig. 2. Relationship between cavitation activity A_k and oscillation frequency f

Производительность и качество ультразвуковой очистки зависят от химической активности моющего раствора (концентрации моющего средства). Согласно рекомендациям производителя концентрация водного раствора технического моющего средства «Контраст-107» для разнообразных видов загрязнений должна составлять 5...50 г/л. Однако эти рекомендации не учитывают характера загрязнений. Применительно к очистке клапанов от нагара минимальная остаточная загрязненность ($0,2 \text{ мг/см}^2$) достигается при концентрации моющего средства 20 г/л (рис. 3). Эта концентрация и принята за оптимальное значение.

С увеличением концентрации моющего средства выше 20 г/л качество очистки ухудшается ввиду снижения химического взаимодействия моющего раствора с загрязнением вследствие повышенного пенообразования.

Неоднозначное влияние на эффективность ультразвуковой очистки оказывает температура моющего раствора. На рисунке 4 приведена зависимость качества очистки, характеризуемой остаточной

загрязненностью, от температуры моющего раствора концентрацией 20 г/л. Наименьшая остаточная загрязненность наблюдается при температуре 60°C ($0,14 \text{ мг/см}^2$). При температуре 50°C значение отличается менее чем на 5%, что находится в пределах погрешности измерений, поэтому в качестве оптимального рекомендован диапазон $50\ldots 60^\circ\text{C}$.

Как следует из приведенной зависимости (рис. 4), наилучшее моющее действие проявляется при температуре раствора $50\ldots 60^\circ\text{C}$. Характер зависимости свидетельствует о том, что при снижении температуры раствора ($\leq 60^\circ\text{C}$) ухудшается его моющая способность вследствие замедления химических реакций. С повышением температуры выше 60°C уменьшается кавитационное давление, поскольку при этом повышается упругость внутри кавитационной полости, что приводит к снижению интенсивности кавитационного воздействия моющей жидкости на загрязнение.

Продолжительность очистки t является параметром, определяющим эффективность удаления загрязнений. Недостаточное время контактирования

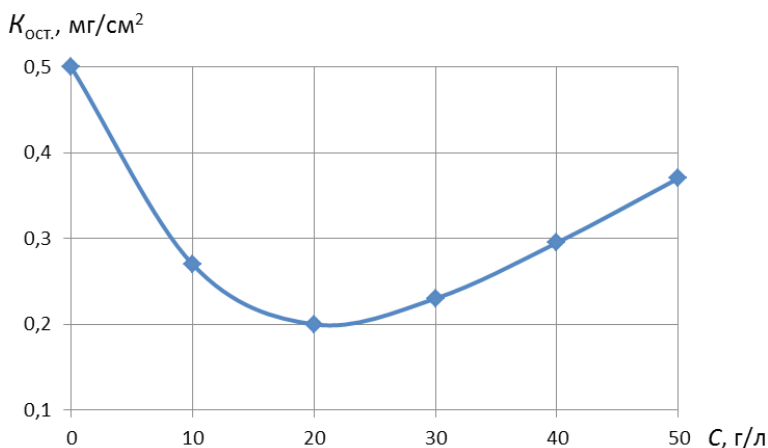


Рис. 3. Зависимость качества очистки от концентрации моющего средства в растворе

Fig. 3. Relationship between the cleaning quality and the detergent concentration in the solution

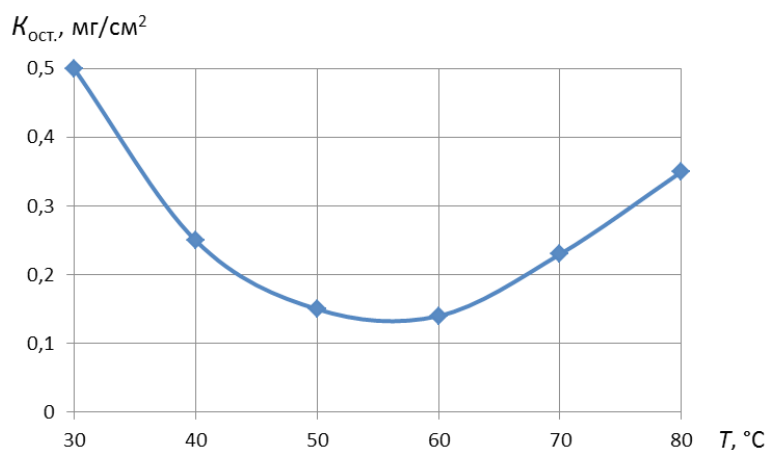


Рис. 4. Зависимость качества очистки от температуры моющей жидкости

Fig. 4. Relationship between the cleaning quality and the temperature of the cleaning liquid

моющей жидкости с очищаемой деталью приводит к неполной очистке. Увеличение времени пребывания деталей в очистке повышает энергоемкость процесса без существенного улучшения результатов.

Минимальная остаточная загрязненность (0,11 мг/см²) достигается при 15 мин очистки, что принято за оптимальное время (рис. 5).

Таким образом, на основании результатов экспериментальных исследований определен оптимальный режим очистки клапанов от нагароотложений для моющего средства «Контраст-107»: частота ультразвуковых колебаний – 25 кГц; концентрация моющего средства – 20 г/л; температура моющего раствора – 50...60°C; продолжительность очистки – 15 мин.

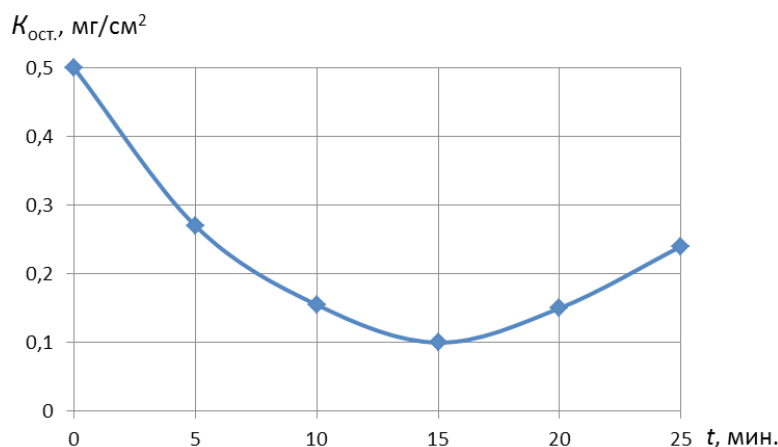


Рис. 5. Зависимость качества очистки от продолжительности процесса

Fig. 5. Relationship between the cleaning quality and the process duration

Выводы

1. Очистку выпускных клапанов газораспределительного механизма двигателя целесообразно проводить в условиях акустической кавитации.

2. Максимальная активность акустической кавитации в моющей жидкости «Контраст-107» достигается при частоте ультразвуковых колебаний 25 кГц.

3. Оптимальный технологический режим очистки клапанов в ультразвуковом поле: частота колебаний – 25 кГц; продолжительность очистки – 15 мин;

температура моющего раствора – 50...60°C; концентрация моющего средства – 20 г/л.

4. Изменением параметров – таких, как частота ультразвуковых колебаний, концентрация моющего средства и температура моющего раствора, можно управлять процессом очистки деталей.

5. Дополнительные исследования будут посвящены изучению влияния на качество очистки геометрической формы детали.

Список источников

1. Фадеев И.В., Степанова Е.И., Воронов В.П., Полищук С.Д. Анализ способов очистки и мойки поверхностей деталей в процессе ремонта агрегатов автотракторной техники // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2022. Т. 14, № 2. С. 183-192. EDN: IUYZQM
2. Мирутко В.В., Семин Е.В., Гуль А.С. Совершенствование технологии очистки двигателя и его деталей при ремонте // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2018. № 51. С. 243-249. EDN: NTUHMД
3. Быков В.В., Загородских Б.П., Садетдинов Ш.В., Юдин В.М. Повышение эффективности мойки деталей при ремонте автомобилей // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 1. С. 358-363. EDN: CBPDMV
4. Томилов А.В., Ломовских А.Е., Свиридов А.А., Вигдорович В.И. Способ безразборной очистки поверхностей деталей цилиндропоршневой группы от нагара в двигателях внутреннего сгорания // Научные технологии. 2019. Т. 20, № 4. С. 49-54. EDN: NJLROL
5. Ходяков П.С., Балажегитов Ж.А., Керученко Л.С., Союнов А.С. Технологии и способы очистки двигателей от нагароотложений // Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития: Сборник IV Международной научно-практической конференции. Омск: Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2020. С. 425-429. EDN: SCZCQN
6. Север А.В., Ломовских А.Е. Технология безразборной очистки деталей кривошипно-шатунного и газораспределительного механизмов от нагароотложений в тракторных двигателях // Вестник науки. 2023. Т. 3, № 12. С. 1299-1304. <https://www.vestnik-nauki.rf/article/11796>. EDN: ONEFJD
7. Сарсенгалиев А.М., Бекренёв Н.В. Научная технология с использованием ультразвука при очистке труднодоступных поверхностей деталей сложной формы // Научные технологии в машиностроении. 2017. № 12. С. 29-35. EDN: YLFNWI
8. Приходько В.М., Казанцев В.Ф., Карагодин В.И. и др. Особенности высокоамплитудной ультразвуковой очистки деталей // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 12. С. 76-81. <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2019-2019-12-76-81>
9. Громаковский Д.Г., Шигин С.В. Опыт применения кавитации для мойки деталей // Динамика и виброакустика. 2018. Т. 4, № 2. С. 6-11. <https://doi.org/10.18287/2409-4579-2018-4-2-6-11>
10. Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б., Кулагина Л.В. и др. Синтез-анализ использования кавитационных технологий // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии». 2022. Т. 15, № 7. С. 774-801. EDN: RSKFGM
11. Котухов А.В., Гаврилюк В.С., Минчук В.С., Дежжунов Н.В. Инновационный метод исследования акустической кавитации // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2020. Т. 18, № 4. С. 80-88. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-80-88>
12. Гаврилюк В.С., Дежжунов Н.В., Котухов А.В. и др. Исследование акустической кавитации: результаты, практическая реализация и перспективы развития // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2024. Т. 22, № 2. С. 92-104. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-92-104>
13. Толочко Н.К., Челединов А.Н., Ланин В.Л. Закономерности распределения активности кавитации в ультразвуковой ванне // Доклады Белорусского государственного

References

1. Fadeev I.V., Stepanova E.I., Voronov V.P., Polishchuk S.D. Analysis of environmental cleaning and washing of affected parts in the process of repairing units of automotive and tractor equipment. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*. 2022;14(2):183-192. (In Russ.)
2. Mirutko V.V., Siomin E.V., Gul A.S. Improvement of technology of cleaning of engine and parts during repair. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva*. 2018;51:243-249. (In Russ.)
3. Bykov V.V., Zagorodskikh B.P., Sadetdinov Sh.V., Yudin V.M. Increase the efficiency of washing details during repairing cars. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2019;1:358-363. (In Russ.)
4. Tomilov A.A., Lomovskikh A.E., Sviridov A.A., Vigdorovich V.I. Means of cylinder-piston blocks workpiece surfaces cleaning-in-place from carbon in the internal combustion engine. *Science Intensive Technologies*. 2019;20(4):49-54. (In Russ.)
5. Khodyakov P., Balazhegiov Zh., Keruchenko L., Soyunov A. Technologies and methods for cleaning engines from carbon deposits. *Nauchnoe i tekhnicheskoe obespechenie APK, sostoyaniye i perspektivy razvitiya*. Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference. Omsk: Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin. 2020. P. 425-429. (In Russ.)
6. Sever A.V., Lomovskikh A.E. Technology of non-selective cleaning of parts of crank and gas distribution mechanisms from carbon deposits in engines. *Science Bulletin*. 2023;3(12):1299-1304 (In Russ.)
7. Sarsengaliyev A.M., Bekrenyov N.V. Science intensive technology with ultrasound use at hard-to-reach surface refinement in complex parts. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2017;12:29-35. (In Russ.)
8. Prihod'ko V.M., Kazancev V.F., Karagodin V.I. et al. Peculiarities of high-amplitude ultrasonic cleaning of parts. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2019;12:76-81. (In Russ.) <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2019-2019-12-76-81>
9. Gromakovsky D.G., Shigin S.V. The experience of use of cavitation for washing of parts. *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*. 2018;4(2):6-11. <https://doi.org/10.18287/2409-4579-2018-4-2-6-11>
10. Radzyuk A.Yu., Istyagina E.B., Kulagina L.V. et al. Synthesis-analysis of the use of cavitation technologies. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2022;15(7):774-801. (In Russ.)
11. Kotukhov A.V., Gavriluk V.S., Minchuk V.S., Dezhkunov N.V. Combined method for acoustic cavitation research. *Doklady BGUIR*. 2020;18(4):80-88. (In Russ.) <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-80-88>
12. Gavriluk V.S., Dezhkunov N.V., Kotukhov A.V. et al. Research of Acoustic Cavitation: Results, Practical Implementation and Development Prospects. *Doklady BGUIR*. 2024;22(2):92-104. (In Russ.) <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-92-104>
13. Tolochko N.K., Cheledinov A.N., Lanin V.L. Regularities of distribution activity of cavitation in ultrasound bath. *Doklady BGUIR*. 2018;3:88-93. (In Russ.)
14. Nigmatzyanov R.I., Kazantsev V.F., Prikhodko V.M. et al. Increasing the efficiency of ultrasonic liquid treatment by activating the energy of cavitation clusters. *STIN*. 2019;3:19-23. (In Russ.)
15. Didmanidze O.N., Petrik D.Yu. Analysis of the efficiency of implemented ultrasonic cleaning technology for agricultural machinery parts. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2025;7:37-38. (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2025-7-37-38>
16. Petrik D.Y., Korneev V.M., Petrik V.Y. The factors of intensification of parts cleaning processes in submerged

университета информатики и радиоэлектроники. 2018. № 3. С. 88-93. EDN: XPUUFN

14. Нигметзянов Р.И., Казанцев В.Ф., Приходько В.М. и др. Повышение эффективности ультразвуковой жидкостной обработки путем активации энергии кавитационных кластеров // СТИН. 2019. № 3. С. 19-23. EDN: ZCQEXB

15. Дидманидзе О.Н., Петрик Д.Ю. Анализ эффективности внедрения технологии ультразвуковой очистки деталей сельскохозяйственной техники // Техника и оборудования для села. 2025. № 7. С. 37-38. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2025-7-37-38>

16. Петрик Д.Ю., Корнеев В.М., Петрик В.Ю. Факторы интенсификации процессов очистки деталей в погружных моечных машинах (на примере ультразвукового метода очистки) // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 1. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.24>

17. Корнеев В.М., Петровский Д.И., Корнеев Н.В. Интенсификация процесса погружной очистки деталей ультразвуковыми колебаниями // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 5. С. 54-60. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-54-60>

18. Дежжунов Н., Ланин В.Л., Ковальчук А. Ультразвуковая очистка в технологии электроники // Технологии в электронной промышленности. 2017. № 1. С. 44-48. EDN: YJYNTB

Информация об авторах

¹ Корнеев Виктор Михайлович, канд. техн. наук, доцент; tsmo@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8945-9875>; SPIN-код: 5464-0703

² Петровский Дмитрий Иванович, канд. техн. наук, доцент; petrovsky@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8162-1789>; SPIN-код: 5948-9799

³ Кравченко Игорь Николаевич, д-р техн. наук, профессор; kravchenko-in@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>; SPIN-код: 8272-6031

⁴ Корнеев Николай Викторович, аспирант; swy16@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8405-1195>

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

⁴ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, пр-д 1-й Институтский, 5

Вклад авторов

В.М. Корнеев – научное руководство, создание черновика рукописи, концептуализация, методология;
Д.И. Петровский – ресурсы, формальный анализ;
И.Н. Кравченко – создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
Н.В. Корнеев – формальный анализ, администрирование данных.

Статья поступила 23.03.2026; после рецензирования и доработки 09.06.2026; принята к публикации 03.07.2026

washing machines (on the example of ultrasonic cleaning method). *International Research Journal*. 2023;1:101. (In Russ.) <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.24>

17. Korneev V.M., Petrovsky D.I., Korneev N.V. Intensification of submersion cleaning of parts using ultrasonic oscillations. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(5):54-60 (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-54-60>

18. Dezhkunov N., Lanin V.L., Kovalchuk A. Ultrasonic cleaning in electronics technology. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti*. 2017;1:44-48. (In Russ.)

Author Information

Viktor M. Korneev¹, CSc (Eng), Associate Professor; tsmo@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8945-9875>

Dmitry I. Petrovskiy², CSc (Eng), Associate Professor; petrovsky@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8162-1789>

Igor N. Kravchenko³, DSc (Eng), Professor; kravchenko-in@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>; ResearcherID: B-9463-2018

Nikolay V. Korneev⁴, postgraduate student; swy16@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8405-1195>

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

⁴ Federal Scientific Agroengineering Centre VIM; 109428, Russian Federation, Moscow; 5, 1st Institutskiy Proezd Str.

Author Contribution

V.M. Korneev – research supervision; writing – original draft; conceptualization; methodology;
D.I. Petrovsky – resources; formal analysis;
I.N. Kravchenko – writing – review and editing of the manuscript;
N.V. Korneev – formal analysis; data curation.

Received 23.03.2026; Revised 09.06.2026; Accepted 03.07.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 658.562

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-74-83>

Обоснование рационального количества измерений для обеспечения точности при проверке погрешности нутромеров на ремонтном предприятии

Г.Н. Темасова^{1✉}, А.Г. Арженовский², В.К. Зимогорский³, Я.К. Зимогорский⁴, В.С. Бондарев⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

¹ temasova@rgau-msha.ru ✉; <https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>

² argenowski@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3569-8934>

³ zimogorskiy@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0004-0060-7803>

⁴ zimyarik@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-2124-6564>

⁵ boss2569@ya.ru

Аннотация. Точность применяемых при ремонте сельскохозяйственной техники и оборудования измерительных приборов влияет на уровень качества восстанавливаемых деталей и узлов. Однако на ремонтных предприятиях калибровка измерительных приборов не является обязательной процедурой. В связи с этим разработана методика оценки погрешности нутромеров на ремонтном предприятии путем проведения многократных измерений образцовой величины. Для достижения статистической стабильности и надежности измерений провели три серии экспериментов с нутромерами различного принципа действия. Количество измерений каждым нутромером составляло 5, 10, 15, 20, 25, 40, 60, 80, 100. Выявили, при измерении трехточечным микрометрическим нутромером GUANGXIN 11-14 начиная с 20 измерений происходит значительное снижение влияния случайной составляющей погрешности; стабильность статистических параметров начинается при 25 измерениях. При измерении клиновым индикаторным нутромером НИ 18-50 случайная составляющая погрешности исключается при 40 измерениях, стабилизация статистических параметров начинается с 25 изменений. Индикаторный нутромер с рычажной передачей НИ 100-160 исключает случайную составляющую погрешности при 100 измерениях, статистические параметры стабилизируются при 20 измерениях. В результате исследований установили рациональное количество измерений: 25-кратное измерение гарантирует достаточную точность оценки погрешности прибора и не влечет за собой лишних затрат. Применение разработанной методики на ремонтных предприятиях позволит сократить время проведения измерительных операций без потери качества, повысить достоверность контроля отверстий, снизить процент брака при восстановлении деталей, сократить гарантийные случаи, и как следствие – повысить конкурентоспособность отечественных ремонтных предприятий за счет высокого качества предоставляемых ремонтных услуг.

Ключевые слова: нутромер; калибровка измерительных приборов; калибровка; погрешность; погрешность измерений; количество измерений; методика оценки погрешности

Финансирование: Исследование выполнено в рамках проекта по созданию и развитию инжинирингового центра РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (соглашение № 075-15-2025-543 от 16 июня 2025 года).

Для цитирования: Темасова Г.Н., Арженовский А.Г., Зимогорский В.К., Зимогорский Я.К., Бондарев В.С. Обоснование рационального количества измерений для обеспечения точности при проверке погрешности нутромеров на ремонтном предприятии // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 4. С. 74-83. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-74-83>

ORIGINAL ARTICLE

Rationalizing the number of measurements to ensure accuracy in checking the error of bore gauges at a repair facility

G.N. Temasova^{1✉}, A.G. Arzhenovskiy², V.K. Zimogorskiy³, Ya.K. Zimogorskiy⁴, V.S. Bondarev⁵

^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

¹temasova@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>

²argenowski@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3569-8934>

³zimogorskiy@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0004-0060-7803>

⁴zimyarik@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-2124-6564>

⁵boss2569@ya.ru

Abstract. The accuracy of measuring instruments used in the repair of agricultural machinery and equipment directly affects the quality level of restored parts and assemblies. However, calibration of measuring instruments is not a compulsory procedure at repair facilities. In this regard, the authors have developed a methodology for assessing the error of bore gauges at a repair facility by performing multiple measurements of a reference value. To achieve static stability and measurement reliability, three series of experiments were conducted with bore gauges of different operating principles. The number of measurements taken with each bore gauge was 5, 10, 15, 20, 25, 40, 60, 80, and 100. It was found that when measuring with a three-point micrometer bore gauge GUANGXING 11-14, starting from 20 measurements, there is a significant reduction in the influence of the random error component; statistical parameter stability begins at 25 measurements. When measuring with a wedge-type dial bore gauge NI 18-50, the random error component is eliminated at 40 measurements, while statistical parameter stabilization begins at 25 measurements. The dial bore gauge with lever transmission NI 100-160 eliminates the random error component at 100 measurements, with statistical parameters stabilizing at 20 measurements. As a result, the rational number of measurements was established: 25-fold measurement guarantees sufficient accuracy in assessing the instrument error and does not entail unnecessary costs. The application of the developed methodology at repair enterprises will reduce the time required for measurement operations without compromising quality, increase the reliability of hole inspection, reduce the rejection rate during part restoration, decrease warranty claims, and consequently enhance the competitiveness of domestic repair enterprises through the high quality of repair services provided.

Keywords: bore gauge; calibration of measuring instruments; calibration; error; measurement error; number of measurements; error assessment methodology

Funding. This work was carried out within the framework of the project for the establishment and development of the Engineering Center of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Agreement No. 075-15-2025-543 dated June 16, 2025).

For citation: Temasova G.N., Arzhenovskiy A.G., Zimogorskiy V.K., Zimogorskiy Ya.K., Bondarev V.S. Rationalizing the number of measurements to ensure accuracy in checking the error of bore gauges at a repair facility. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(4):74-83 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-74-83>

Введение

Современная сельскохозяйственная техника, подлежащая ремонту, насыщена достаточно сложными и точными соединениями, требования к которым с каждым годом ужесточаются [1, 2]. От точности контрольно-измерительных средств зависит уровень качества восстанавливаемых деталей и агрегатов [3-5], поэтому для обеспечения их правильной работы и единства измерений на ремонтных предприятиях должна регулярно проводиться калибровка измерительных приборов [7-9].

Необходимость регулярного проведения калибровок обусловлена соблюдением нормативных ак-

тов (Федерального Закона от 26 июня 2008 г. № 102)¹, практическими соображениями с целью недопущения постепенного выхода из строя измерительного инструмента, и соответственно, возникновения ошибок первого и второго рода, повторных ремонтов и потери доверия потребителя [10-12].

Правила, регулирующие проведение калибровки, опираются на правила проведения поверки, в рамках которых требуется выполнить измерения по всему диапазону измерений прибора с заданным шагом,

¹ Об обеспечении единства измерений: Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77904/ (дата обращения: 01.02.2026).

либо при калибровке проводится минимальное количество измерений в двух или трех точках диапазона измерений. Реально же на ремонтных предприятиях калибровка измерительных приборов не проводится, так как эта процедура не является обязательной. Возникает вопрос о том, можно ли оценить погрешность измерений прибора на предприятии без калибровки.

Цель исследований: разработка методики оценки погрешности нутромеров на ремонтном предприятии путем проведения многократных измерений образцовой величины.

Материалы и методы

Объект исследований – процесс проверки погрешности нутромеров различного принципа действия при контроле отверстий.

Предмет исследований – критерии, позволяющие определить минимальное количество измерений при проверке погрешности средств измерений.

Выбор средств измерений для контроля линейных размеров осуществляли в соответствии с требованиями ГОСТ 8.051-81² и РД 50-98-86³. Выбор конкретного средства измерения обусловлен предельными значениями контролируемого параметра и допустимыми отклонениями, устанавливаемыми нормативно-технической документацией изделия.

Средство измерений должно быть выбрано из указанного диапазона таким образом, чтобы максимальная погрешность измерения (Δ_{lim}) не превышала допустимого значения ($\delta_{\text{изм}}$)⁴:

$$\Delta_{\text{lim}} \leq \delta_{\text{изм}}. \quad (1)$$

При отсутствии конкретных указаний в нормативно-технической документации рекомендуется устанавливать допустимую погрешность измерения равной одной трети от допуска контролируемого параметра [13]:

$$\delta_{\text{изм}} = 0,33 \cdot T, \quad (2)$$

где T – допуск контролируемого параметра.

²ГОСТ 8.051-81. Государственная система обеспечения единства измерений. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм: утв., введ. Постановлением Госстандарта СССР от 23 ноября 1981 г. № 5067. Дата введения: 1982-01-01. М.: Издательство стандартов, 1982. 12 с.

³РД 50-98-86. Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм (по применению ГОСТ 8.051-81): утв., введ. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 8 июля 1986 г. № 2035. Дата введения: 1987-07-01. М.: Издательство стандартов, 1987. 80 с.

⁴Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Карпузов В.В. Метрология, стандартизация и сертификация: Учебник для вузов. 4-е изд. Санкт-Петербург: Лань, 2026. 196 с. EDN: TWJKDI.

Принцип основан на следующем подходе: допуск (T) определяется как максимальное отклонение фактического размера детали от номинального значения, при котором считается, что деталь соответствует техническим требованиям. При наличии большой погрешности измерения существует вероятность отсутствия дефекта или выбраковки деталей, которые могут быть отремонтированы. Чтобы избежать такого риска, погрешность измерительного устройства выбирается значительно меньшей по сравнению с допустимым значением. Данное правило широко используется в промышленности и помогает обеспечить требуемый уровень точности измерений даже при отсутствии специальных инструкций от производителя.

Полная оценка качества контроля предполагает комплексный подход, учитывающий технические аспекты (точность измерений, частота и тип ошибок) и экономические факторы (затраты, экономия).

На рисунке 1 представлены алгоритм выбора средств измерений, согласно которому оценивается количество неправильно забракованных и неправильно принятых деталей, и технико-экономические показатели выбранных средств измерений.

Для определения рационального количества измерений, позволяющего исключить влияние случайной составляющей погрешности, необходимо выполнить несколько серий прямых измерений с многократными наблюдениями. Полученные результаты следует обработать по методике ГОСТ 8.207-76⁵ в такой последовательности:

1. Оценить среднее арифметическое значение результатов многократных наблюдений $\bar{X}$ по формуле [13]:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (3)$$

где n – объем выборки; X_i – i -й результат измерения из выборки n .

Среднее арифметическое значение выборки является наиболее распространенным способом оценки истинного результата измеряемой величины.

2. Рассчитать среднее квадратическое отклонение среднего арифметического значения результата

⁵ГОСТ 8.207-76. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения: утв., введ. Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 15 марта 1976 г. № 619. Дата введения: 1977-01-01. М.: Стандартинформ, 2006. 8 с.

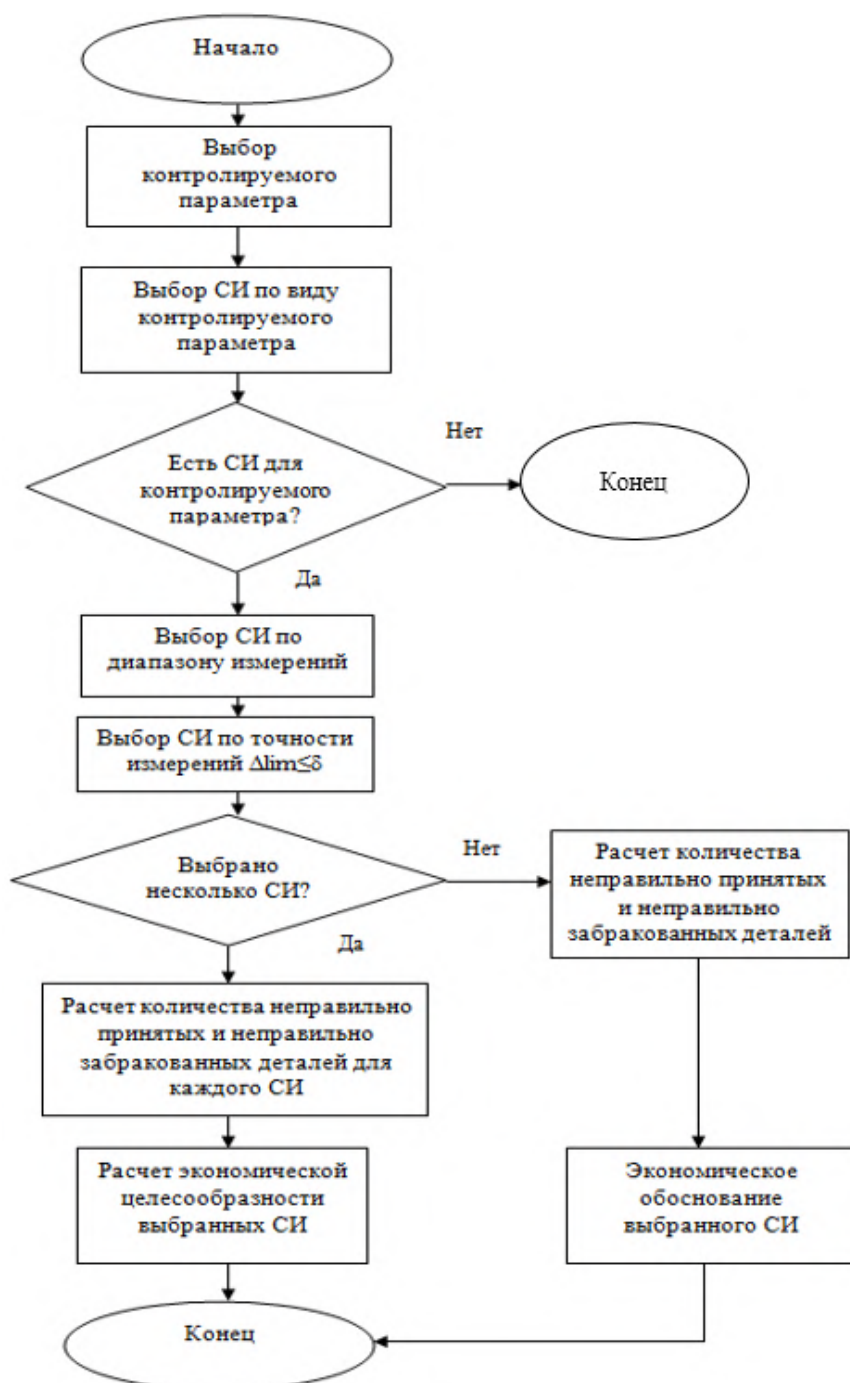


Рис. 1. Алгоритм выбора средств измерений
Fig. 1. Algorithm for selecting measuring instruments

измерений σ_x и среднего квадратического отклонения единичного результата наблюдения σ_x^- [13] по выражениям:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}; \quad (4)$$

$$\sigma_x^- = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}. \quad (5)$$

3. Проверить результаты наблюдений на наличие грубых ошибок (промахов). Для этого контролируются наибольшее и наименьшее значения

из полученных результатов наблюдений (вариационного ряда) [13]. Существует несколько критериев для проверки. При сериях с числом измерений $n \leq 20$ используется критерий Романовского (формула 6). При количестве измерений $n > 20$ используется критерий трех сигм (формула 7):

$$B = \frac{|X_i - \bar{X}|}{\sigma_x}, \quad (6)$$

где B – значение критерия, сравниваемое с табулированным значением, зависящим от объема выборки n ;

$$P(|X_i - \bar{X}| \geq 3\sigma) \leq \frac{1}{9}, \quad (7)$$

где P – вероятность того, что при наблюдении была допущена грубая погрешность.

4. Оценить границы неисключенной систематической погрешности результата измерения θ . В нашем случае приняты границы погрешности используемых средств измерений [13]. Пределы неисключенной систематической погрешности позволяют учитывать возможные систематические сдвиги, возникающие при измерениях, и повышают общую точность оцениваемого результата.

5. Оценить пределы случайной составляющей погрешности измерения Δ_p для заданной доверительной вероятности [13]:

$$\Delta_p = t_p \sigma_{\bar{x}}, \quad (8)$$

где t_p – значение коэффициента Стьюдента, зависящее от объема выборки n .

6. Учесть среднеквадратичное отклонение численного значения результатов и неисключенную систематическую погрешность для определения доверительных пределов погрешности результатов измерений [13]:

$$\frac{\theta}{\sigma_{\bar{x}}} \begin{cases} \geq 8 \rightarrow \Delta_{\Sigma} = \Delta_p \\ \leq 0,8 \rightarrow \Delta_{\Sigma} = \theta \\ 0,8 \geq \frac{\theta}{\sigma_{\bar{x}}} \geq 8 \rightarrow \Delta_{\Sigma} = K \cdot \sigma_{\Sigma}, \end{cases} \quad (9)$$

где Δ_{Σ} – границы суммарной погрешности результата измерения; K – коэффициент, зависящий от соотношения θ и Δ_p (формула 10); σ_{Σ} – оценка суммарного среднего квадратического результата измерений (формула 11):

$$K = \frac{\Delta_p + \theta}{\sigma_{\bar{x}} + \sqrt{\frac{\theta^2}{3}}}; \quad (10)$$

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\frac{\theta^2}{3} + \sigma_{\bar{x}}^2}. \quad (11)$$

Выполнение данных процедур позволит минимизировать затраты на измерения и потери от измерений, сохранив при этом требуемую точность измерений и высокую степень достоверности получаемых результатов.

Результаты и их обсуждение

Для достижения стабильности статических показателей и надежности измерений проведены три серии экспериментов с помощью трехточечного внутреннего микрометрического нутромера GUANGXING 11-14, клинового индикаторного нутромера НИ 18-50 с электронным индикатором SHANE ИЦ-25,4 и рычажного индикаторного нутромера НИ 100-160 с индикаторной головкой ИЧ-10. Каждым нутромером проведены многократные измерения в количестве 5, 10, 15, 20, 25, 40, 60, 80, 100.

Условия проведения измерений представлены в таблице 1, характеристики средств измерений указаны в таблицах 2, 3. После статистической обработки данных дополнительно определяли процент изменения случайной погрешности при увеличении количества измерений $\Delta_{\%P}$:

$$\Delta_{\%P} = \left(1 - \frac{\Delta_{Pi-1}}{\Delta_{Pi}}\right) 100\%. \quad (12)$$

Обработанные результаты измерений приведены в таблицах 4-6.

Согласно результатам расчетов при измерении трехточечным микрометрическим нутромером (табл. 4), в соответствии с условием формулы 9, начиная с 20 измерений происходит значительное снижение влияния случайной составляющей погрешности. Согласно значениям $\sigma_{\bar{x}}$, σ_x и Δ_p стабильность статистических параметров начинается при 25 измерениях.

По результатам измерений клиновым индикаторным нутромером (табл. 5), в соответствии с условием формулы 9, случайная составляющая погрешности исключается при 40 измерениях, стабилизация статистических параметров $\sigma_{\bar{x}}$, σ_x и Δ_p начинается с 25 изменений.

Таблица 1

Условия проведения измерений

Table 1

Measurement conditions

Условие	Параметры условия
Температура воздуха	(20 ± 2) , °C
Относительная влажность воздуха	(60 ± 10) , %
Освещенность помещения	(625 ± 125) , Лк
Чистота контактных поверхностей	Рабочие поверхности протирали безворсовыми салфетками, пропитанными изопропиловым спиртом. Очистку проводили перед началом измерений и после каждой серии
Время выдержки перед измерениями и между ними	Перед началом измерений – 30 мин, после каждой серии измерений – 15 мин

Таблица 2

Характеристики трехточечного микрометрического нутромера

Table 2

Characteristics of the three-point bore micrometer gauge

Средство измерений	Диапазон измерений, мм	Базовая глубина измерений, мм	Цена делений, мм	Погрешность измерений, мм
Трехточечный внутренний микрометрический нутромер GUANGXING 11-14	11...14	50	0,001	±0,002

Таблица 3

Характеристики индикаторных нутромеров

Table 3

Characteristics of indicator bore gauges

Средство измерений	Наибольшая глубина измерений, мм	Диапазон измерений, мм	Диапазон показаний, мкм	Цена делений, мм	Погрешность измерений, мм
НИ 18-50 в сборе с ИЦ-25,4	150	18...50	0...99,99	0,01	0,03
НИ 160 в сборе с ИЧ 0-10	400	100...160	0...0,1	0,01	±0,018

Таблица 4

Результаты измерений трехточечным нутромером

Table 4

Measurement results obtained with a three-point bore gauge

Параметр	Количество измерений								
	5	10	15	20	25	40	60	80	100
	Результаты расчетов								
$\bar{X}$, мм	10,9956	10,9948	10,9948	10,9948	10,9948	10,9945	10,9943	10,9941	10,9941
$\sigma_{\bar{x}}$, мкм	0,510	0,389	0,279	0,225	0,191	0,164	0,134	0,113	0,098
σ_x , мкм	1,140	1,229	1,082	1,005	0,957	1,038	1,035	1,014	0,984
Δ_p , мкм	1,416	0,879	0,599	0,470	0,395	0,332	0,267	0,226	0,195
$\Delta_{\%p}$, %	—	37,89	31,84	21,51	16,00	16,02	17,40	15,65	13,49
Θ , мкм	2								
$\Theta / \sigma_{\bar{x}}$	3,92	5,14	7,16	8,90	10,44	12,19	14,96	17,64	20,33
Δ_{Σ} , мкм	2,590	2,273	2,153	2	2	2	2	2	2

Таблица 5

Результаты измерений индикаторным нутромером с клиновой передачей

Table 5

Measurement results obtained using an indicator bore gauge with a wedge gear

Параметр	Количество измерений								
	5	10	15	20	25	40	60	80	100
	Результаты расчетов								
$\bar{X}$, мм	0,828	0,828	0,829	0,8295	0,8292	0,829	0,8285	0,8285	0,8281
$\sigma_{\bar{x}}$, мкм	2,000	1,333	1,182	0,881	0,800	0,665	0,631	0,599	0,537
σ_x , мкм	4,472	4,216	4,577	3,940	4,000	5,150	6,308	3,789	4,800
Δ_p , мкм	5,553	3,016	2,235	1,894	1,651	1,430	1,252	1,112	1,018
$\Delta_{\%p}$, %	—	45,68	25,90	15,25	12,83	13,36	12,50	11,16	8,43
Θ , мкм	6								
$\Theta / \sigma_{\bar{x}}$	3,00	4,50	5,08	6,81	7,50	9,02	9,51	10,01	11,18
Δ_{Σ} , мкм	0,846	0,698	0,649	0,649	0,638	0,600	0,600	0,600	0,600

Таблица 6

Результаты измерений индикаторным нутромером с рычажной передачей

Table 6

Measurement results obtained using a lever-operated indicator bore gauge

Параметр	Количество измерений								
	5	10	15	20	25	40	60	80	100
	Результаты расчетов								
$\bar{X}$, мм	0,048	0,058	0,06	0,06	0,0608	0,0605	0,0621	0,0625	0,0627
$\sigma_{\bar{x}}$, мкм	3,817	2,677	1,802	1,428	1,179	0,891	0,675	0,558	0,478
σ_x , мкм	8,535	8,464	6,980	6,387	5,897	5,635	5,232	4,992	4,776
Δ_p , мкм	10,598	6,055	3,865	2,989	2,395	1,920	1,509	1,190	0,948
$\Delta_{\%p}$, %	—	42,87	36,17	22,67	19,88	19,81	21,42	21,16	20,33
Θ , мкм	10								
Θ / σ_x	2,620	3,736	5,549	7,002	8,479	11,223	14,806	17,918	20,937
Δ_{Σ} , мкм	2,693	1,801	1,411	1,276	1,193	1,148	1,112	1,077	1,000

Результаты измерений индикаторным нутромером с рычажной передачей (табл. 6) свидетельствуют о том, что исключение случайной составляющей погрешности измерений происходит при 100 измерениях в соответствии с условием формулы 9. При этом статистические параметры $\sigma_{\bar{x}}$, σ_x и Δ_p начинают стабилизироваться при 20 измерениях.

Для определения стабильности измерительного процесса построены графики зависимости σ_x от количества измерений, приведены функции распределения и величина достоверности аппроксимации R^2 (рис. 2).

Анализ данных рисунка 1 показывает, что среднеквадратическое отклонение рассеяния погрешности измерений является максимальным у нутромера с рычажной передачей, и это обусловлено особенностями механизма передачи движения под углом 90°. В его кинематической цепи преобразование осевого перемещения стержня в поперечное движение измерительной поверхности осуществляется через систему рычагов и шарнирных соединений. Суммирование технологических зазоров в кинематических парах, упругие деформации рычагов под действием измерительного усилия, трение в шарнирах, а также их износ в процессе эксплуатации приводят к накоплению погрешностей и нелинейности характеристики преобразования.

Нутромер с клиновой передачей отличается более жесткой кинематической схемой: преобразование движения происходит по принципу наклонной плоскости при отсутствии шарнирных соединений. Контактные поверхности клина работают преимущественно на сжатие, что обеспечивает минимальные упругие деформации и линейную зависимость между перемещениями. Меньшее число подвижных соединений и отсутствие люфтов обуславливают

более высокую стабильность показаний и меньшее рассеяние результатов измерений.

Трехточечный нутромер, оснащенный тремя радиально перемещающимися губками (расположенными под углом 120°), занимает в этом ряду особое положение. Его ключевым преимуществом является эффект автоматического центрирования в отверстии, что исключает погрешность, вызванную перекосом инструмента. Однако преобразование осевого перемещения в радиальное осуществляется в нем через внутренний конусный механизм. Трение между конусом и тремя плунжерами, а также упругие деформации системы создают специфический разброс показаний. Тем не менее отсутствие шарнирных передач и высокая жесткость конструкции обеспечивают ему общую стабильность, превосходящую нутромеры с рычажной и клиновой передачами.

Для лучшего представления динамики изменений случайной погрешности Δ_p при увеличении количества измерений приведен график по показаниям $\Delta_{\%p}$, полученным в результате всех трех серий измерений (рис. 3).

Полученные графики изменений случайной погрешности (рис. 2) свидетельствуют о линейном характере динамики измерения случайной погрешности при достижении 25 и 60 измерений и о незначительной разнице в значениях случайной погрешностей. При этом проведение 25 измерений по сравнению с 60 измерениями несет меньше издержек и облегчает обработку данных.

Таким образом, проведение калибровки на ремонтном машиностроительном предприятии 25 измерений гарантирует, с одной стороны, достаточную точность оценки погрешности нутромера, а с другой – не влечет за собой лишних издержек.

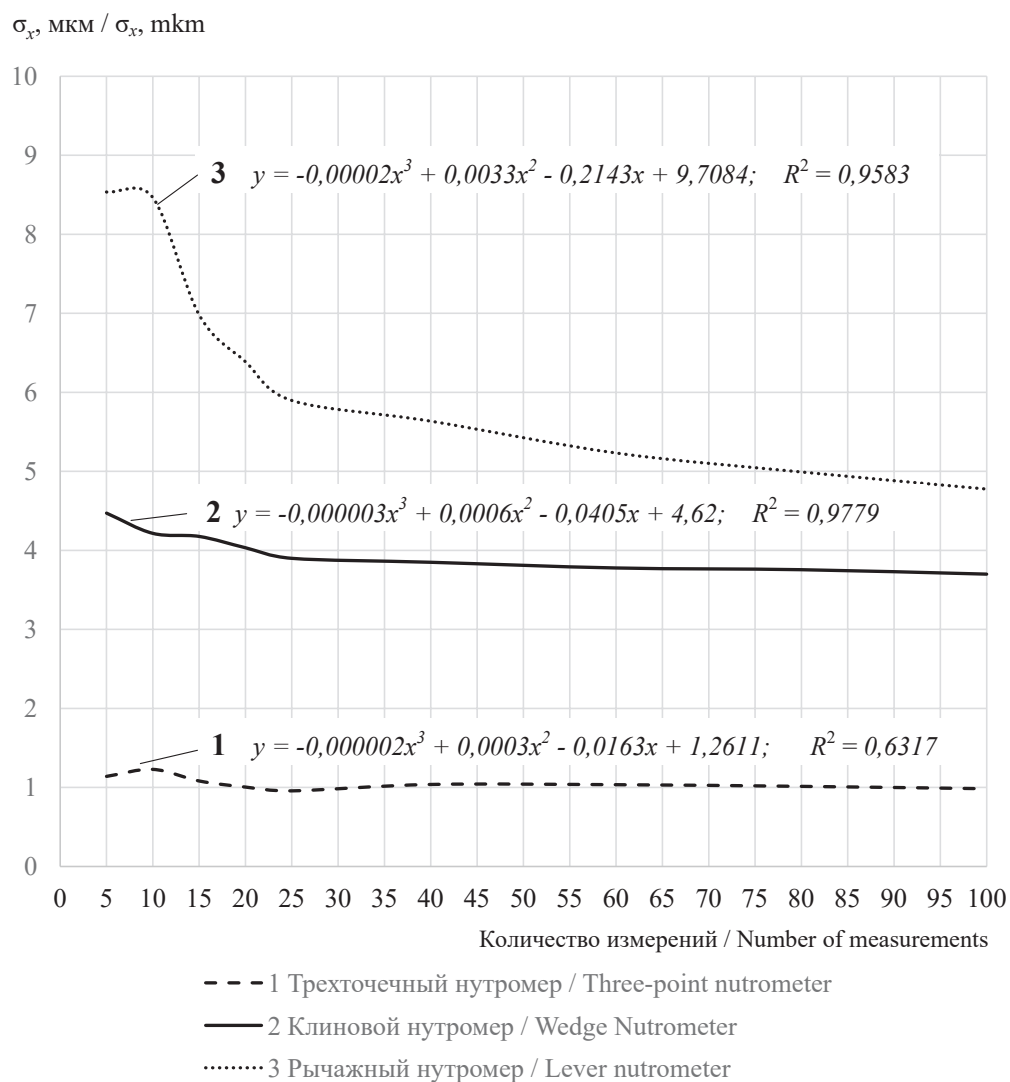
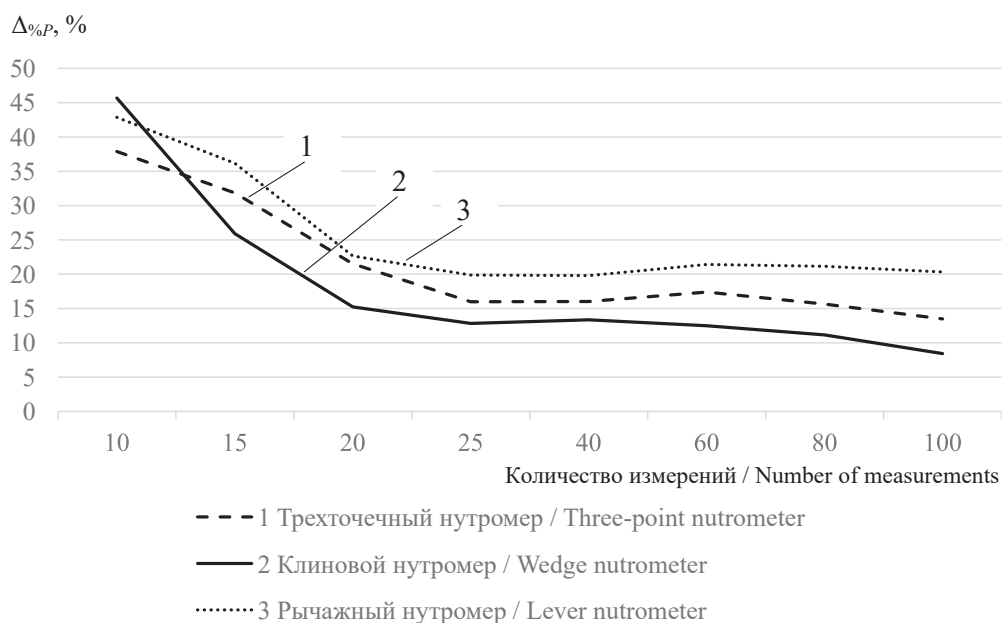
Рис. 2. Изменение σ_x при увеличении количества измеренийFig. 2. Change in σ_x with an increase in the number of measurements

Рис. 3. Изменение случайной погрешности при увеличении количества измерений

Fig. 3. Changes in the random error when increasing the number of measurements

Выводы

1. Разработанная методика оценки погрешности нутромеров может применяться на ремонтных предприятиях при отсутствии калибровки средств измерений.

2. Экспериментально установленное рациональное количество измерений (25) обеспечивает необходимую точность оценивания погрешности.

3. Рекомендуем внедрить предложенную методику в технологические карты контроля размеров деталей при ремонте сельскохозяйственной

техники, разработать и утвердить внутренние стандарты предприятия по периодичности оценки погрешности средств измерений с учетом сезонности ремонтных работ.

4. Применение предложенной методики позволит ремонтным предприятиям повысить достоверность контроля отверстий, снизить процент брака при восстановлении деталей, сократить гарантийные случаи, и как следствие – повысить конкурентоспособность отечественных ремонтных предприятий за счет высокого качества предоставляемых ремонтных услуг.

Список источников

1. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Гринченко Л.А. Расчет суммарного отклонения от соосности выходного вала коробки передач относительно уплотнения // Вестник машиностроения. 2025. Т. 104, № 4. С. 269-274. EDN: HGIQUU
2. Голиницкий П.В., Леонов О.А., Антонова У.Ю. Использование цифровых технологий в обеспечении максимального запаса на изнашивание соединений с зазором // Вестник машиностроения. 2025. Т. 104, № 8. С. 650-656. EDN: JDKASE
3. Корнилович С.А. Особенности контроля сборки цилиндропоршневой группы двигателей // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2018. № 1 (29). С. 99-105. EDN: YUPDZE
4. Будко С.И., Галигузов А.В. Исследование изношенных гильз цилиндров // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. 2025. № 1 (24). С. 35-40. EDN: LHLHML
5. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. Метрологические особенности контроля коренных шеек коленчатых валов при ремонте двигателей // Сельский механизатор. 2024. № 10. С. 50-52. EDN: RTJXZD
6. Галиев Р.М., Барыкин А.Ю., Илдарханов Р.Ф. и др. Анализ и методы повышения надежности двигателя внутреннего сгорания // Научно-технический вестник Поволжья. 2022. № 4. С. 54-56. EDN: ARJHIJ
7. Stukach O.V. Automated remote calibration of electrical measuring tools on the example of a digital multimeter NI PXI 4072 // Автоматика и программная инженерия. 2023. № 1 (43). С. 15-29. EDN: YBQXDE
8. Кукушкин А.В. Необходимость в расчете неопределенности при калибровке средств измерений // Вестник науки и образования. 2019. № 21-1 (75). С. 26-28. EDN: TAMHLP
9. Левин С.Ф. Калибровка средств измерений: комплекс проблем. Ч. 2 // Законодательная и прикладная метрология. 2023. № 2 (182). С. 35-40. EDN: HYAKWE
10. Данилов А.А. Оценка пригодности методик калибровки средств измерений // Главный метролог. 2018. № 2 (101). С. 42-47. EDN: XOSMIX
11. Овадыкова Ж.В., Отев К.С., Овадыков Э.Х., Окладников С.А. К вопросу о разработке методики калибровки средств измерений // Естественные и технические науки. 2020. № 11 (149). С. 169-174. EDN: SPXQJI
12. Горбушина С.Н., Фаузетдинова А.Р. Управление рисками процесса поверки (калибровки) средств измерений // Методы менеджмента качества. 2019. № 5. С. 44-47. EDN: ZFCMAX
13. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. и др. Методы и средства контроля качества обработки гильз цилиндров (ремонтных машиностроительных предприятиях // Вестник машиностроения. 2020. № 6. С. 40-45. EDN: WFKNZB

References

1. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Grinchenko L.A. Calculation of the total deviation from the coaxial alignment of the gearbox output shaft relative to the seal. *Vestnik mashinostroeniya*. 2025;104(4):269-274. (In Russ.)
2. Golitskiy P.V., Leonov O.A., Antonova U.Yu. Using digital technologies to ensure maximum wear margin for joints with a gap. *Vestnik mashinostroeniya*. 2025;104(8):650-656. (In Russ.)
3. Kornilovich S.A. Features of control of assemblage cylinder piston group. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2018;1:99-105. (In Russ.)
4. Budko S.I., Galiguzov A.V. Investigation of worn cylinder liners. *Konstruirovaniye, ispolzovanie i nadezhnost mashin selskokhozyaystvennogo naznacheniya*. 2025;1:35-40. (In Russ.)
5. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G. Metrological features of the control of the crankshaft root necks during engine repair. *Selskiy mekhanizator*. 2024;10:50-52. (In Russ.)
6. Galiev R.M., Barykin A.Yu., Ildarkhanov R.F. et al. Analysis and methods of improving the reliability of the internal combustion engine. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2022;4:54-56. (In Russ.)
7. Stukach O.V. Automated remote calibration of electrical measuring tools on the example of a digital multimeter NI PXI 4072. *Avtomatika i programmaya inzheneriya*. 2023;1:15-29.
8. Kukushkin A.V. Need for calculating uncertainty when calibrating measurement means. *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 2019;21-1:26-28. (In Russ.)
9. Levin S.F. Calibration of measuring instruments: a set of problems. Part 2. *Zakonodatelnaya i prikladnaya metrologiya*. 2023;2:35-40. (In Russ.)
10. Danilov A.A. Assessment of the suitability of calibration methods for measuring instruments. *Glavniy metrolog*. 2018;2:42-47. (In Russ.)
11. Ovadykova Zh.V., Otev K.S., Ovadykov E.Kh., Okladnikov S.A. To the question of development of a method for calibration of measurements. *Natural and Technical Sciences*. 2020;11:169-174. (In Russ.)
12. Gorbushina S.N., Fauzetdinova A.R. Risk management the process of verification (calibration) of measuring instruments. *Metody menedzhmenta kachestva*. 2019;5:44-47. (In Russ.)
13. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Golitskiy P.V., Antonova U.Yu. Methods and means of quality control of processing of cylinder liners at repair machine-building enterprises. *Vestnik mashinostroeniya*. 2020;6:40-45. (In Russ.)

Информация об авторах

- ¹ **Темасова Галина Николаевна**, д-р техн. наук, доцент;
temasova@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>; SPIN-код: 8805-3016
- ² **Арженовский Алексей Григорьевич**, д-р техн. наук,
профессор; arzhenovskij@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-3569-8934>; SPIN-код: 5549-4841
- ³ **Зимогорский Владислав Кириллович**, аспирант;
zimogorskij@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0009-0004-0060-7803>; SPIN-код: 1262-3315
- ⁴ **Зимогорский Ярослав Кириллович**, аспирант;
zimyarik@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-2124-6564>;
SPIN-код: 2754-4654
- ⁵ **Бондарев Владимир Сергеевич**, магистр; boss2569@ya.ru;
SPIN-код: 2754-4654
- ^{1, 2, 3, 4, 5} Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434,
Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

Г.Н. Темасова – концептуализация, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
А.Г. Арженовский – ресурсы, создание черновика рукописи;
В.К. Зимогорский – методология, проведение исследований;
Я.К. Зимогорский – администрирование проекта, создание черновика рукописи;
В.С. Бондарев – проведение исследований.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 26.02.2026, после рецензирования и доработки 22.06.2026; принята к публикации 03.07.2026

Author Information

- Galina N. Temasova**¹, DSc (Eng), Associate Professor;
temasova@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>; ResearcherID: AAD-6551-2022
- Aleksey G. Arzhnovsky**², DSc (Eng), Professor;
<https://orcid.org/0000-0002-3569-8934>;
arzhenovskij@rgau-msha.ru
- Vladislav K. Zimogorskiy**³, postgraduate student;
zimogorskij@rgau-msha.ru,
<https://orcid.org/0009-0004-0060-7803>
- Yaroslav K. Zimogorskiy**⁴, postgraduate student;
zimyarik@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2124-6564>
- Vladimir S. Bondarev**⁵, MSc student; boss2569@ya.ru
^{1, 2, 3, 4, 5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev
Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow,
127434, Russian Federation

Author Contributions:

G.N. Temasova – conceptualization, writing – review and editing of the manuscript;
A.G. Arzhnovskiy – resources, writing – original draft;
V.K. Zimogorskiy – methodology, investigation;
Ya.K. Zimogorskiy – project administration, writing – original draft;
V.S. Bondarev – investigation.

Conflict of interests

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

Received 26.02.2026; Revised 22.06.2026; Accepted 03.07.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.793:62-772.2:62-762.84

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-84-92>**Ремонтный комплект для восстановления герметичности и повышения ресурса уплотнительных соединений валов***А.В. Лапаев¹, О.М. Мельников^{2✉}, Н.В. Серов³, А.Г. Гамидов⁴, А.В. Серов⁵*¹МГТУ «СТАНКИН»; г. Москва, Россия^{2,3,4}Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия⁵Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет); г. Москва, Россия¹a9162968177@yandex.ru²melnikov@rgau-msha.ru ✉; <https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>³n.serov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7676-4344>⁴gamidov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4222-3726>⁵av_serov@vk.com; <https://orcid.org/0000-0001-6114-7354>

Аннотация. При капитальном ремонте энергонасыщенных тракторов около 70% валов ответственных узлов требуют восстановления рабочих поверхностей в зоне контакта с уплотнениями. Для предотвращения длительных простоев техники, вызванных неисправностями уплотнительных соединений валов, можно использовать ремонтный комплект (аптечку). Установка тонкостенной ремонтной втулки является быстрым, эффективным и экономически целесообразным способом восстановления герметичности уплотнительных соединений. Цель исследований – разработать ремонтный комплект для восстановления герметичности уплотнительных соединений, в состав которого входят новая манжета и упрочненная тонкостенная ремонтная втулка (ТРВ). Тонкостенная ремонтная втулка толщиной 0,25...0,35 мм изготовлена из стали AISI 321 с упрочнением TiN до микротвердости 18900...21700 МПа. Износостойкость соединений «Вал-манжета» с использованием предлагаемой ТРВ и втулки из стали 45 (эталон) исследовали на изготовленном стенде в течение 32 ч с добавлением в смазку узла 2% абразива. Установили, что титанирование поверхности втулок позволило увеличить их износостойкость в сравнении с заводскими валами в 10 раз и ресурс соединения – на 22%. Характеристики поверхности предлагаемых ТРВ соответствуют конструктивным параметрам, определяющим долговечность уплотнительных узлов валов (ГОСТ 8752-79). Тонкостенная ремонтная втулка позволяет восстановить работоспособность соединения в минимальные сроки (20-30 мин) даже в полевых условиях. Стоимость предлагаемой тонкостенной ремонтной втулки в 16 раз дешевле стоимости ТРВ иностранных производителей. Результаты исследований подтверждают целесообразность применения ремонтного комплекта (аптечки), включающего в себя упрочненную TiN тонкостенную ремонтную втулку (ТРВ), для восстановления рабочих поверхностей в зоне контакта с уплотнениями. Применение отечественных ТРВ позволит снизить зависимость от импортных комплектующих при восстановлении герметичности соединения «Вал-манжета».

Ключевые слова: вал-манжета; восстановление герметичности; долговечность уплотнительных узлов; тонкостенная ремонтная втулка; износ; износостойкость; ремонтный комплект

Для цитирования: Лапаев А.В., Мельников О.М., Серов Н.В., Гамидов А.Г., Серов А.В. Ремонтный комплект для восстановления герметичности и повышения ресурса уплотнительных соединений валов // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 4. С. 84-92. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-84-92>

ORIGINAL ARTICLE

Repair kit for restoring sealing integrity and increasing the service life of shaft seal assemblies

A.V. Lapaev¹, O.M. Melnikov², N.V. Serov³, A.G. Gamidov⁴, A.V. Serov⁵

¹ Moscow State University of Technology "STANKIN"; Moscow, Russia

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

⁵ Bauman Moscow State Technical University (National Research University); Moscow, Russia

¹ a9162968177@yandex.ru

² melnikov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>

³ n.serov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7676-4344>

⁴ gamidov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4222-3726>

⁵ av_serov@vk.com; <https://orcid.org/0000-0001-6114-7354>

Abstract. During the overhaul of high-horsepower tractors, about 70% of shafts in critical assemblies require restoration of working surfaces in the contact zone with seals. To prevent prolonged downtime of machinery caused by failures of shaft seal assemblies, a first-aid repair kit can be used. Installation of a thin-walled repair sleeve is a fast, effective, and economically feasible method of restoring sealing integrity. The research aimed to develop a repair kit for restoring sealing integrity, which includes a new sealing lip and a hardened thin-walled repair sleeve (TWRS). The thin-walled repair sleeve with a thickness of 0.25 to 0.35 mm is made of AISI 321 steel hardened with TiN to a microhardness of 18,900 to 21,700 MPa. The wear resistance of the "Shaft-Seal" assemblies using the proposed TWRS and a sleeve made of 45 steel (reference) was studied on a manufactured test bench for 32 hours with the addition of 2% abrasive to the assembly lubricant. It was found that titanium coating of the sleeve surfaces made it possible to increase their wear resistance by 10 times compared to factory shafts and the assembly service life by 22%. The surface characteristics of the proposed TWRS correspond to the design parameters determining the durability of shaft sealing units (GOST 8752-79). The thin-walled repair sleeve restores the operability of the assembly in minimum time (20-30 min) even in field conditions. The cost of the proposed thin-walled repair sleeve is 16 times lower than the cost of TWRS from foreign manufacturers. The research results confirm the feasibility of using a first-aid repair kit, including a TiN-hardened thin-walled repair sleeve (TWRS), for restoring working surfaces in the contact zone with seals. The use of domestically produced TWRS will reduce dependence on imported components when restoring the sealing integrity of the "Shaft-Seal" assembly.

Keywords: "shaft-seal" assembly; sealing integrity restoration; durability of sealing units; thin-walled repair sleeve; wear; wear resistance; repair kit

For citation: Lapaev A.V., Melnikov O.M., Serov N.V., Gamidov A.G., Serov A.V. Repair kit for restoring sealing integrity and increasing the service life of shaft seal assemblies. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(4):84-92. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-84-92>

Введение

Качественные показатели работы отечественного агропромышленного комплекса зависят от парка техники. В настоящее время в АПК 59,6% тракторов, 45,3% зерноуборочных и 44,3% кормоуборочных комбайнов находятся в эксплуатации в течение более 10 лет [1]. Эксплуатация устаревших машин сопровождается простоями по причине аварийных отказов (43% случаев) и недостатка запасных частей (20...21%) [2, 3]. В большинстве регионов России сервисные бригады преодолевают в среднем 200 км до места ремонта. В ожидании

устранения простоя техники без разборки основных узлов¹ проходят сутки, а с необходимостью разборки – до двух суток [4]. Один час простоя комбайна в зависимости от его производительности обходится хозяйству в 10...15 тыс. руб. [2]. При средней наработке комбайна 14 ч за смену потери хозяйства от простоев могут составить от 140 до 210 тыс. руб. в день.

Традиционные методы ремонта с заменой вышедших из строя деталей теряют свою актуальность в связи с дефицитом запасных частей для зарубежной и отечественной техники (до 40% деталей

¹ Лапаев А.В. Восстановление соединений «вал-манжета» подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2026. 137 с. EDN: AAHDNP

в российской технике – импортные). Использование ремонтных комплектов взамен деталей позволяет повысить эффективность ремонта почти на 46% [3]. Использование ремонтных комплектов способствует увеличению общего ресурса машины до предельного состояния, снижению удельного расхода запасных частей и сокращению времени нахождения техники в ремонте.

Одной из причин уменьшения срока службы машин является потеря герметичности уплотнительных соединений вследствие износа. Утечки масла через уплотнения в энергонасыщенных тракторах составляют 23...28%, а в гидроагрегатах – до 44% от общего числа отказов [5]. Основной причиной износа деталей, эксплуатирующихся в условиях запыленности, является попадание абразива в зону трения² [6]. Одним из путей уменьшения износа вала является упрочнение поверхности, контактирующей с манжетой. Альтернативным, быстрым и экономически выгодным решением является установка упрочненных тонкостенных ремонтных втулок ТРВ (рис. 1).

Тонкостенные ремонтные втулки иностранных производителей SKF (Швеция), Dichtomatik (Германия) и др., установленные на изношенные валы, лучшим образом зарекомендовали себя при устранении утечек уплотняемой среды в соединении

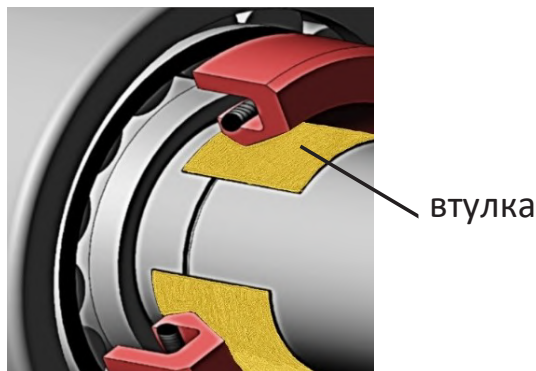


Рис. 1. Восстановленный уплотнительный узел

Fig. 1. Restored sealing assembly

«Вал-манжета». Однако использование втулок от данных производителей по стоимости сравнимо с заменой вала. Более того, в связи с введением санкций поставки от данных компаний прекращены. Следовательно, разработка ремонтных комплектов для восстановления уплотнительных соединений с применением тонкостенных втулок обеспечит импортозамещение запасных частей.

Цель исследований: разработать ремонтный комплект для восстановления герметичности и повышения износостойкости соединения «Вал-манжета».

Материалы и методы

Определяли износостойкость двух трибосоединений: в первом с манжетой контактировала втулка из стали 45 (эталон), распространенной для изготовления валов сельскохозяйственных машин; во-втором между манжетой и втулкой установили тонкостенную втулку из стали AISI 321, упрочненную TiN методом PVD (рис. 2, табл. 1) [6]. При необходимости фиксации втулки на валу допускается применение клеевых композиций.

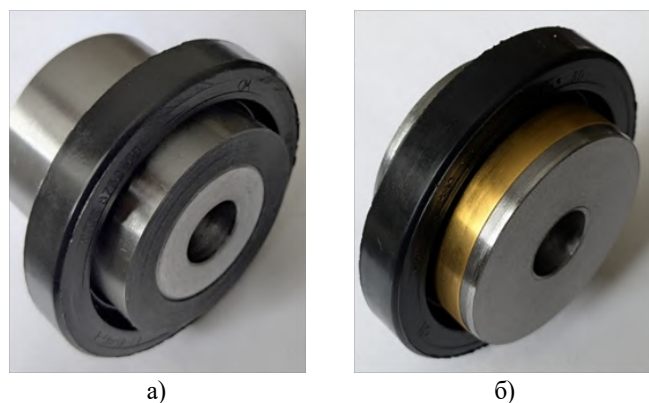


Рис. 2. Образцы для испытаний:

а) манжета и втулка из стали 45; б) манжета и тонкостенная втулка, упрочненная TiN

Fig. 2. Test specimens:

a) sealing lip and sleeve made of 45 steel; b) sealing lip and thin-walled sleeve hardened with TiN

Параметры поверхности валов и ТРВ

Таблица 1

Surface parameters of shafts and TWRS

Table 1

Деталь/Материал/Метод упрочнения	Обозначение покрытия	Толщина покрытия, мкм	Шероховатость рабочей поверхности Ra, мкм	Микротвердость, МПа
Вал/Сталь 45 (эталон)	нет	нет	0,16...0,63	7000...8000
ТРВ/Сталь AISI 321/Физическое осаждение PVD	TiN	4,2...5,2	0,18...0,27	18900...21700

² ООО «КЗ «Ростсельмаш»». [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1744871554&tld=ru&lang=ru&name=HowToSelect-Havester-Rev.pdf&text> (дата обращения: 15.04.2025).

Определяли износостойкость соединений «Вал-манжета» 5 образцов на специально изготовленном стенде (рис. 3) с возможностью испытаний одновременно двух соединений. Стенд состоит из асинхронного электродвигателя¹ с регулятором частоты вращения от 300 до 1350 мин⁻¹, рабочей камеры (рис. 3). Вращение от двигателя к валу камеры

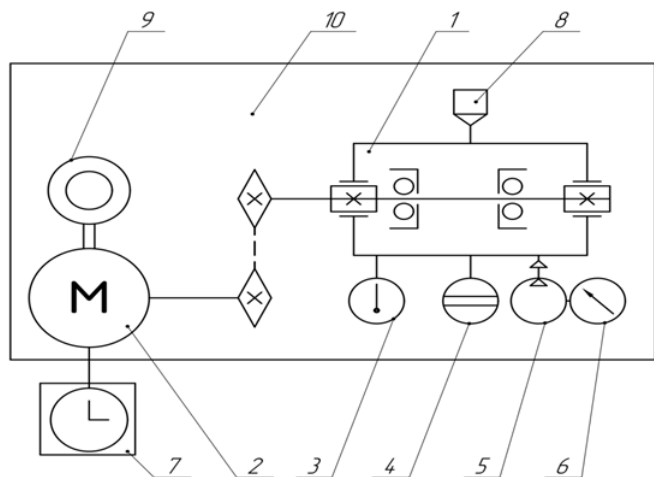


Рис. 3. Схема испытательного стенда:

- 1 – рабочая камера; 2 – двигатель; 3 – термометр;
4 – указатель уровня масла; 5 – компрессор;
6 – манометр; 7 – часы; 8 – заливная горловина;
9 – тахометр; 10 – рама

Fig. 3. Diagram of the test bench:

- 1 – working chamber; 2 – motor; 3 – thermometer;
4 – oil level indicator; 5 – compressor;
6 – pressure gauge; 7 – clock; 8 – filler neck; 9 – tachometer; 10 – frame

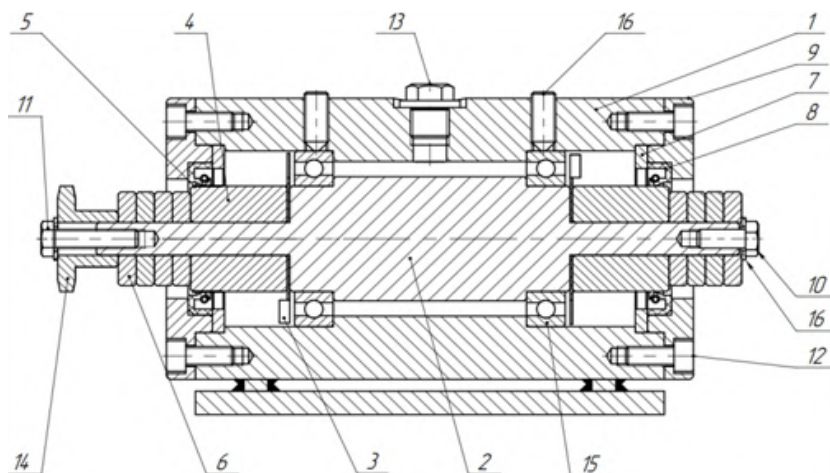


Рис. 4. Рабочая камера:

- 1 – корпус; 2 – вал; 3 – крыльчатка; 4 – втулка; 5 – тонкостенная втулка;
6 – пакет установочных шайб; 7 – упорная втулка; 8 – уплотнение; 9 – крышка; 10, 11 – крепежные винты;
12 – болт; 13 – заливная горловина; 14 – звездочка; 15 – подшипник; 16 – стопорная шайба

Fig. 4. Working chamber:

- 1 – housing; 2 – shaft; 3 – impeller; 4 – bushing; 5 – thin-walled sleeve; 6 – set of adjusting washers; 7 – thrust bushing;
8 – seal; 9 – cover; 10, 11 – mounting screws; 12 – bolt; 13 – filler neck; 14 – sprocket; 15 – bearing; 16 – lock washer

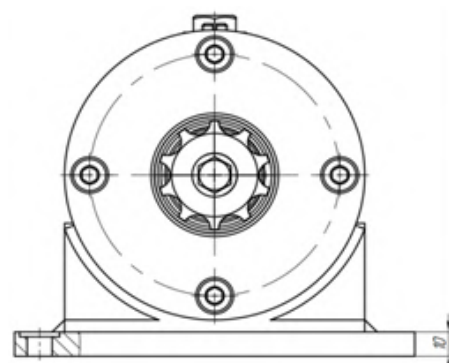
передается цепной передачей. Давление в камере повышается компрессором.

В корпусе камеры (рис. 4) установлен вал на двух подшипниках. На вал устанавливаем испытываемые втулки. Установочные шайбы позволяют крепить на вал втулки разной длины и перемещать их вдоль вала. Для разбрызгивания смазки на вал установлены крыльчатки³.

Сельскохозяйственная техника в течение основного времени работает в пылевом облаке. При увеличении содержания в смазке абразива от 0 до 2% скорость износа вырастает в 30 раз. Годовая загрузка тракторов в АПК в среднем по РФ составляют 940 ч. Для стендовых испытаний добавили в смазку 2% абразива, включающего в себя 87% кварцевого песка с микротвердостью 10500...11300 МПа и 13% оксида алюминия с микротвердостью 21000 МПа. Длительность испытаний установили в 30 раз меньше наработки (32 ч).

При испытаниях сравнивали интенсивность изнашивания серийных (эталонных) поверхностей соединений и соединений с ТРВ в идентичных условиях.

Испытания проводили в два этапа. На первом этапе детали соединения прирабатываются при частоте вращения вала 300 мин⁻¹ в течение 120 мин до стабилизации сил трения и температуры в зоне скольжения. Второй этап (основной) длится не менее 32 ч или до износа поверхности втулок на глубину 0,25 мм, равную толщине тонкостенной ремонтной втулки. Изнашивание происходит при частоте



³ Лапаев А.В. Восстановление соединений «вал-манжета» подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2026. 137 с. EDN: AAHDNP.

Характеристики измерительных приборов

Таблица 2

Characteristics of measuring instruments

Table 2

Прибор	Измеряемые параметры	Диапазон измерений	Погрешность
Прибор для измерений шероховатости и контура поверхности MarSurf LD120	Микрорельеф рабочей поверхности втулки	от 0,1 до 120 мкм	2%
Профилометр MarSurf M400	Ra , $Rmax$ рабочей поверхности втулки	от 0,007 до 10 мкм	3%
Профильный измерительный проектор HELIOS350-H	$D_{вн}$ манжеты	Длина: 0...250 мм Угол: 0...360°	$\pm 3'$

вращения вала рабочей камеры 600...1350 мин⁻¹ в режиме «Работа – остановка – работа» и давлении внутри камеры 0,05...0,15 МПа.

При подготовке к испытаниям проводили осмотр деталей на отсутствие повреждений сопрягаемых поверхностей манжет и втулок. Измерение профиля поверхности втулок проводили на приборе MarSurf LD120. Внутренний диаметр манжет измеряли с помощью HELIOS350-H. Шероховатость поверхности втулок определяли на профилометре MarSurf M400 (табл. 2).

По профилограммам определяли износ после приработки (W_{II}) и основного этапа испытаний (W_{III}) в течение 9, 18 и 32 ч работы стенда. Для этого частично разбирали рабочую камеру и снимали втулки и уплотнения, промывали их, сушили и производили замеры внутренних диаметров манжет и рабочих поверхностей втулок. Средний износ втулок определяли как среднее арифметическое по результатам замеров с 8 равноотстоящих по окружности участков (рис. 5).

Износ на участке профилографирования W_i определяли по формуле:

$$W_i = KW, \quad (1)$$

где K – коэффициент пропорциональности; W – глубина канавки (рис. 6), мкм.

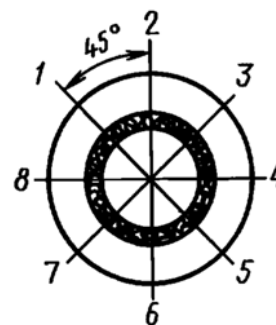


Рис. 5. Разметка втулок на участки для профилографирования

Fig. 5. Marking sleeves into sections for profilographing

$$K = \frac{R_{max}}{(H_{max} + H_{min})}, \quad (2)$$

где R_{max} , H_{max} , H_{min} – наибольшая высота неровностей, наибольшая высота выступа, наибольшая глубина впадины профиля, мкм (измеряются по профилограмме).

Износ втулок W_{cp} , мкм, определяли как среднее арифметическое по восьми участкам:

$$W_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^8 W_i}{8}. \quad (3)$$

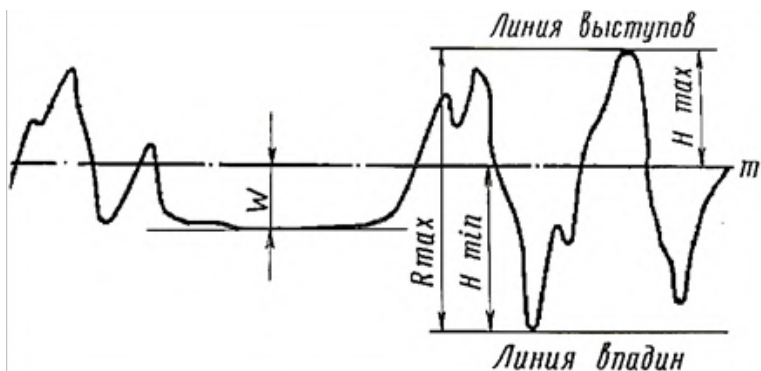


Рис. 6. Рельеф поверхности втулки с износом

Fig. 6. Surface topography of a worn sleeve

⁴ Лапаев А.В. Восстановление соединений «вал-манжета» подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2026. 137 с. EDN: AAHDNP.

По результатам износа деталей соединения строили графики.

Результаты и их обсуждение

Согласно результатам ранее проведенных исследований⁴ уровень упрочнения поверхности одной из деталей в соединениях «Вал-втулка» должен составлять не менее 15100 МПа.

Условия эксплуатации соединения «Вал-втулка», необходимые геометрические параметры, качество и твердость рабочей поверхности обуславливают сочетание следующих показателей тонкостенной ремонтной втулки: микротвердость >15100 МПа (по возможности > 21000 МПа); коррозионная стойкость; шероховатость поверхности $Ra = 0,16 \dots 0,63$ (ГОСТ 8752-79) и низкий коэффициент трения.

Процессы упрочнения должны сохранить форму втулки (исключить коробление детали),

шероховатость поверхности и исключить значительное увеличение толщины втулки.

Втулки изготовили толщиной 0,25...0,35 мм из нержавеющей стали AISI 321 для обеспечения коррозионной стойкости и упрочнили TiN методом физического осаждения из паровой фазы при температуре процесса 200...400°C для придания износостойкости рабочей поверхности втулок.

Результаты интенсивности изнашивания показали уменьшение износа более чем на 20% у трибосоединений с ТРВ, упрочненных TiN, относительно эталонных образцов. При этом износ ТРВ почти в 10 раз меньше износа эталонных поверхностей (рис. 7-9).

В целях исключения простоев техники, вызванных неисправностями в соединении «Вал-манжета», для сельскохозяйственных предприятий предлагается два варианта: изготовление ТРВ в сервисных центрах или в ремонтных мастерских;

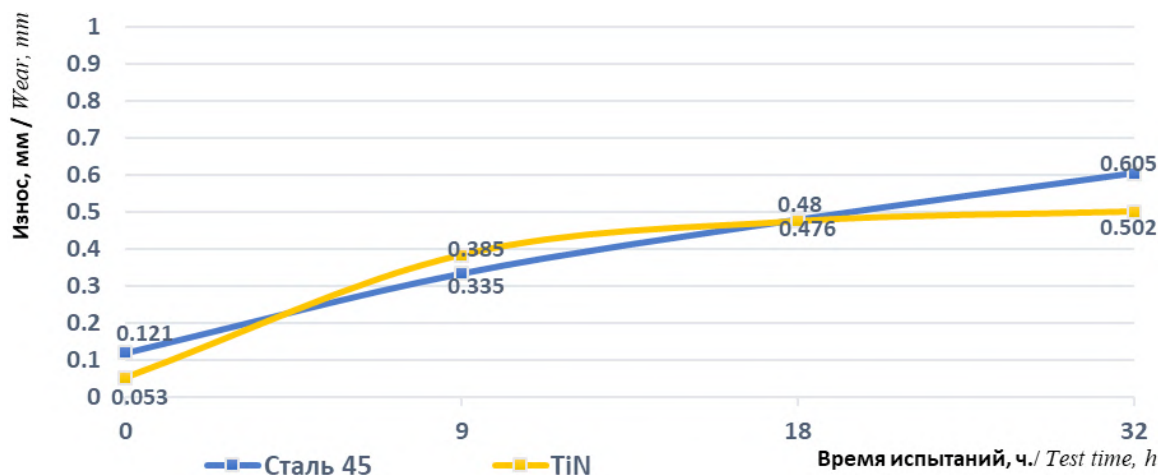


Рис. 7. Износ манжет

Fig. 7. Wear of sealing lips

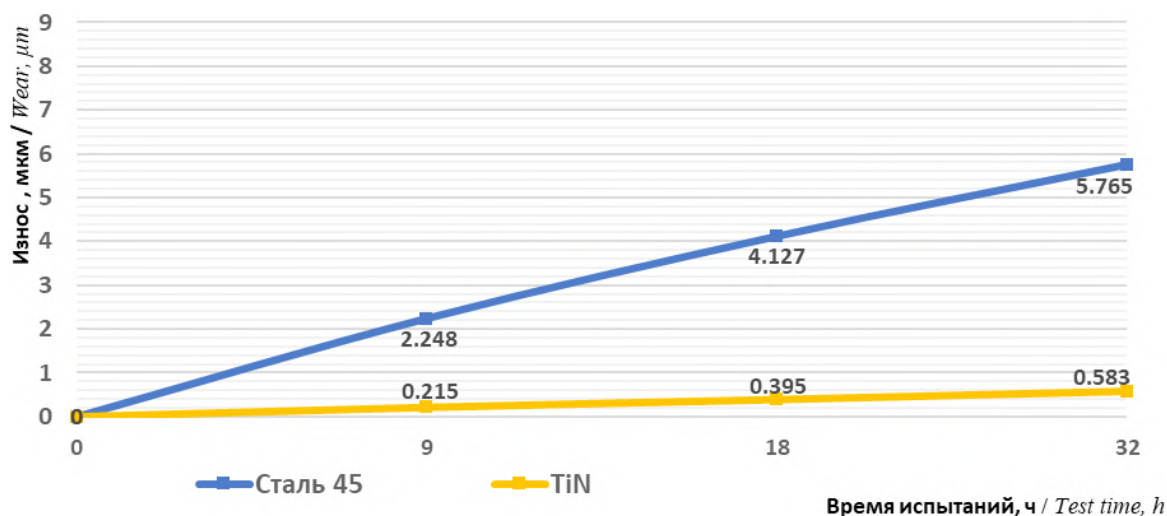


Рис. 8. Износ втулок

Fig. 7. Wear of sealing lips

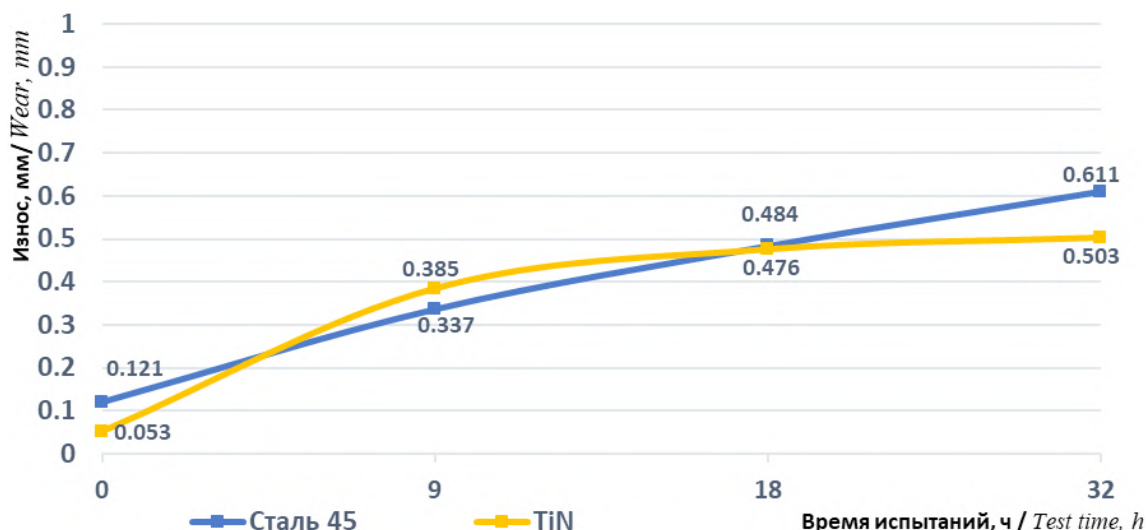


Рис. 9. Износ соединения «Вал-манжета»

Fig. 9. Wear of the “Shaft-Seal” assembly

использование готовых ремонтных комплектов (аптечек) (рис. 10).

При восстановлении герметичности соединения необходимо старую манжету заменить на новую. Предварительно следует очистить поверхность вала и установить на вал в зону его контакта с уплотнением тонкостенную втулку. Для фиксации ТРВ на валу предлагается использовать переходные посадки с клеевыми композициями [7-10]. Это связано с тем, что отклонение размеров валов может превышать 0,180 мм (исследование «ФНАЦ ВИМ»)⁵. При недостаточной фиксации

втулки на валу за счет посадки на внутреннюю поверхность втулки и поверхность вала после их обезжиривания нужно нанести клей и установить втулку на вал, после чего собрать узел. Применение клеевых композиций позволит обеспечить надежное соединение и минимизировать влияние отклонений размера вала на эксплуатационные характеристики узла. Для фиксации втулки на валу выбран продукт «ФГУП НИИ полимеров». Данный клей отверждается при зазоре до 0,3 мм и имеет допустимые напряжения сдвига 1,5 МПа. Сила трения между манжетой и валом диаметром 45 мм достигает



Рис. 10. Состав ремонтного комплекта (аптечки):

1 – ТРВ; 2 – манжета; 3 – средство для очистки и обезжиривания; 4 – клеевая композиция; 5 – наждачная бумага; 6 – салфетки

Fig. 10. Contents of the first-aid repair kit:

1 – TWRS; 2 – sealing lip; 3 – cleaning and degreasing agent; 4 – adhesive composition; 5 – sandpaper; 6 – wipes

⁵Нестеркин Г.А. Нормированные требования к качеству манжет, валов и их соединений // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении: IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: Сборник докладов. г. Тула, 18-20 апреля 2023 г. Тула: Тульский государственный университет, 2023. С. 146-148. EDN: QPFKRS

60 Н [11]. При ширине втулки 15 мм напряжение на сдвиг в клеевом слое между валом и ремонтной втулкой составит 0,03 МПа, что в 50 раз меньше допускаемых напряжений.

Стоимость полученных образцов составила 530 руб., что в 16 раз дешевле стоимости втулок иностранных производителей.

Выводы

1. Применение упрочненных тонкостенных ремонтных втулок TiN позволяет обеспечить восстановление контактирующей поверхности валов до требований, установленных ГОСТ 8752-79;

износостойкость полученной поверхности превышает эталонную в 10 раз.

2. Разработанные ремонтные комплекты (аптечки) для восстановления герметичности соединения «Вал-манжета» позволяют восстановить работоспособность соединения в минимальные сроки (20-30 мин) даже в полевых условиях.

3. Стоимость полученных образцов (530 руб.) в 16 раз дешевле стоимости втулок иностранных производителей.

4. Использование тонкостенной ремонтной втулки при ремонте техники позволит снизить зависимость от импортных комплектующих.

Список источников

1. Лукиенко Л.В. Анализ отказов эксплуатируемой сельскохозяйственной техники российского производства // *Агропродовольственная экономика*. 2024. № 5. С. 7-11. EDN: FCXNKK
2. Павлов А.П., Перфилов А.С. Обоснование эффективности применения стратегии эксплуатационного резервирования методом использования ремонтных комплектов // *Автотранспортное предприятие*. 2011. № 12. С. 50-52. EDN: OJQESX
3. Павлов А.П., Перфилов А.С. Обеспечение повышения уровня технического состояния парка машин на основе использования ремонтных комплектов // *Автотранспортное предприятие*. 2012. № 1. С. 53-55. EDN: ONMRHL
4. Коняева Н.И., Коняев Н.В. Особенности ремонта сельскохозяйственной техники в современных условиях // *Современные материалы, техника и технологии*. 2022. № 6 (45). С. 125-130. EDN: VQNZDK
5. Лапаев А.В., Мельников О.М. Методика расчета толщины ремонтной тонкостенной втулки для восстановления оптимального натяга в соединении «вал-манжета» // *Техника и оборудование для села*. 2025. № 1 (331). С. 31-34. EDN: LUBFOR
6. Лапаев А.В., Мельников О.М. Выбор метода поверхностного упрочнения ремонтной тонкостенной втулки // *Агроинженерия*. 2025. Т. 27, № 2. С. 77-83. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-77-83>
7. Игнаткин И.Ю., Серов А.В., Дроздов А.В. Способ восстановления вала редуктора с применением ремонтной детали и полимерных материалов // *Вестник НГИЭИ*. 2021. № 5. С. 53-64. EDN: GUBFOE
8. Кононенко А.С., Игнаткин И.Ю., Дроздов А.В. Восстановление шейки вала редуктора приклеиванием упрочненной втулки // *Клей. Герметики. Технологии*. 2021. № 8. С. 33-39. EDN: TTXMNN
9. Игнаткин И.Ю., Дроздов А.В. Способ восстановления вала редуктора с применением упрочненной ремонтной детали // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2020. № 9. С. 13-17. EDN: LRSMGN
10. Игнаткин И.Ю., Дроздов А.В. Способ восстановления изношенной поверхности вала редуктора в соединении «вал-манжета» с применением ремонтной втулки и полимерных материалов // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина»*. 2019. № 6. С. 40-45. EDN: RLGQMV
11. Мельников О.М., Казанцев С.П., Игнаткин И.Ю. и др. Совершенствование уплотнительных устройств подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24, № 3. С. 68-72. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-68-72>

References

1. Lukienko L.V. Analysis of failures Russian-made agricultural machinery in operation. *Agroprodovolstvennaya ekonomika*. 2024;5:7-11. (In Russ.)
2. Pavlov A.P., Perfilov A.S. Justification of the effectiveness of applying the operational redundancy strategy using the method of repair kits. *Avtotransportnoe predpriyatie*. 2011;12:50-52. (In Russ.)
3. Pavlov A.P., Perfilov A.S. Ensuring improvement of the technical condition level of the machine fleet based on the use of repair kits. *Avtotransportnoe predpriyatie*. 2012;1:53-55. (In Russ.)
4. Konyaeva N.I., Konyaev N.V. Features of agricultural repair techniques in modern conditions. *Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii*. 2022;6(45):125-130. (In Russ.)
5. Lapayev A.V., Melnikov O.M. Method for calculating the thickness of a thin-walled repair bushing to restore optimal tension in the shaft-seal connection. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2025;1(331):31-34. (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2025-1-31-34>
6. Lapayev A.V., Melnikov O.M. Selecting a method of surface hardening for thin-walled repair bushings. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(2):77-83. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-77-83>
7. Ignatkin I.Yu., Serov A.V., Drozdov A.V. Method for recovery of the reducer shaft using repair parts and polymer materials. *Vestnik NGIEI*. 2021;5:53-64. (In Russ.)
8. Kononenko A.S., Ignatkin I.Yu., Drozdov A.V. Renewal method of gearbox shaft neck by gluing of hardened sleeve. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. 2021;8:33-39. (In Russ.)
9. Ignatkin I.Yu., Drozdov A.V. Renewal method of gearbox shaft with use of strengthened repair part. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2020;9:13-17. (In Russ.)
10. Ignatkin I.Yu., Drozdov A.V. Method of restoring the worn surface of a reduction gear shaft in a 'shaft-to-collar' connection using a repair bushing and polymeric materials. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"*. 2019;6:40-45. (In Russ.)
11. Melnikov O.M., Kazantsev S.P., Ignatkin I.Yu. et al. Improving sealing elements of the bearing assembly of agricultural machinery. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(3):68-72. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-68-72>

Информация об авторах

- ¹ **Лапаев Андрей Валентинович**, канд. техн. наук, доцент;
a9162968177@yandex.ru; SPIN-код: 3820-5721
- ² **Мельников Олег Михайлович**, канд. техн. наук, доцент;
melnikov@rgau-msha.ru[✉];
<https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>; SPIN-код: 3684-2856
- ³ **Серов Никита Вячеславович**, канд. техн. наук, доцент;
n.serov@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-7676-4344>; SPIN-код: 3364-1840
- ⁴ **Гамидов Абдурахман Гаджиевич**, канд. техн. наук, доцент;
gamidov@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-4222-3726>; SPIN-код: 7150-6492
- ⁵ **Серов Антон Вячеславович**, канд. техн. наук, доцент;
av_serov@vk.com; <https://orcid.org/0000-0001-6114-7354>;
SPIN-код: 8269-4840
- ¹ Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»; 127994, Российская Федерация, г. Москва, Вадковский переулок, 1
- ^{2,3,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49
- ⁵ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет); 105005, Российская Федерация, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

Вклад авторов

Лапаев А.В. – проведение исследований, создание черновика рукописи;
Мельников О.М. – руководство исследованиями, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
Серов Н.В. – ресурсы, формальный анализ;
Гамидов А.Г. – верификация данных;
Серов А.В. – визуализация.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 10.03.2026; после рецензирования и доработки 29.06.2026; принята к публикации 03.07.2026

Author Information

- Andrey V. Lapaev**¹, CSc (Eng), Associate Professor;
a9162968177@yandex.ru
- Oleg M. Melnikov**², CSc (Eng), Associate Professor;
melnikov@rgau-msha.ru[✉];
<https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>;
Scopus Author ID: 57209744643
- Nikita V. Serov**³, CSc (Eng), Associate Professor;
n.serov@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-7676-4344>;
Scopus Author ID: 57226809065
- Abdurakhman G. Gamidov**⁴, CSc (Eng), Associate Professor;
gamidov@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-4222-3726>;
Scopus Author ID: 57224404150
- Anton V. Serov**⁵, CSc (Eng), Associate Professor;
av_serov@vk.com; <https://orcid.org/0000-0001-6114-7354>
- ¹ Moscow State University of Technology “STANKIN”; 127994, Russian Federation, Moscow, Vadkovsky Lane, 1
- ^{2,3,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49
- ⁵ Bauman Moscow State Technical University (National Research University); 105005, Russian Federation, Moscow, 2nd Baumanskaya Str., 5, Bld. 1

Author Contributions

Lapaev A.V. – investigation, writing – original draft;
Melnikov O.M. – research supervision, writing – review and editing of the manuscript;
Serov N.V. – resources, formal analysis;
Gamidov A.G. – data verification;
Serov A.V. – visualization.

Conflict of interests

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

Received 10.03.2026; Revised 29.06.2026; Accepted 03.07.2026

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 697.278:631.22

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-93-101>



Физическое моделирование теплового режима животноводческого помещения с комбинированной системой электротеплоаккумуляционного обогрева

Д.А. Тихомиров¹, А.В. Хименко²✉, А.В. Кузьмичев²

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

¹ tihda@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3526-4474>

² avmkh87@gmail.com✉; <https://orcid.org/0000-0003-2612-969X>

³ alkumkuzm@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4655-6448>

Аннотация. Параметры микроклимата на животноводческих фермах зависят от способа теплообеспечения и воздухообмена. Для повышения сохранности и продуктивности животных предложено использовать разработанный энергоэффективный электрический теплоаккумуляционный обогреватель (КЭТО), состоящий из аккумуляционного блока и блока прямого нагрева, совместно с потолочным вентилятором. Исследования проведены с целью оценки влияния работы потолочного вентилятора на параметры микроклимата в зоне расположения животных при его совместной работе с комбинированным электрическим теплоаккумуляционным обогревателем. Замеры параметров микроклимата (температуры и скорости) производили в нескольких точках по высоте помещения в двух режимах: при работающем потолочном вентиляторе и без него. В результате исследований получили интерполяционные полиномы зависимости изменения температуры воздуха с учетом расстояния от вертикальной оси потолочного вентилятора при двух режимах и зависимости распределения скорости воздуха в помещении при работающем вентиляторе. Установлено, что совместная работа КЭТО с потолочным вентилятором позволяет повысить температуру воздуха в рабочей зоне отапливаемого помещения на 2...3°C при снижении мощности системы теплообеспечения не менее чем на 15%. Энергосберегающий эффект достигается за счет использования теплоты воздуха, скапливающегося в верхней зоне помещения (под потолком), при его подаче потолочным вентилятором в рабочую зону. Результаты экспериментальных исследований применения КЭТО совместно с потолочными вентиляторами показали более равномерное распределение температуры воздуха по высоте помещения при соблюдении нормативной скорости движения воздуха в рабочей зоне (не более 0,2...0,4 м/с). Результаты исследований могут быть использованы при проектировании энергосберегающих систем электротеплоаккумуляционного обогрева животноводческих помещений ферм КРС и разработке типоразмерного ряда КЭТО.

Ключевые слова: ферма КРС; микроклимат; вентилятор; потолочный вентилятор; электрический теплоаккумуляционный обогреватель; воздухообмен; обогрев

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ФГБНУ ФНАЦ ВИМ FGUN-2025-0004.

Для цитирования: Тихомиров Д.А., Хименко А.В., Кузьмичев А.В. Физическое моделирование теплового режима животноводческого помещения с комбинированной системой электротеплоаккумуляционного обогрева // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 4. С. 93-101. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-93-101>

ORIGINAL ARTICLE

Physical modeling of the thermal mode of a livestock building with a combined electric thermal storage heating system

D.A. Tikhomirov¹, A.V. Khimenko^{2✉}, A.V. Kuzmichev³

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

¹ tihda@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3526-4474>

² avmkh87@gmail.com✉; <https://orcid.org/0000-0003-2612-969X>

³ alkumkuzm@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4655-6448>

Abstract. Indoor climate parameters on livestock farms depend on the heat supply and air exchange methods. To improve the survival rate and productivity of animals, it is proposed to use a developed energy-efficient combined electric thermal storage heater (CETSH), consisting of a storage unit and a direct heating unit, in conjunction with a ceiling fan. The research aimed to assess the effect of ceiling fan operation on indoor climate parameters in the animal-occupied zone during its joint operation with a combined electric thermal storage heater. Measurements of indoor climate parameters (temperature and velocity) were taken at several points along the height of the room in two modes: with the ceiling fan in the position “ON” and “OFF”. As a result, interpolation polynomials were obtained for the dependence of air temperature change taking into account the distance from the vertical axis of the ceiling fan in two modes, and for the dependence of air velocity distribution in the room with the fan operating. It was established that the joint operation of the CETSH with a ceiling fan makes it possible to increase the air temperature in the working zone of the heated room by 2 to 3°C while reducing the power of the heat supply system by at least 15%. The energy-saving effect is achieved by utilizing the heat of air accumulating in the upper zone of the room (under the ceiling) when it is supplied by the ceiling fan to the working zone. The results of experimental studies on the use of CETSH together with ceiling fans showed a more uniform distribution of air temperature along the height of the room while maintaining the standard air velocity in the working zone (not exceeding 0.2 to 0.4 m/s). The research results can be used in the design of energy-saving electric thermal storage heating systems for livestock buildings on cattle farms and in the development of a standard size range of CETSH.

Keywords: cattle farm; indoor climate; fan; ceiling fan; electric thermal storage heater; air exchange; air heating

Funding. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (No. FGUN-2025-0004).

For citation Tikhomirov D.A., Khimenko A.V., Kuzmichev A.V. Physical modeling of the thermal mode of a livestock building with a combined electric thermal storage heating system. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(4):93-101. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-93-101>

Введение

Применение на животноводческих фермах энергетического оборудования, в том числе для обогрева помещений, и высокая концентрация животных, являющихся источником теплоты, приводят к возникновению вертикального температурного градиента по высоте помещения. Менее плотный нагретый воздух, скапливаясь под потолком помещения, образует воздушную тепловую «подушку», а холодный и более влажный воздух скапливается в нижней части помещения у пола в зоне пребывания животных. В зависимости от высоты помещения разность температуры воздуха у потолка и пола может достигать 3...6°C. При этом в зоне расположения животных (0,5...1,0 м от пола) в холодный период года температура воздуха

часто не соответствует требуемым методическими рекомендациями по технологическому проектированию животноводческих ферм значениям. Применяемые в животноводческих помещениях приточно-вытяжные системы вентиляции и различные конструкции воздухораспределителей в большинстве случаев лишь частично решают поставленную задачу.

Для повышения интенсивности циркуляции воздуха разрабатываются системы вентиляции и кондиционирования [1] и вентиляционное оборудование, обеспечивающее движение воздушного потока в помещении по замкнутой траектории [2, 3]; предлагают комбинированную работу естественной вентиляции и потолочных вентиляторов [4]; выявляют факторы, влияющие на скорость воздушного

потока в помещении, создаваемого потолочными вентиляторами [5, 6].

Установлено, что применение потолочного вентилятора позволяет снизить концентрацию аэрозолей на высоте 1,5...2,0 м от пола (в зоне дыхания человека) более чем на 20% [7, 8]. Применение потолочных вентиляторов совместно с системой обогрева улучшает циркуляцию и подвижность воздуха (с допустимой скоростью движения в зоне нахождения животных), вследствие чего выравнивается температура воздуха по высоте помещения, снижаются тепловые потери через ограждающие конструкции, увеличивается коэффициент теплоотдачи отопительных приборов. У потолочных вентиляторов за счет регулирования частоты вращения двигателя можно изменить производительность, а соответственно и скорость движения воздуха. Вентиляторы в помещении можно устанавливать над зоной расположения животных, что позволит локально регулировать температуру воздуха в зависимости от их возраста и состояния [9, 10].

В качестве источников обогрева небольших помещений при групповом содержании телят, а также бытовых и технологических помещений ферм КРС предлагаются электронагревательные установки с аккумуляцией теплоты конвективного типа [9, 11, 12]. Разработана методика теплового расчета основных параметров системы электротеплоаккумуляционного отопления с центральной электрической теплоаккумуляционной установкой (ЭТАУ). На основании экспериментальных данных произведены расчеты количества аккумулируемой теплоты центральным ЭТАУ и теплоотдачи в воздушных каналах различной геометрии [13] и расчеты тепловых характеристик электрического теплоаккумуляционного обогревателя (ЭТО) динамического типа в режимах заряда и отдачи теплоты [14-16].

Актуальной задачей снижения энергозатрат на производство сельхозпродукции при повышении сохранности и продуктивности животных представляется совместное использование энергоэффективного электрического теплоаккумуляционного обогревателя, работающего по временному графику (периодического действия), и потолочного вентилятора.

Цель исследований: оценить влияние работы потолочного вентилятора на параметры микроклимата в зоне расположения животных при его совместной работе с комбинированным электрическим теплоаккумуляционным обогревателем (КЭТО).

Материалы и методы

На основании проведенного анализа часовых и суточных графиков потребления тепловой

и электрической энергии типовых ферм КРС обоснована возможность применения электрических теплоаккумуляционных установок для теплообеспечения технологических помещений с временным пребыванием персонала (помещения для содержания телят, ветсанпропускник, ветпункт, кормоприготовительные, моечные, бытовые помещения, помещения для обслуживания и ремонта сельскохозяйственной техники) [17].

При работе по временному графику теплоаккумуляционная отопительная установка должна вырабатывать необходимое количество теплоты в течение суток для обеспечения требуемых параметров микроклимата. У подавляющего большинства конструкций аккумуляционных электроотопительных установок в период заряда вся вырабатываемая тепловая энергия расходуется на нагрев теплоаккумулирующего сердечника. В ночное время температура воздуха в помещении может снизиться ниже нормируемых значений. Предлагается решить данную проблему путем добавления в конструкцию теплоаккумуляционного обогревателя дополнительного электронагревателя (электрокалорифера).

Функциональная схема комбинированного электрического теплоаккумуляционного обогревателя (КЭТО) показана на рисунке 1.

Конструкция КЭТО представляет собой два независимых нагревательных блока: блок аккумулярования (теплоаккумулятор) и блок прямого нагрева (электрокалорифер). Блок аккумулярования включает вентилятор В1, электронагреватели (ТЭНы), теплоаккумулирующий сердечник и управляемую воздушную заслонку (УВЗ). Блок прямого нагрева включает вентилятор В2 и электрический калорифер ЭК. Электрокалорифер может работать как в период заряда, так и в период отдачи теплоты (разряда) теплоаккумулятора (ТА). Комбинированный электрический теплоаккумуляционный обогреватель (КЭТО) предполагает совместную работу с потолочным вентилятором (ПВ), поэтому шкаф автоматического управления (ШУ) осуществляет контроль и управление КЭТО и ПВ.

На основе предложенной функциональной схемы разработана физическая модель КЭТО (рис. 2).

Мощность физической модели КЭТО рассчитывали на основе данных и рекомендаций¹ [14] и в соответствии с обоснованным типоразмерным рядом теплоаккумуляционных отопительных установок [18]. Электрическая мощность блока аккумулярования

¹ Богословский В.Н., Новожилов В.И., Симаков Б.Д., Титов В.П. Отопление и вентиляция: В 2 ч. Ч. 2. Вентиляция. М.: Стройиздат. 1976. 439 с.

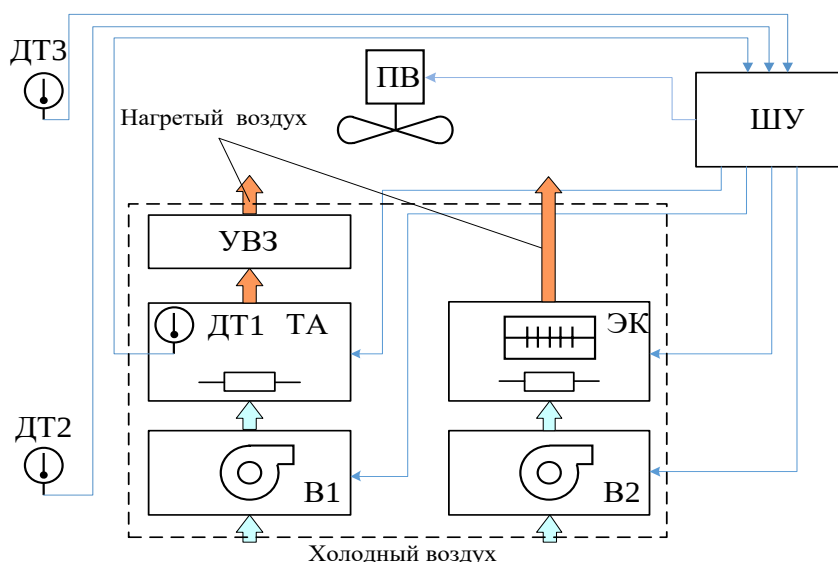


Рис. 1. Функциональная схема комбинированного электрического теплоаккумуляционного обогревателя (КЭТО):

ДТ1...ДТ3 – датчики температуры; В1, В2 – вентиляторы; ТА – теплоаккумулятор с электрическим нагревателем; УВЗ – управляемая воздушная заслонка; ЭК – электрокалорифер; ШУ – шкаф управления; ПВ – потолочный вентилятор

Fig. 1. Functional flow diagram of a combined electric thermal-storage heater (CETSH):

TS1 to TS3 – temperature sensors; F1, F2 – fans; TS – thermal-storage with electric heater; CAD – controlled air damper; EH – electric heater; CP – control panel; CF – ceiling fan

КЭТО принята как $P_{\text{это}} \approx 2$ кВт (3 ТЭНа по 0,63 кВт), мощность блока прямого нагрева – электрокалорифера – $P_{\text{э}} = 1$ кВт (2 ТЭНа по 0,5 кВт). В блоке забора воздуха и электрокалорифера КЭТО установлены по одному тангенциальному вентилятору мощностью 27 Вт и производительностью 135 м³/ч (рис. 2).

Измерение температуры воздуха по высоте производили с помощью измерительной стойки 5 в пяти характерных точках (Т1-Т5) (рис. 3) при совместной работе КЭТО и потолочного вентилятора.

Измерительная стойка состоит из двух соединенных между собой металлических прутков, на которых через 0,5 м от отметки 0,1 до 2,1 м от уровня пола установлены пять датчиков температуры TSM50M (предел основной приведенной погрешности – 0,25%). Температуру воздуха измеряют на выходе из ЭТО 3 (Т6, TSM50M), температуру воздуха на выходе из блока прямого нагрева КЭТО 2 (Т7, TSM50M) и температуру поверхности корпуса комбинированного КЭТО (Т8, датчик ТХ-К(L) с пределом основной приведенной погрешности 0,5%). В качестве вторичного преобразователя температур (блок измерения) использовали модуль ввода – аналоговый измерительный 8-канальный ОБЕН МВА8 (класс точности – 0,25; 0,5).

Общий вид лабораторного стенда для исследования теплового режима помещения при совместной работе КЭТО и потолочного вентилятора показан на рисунке 4.



Рис. 2. Физическая модель комбинированного электрического теплоаккумуляционного обогревателя (КЭТО):

1 – корпус электрического теплоаккумуляционного обогревателя; 2, 3 – высокотемпературная тепловая изоляция; 4 – ТЭНы теплоаккумулирующего сердечника КЭТО; 5 – теплоаккумулирующий сердечник КЭТО; 6 – тангенциальный вентилятор разряда (забора воздуха) КЭТО; 7 – тангенциальный вентилятор электрокалорифера; 8 – корпус блока электрокалорифера; 9 – ТЭНы электрокалорифера

Fig. 2. CETSH physical model:

1 – CETSH housing; 2,3 – high-temperature thermal insulation; 4 – heating elements heat-storage core of CETSH; 5 – CETSH heat-storage core; 6 – CETSH tangential discharge fan (air intake); 7 – tangential fan of the electric heater; 8 – electric heater block housing; 9 – heating elements of the electric heater

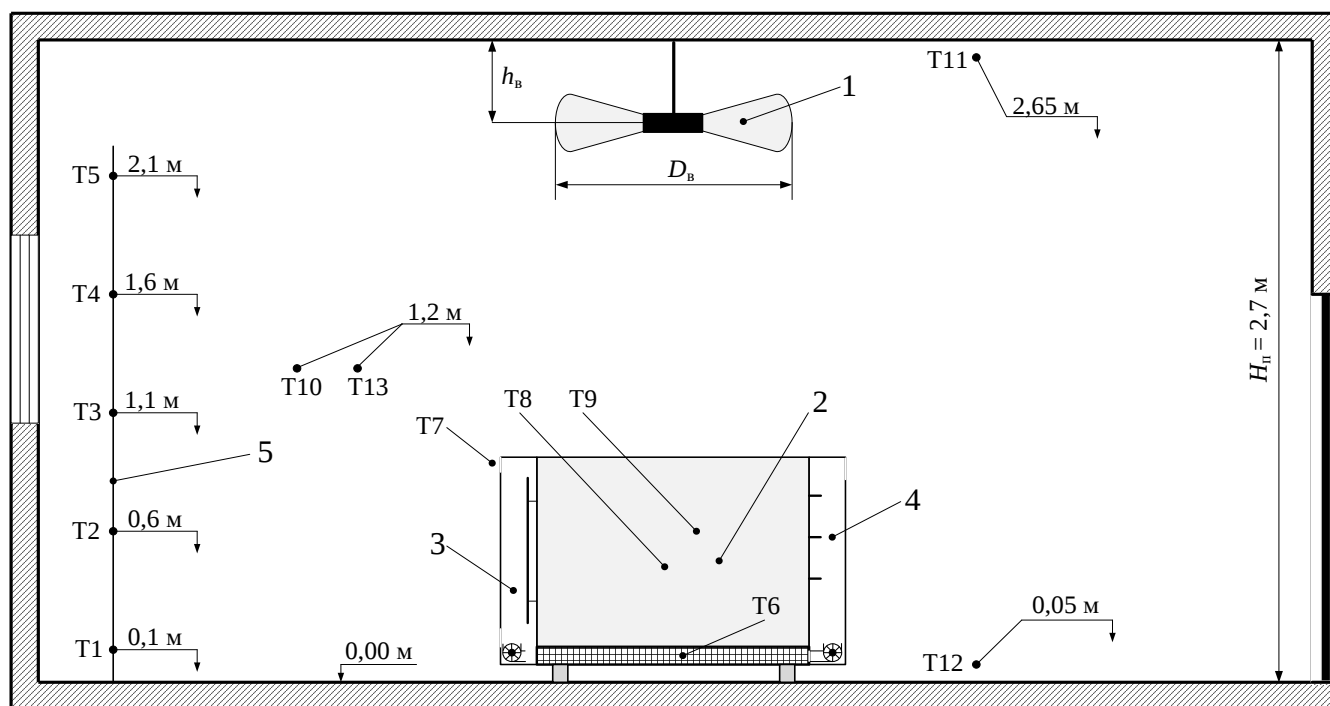


Рис. 3. Схема размещения датчиков температуры в исследуемом помещении:

1 – потолочный вентилятор; 2 – комбинированный электрический теплоаккумуляционный обогреватель (физическая модель КЭТО); 3 – блок прямого нагрева (электрокалорифер (ЭТО) с тангенциальным вентилятором); 4 – блок подключения ТЭНов и забора воздуха с тангенциальным вентилятором КЭТО; 5 – измерительная стойка

Fig. 3. Layout of temperature sensors placement in the test premises:

1 – ceiling fan; 2 – CETSH unit (physical model); 3 – direct heating unit of CETSH: electric heater with a tangential fan; 4 – heating element connection unit and air intake unit with a tangential fan of CETSH; 5 – measuring rack

Размеры исследуемого помещения: длина $L_n = 5,4$ м; ширина $B_n = 3,5$ м; высота $H_n = 2,7$ м. Измерения скорости движения воздуха в исследуемом помещении $v_{n,cr}$ при работе КЭТО совместно с потолочным вентилятором выполняли по высоте помещения в 4 характерных точках через 0,5 м от отметки 0,6 м до отметки 2,1 м от уровня пола с помощью термоанемометра ТТМ-2-02-2 с выносным зондом с диапазоном измерения от 0,1 до 10 м/с и точностью измерения до 10%.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования температуры воздуха в помещении при совместной работе потолочного вентилятора и КЭТО в период отдачи теплоты в зависимости от высоты от уровня пола и расстояния от вертикальной оси подвеса потолочного вентилятора представлены на рисунке 5.

Замеры параметров микроклимата помещения температуры и скорости производили в двух режимах: при работе потолочного вентилятора и без него. При выключенном вентиляторе температура воздуха в помещении на уровне $h_{wa} = 1$ м от пола составляла 11...12°C.

С помощью математического пакета Maple17 выполнена аппроксимация данных с использо-

ванием метода наименьших квадратов и получен интерполяционный полином зависимости распределения температуры воздуха в помещении при неработающем потолочном вентиляторе t_p и работающем t_p^B :

$$t_p = 1,35h_p^2 + 0,03h_p r - 0,1r^2 - 1,26h_p + 0,2r + 11,38; \quad (1)$$

$$t_p^B = -0,6h_p^2 + 0,064h_p r - 0,12r^2 + 3,59h_p + 0,21r + 12,08, \quad (2)$$

где h_p – высота помещения от уровня пола, м; r – расстояние (удаленность) от вертикальной оси подвеса потолочного вентилятора, м.

Выбор диаметра лопастей потолочного вентилятора и частоты вращения будет зависеть от высоты помещения и требуемой скорости движения воздуха в зоне нахождения животных. Методика расчета параметров потолочного вентилятора приведена в работе [9].

В результате исследования скорости движения воздуха установлено, что при расположении КЭТО на расстоянии $1,5 D_B$ (D_B – диаметр лопастей потолочного вентилятора, м) от вертикальной оси подвеса потолочного вентилятора их взаимовлиянием на скорость движения воздуха в рабочей зоне и на конвективный теплообмен можно пренебречь. Скорость движения воздуха v_B в объеме отапливаемого

помещения при работе потолочного вентилятора показана на рисунке 6.

Интерполяционный полином зависимости распределения скорости воздуха в помещении при работающем вентиляторе имеет вид:

$$v_b = -0,006h_p^2 - 0,35h_p r + 0,57r^2 + 0,32h_p - 1,05r + 0,63. \quad (3)$$

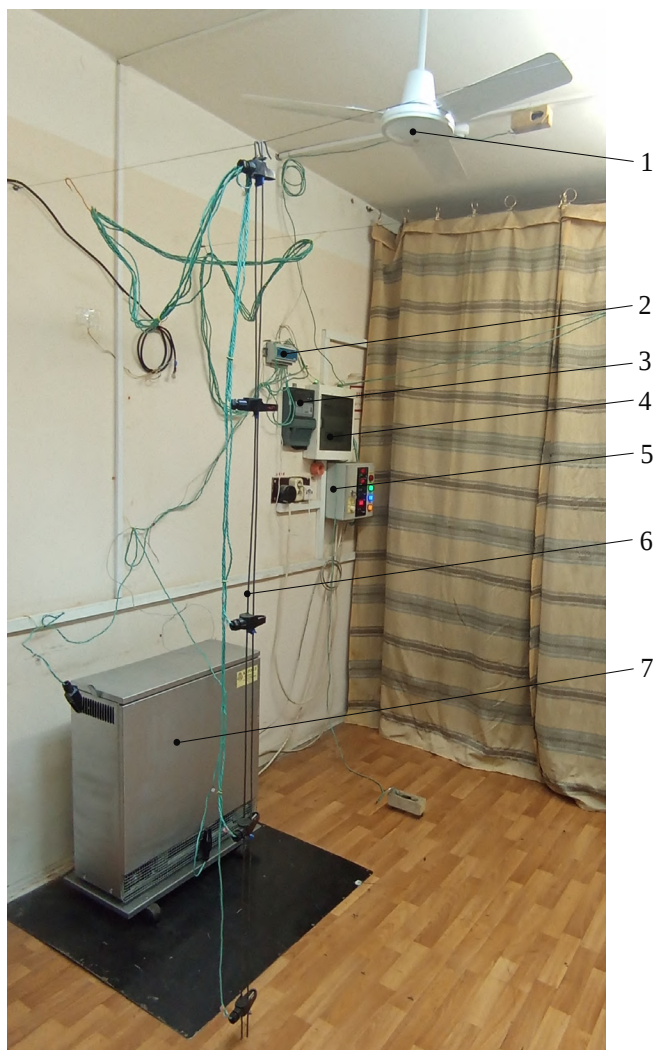


Рис. 4. Общий вид лабораторного стенда для исследования теплового режима помещения при совместной работе КЭТО и потолочного вентилятора:
1 – потолочный вентилятор; 2 – блок измерения (модуль ввода – аналоговый измерительный 8-канальный ОВЕН МВА8); 3 – электрический счетчик – трехфазный Меркурий 230; 4 – щит силовой; 5 – щит управления элементами системы электрообогрева; 6 – измерительная стойка; 7 – комбинированный ЭТО (физическая модель)

Fig. 4. General view of the laboratory bench for studying the thermal conditions of premises during combined operation of the CETSH unit and a ceiling fan:

1 – ceiling fan; 2 – measurement unit: OVEN MVA88-channel analog input module; 3 – Mercury 230 three-phase electric meter; 4 – power panel; 5 – control panel for the electric heating system elements; 6 – measuring rack; 7 – CETSH unit (physical model)

При совместной работе КЭТО с потолочным вентилятором скорость движения воздуха в рабочей зоне помещения составляет не более $0,2 \dots 0,4$ м/с, что не превышает нормативных значений².

Режим автоматического поддержания температуры воздуха в рабочей зоне помещения при работе

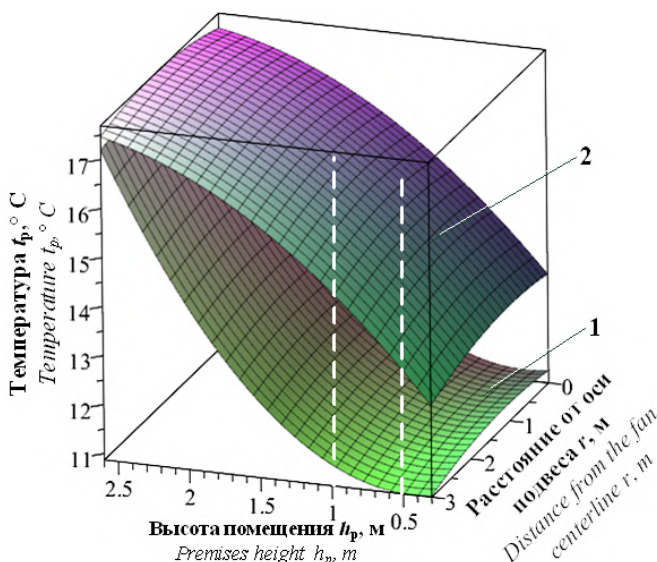


Рис. 5. Распределение температуры воздуха в помещении по высоте h_p с учетом расстояния от оси подвеса вентилятора r :
1 – при выключенном потолочном вентиляторе, 2 – при работающем вентиляторе

Fig. 5. Distribution of air temperature by premises height h_p and distance from the fan centerline r :
1 – with the ceiling fan in the OFF-position, 2 – with the ceiling fan in the ON-position

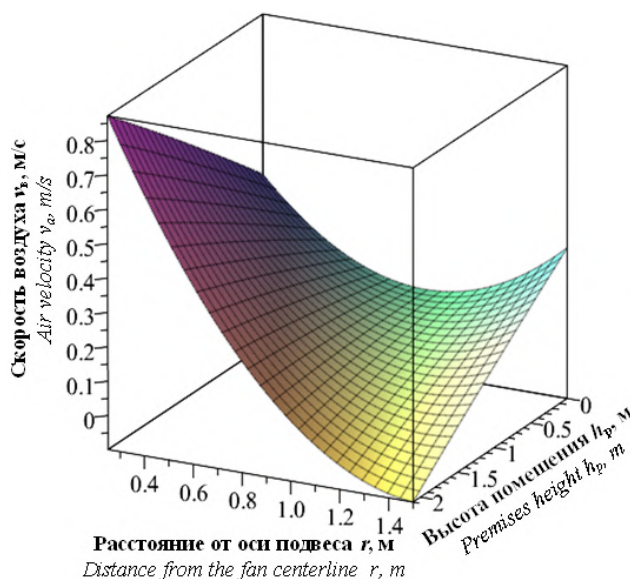


Рис. 6. Скорость движения воздуха v_b в объеме исследуемого помещения при работе потолочного вентилятора

Fig. 6. Air velocity in the test premises volume during ceiling fan operation

КЭТО и потолочного вентилятора показан на графиках рисунка 7. Температура воздуха в рабочей зоне задана как $t_{p.z.} = 21 \pm 1^\circ\text{C}$ (t_2). При значении ниже 20°C включается КЭТО (рис. 7). При невозможности поддержания заданной температуры воздуха КЭТО в вечернее и ночное время, а также в случае снижения температуры ниже установленной (в нашем

примере – $19,5^\circ\text{C}$) включается встроенный калорифер КЭТО для подогрева воздуха до заданного значения. При превышении разницы температуры воздуха у потолка и пола Δt (рис. 8) более установленного значения (в нашем случае $\Delta t = 1,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$) автоматически включается потолочный вентилятор для выравнивания температуры по высоте помещения.

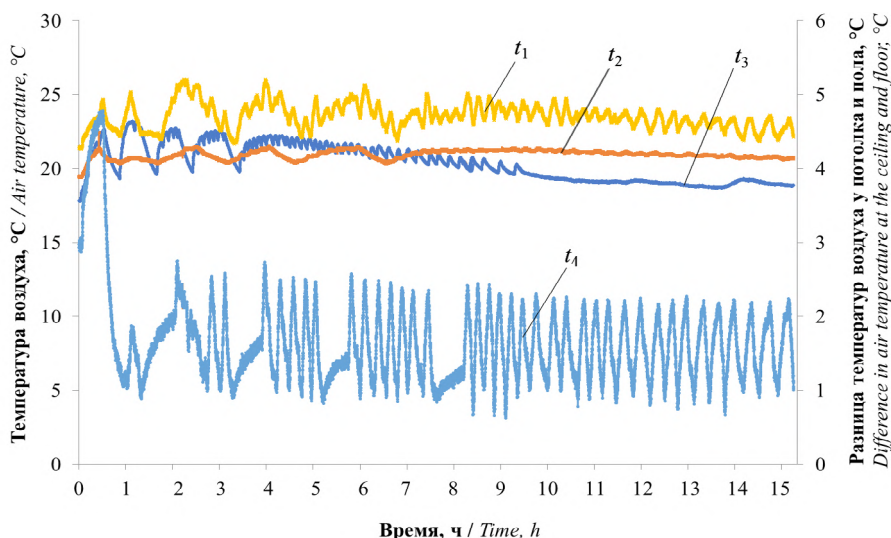


Рис. 7. График изменения температуры воздуха в помещении при автоматическом регулировании:

t_1 – температура воздуха у потолка, $^\circ\text{C}$; t_2 – температура воздуха в рабочей зоне, $^\circ\text{C}$;
 t_3 – температура воздуха у пола, $^\circ\text{C}$; t_4 – разность температур воздуха у потолка и у пола, $^\circ\text{C}$

Fig. 7. Graph of air temperature variation in the room under automatic control:

t_1 – air temperature near the ceiling, $^\circ\text{C}$; t_2 – air temperature in the working area, $^\circ\text{C}$;
 t_3 – air temperature near the floor, $^\circ\text{C}$; t_4 – air temperature difference between the ceiling and the floor, $^\circ\text{C}$

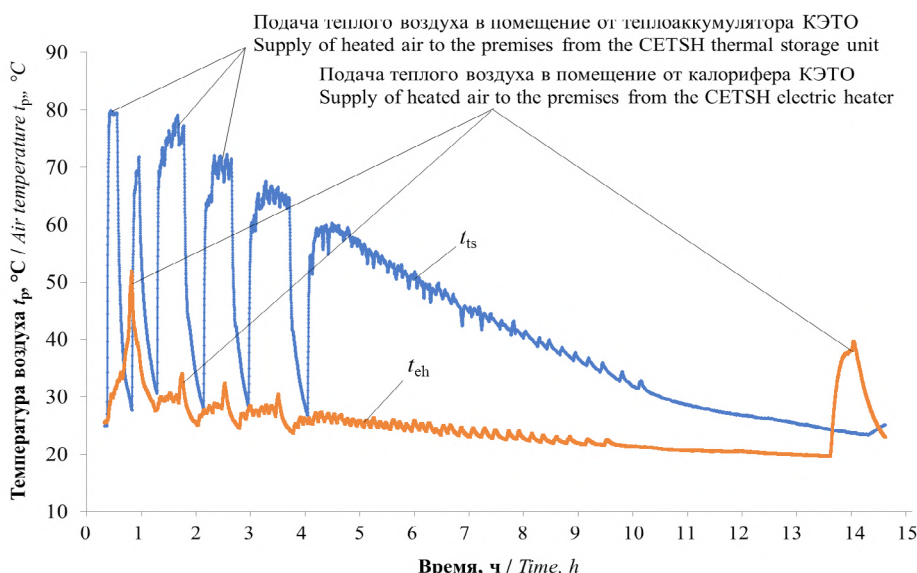


Рис. 8. Температура воздуха на выходе из КЭТО:

t_{ts} – температура воздуха, выходящего из теплоаккумуляционного блока КЭТО;
 t_{ch} – температура воздуха, выходящего из калорифера КЭТО

Fig. 8. Air temperatures at the CETSH outlet:

t_{ts} – air temperature at the outlet of the CETSH thermal storage unit; t_{ch} – air temperature at the outlet of the CETSH electric heater

²РД-АПК 1.10.01.01-18. Методические рекомендации по технологическому проектированию ферм и комплексов крупного рогатого скота. М.: Минсельхоз России, 2018.

В результате экспериментальных исследований установлено, что совместная работа КЭТО и потолочного вентилятора позволяет поддерживать требуемые температурные условия в зоне размещения животных. При этом скорость движения воздуха в рабочей зоне не превышает нормативных значений.

Выводы

1. Разработанный комбинированный электрический теплоаккумуляционный обогреватель (КЭТО), состоящий из аккумуляционного блока и блока прямого нагрева, способен работать по временному графику выработки тепловой энергии (периодического действия) и обеспечивать нормативные значения температуры воздуха в животноводческих помещениях.

2. При совместной работе КЭТО с потолочным вентилятором температура воздуха в рабочей зоне отапливаемого помещения повышается на 2...3°C. Энергосберегающий эффект достигается за счет

направления потолочным вентилятором теплого воздуха, скапливающегося у потолка, в рабочую зону помещения. По предварительной оценке, за счет этого можно снизить мощность электрической системы обогрева не менее чем на 15%.

3. Совместная работа КЭТО и потолочного вентилятора позволяет поддерживать необходимый температурный режим в животноводческом помещении при обеспечении скорости движения воздуха в рабочей зоне не более 0,2...0,4 м/с, не превышающей нормативных значений.

4. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку имитационной компьютерной модели животноводческого помещения при обогреве КЭТО с потолочным вентилятором. Планируется также проведение натурных испытаний для оценки влияния комбинированной системы электротеплоаккумуляционного обогрева на концентрацию вредных выделений в зоне расположения животных.

Список источников

1. Игнаткин И.Ю., Ерохин М.Н., Кирсанов В.В. Определение дальности распространения воздушной струи в струйной системе вентиляции животноводческих объектов // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 3. С. 23-32. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-23-32>
2. Новиков Н.Н. Энергоэффективные системы микроклимата в помещениях для содержания животных // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2018. № 4. С. 159-167. EDN: YNVDZB
3. Новиков Н.Н., Кольчик И.Е. Кондиционирование воздуха в животноводческих помещениях при нестационарной вентиляции // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 1. С. 52-58. EDN: RQXZTK
4. Flood Jr C.A., Koon J.L., Trumbull R.D. et al. Energy savings with ceiling fans in broiler houses. *Applied Engineering in Agriculture*. 1998;14(3):305-309
5. Liu Sh., Lipczynska A., Schiavon S. et al. Detailed experimental investigation of air speed field induced by ceiling fans. *Building and Environment*. 2018;142:342-360. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.06.037>
6. Raftery P., Fizer J., Chen W. et al. Ceiling fans: Predicting indoor air speeds based on full scale laboratory measurements. *Building and Environment*. 2019;155:210-223. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.03.040>
7. Omrani S., Matour S., Bamdad K. et al. Ceiling fans as ventilation assisting devices in buildings: A critical review. *Building and Environment*. 2021;201:108010. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108010>
8. Li W., Chong A., Hasama T. et al. Effects of ceiling fans on airborne transmission in an air-conditioned space. *Building and Environment*. 2021;198:107887. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.107887>
9. Khimenko A., Tikhomirov D., Trunov S. et al. Electric heating system with thermal storage units and ceiling fans for cattle-breeding farms. *Agriculture*. 2022;12(11):1753. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111753>
10. Трунов С.С., Растимешин С.А. Экономия энергии при использовании потолочных вентиляторов в животноводческих

References

1. Ignatkin I.Yu., Erokhin M.N., Kirsanov V.V. Determination of an air jet propagation range in the jet ventilation system of livestock facilities. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(3):23-32 (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-23-32>
2. Novikov N.N. Energy-efficient indoor climate systems in animal keeping premises. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*. 2018;4:159-167. (In Russ.)
3. Novikov N.N., Kolchik I.E. Air conditioning in livestock buildings with temporary ventilation. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2021;1:52-58 (In Russ.). <https://doi.org/10.51794/27132064-2021-1-52>
4. Flood Jr, C. A., Koon J.L., Trumbull R.D. et al. Energy savings with ceiling fans in broiler houses. *Applied Engineering in Agriculture*. 1998;14(3):305-309.
5. Liu Sh., Lipczynska A., Schiavon S. et al. Detailed experimental investigation of air speed field induced by ceiling fans. *Building and Environment*. 2018;142:342-360. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.06.037>
6. Raftery P., Fizer J., Chen W. et al. Ceiling fans: Predicting indoor air speeds based on full scale laboratory measurements. *Building and Environment*. 2019;155:210-223. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.03.040>
7. Omrani S., Matour S., Bamdad K. et al.: Ceiling fans as ventilation assisting devices in buildings: A critical review. *Building and Environment*. 2021;201:108010. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108010>
8. Li W., Chong A., Hasama T. et al. Effects of ceiling fans on airborne transmission in an air-conditioned space. *Building and Environment*. 2021;198:107887. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.107887>
9. Khimenko A., Tikhomirov D., Trunov S. et al. Electric heating system with thermal storage units and ceiling fans for cattle-breeding farms. *Agriculture*. 2022;12(11):1753. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111753>
10. Trunov S.S., Rastimeshin S.A. Energy savings when using ceiling fans in livestock premises. *Vestnik VIESKH*. 2016;3:35-37. (In Russ.)

помещениях // Вестник ВИЭСХ. 2016. № 3. С. 35-37. EDN: WWWVCZ

11. Тихомиров Д.А., Трунов С.С., Дудин С.Н. Теплоаккумуляционная электроустановка для нагрева воздуха // Сельский механизатор. 2019. № 8. С. 31-33. EDN: YRDHZG

12. Трунов С.С., Хименко А.В., Тихомиров Д.А. Электрическая теплоаккумуляционная отопительная установка для животноводческих помещений // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. Т. 71, № 4. С. 73-81. EDN: BDEVPD

13. Zhao H., Yan N., Xing Z. et al. Thermal calculation and experimental investigation of electric heating and solid thermal storage system. *Energies*. 2020;13(20):5241. <https://doi.org/10.3390/en13205241>

14. Khimenko A.V., Tikhomirov D.A., Kuzmichev A.V. et al. Thermal characteristics and operation efficiency of solid-state electro thermal storage. *Energy Reports*. 2021;7(5):219-231. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.129>

15. Khimenko A.V., Tikhomirov D.A., Kuzmichev A.V. Experimental studies of the thermal characteristics of electro-thermal storage. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;839:052058. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/5/052058>

16. Khimenko A., Tikhomirov D., Trunov S., Kuzmichov A. Theoretical studies of the thermal state of heat storage elements of the electric thermal storage in the modes of charging and heat output. *E3S Web of conferences*. 2021;254:07010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125407010>

17. Трунов С.С., Дудин С.Н. Определение оптимальной доли использования теплоаккумуляторов в общем энергобалансе электротепловых установок фермы // Вестник ВИЭСХ. 2017. № 4. С. 13-20. EDN: VVWXRR

18. Дудин С.Н., Тихомиров Д.А. Энергоэффективная аккумуляционная электроустановка для нагрева воздуха // Молодая наука аграрного Дона: традиции, опыт, инновации. 2018. № 2-2. С. 200-206. EDN: YOLRBZ

Информация об авторах

¹Тихомиров Дмитрий Анатольевич, член-корр. РАН, д-р техн. наук, главный научный сотрудник; tihda@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3526-4474>; SPIN-код: 9409-8655

²Хименко Алексей Викторович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; avmkh87@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2612-969X>; SPIN-код: 1476-8640

³Кузьмичев Алексей Васильевич, научный сотрудник; alkumkuzm@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4655-6448>; SPIN-код: 6773-5432

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

Вклад авторов

Тихомиров Д.А. – концептуализация, руководство исследованиями, верификация данных, создание черновика рукописи; Хименко А.В. – методология, проведение исследований, визуализация, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

Кузьмичев А.В. – программное обеспечение, формальный анализ.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 11.03.2026; после рецензирования и доработки 07.07.2026; принята к публикации 09.07.2026

11. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Dudin S.N. Heat storage installation for air heating. *Selskiy Mekhanizator*. 2019;8:31-33. (In Russ.)

12. Trunov S.S., Khimenko A.V., Tikhomirov D.A. Electric heat storage heating plant for livestock premises. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2024;71(4):73-81 (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2024-71-4-73-81>

13. Zhao H., Yan N., Xing Z. et al. Thermal calculation and experimental investigation of electric heating and solid thermal storage system. *Energies*. 2020;13(20):5241. <https://doi.org/10.3390/en13205241>

14. Khimenko A.V., Tikhomirov D.A., Kuzmichev A.V. et al. Thermal characteristics and operation efficiency of solid-state electro thermal storage. *Energy Reports*, 2021;7S5:219-231. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.129>

15. Khimenko A.V., Tikhomirov D.A., Kuzmichev A.V. Experimental studies of the thermal characteristics of electro-thermal storage. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021;839:052058. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/5/052058>

16. Khimenko A., Tikhomirov D., Trunov S., Kuzmichov A. Theoretical studies of the thermal state of heat storage elements of the electric thermal storage in the modes of charging and heat output. *E3S Web of Conferences*, 2021;254:07010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125407010>

17. Trunov S.S., Dudin S.N. Determining the optimal share of heat storages in the overall energy balance of farm electric thermal installations. *Vestni VIESH*. 2017;4:13-20 (In Russ.)

18. Dudin S.N., Tikhomirov D.A. Energy-efficient storage electric installation for air heating. *Molodaya nauka agrarnogo Dona: traditsii, opyt, innovatsii*. 2018;2-2:200-206. (In Russ.)

Author Information

Dmitriy A. Tikhomirov¹, RAS Corresponding Member, DSc (Eng), Chief Research Engineer; tihda@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3526-4474>

Aleksei V. Khimenko², PhD (Eng), Lead Research Engineer; avmkh87@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2612-969X>

Aleksey V. Kuzmichev³, Research Engineer; alkumkuzm@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4655-6448>

^{1, 2, 3}Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russia, Moscow, 1st Institutsky Proezd Str., 5

Author Contributions

D.A. Tikhomirov – conceptualization, research supervision, data curation, writing – original draft;

A.V. Khimenko – methodology, investigation, visualization, writing – review and editing of the manuscript;

A.V. Kuzmichev – software, formal analysis.

Conflict of interests

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

Received 11.03.2026; Revised 07.07.2026; Accepted 09.07.2026

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 378.14:631.171

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-102-109>



Метакогнитивная включенность в деятельность как основа формирования профессиональной компетентности будущих агроинженеров

*Т.П. Коваленок¹, Л.В. Занфирова², Л.И. Назарова^{3✉}, Е.Н. Козленкова⁴,
А.Н. Волкова⁵, А.А. Большаков⁶*

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

¹ kovalenok@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2835-1454>

² zanfirova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6151-2267>

³ nazarova@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-5698-6284>

⁴ kozlenkova_en@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8230-5200>

⁵ volkova_an@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0009-0002-6212-7552>

⁶ bolshakov_a@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1394-3927>

Аннотация. Подготовка инженерных кадров в условиях цифровой трансформации сельскохозяйственного производства требует пересмотра структуры их профессиональной компетентности. Профессиональная компетентность включает в себя мотивационно-личностный, функционально-деятельностный и рефлексивно-оценочный компоненты. Особое внимание нужно уделить изучению метакогнитивной включенности в учебно-профессиональную деятельность студентов как ключевого фактора формирования профессиональной компетентности будущих специалистов. Исследования проведены с целью изучения динамики уровня сформированности метакогнитивных процессов студентов. Показано, что в условиях стремительных изменений производственных технологий особую важность приобретает развитие метакомпетенций, обеспечивающих умение осваивать новые знания и технологии, адаптироваться к изменениям и планировать собственную профессиональную траекторию. Представлены результаты опытно-экспериментальной работы, проведенной среди 68 студентов первого и третьего курсов агроинженерных направлений подготовки. Установлено, что несмотря на незначительное улучшение некоторых метакогнитивных характеристик у обучающихся старших курсов, различия не достигают статистически значимого уровня. Это свидетельствует о необходимости включения специализированных форм учебной деятельности, нацеленных на развитие метакогнитивных навыков. Предложен комплекс мер по совершенствованию образовательного процесса, в том числе широкое использование интерактивных методов обучения, организация производственной практики, включение элементов компьютерного моделирования и проектирование ситуаций, приближенных к реальной профессиональной среде. Предлагается усиление психолого-педагогической подготовки студентов, направленной на развитие рефлексивных навыков и способности к саморазвитию. Разработка образовательных моделей, учитывающих особенности современных тенденций в агроинженерии, позволит сформировать активную, творческую и технологически грамотную личность специалиста.

Ключевые слова: метакогнитивная включенность в деятельность; метакомпетенции; агроинженер; подготовка инженерных кадров; профессиональная компетентность

Для цитирования: Коваленок Т.П., Занфирова Л.В., Назарова Л.И., Козленкова Е.Н., Волкова А.Н., Большаков А.А. Метакогнитивная включенность в деятельность как основа формирования профессиональной компетентности будущих агроинженеров // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 4. С. 102-109. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-102-109>

ORIGINAL ARTICLE

Metacognitive involvement in activities as a basis for the professional competence development of future agricultural engineers

T.P. Kovalenok¹, L.V. Zanfirova², L.I. Nazarova³✉, E.N. Kozlenkova⁴, A.N. Volkova⁴, A.A. Bolshakov⁶

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

¹ kovalenok@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2835-1454>

² zanfirova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6151-2267>

³ nazarova@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0001-5698-6284>

⁴ kozlenkova_en@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8230-5200>

⁵ volkova_an@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0009-0002-6212-7552>

⁶ bolshakov_a@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1394-3927>

Abstract. The training of engineering personnel in the context of the digital transformation of agricultural production requires a revision of their professional competency framework. Particular attention should be paid to studying students' metacognitive engagement in their educational and professional activities as a key factor in developing the professional competence of future specialists. This study aimed to examine the dynamics of students' metacognitive processes. The authors examined the main approaches to defining professional competence and identified the key components of its structure: motivational-personal, functional-activity, and reflective-evaluative components. It is shown that, in the context of rapid changes in production technologies, the development of metacompetencies is particularly important. These competencies ensure the ability to master new knowledge and technologies, adapt to change, and plan one's own professional trajectory. The article presents the results of experimental work conducted among first- and third-year students majoring in agricultural engineering. It was found that, despite a slight improvement in some metacognitive characteristics among senior students, the differences do not reach a statistically significant level. This demonstrates the need to incorporate specialized forms of learning activities aimed at developing metacognitive skills. The authors propose a set of measures to improve the educational process, including the widespread use of interactive teaching methods, the organization of industrial internships, the incorporation of computer modeling elements, and the design of situations that approximate a real professional environment. It is proposed to strengthen students' psychological and pedagogical training aimed at developing reflective skills and the ability to self-develop. The development of educational models that take into account the specifics of modern trends in agricultural engineering will help shape active, creative, and technologically advanced specialists.

Keywords: metacognitive involvement in activities; meta-competence; agricultural engineer; engineering staff training; professional competence

For citation: Kovalenok T.P., Zanfirova L.V., Nazarova L.I., Kozlenkova E.N., Volkova A.N., Bolshakov A.A. Metacognitive involvement in activities as a basis for the professional competence development of future agricultural engineers. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(4):102-109. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-102-109>

Введение

Совершенствование системы подготовки инженерных кадров предполагает повышение степени готовности выпускников вузов к самостоятельной деятельности в новых социально-экономических условиях. Цифровизация современного производства требует анализа и пересмотра структуры профессиональной компетентности будущих инженеров. Компетентность инженера понимается как совокупность знаний, умений, профессионально значимых качеств, необходимых для эффективного и ответственного решения отраслевых производственных задач – как инженерно-технических, так и производственно-технологических [1, 2].

В структуре профессиональной компетентности будущего инженера выделяют три основных компонента: мотивационно-личностный, функционально-деятельностный, рефлексивно-оценочный. И.С. Волежанина отмечает, что мотивационно-личностный компонент включает в себя «... корпоративность, обобщенные корпоративные ценности-цели (ориентированность на совершенствование профессиональной компетентности, ответственность за результаты собственных действий, профессионально значимые личностные качества, ценностное отношение к деятельности); функционально-деятельностный – включает совокупность знаний (ресурсных, прагматических, проектных и оценочных),

умений (познавательной и преобразовательной деятельности), компетенций (исследовательско-аналитической, производственно-технологической, инновационно-проектной, организационно-управленческой, коммуникативно-личностной) и начального производственного опыта в отрасли; рефлексивно-оценочный – включает самоорганизацию, самоанализ, саморегуляцию, самооценку и самореализацию, обеспечивая понимание и оценку будущим инженером возможностей и границ своего индивидуального профессионального ресурса» [1].

Формирование профессиональной компетентности выступает в качестве ключевой задачи профессионального образования. Значимость составляющих различных компонентов профессиональной компетентности и готовности к деятельности по-разному оценивалась в различные периоды становления науки и практики общественного производства.

В начале XX в. преобладал поведенческий подход к организации профессионального образования, декларирующий необходимость формирования у будущего работника комплекса действий, обеспечивающих приспособление к техническому устройству. Считалось, что в основе трудовых движений лежат «биомеханические», сенсомоторные установки, для формирования которых требовалось многократное выполнение соответствующих упражнений.

Следующим этапом стала направленность профессиональной подготовки на формирование обобщенных знаний, умений и навыков (политехнизм), развитие личности профессионала, обеспечивающей осознанную и осмысленную реализацию профессиональной деятельности.

В середине XX в. рассматривался характер взаимодействия физических и психических особенностей субъекта и требований профессиональной деятельности, определяющий выработку индивидуального стиля конкретной профессиональной деятельности.

В 1990-е гг. исследователи проблем профессионального образования начали уделять большее внимание методам освоения знаний. Используя системный метод анализа, обучающийся должен был научиться выделить предмет деятельности, оценить характер необходимых средств, соотнести цель с условиями ее достижения, оценить конечный продукт как достигнутую или недостигнутую цель, изменить план осуществления деятельности в целом [3].

В настоящее время быстрые изменения в технологиях, недостаточная гибкость программ обучения делают актуальной нацеленность не столько на обучение конкретной профессии, сколько на развитие умения учиться, общаться, организовывать свою деятельность, планируя время и расставляя приоритеты,

то есть формирование рефлексивно-оценочного компонента профессиональной компетентности.

В теории профессионального образования появились новые понятия: «компетенции», «гибкие навыки», «метакомпетенции». Компетенции рассматриваются как конкретные умения и знания, необходимые для определенного вида профессиональной деятельности. Гибкие навыки не связаны с отдельной профессиональной деятельностью, профессиональной подготовкой, а в большей степени отражают личностные особенности работника [4, 5]. Метакомпетенции – это способности и навыки, позволяющие профессионалу эффективно управлять своими компетенциями [6, 7]. С нашей точки зрения, личностные качества определяют параметры гибких навыков, гибкие навыки детерминируют состав и уровень метакомпетенций, которые влияют на эффективность реализации компетенций.

Развитие научных представлений об этих составляющих профессионализма нашло свое отражение и в нормативных документах системы профессионального образования. Содержание учебных планов и программ направлено на формирование различных компетенций, соответствующих задачам профессиональной деятельности. Выделяются универсальные, общепрофессиональные и профессиональные компетенции. Универсальные компетенции определяют успешность работника независимо от специфики и направления профессиональной деятельности, общепрофессиональные ориентированы на успешность выполнения инвариантных для сферы профессиональной деятельности функций, профессиональные – на решение задач конкретного вида трудовой деятельности. Дополнительное развивающее воздействие на все виды компетенций оказывают различные виды внеучебной активности студентов: работа в научных сообществах, участие в культурных, спортивных и других мероприятиях. Профессиональное образование в целом и компоненты конкретной образовательной среды оказывают разное влияние на становление компонентов профессионализма.

Анализ особенностей профессиональной подготовки инженеров показал, что список универсальных компетенций инженера в ФГОС и выделяемых в психолого-педагогической литературе гибких навыков, необходимых инженеру, полностью совпадает по показателям критического мышления, по работе в команде и лидерству, коммуникации, креативности, самоорганизации, самомотивации [5]. Цифровизация производства меняет характер профессиональной деятельности инженера: происходит переход от управления производством к управлению знаниями. Для этого нужны способности, связанные

с навыками работы с информацией, разработкой стратегии, созданием организационной культуры и использованием информационных технологий [1, 8].

Внедрение цифровых технологий способствует формированию новых вызовов для агроинженерного образования: помимо общих знаний о датчиках и технологических инструментах, в сельском хозяйстве, животноводстве, пищевой промышленности и лесном хозяйстве требуются инженеры – специалисты по данным, специализирующиеся в своей области знаний. Это требует формирования способности сознательно накапливать, систематизировать и использовать конкретные знания, необходимые для создания и управления цифровыми инструментами, позволяющими решать проблемы агропродовольственного и экологического секторов.

Задача повышения готовности агроинженеров к практической деятельности делает актуальной ориентацию профессиональной подготовки на развитие «метакомпетенций» – таких, как гибкость и адаптивность, готовность к непрерывному обучению/образованию, к переносу имеющихся знаний, умений, способностей на новые объекты деятельности [7, 9].

Цель исследований: обоснование роли и значения метакогнитивной включенности для формирования профессиональной компетентности будущих агроинженеров, изучение динамики уровня сформированности метакогнитивных процессов студентов.

Материалы и методы

Задача опытно-экспериментальной работы заключалась в сравнении уровня метакогнитивной включенности в учебно-профессиональную деятельность студентов 1-го и 3-го курсов. Предполагалось, что уровень метакогнитивной включенности в деятельность должен быть выше у студентов 3-го курса. В исследованиях приняли участие 68 студентов 1-го и 3-го курсов, обучающихся по направлениям подготовки 35.03.06 – Агроинженерия и 35.03.11 – Гидромелиорация, них 48 юношей и 20 девушек, средний возраст – 19,7 года.

Использовалась методика «Метакогнитивная включенность в деятельность», разработанная Г. Шроу и Р. Деннисоном, адаптированная А.В. Карповым и И.М. Скитяевой, сокращенная версия Е.И. Периковой и В.М. Бызовой. Как отмечают авторы сокращенной версии опросника, он «...имеет двухфакторную структуру шкал: метакогнитивное знание и метакогнитивное регулирование, а также 8 субшкал: декларируемые знания, процедурные знания, условные знания, планирование, стратегии управления информацией, контроль компонентов, структура исправления ошибок и оценка» [10].

Выполнение теста предложено студентам как учебное задание. Подсчитывались средние показатели по всем шкалам методики, в выборке целиком и отдельно для студентов 1-го и 3-го курсов. Полученные данные по выборке будущих агроинженеров сравнивались с нормативными данными студентов. Проводилось сравнение показателей развития метакогнитивных процессов студентов 1-го и 3-го курсов. Для оценки значимости различий применялся непараметрический критерий Манна-Уитни.

Результаты и их обсуждение

Изучение метапознания является одним из центральных направлений психолого-педагогических исследований. Под метапознанием понимают «особый вид психической активности, направленной на изучение и управление собственными когнитивными процессами для достижения конкретной цели. Выделяются два типа таких процессов – метакогнитивные знания (декларируемые знания, процедурные знания, условные знания) и метакогнитивная регуляция (планирование, управление, контроль, исправление ошибок и оценка)» [1]. К декларируемым знаниям относится знание об особенностях своих познавательных процессов, например: «Я хорошо запоминаю новую информацию», «Я способен хорошо структурировать информацию» и т.п. Процедурные знания – знания о стратегиях обработки информации. Условные знания – знания об условиях применения определенных стратегий обработки информации [10].

Метакогнитивная регуляция реализуется через такие процессы, как планирование (целеполагание, приоритизация задач, выбор методов решения задач, поиск и анализ информации, требуемой для решения задач), применение стратегий управления информацией (сознательная концентрация на нужной информации), контроль компонентов (рефлексия процесса работы над проблемой, например: «Я склонен спрашивать себя, насколько успешно я продвигаюсь, когда изучаю что-то новое»), исправление ошибок («Я пересматриваю свои предположения, когда затрудняюсь в решении проблемы») и оценка («Когда решение задачи закончено, я спрашиваю себя, достигнуты ли все поставленные цели») [1].

Отечественные психологи рассматривают метапознание как ведущую форму рефлексивной регуляции познавательной деятельности [11], исследования указывают на связь уровня развития метакогнитивных процессов с академической успеваемостью и успешностью в профессиональной деятельности. Когнитивные метазнания и метанавыки рассматриваются как ядро профессионального инженерно-технического мышления [12]. Утверждается, что высокого

уровня профессионализации можно достичь только при высоком уровне метакогнитивного контроля над ходом решения профессиональных задач [11]. Это подчеркивает актуальность образовательных воздействий, стимулирующих становление метакогнитивных процессов.

Существуют альтернативные точки зрения на возможность развития метакогнитивных способностей: от постулирования наличия изначальной неизменной метакогнитивной одаренности до утверждений о намеренном формировании их на основе области знаний, в которой субъект достаточно компетентен, с применением специальных развивающих компьютерных программ [11]. Исследователи инженерного образования рассматривают трансдисциплинарный подход при изучении физико-технических дисциплин как ресурс развития метакогнитивных навыков у будущих инженеров, разрабатывают способы формирования метакогнитивного знания в обучении иноязычному чтению студентов инженерных специальностей [12, 13].

Исследования позволяют предположить, что процесс учения студентов в вузе должен сопровождаться повышением уровня когнитивной осознанности учебного опыта и содержательной интеграции знаний, что обеспечит повышение уровня практической готовности к профессиональной деятельности.

Анализ показателей общего уровня метакогнитивной включенности в деятельность студентов-агроинженеров с нормативными показателями студентов показал, что у большинства студентов

он средний – 86% (табл.). Интервал нормы, определенный для студентов авторами методики, составляет от 98,9 до 142,9 [10], среднее в данной выборке – 124,7, что немного выше медианного показателя студентов.

В структуре метакогнитивной включенности оценка студентами-агроинженерами знаний об индивидуальных особенностях своей познавательной деятельности соответствует средней для выборки студентов, хотя нужно отметить, что показатели ближе к нижней границе нормы. При этом будущие агроинженеры выше оценивают свою способность к регуляции собственной интеллектуальной деятельности: планированию, контролю и оценке знаний. Студенты отмечают недостаточную осведомленность об индивидуальных особенностях своих когнитивных функций: памяти, мышления и других, низко оценивают эффективность своей памяти, способность к селекции информации, затрудняются в использовании компенсирующих интеллектуальную недостаточность стратегий, не знают сильных сторон своих когнитивных возможностей. Наименее сформированными компонентами метакогнитивного регулирования являются рефлексия процесса работы над проблемой, готовность к контролю и исправлению ошибок.

Следующим этапом анализа эмпирических данных стало сравнение показателей метакогнитивной включенности в деятельность студентов 1-го и 3-го курсов. Реализация учебно-профессиональной деятельности должна расширять знания студентов о себе, своих способностях и возможностях, повышая уровень

Таблица

Результаты диагностики уровня метакогнитивной включенности в деятельность студентов-агроинженеров

Table

Results of the diagnostics of the level of metacognitive engagement in the activities of agricultural engineering students

Показатели метакогнитивной включенности в деятельность	Нормативные данные для студентов	Среднее значение показателей			Доля от общего числа исследованных, %		
		студентов-агроинженеров	студентов 1-го курса	студентов 3-го курса	Высокий уровень	Средний уровень	Низкий уровень
Общий показатель	120,9±22	124,7	123,7	125,7	12	86	2
Метакогнитивные знания	42,9±8,9	46,2	45,2	47,1	6	94	0
Метакогнитивное регулирование	68,1±12,8	79,6	78,5	80,6	26	72	2
Декларируемые знания	18±3,9	19	18,5	19,4	2	96	2
Процедурные знания	10,5±2,6	11,7	11,2	12,1	4	96	0
Условные знания	14,5±3,2	15,5	15,4	15,6	10	90	0
Планирование	15,6±3,2	16,4	16,3	16,5	18	82	0
Стратегии управления информацией	7,7±1,8	8,2	8	8,3	10	88	2
Контроль компонентов	23,0±4,7	23,4	23,5	23,3	8	88	4
Структура исправления ошибок	15,8±3,2	15,8	15,5	16	14	84	2
Оценка	14,9±3,3	15,5	15,1	15,8	14	80	6

развития метакогнитивных процессов с каждым годом обучения. Сравнение усредненных показателей отдельных метакогнитивных процессов студентов разных курсов показало, что результаты студентов 3-го курса, действительно, несколько выше (рис.). Однако проведенный статистический анализ оценки различий с использованием U-критерия Манна-Уитни не выявил значимых различий ни по одному показателю метакогнитивных процессов.

Необходимо отметить, что недостаточный объем выборки испытуемых, возможно, является причиной таких результатов и не позволяет экстраполировать полученные результаты. Но в целом эмпирические данные свидетельствуют о том, что необходимы разработка и применение специальных методов формирования метакогнитивных компетенций у будущих агроинженеров, в том числе знаний о себе как о познающем субъекте, о том, как происходит процесс обучения [14].

Для развития профессиональных компетенций современных агроинженеров необходимо использовать методы, сочетающие теоретическое обучение, практическую подготовку и внеучебную деятельность, а также методы оценки сформированности компетенций. Важно, чтобы подготовка инженерных кадров была основана на компетентностном подходе, который предполагает соединение научно-технических знаний с формирующимся собственным производственным опытом обучающегося.

В качестве эффективных методов обучения для развития профессиональных компетенций агроинженеров рекомендуется использовать различные интерактивные методы, в том числе реализуемые с использованием современных цифровых технологий: кейс-анализ, деловые игры, метод проектов, практико-ориентированные упражнения, отражающие специфику будущей профессиональной деятельности [14-16]. Учебные дисциплины должны включать в себя задания на овладение фактическим материалом, тренировочные задания, продуктивные задания, проекты профессиональной направленности. Согласование методики изложения темы в разных дисциплинах улучшит качество усвоения материала и будет способствовать формированию метакомпетенций.

Ключевую роль в развитии профессиональных компетенций агроинженеров играет производственная практика, задачами которой являются выработка творческого подхода к решению инженерно-технологических задач в области эксплуатации и ремонта агротехнических систем, разработка новых методик проектирования, технологий выполнения работ. Студенты с первых курсов должны знакомиться с реальными условиями своей будущей профессии, учебные ситуации должны моделировать производственные; необходимо использовать онлайн-тренажеры, симуляторы для погружения в реальные производственные условия.



Рис. Сравнение показателей развития метакогнитивных процессов у студентов 1-го и 3-го курсов

Fig. Metacognitive process development in university students: a comparative analysis of first-year and third-year cohorts

Важными являются освоение инженерами дисциплин психолого-педагогического цикла, повышение их значимости в структуре подготовки, так как они позволяют познакомиться с научными знаниями о причинах поведения человека, особенностях переработки информации, принятия решений и т.п., стимулируют процессы рефлексии, самоанализа, что способствует развитию метакомпетенций и рефлексивно-оценочного компонента компетентности.

Выводы

1. Цифровизация сельскохозяйственного производства требует анализа и пересмотра структуры профессиональной компетентности будущих агроинженеров – в частности, метакогнитивных компетенций:

Список источников

1. Волежанина И.С. Становление и развитие профессиональной компетентности будущего инженера в условиях научно-образовательного комплекса // Перспективы науки и образования. 2020. № 2. С. 83-97. EDN: AYZKIM
2. Kubrushko P.F., Kozlenkova E.N. Continuing engineering education: background and development vectors. 1st International Scientific Practical Conference «The Individual and Society in the Modern Geopolitical Environment» (ISMGE2019): Proceedings of the 1st International Scientific Practical Conference. Volgograd: Atlantis Press, 2019. Vol. 331. Pp. 397-403. EDN: EGIXGI
3. Зеер Э.Ф., Шаров А.А. Психолого-педагогические особенности формирования профессиональной успешности субъекта деятельности // Проблемы современного педагогического образования. 2023. № 81-2. С. 711-713. EDN: GZAVIF
4. Астапенко Е.В., Шмурыгина О.В. Надпрофессиональные навыки преподавателя профессионального образования // Профессиональное образование и рынок труда. 2022. № 3. С. 21-34. <https://doi.org/10.52944/PORT.2022.50.3.001>
5. Ануфриева Т.Н. Компонентный состав гибких навыков современного инженера // Научно-педагогическое обозрение. 2023. № 4. С. 7-16. EDN: UTZLTO
6. Захарова-Саровская М.В. Метакогнитивный подход к преподаванию: к вопросу о метакомпетенции и метакомпетентности // Язык и культура в эпоху интеграции научного знания и профессионализации образования. 2024. № 5-2. С. 43-46. EDN: IDDQXT
7. Zeer E., Zinnatova M., Tretyakova V., Bukovey T. Trans-professionalism as a predictor of adaptation of a person to digital professional future. *Elementary Education Online*, 2020;19(4):2532-2541. EDN: VOZGWJ
8. Кубрушко П.Ф., Шингарева М.В., Атапина Ю.А. Подготовка кадров для агропромышленного комплекса в системе непрерывного профессионального образования // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 4. С. 58-63. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-58-63>
9. Шабанов О.А. Метакомпетенция и метакомпетентность в рамках компетентного подхода в образовании // Человек и образование. 2015. № 3. С. 53-56. EDN: VEIVXH
10. Перикова Е.И., Бызова В.М. Факторная структура русскоязычной версии опросника «Метакогнитивная включенность в деятельность» // Культурно-историческая психология. 2022. Т. 18, № 2. С. 116-126. <https://doi.org/10.17759/chp.2022180213>. EDN: FGLVTG

умения организовывать, регулировать и координировать свои познавательные процессы, генерировать новое знание.

2. Показателем компетентности будущего агроинженера выступает сформированность метакомпетенций: гибкости, адаптивности, обучаемости, самоорганизации, саморегуляции и др.

3. Современная система подготовки агроинженеров в недостаточной степени влияет на развитие метакогнитивных компетенций. Реализация метакогнитивного подхода в обучении будет способствовать развитию у обучающихся способностей самостоятельно оценивать и регулировать свою учебно-познавательную, а в дальнейшем – и профессиональную деятельность.

References

1. Volegzhaniina I.S. Formation and development of professional competence of a future engineer in the context of a scientific-educational complex. *Prospects of Science and Education*, 2020;2:83-97. (In Russ.)
2. Kubrushko P.F., Kozlenkova E.N. Continuing engineering education: background and development vectors. *1st International Scientific Practical Conference “The Individual and Society in the Modern Geopolitical Environment” (ISMGE2019): Proceedings of the 1st International Scientific Practical Conference*. Volgograd, 2019;331:397-403.
3. Zeer E.F., Sharov A.A. Psychological and pedagogical features of the formation of professional success of the subject of activity. *Problemy sovremennogo pedagogicheskogo obrazovaniya*. 2023;81-2:711-713. (In Russ.)
4. Astapenko E.V., Shmurygina O.V. Soft skills for VET teachers. *Vocational Education and Labor Market*, 2022;3:21-34. (In Russ.) <https://doi.org/10.52944/PORT.2022.50.3.001>
5. Anufrieva T.N. The component composition of the modern engineer's soft skills. *Pedagogical review*, 2023;4:7-16. (In Russ.)
6. Zakharova-Sarovskaya M.V. Metacognitive approach to teaching: meta-competency and meta-competence. *Language and Yazyk i kultura v epokhu integratsii nauchnogo znaniya i professionalizatsii obrazovaniya*. 2024;5-2:43-46. (In Russ.)
7. Zeer E., Zinnatova M., Tretyakova V., Bukovey T. Trans-professionalism as a predictor of adaptation of a person to digital professional future. *Elementary Education Online*, 2020;19:2532-2541.
8. Kubrushko P.F., Shingareva M.V., Atapina Yu.A. Agricultural staff training in the system of lifelong professional education. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022;24(4):58-63. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-58-63>
9. Shabanov O.A. Meta-competency and meta-competence within the competence approach in education. *Man and Education*, 2015;3:53-56. (In Russ.)
10. Perikova E.I., Byzova V.M. Factor structure of the Russian version of the “Metacognitive Awareness Inventory”. *Cultural-Historical Psychology*, 2022;18(2):116-126. (In Russ.) <https://doi.org/10.17759/chp.2022180213>
11. Karpov A.A. Development of learning ability as a condition for the implementation of a competence approach in education. *Personality in a Changing World: health, adaptation, development*. 2014;2:31-38. (In Russ.)
12. Iskakova A.B., Nurumzhanova K.A. Transdisciplinary approach as a resource to develop student metacognitive skills

11. Карпов А.А. Развитие обучаемости как условие реализации компетентностного подхода в образовании // *Личность в меняющемся мире: здоровье, адаптация, развитие*. 2014. № 2. С. 31-38. EDN: SCVVQB

12. Исакова А.Б., Нурумжанова К.А. Трансдисциплинарный подход как ресурс развития у студентов метакогнитивных навыков при изучении физико-технических дисциплин // *Образование и наука*. 2024. Т. 26, № 2. С. 113-139. <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2024-2-113-139>

13. Леушина Н.А. Метакогнитивное знание в обучении иноязычному чтению студентов инженерных специальностей: роль, компоненты, способы формирования // *Непрерывное образование: XXI век*. 2020. № 4. С. 52-64. <https://doi.org/10.15393/j5.art.2020.6347>

14. Занфирова Л.В., Коваленок Т.П., Меликов А.В. Формирование гибких навыков агроинженеров // *Международный научный журнал*. 2022. № 3. С. 91-101. EDN: ZQDXDZ

15. Моисеева М.Н., Фисунова Л.В. Развитие профессиональной компетенции будущего агроинженера при изучении дисциплины // *Современное педагогическое образование*. 2018. № 4. С. 149-152. EDN: VSDHZZ

16. Волкова А.Н., Козленкова Е.Н. Формирование готовности студентов аграрного вуза к организации проектно-исследовательской деятельности // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, № 4. С. 81-88. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-81-88>

Информация об авторах

¹ Коваленок Татьяна Петровна, канд. психол. наук, доцент; kovalenok@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2835-1454>; SPIN-код: 2605-9724

² Занфирова Лариса Вячеславовна, канд. пед. наук, доцент; zanfirova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6151-2267>; SPIN-код: 5688-1091

³ Назарова Людмила Ивановна, канд. пед. наук, доцент; nazarova@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-5698-6284>; SPIN-код: 1909-3611

⁴ Козленкова Елена Николаевна, канд. пед. наук, доцент; kozlenkova_en@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8230-5200>; SPIN-код: 8631-4690

⁵ Волкова Анастасия Никитична, канд. пед. наук, старший преподаватель; volkova_an@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0009-0002-6212-7552>; SPIN-код: 5954-6670

⁶ Большаков Александр Алексеевич, старший преподаватель; bolshakov_a@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1394-3927>; SPIN-код: 1436-1900

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

Вклад авторов

Т.П. Коваленок – концептуализация, создание черновика рукописи;

Л.В. Занфирова – проведение исследований;

Л.И. Назарова – методология, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

Е.Н. Козленкова – методология;

А.Н. Волкова – ресурсы;

А.А. Большаков – верификация данных, администрирование данных.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 16.03.2026; после рецензирования и доработки 21.05.2026; принята к публикации 22.05.2026

in studying physical and engineering disciplines. *The Education and Science Journal*. 2024;26(2):113-139. (In Russ.) <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2024-2-113-139>

13. Leushina N.A. Metacognitive knowledge in teaching reading in English to engineering students: role, components, and ways of development. *Continuous Education: XXI century*, 2020;4(32):52-64. (In Russ.) <https://doi.org/10.15393/j5.art.2020.6347>

14. Zanfirova L.V., Kovalenok T.P., Melikov A.V. Formation of flexible skills of agroengineers. *International Scientific Journal*, 2022;3(84):91-101. (In Russ.)

15. Moiseeva M.N., Fisunova L.V. Fostering professional competence in future agricultural engineers through academic disciplines. *Modern Pedagogical Education*, 2018;4:149-152. (In Russ.)

16. Volkova A.N., Kozlenkova E.N. Enhancing the readiness of agricultural university students to organize project and research activities. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(4):81-88. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-81-88>

Author Information

Tatyana P. Kovalenok¹, CSc (Psy), Associate Professor; kovalenok@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2835-1454>

Larisa V. Zanfirova², CSc (Ed), Associate Professor; zanfirova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6151-2267>

Liudmila I. Nazarova³, CSc (Ed), Associate Professor; nazarova@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-5698-6284>

Elena N. Kozlenkova⁴, CSc (Ed), Associate Professor; kozlenkova_en@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8230-5200>;

Anastasia N. Volkova⁵, CSc (Ed), Senior Lecturer; volkova_an@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0009-0002-6212-7552>

Aleksandr A. Bolshakov⁶, Senior Lecturer; bolshakov_a@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1394-3927>

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

Author Contribution

T.P. Kovalenok – conceptualization; writing – original draft;

L.V. Zanfirova – investigation;

L.I. Nazarova – research methodology, writing – review and editing of the manuscript;

E.N. Kozlenkova – research methodology;

A.N. Volkova – resources;

A.A. Bolshakov – data curation; validation.

Conflict of interests

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

Received 16.03.2026; Revised 21.05.2026; Accepted 22.05.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 378:004.9

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-110-117>

Диагностика уровня готовности преподавателей аграрного профиля к профессиональной деятельности в электронной информационно-образовательной среде вуза

П.Ф. Кубрушко¹, И.Ф. Кривчанский², А.С. Симан³, В.В. Жилыева^{4✉},
М.В. Шингарева⁵, Ю.А. Атапина⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

¹ kubrushko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2142-1037>

² krivchanskiy@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4034-3353>

³ siman@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8280-6195>

⁴ zhilyaeva@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-2265-916X>

⁵ shingareva@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0002-0713-5042>

⁶ atapina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1098-503X>

Аннотация. Взаимодействие субъектов образовательных отношений в электронной информационно-образовательной среде (ЭИОС) требует от профессорско-преподавательского состава готовности применять цифровые образовательные ресурсы и сервисы (ЦОР и ЦОС), составляющие инфраструктурную основу современного образовательного процесса. Исследования проведены с целью диагностики уровня готовности преподавателей аграрного профиля к реализации образовательного процесса в ЭИОС вуза. Эмпирические исследования проведены на базе Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева. В исследованиях приняли участие 323 преподавателя. Анализ диагностики сформированности готовности преподавателей аграрного профиля к профессиональной деятельности в ЭИОС в соответствии с трехуровневой авторской классификацией, включающей в себя непродуктивный, базовый и продуктивный уровни готовности, показал непродуктивный уровень сформированности мотивационного, когнитивного и деятельностного компонентов готовности преподавателей. После обучения преподавателей по дополнительной профессиональной программе «Электронная информационно-образовательная среда» распределение по мотивационному компоненту готовности следующее: непродуктивный уровень – 15,2% (49 чел.), базовый уровень – 42,4% (137 чел.), продуктивный уровень – 42,4% (137 чел.); по когнитивному компоненту: непродуктивный уровень – 17,3% (56 чел.), базовый уровень – 50,5% (163 чел.), продуктивный уровень – 32,2% (104 чел.); по деятельностному компоненту: непродуктивный уровень – 17,3% (56 чел.), базовый уровень – 53,3% (172 чел.), продуктивный уровень – 29,4% (95 чел.). Результаты исследований подтвердили необходимость целенаправленной и систематической подготовки преподавателей университета к использованию ЦОР и ЦОС. В целях формирования такой готовности необходимо создавать условия для повышения мотивации преподавателей и студентов к работе в среде для творческой реализации образовательного процесса с использованием ЦОС и ЦОР и повышения качества подготовки кадров для агропромышленного комплекса.

Ключевые слова: готовность преподавателей вуза; электронная информационно-образовательная среда; уровни готовности

Для цитирования: Кубрушко П.Ф., Кривчанский И.Ф., Симан А.С., Жилыева В.В., Шингарева М.В., Атапина Ю.А. Диагностика уровня готовности преподавателей аграрного профиля к профессиональной деятельности в электронной информационно-образовательной среде вуза // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 4. С. 110-117. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-110-117>

ORIGINAL ARTICLE

Readiness of agricultural university teachers for professional activity in the electronic information and educational environment: An assessment study

P.F. Kubrushko¹, I.F. Krivchanskiy², A.S. Siman³, V.V. Zhilyaeva^{4✉},
M.V. Shingareva⁵, Y.A. Atapina⁶

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

¹ kubrushko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2142-1037>

² krivchanskiy@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4034-3353>

³ siman@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8280-6195>

⁴ zhilyaeva@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-2265-916X>

⁵ shingareva@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0002-0713-5042>

⁶ atapina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1098-503X>

Abstract. The interaction of educational stakeholders within the electronic information and educational environment (EIEE) requires academic staff to be proficient in using digital educational resources and services (DER and DES), which constitute the infrastructural foundation of the modern educational process. This study aimed to diagnose the level of readiness of agricultural university teachers to implement the educational process within the university's EIEE. The empirical study was conducted at Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, with 323 academic staff members participating. A dynamic analysis of teacher readiness for professional activity in the EIEE was performed based on the authors' three-level classification, which distinguishes unproductive, basic, and productive levels of readiness. The initial assessment revealed an unproductive level of development across the motivational, cognitive, and activity components of teacher readiness. Following the completion of a professional development program on "Electronic Information and Educational Environment," the distribution of readiness levels showed notable improvement: motivational component: unproductive – 15.2% (49), basic – 42.4% (137), productive – 42.4% (137); cognitive component: unproductive – 17.3% (56), basic – 50.5% (163), productive – 32.2% (104); activity component: unproductive – 17.3% (56), basic – 53.3% (172), productive – 29.4% (95). The study results confirm the need for targeted and systematic training of university teachers in the use of DER and DES. To foster such readiness, it is essential to create conditions that enhance the motivation of both academic staff and students to engage in the creative implementation of the educational process using DER and DES, thereby improving the quality of personnel training for the agro-industrial sector.

Keywords: readiness of university teachers; electronic information and educational environment; readiness levels

For citation: Kubrushko P.F., Krivchanskiy I.F., Siman A.S., Zhilyaeva V.V., Shingareva M.V., Atapina Yu.A. Readiness of agricultural university teachers for professional activity in the electronic information and educational environment: An assessment study. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(4):110-117. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-110-117>

Введение

Электронная информационно-образовательная среда вуза (ЭИОС) представляет собой многокомпонентную интегративную систему, включающую в себя различные программно-аппаратные средства, цифровые образовательные сервисы (ЦОС) и ресурсы (ЦОР), необходимые для освоения обучающимися основных профессиональных образовательных программ в полном объеме независимо от их местонахождения [1]. Роль и значимость ЭИОС подкрепляет ряд законодательных актов федерального уровня, которые устанавливают перечень требований и функциональное назначение отдельных цифровых инструментов, используемых в процессе обучения студентов. Это Федеральный

закон № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации», Федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования, Постановление Правительства Российской Федерации № 1678 «Об утверждении Правил применения организациями, осуществляющими образовательную деятельность, электронного обучения, дистанционных образовательных технологий при реализации образовательных программ». Это свидетельствует о важности и востребованности рассматриваемого вопроса на государственном уровне.

Постоянно модернизирующаяся электронная информационно-образовательная среда организаций высшего образования обуславливает принципиально новое взаимодействие преподавателей

и обучающихся как в привычном аудиторном формате, так и при использовании электронного обучения (ЭО) и дистанционных образовательных технологий (ДОТ) [2]. В связи с этим перед аграрными вузами встает важная и актуальная задача адаптации профессорско-преподавательского состава (ППС) к изменяющимся условиям и новым особенностям взаимодействия со студентами в ЭИОС. Умение работать с информационными и коммуникационными технологиями (ИКТ), цифровыми образовательными сервисами и ресурсами, программным обеспечением становится необходимым условием эффективной реализации педагогической деятельности при подготовке высококвалифицированных кадров [3, 4].

Готовность преподавателей вуза к работе в электронной информационно-образовательной среде представляет собой интегративное качество личности, которое характеризуется совокупностью знаний, умений, навыков по применению ИКТ в педагогической деятельности, положительным отношением и мотивацией к использованию ЦОС и ЦОР, необходимых для планирования и реализации образовательного процесса в условиях специально созданной электронной информационно-образовательной среды [5].

Цель исследований: диагностика уровня готовности преподавателей аграрного профиля к реализации образовательного процесса в ЭИОС вуза.

Материалы и методы

Базой для проведения эмпирических исследований стали четыре института, реализующие подготовку студентов аграрного профиля в Российском государственном аграрном университете – МСХА имени К.А. Тимирязева: Институты агробиотехнологии, зоотехнии и биологии, садоводства и ландшафтной архитектуры, механики и энергетики имени В.П. Горячкина. В совокупности в исследованиях приняли участие 323 преподавателя.

Диагностика исходного и итогового уровня готовности преподавателей аграрного профиля к реализации образовательного процесса после обучения по дополнительной профессиональной программе «Электронная информационно-образовательная среда» проведена с применением авторской анкеты, теста, разработанных практических заданий и использованием программно-аппаратных средств и цифровых инструментов ЭИОС. Уровень готовности преподавателей к работе в ЭИОС определен по трем компонентам [5]: мотивационному (анкетирование позволяет определить уровень мотивации преподавателей к использованию ЦОС и ЦОР

в профессионально-педагогической деятельности), когнитивному (вопросы анкеты и дидактического теста направлены на выявление знаний ППС в части нормативных основ применения ЭИОС и ее функциональных возможностей), деятельностному (вопросы анкеты и оценка практических заданий показывают уровень сформированности умений ППС использовать компоненты ЭИОС в профессионально-педагогической деятельности).

Распределение по уровням готовности осуществлялось на основе суммарного количества баллов, набранных испытуемыми в ходе диагностических процедур, в частности:

- непродуктивный уровень (0...8 баллов – мотивационный компонент; 0...4 балла – когнитивный компонент; 0...6,5 балла – деятельностный компонент);
- базовый уровень (8,5...16 баллов – мотивационный компонент; 5...8 – баллов когнитивный компонент; 7...13,5 балла – деятельностный компонент);
- продуктивный уровень (16,5...23 балла – мотивационный компонент; 9...11 баллов – когнитивный компонент; 14...19 баллов – деятельностный компонент).

Результаты и их обсуждение

Результаты диагностики исходного уровня готовности группировались в зависимости от принадлежности преподавателей конкретным институтам университета. У значительной части выборки зафиксирован непродуктивный уровень сформированности всех компонентов готовности (табл. 1, рис. 1).

В Институтах агробиотехнологии, зоотехнии и биологии, садоводства и ландшафтной архитектуры зафиксировано более 50% испытуемых с непродуктивным уровнем готовности по всем компонентам. Интерпретация полученных результатов позволяет предположить, что в этих подразделениях университета в учебном процессе преобладает традиционная форма практической подготовки. В частности, специфика аграрного образования, включающая в себя значительный объем полевых, садовых и лабораторных работ, создает объективные сложности для введения ЦОС и ЦОР в данные виды профессиональной деятельности при отсутствии у ППС специальных знаний и умений. В Институте механики и энергетики имени В.П. Горячкина 64,4% испытуемых набрали количество баллов, соответствующее базовому уровню деятельностного компонента, однако установлено 48,9% преподавателей с непродуктивным уровнем мотивационного компонента и 44,4% с непродуктивным уровнем когнитивного компонента. Результаты диагностики указывают на фрагментарное и зачастую

Таблица 1

Исходный уровень готовности преподавателей аграрного профиля к работе в ЭИОС, %

Table 1

Initial level of readiness of agricultural academic university teachers to work in an electronic information and educational environment, %

Уровень	Компонент		
	Мотивационный	Когнитивный	Деятельностный
Институт агробиотехнологии			
Непродуктивный	54,3	58,5	67
Базовый	26,6	30,9	32
Продуктивный	19,1	10,6	1
Институт зоотехнии и биологии			
Непродуктивный	59,8	54,6	66
Базовый	25,8	26,8	32
Продуктивный	14,4	18,6	2
Институт садоводства и ландшафтной архитектуры			
Непродуктивный	52,4	50	61,9
Базовый	33,3	40,5	35,7
Продуктивный	14,3	9,5	2,4
Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина			
Непродуктивный	48,9	44,4	33,3
Базовый	31,1	37,8	64,4
Продуктивный	20	17,8	2,3

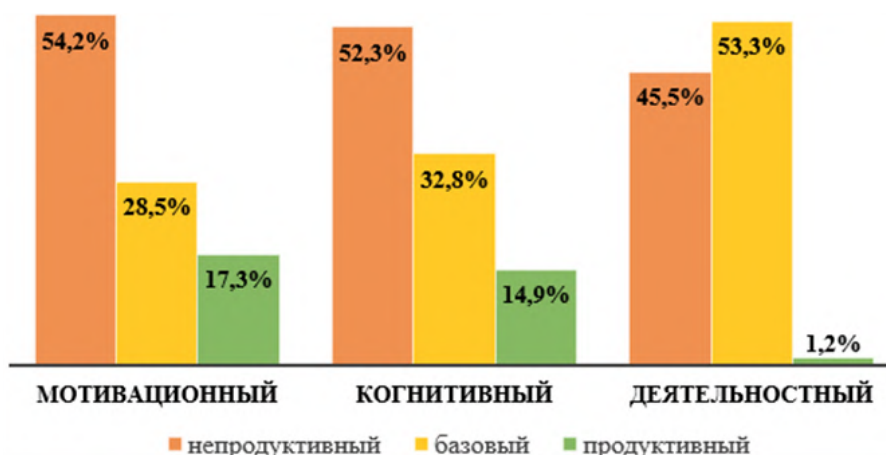


Рис. 1. Исходный уровень готовности преподавателей аграрного профиля к работе в ЭИОС по компонентам

Fig. 1. Initial level of readiness of agricultural university teachers to work in the EIEE by components

интуитивное применение преподавателями отдельных ЦОС и ЦОР (в том числе не входящих в состав ЭИОС). Эти данные обусловлены, вероятно, отсутствием систематических знаний о возможностях университетской ЭИОС и недостаточным уровнем

мотивации к ее целенаправленному использованию в образовательном процессе.

В среднем процент респондентов, набравших баллы, соответствующие непродуктивному уровню мотивационного компонента,

достиг 54,2% (175 чел.), базовому уровню – 28,5% (92 чел.), продуктивному – 17,3% (56 чел.) (рис. 1). По сформированности когнитивного компонента непродуктивному уровню соответствуют 52,3% испытуемых (169 чел.); базовому – 32,8% (106 чел.); продуктивному – 14,9% (48 чел.). Деятельностный компонент, подразумевающий регулярное использование ЭИОС в педагогической практике и умение применения ее компонентного состава, у 45,5% (147 чел.) соответствует непродуктивному уровню, у 53,3% (172 чел.) – базовому уровню, у 1,2% (4 чел.) – продуктивному уровню.

В период 2021-2023 гг. в вузе проведено обучение преподавателей аграрного профиля по дополнительной профессиональной программе (программе повышения квалификации) «Электронная информационно-образовательная среда» для ППС университета. В ходе освоения программы преподаватели изучали нормативную базу использования ЭИОС, применения ЭО и ДОТ, а также выполняли практические задания, предполагающие использование в реальных профессиональных условиях функциональных возможностей каждого компонента ЭИОС. Специально созданная в университете электронная информационно-образовательная среда включает в себя официальный сайт вуза, личный кабинет преподавателя и студента, корпоративный почтовый сервер, учебно-методический портал на базе LMS «Moodle», электронную библиотечную систему и электронный деканат (автоматизированную информационную систему управления).

Особенность программы заключается в подготовке преподавателей к деятельности в ЭИОС непосредственно внутри самой ЭИОС. Так, ППС смогли «примерить» на себя, с одной стороны, роль студента, что позволило рассмотреть весь процесс взаимодействия в ЭИОС с обучающимися с их точки зрения, с другой – попробовать себя в качестве преподавателя-администратора, использующего инструментарий ЦОС и ЦОР в рамках преподаваемых дисциплин, и ЭИОС для реализации творческого педагогического потенциала.

Мотивация преподавателей к реализации учебного процесса в ЭИОС подразумевает материальное вознаграждение победителей ежегодного открытого конкурса за создание своего онлайн-курса на открытой образовательной онлайн-платформе «Stepik». Кроме того, в рейтинге эффективности деятельности ППС университета учитываются разработанные онлайн-курсы на учебно-методическом портале университета и внешних открытых образовательных платформах как для учебного процесса

по основным профессиональным образовательным программам, так и в рамках дополнительного профессионального образования (оценивается реализация как новых, так и ранее разработанных курсов).

Результаты итоговой диагностики уровня готовности преподавателей к работе в ЭИОС по окончании обучения отражены в таблице 2 и на рисунке 2.

В двух из четырех институтов университета зафиксировано преобладание числа респондентов, набравших баллы, соответствующие продуктивному уровню мотивационного компонента: Институт зоотехнии и биологии – 49,5% (48 чел.), Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина – 51,1% (46 чел.). В то же время доля преподавателей, количество набранных баллов которых соответствует базовому уровню готовности к работе в ЭИОС, является доминирующей в Институтах агробиотехнологии, садоводства и ландшафтной архитектуры. Менее 20% респондентов Институтов зоотехнии и биологии, садоводства и ландшафтной архитектуры, механики и энергетики имени В.П. Горячкина остались на непродуктивном уровне.

Анализ полученных данных свидетельствует о преимущественно базовом уровне сформированности когнитивного компонента для всех институтов, а именно: агробиотехнологии – 54,3% (19 чел.), зоотехнии и биологии – 48,5% (47 чел.), садоводства и ландшафтной архитектуры – 42,9% (18 чел.), механики и энергетики имени В.П. Горячкина – 52,2% (47 чел.). Непродуктивный уровень с процентным показателем менее 14% наблюдается у Института зоотехнии и биологии, Института механики и энергетики имени В.П. Горячкина. Отметим достаточно высокий процент сформированности готовности когнитивного компонента на рассматриваемом уровне в сравнении с уже представленными результатами: в Институтах агробиотехнологии – 20,2% (19 чел.), садоводства и ландшафтной архитектуры – 35,7% (18 чел.).

Базовый уровень сформированности деятельностного компонента для всех институтов имеет показатель более 50%. При этом отметим значительное снижение процента испытуемых на непродуктивном уровне и повышение процента продуктивного уровня, соответственно, для Институтов: агробиотехнологии – 20,2% (19 чел.) и 26,6% (25 чел.); зоотехнии и биологии – 17,5% (17 чел.) и 29,9% (29 чел.); садоводства и ландшафтной архитектуры – 19% (8 чел.) и 23,8% (10 чел.); 4) механики и энергетики имени В.П. Горячкина – 10% (12 чел.) и 34,5% (31 чел.).

Таблица 2

Итоговый уровень готовности преподавателей аграрного профиля к работе в ЭИОС, %

Table 2

Final level of readiness of agricultural university teachers to work in the EIEE, %

Уровень	Компонент		
	Мотивационный	Когнитивный	Деятельностный
	Институт агробиотехнологии		
Непродуктивный	18,1	20,2	20,2
Базовый	50,0	54,3	53,2
Продуктивный	31,9	25,5	26,6
Институт зоотехнии и биологии			
Непродуктивный	15,4	10,3	17,5
Базовый	35,1	48,5	52,6
Продуктивный	49,5	41,2	29,9
Институт садоводства и ландшафтной архитектуры			
Непродуктивный	19,0	35,7	19,0
Базовый	50,0	42,9	57,2
Продуктивный	31,0	21,4	23,8
Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина			
Непродуктивный	10,0	13,3	10,0
Базовый	38,9	52,2	52,2
Продуктивный	51,1	34,5	34,5

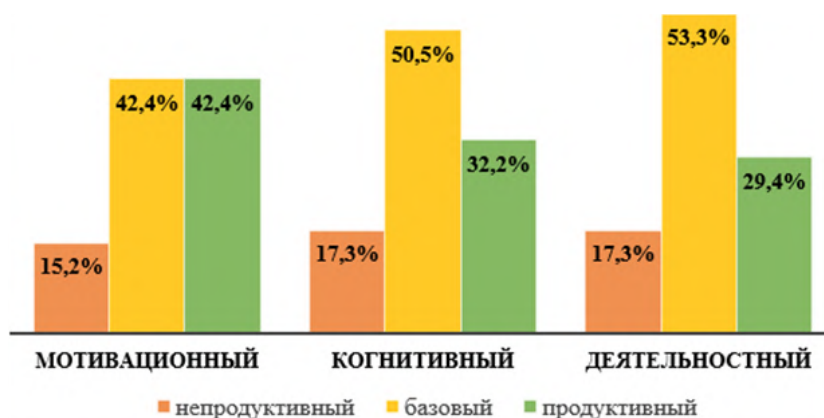


Рис. 2. Итоговый уровень готовности преподавателей аграрного профиля к работе в ЭИОС по компонентам

Fig. 2. Final level of readiness of agricultural university teachers to work in the EIEE by components

Полученные данные подтверждают эффективность процесса формирования готовности преподавателей вуза к профессиональной деятельности в ЭИОС.

Уровневое распределение участников исследований по всем компонентам готовности по итогам

реализации программы представлено следующим образом:

1) мотивационный компонент: непродуктивный уровень – 15,2% (49 чел.), базовый уровень – 42,4% (137 чел.), продуктивный уровень – 42,4% (137 чел.).

2) когнитивный компонент: непродуктивный уровень – 17,3% (56 чел.), базовый уровень – 50,5% (163 чел.), продуктивный уровень – 32,2% (104 чел.);

3) деятельностный компонент: непродуктивный уровень – 17,3% (56 чел.), базовый уровень – 53,3% (172 чел.), продуктивный уровень – 29,4% (95 чел.).

Анализ представленных данных позволяет констатировать наличие положительной динамики в уровне готовности ППС после завершения программы обучения. Так, увеличилась численность преподавателей с базовым и продуктивным уровнями по всем компонентам готовности при соответственном уменьшении количества преподавателей, находящихся на непродуктивном уровне. Результаты исследований подтверждены статистической обработкой при помощи критерия Вилкоксона, который

показал нахождение статистических параметров в зоне значимости.

Выводы

Результаты эмпирических исследований, проведенных на базе ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, подтвердили необходимость целенаправленной и систематической подготовки ППС университета к использованию ЦОС и ЦОР, входящих в состав ЭИОС. В формировании готовности важен не только уровень использования преподавателями соответствующих компонентов среды, но и создание в университете условий для повышения мотивации преподавателей и студентов к работе в среде, которые будут способствовать творческой реализации образовательного процесса с использованием ЦОС и ЦОР и повышению качества подготовки кадров для агропромышленного комплекса.

Список источников

1. Жилиева В.В., Симан А.С. Развитие электронной информационно-образовательной среды вуза в условиях цифровой трансформации образования // Актуальные проблемы профессионального образования: Сборник научных статей по материалам Международной научно-практической конференции, г. Саранск, 25-26 апреля 2022 г. Саранск: Мордовский государственный педагогический университет имени М.Е. Евсевьева, 2022. С. 7. EDN: EPNOUT
2. Дорожкин Е.М., Изюрова Я.С. Роль электронной информационно-образовательной среды в системе высшего образования // Московский педагогический журнал. 2022. № 2. С. 71-85. <https://doi.org/10.18384/2310-7219-2022-2-71-85>
3. Новикова Г.П. Профессиональная готовность педагога к инновационной деятельности в условиях цифровой трансформации образования // Инновационная деятельность в дошкольном образовании: Материалы XIX Международной научно-практической конференции, Москва-Пушкино, 22 апреля 2025 г. Москва-Ярославль, 2025. С. 10-27. EDN: RPUQRS
4. Стымковский В.И., Сергеева М.Г., Орешкина А.К., Чернега Е.В. Проектирование цифровой образовательной среды для осуществления комплексных изменений педагогической деятельности преподавателя // Цифровые технологии в инженерном образовании: новые тренды и опыт внедрения: Сборник трудов Международного форума. Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет). 2020. С. 432-437. EDN: VWSBUY
5. Жилиева В.В. Содержание и структура готовности преподавателей вуза к работе в электронной информационнообразовательной среде // Российский научный вестник. 2025. № 3. С. 294-298. EDN: FQPIOP

References

1. Zhilyaeva V.V., Siman A.S. Development of the electronic information and educational environment of the university in the conditions of digital transformation of education. *Aktualnye problemy professionalnogo obrazovaniya: Proceedings of International Scientific and Practical Conference, Saransk, April 25-26, 2022. Saransk: Mordovian State Pedagogical University named after M.E. Evsevieva, 2022. P. 7. (In Russ.)*
2. Dorozhkin E.M., Izyurova Ya.S. The role of the electronic information and educational environment in the higher education system. *Moscow Pedagogical Journal*. 2022;2:71-85. (In Russ.) <https://doi.org/10.18384/2310-7219-2022-2-71-85>
3. Novikova G.P. Professional readiness of a teacher for innovative activity in the context of digital transformation of education. *Innovatsionnaya deyatel'nost' v doskol'nom obrazovanii: Proceedings of the 19th International Scientific and Practical Conference. Moscow-Yaroslavl, 2025, Moskva-Pushkino, April 22, 2025. Moskva-Yaroslavl, 2025. Pp. 10-27. (In Russ.)*
4. Stymkovsky V.I., Sergeeva M.G., Oreshkina A.K., Chernega E.V. Designing a digital educational environment for the implementation of complex changes in the pedagogical activity of a teacher. *Tsifrovye tekhnologii v inzhenernom obrazovanii: novye trendy i opyt vnedreniya: Proceedings of the International Forum. Bauman Moscow State Technical University (National Research University) (Moscow). 2020. Pp. 432-437. (In Russ.)*
5. Zhilyaeva V.V. Content and structure of academic staff readiness to use a digital educational environment. *Rossiyskiy nauchnyi vestnik*. 2025;3:294-298. (In Russ.)

Информация об авторах

- ¹ **Кубрушко Петр Федорович**, д-р пед. наук, профессор, чл.- корр. РАО; kubrushko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2142-1037>; SPIN-код: 1787-9218
- ² **Кривчанский Иван Филиппович**, канд. пед. наук, профессор; krivchanskiy@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4034-3353>; SPIN-код: 7473-3468
- ³ **Симан Алексей Сергеевич**, канд. пед. наук, доцент; siman@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8280-6195>; SPIN-код: 9345-8553
- ⁴ **Жиляева Виктория Викторовна**, ассистент; zhilyaeva@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-2265-916X>; SPIN-код: 9265-5129
- ⁵ **Шингарева Марина Валентиновна**, канд. пед. наук, доцент; shingareva@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0002-0713-5042>; SPIN-код: 3842-3514
- ⁶ **Атапина Юлия Алексеевна**, ассистент; atapina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1098-503X>; SPIN-код: 1938-7020
- ^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

Вклад авторов

Кубрушко П.Ф. – руководство исследованием;
 Кривчанский И.Ф. – методология исследования;
 Симан А.С. – концептуализация, создание черновика рукописи;
 Жиляева В.В. – проведение исследований, верификация данных, создание черновика рукописи;
 Шингарева М.В. – формальный анализ, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
 Атапина Ю.А. – ресурсы, визуализация.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 02.03.2026; после рецензирования и доработки 30.06.2026; принята к публикации 03.07.2026

Author Information

- Petr F. Kubrushko**¹, DSc (Ed), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Education, kubrushko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2142-1037>
- Ivan F. Krivchanskiy**², CSc (Ed), Professor; krivchanskiy@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4034-3353>
- Aleksei S. Siman**³, CSc (Ed), Associate Professor, siman@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8280-6195>
- Viktoriya V. Zhilyaeva**⁴, Assistant Professor, zhilyaeva@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-2265-916X>
- Marina V. Shingareva**⁵, CSc (Ed), Associate Professor, shingareva@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0002-0713-5042>
- Yulia A. Atapina**⁶, Assistant Professor, atapina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1098-503X>
- ^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contribution

P.F. Kubrushko – research supervision;
 I.F. Krivchanskiy – research methodology;
 A.S. Siman – conceptualization, writing – original draft;
 V.V. Zhilyaeva – investigation; validation; data curation; writing – original draft;
 M.V. Shingareva – formal analysis, writing – review and editing of the manuscript;
 Yu.A. Atapina – resources, visualization.

Conflict of interests

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

Received 02.03.2026; Revised 30.06.2026; Accepted 03.07.2026

Требования к оформлению статьи

Структура статьи (образец)

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК:

<https://doi.org/10.26897/2687-1149->

Название статьи (тах 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 второго автора; [https://orcid.org/..](https://orcid.org/)

Аннотация – самостоятельный законченный материал. Вводная часть минимальна. Нужно коротко и емко отразить актуальность и цель исследований, условия и схемы экспериментов, привести полученные результаты (с обязательным аргументированием на основании цифрового материала), сформулировать выводы. Нельзя использовать аббревиатуры и сложные элементы форматирования (например, верхние и нижние индексы) (объем 200 слов, включает ключевые слова!).

Ключевые слова: 7-10 слов или словосочетаний для поисковых систем и классификации статей по темам.

Финансирование. Сведения о грантах, финансировании.

Для цитирования: ФИО авторов. Название статьи // *Агроинженерия*. Год. Том. №. С. . <https://doi.org/10.26897/2687-1149->

© ФИО авторов, год

ORIGINAL ARTICLE

Article title

Full 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

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.

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 $\lim$, $\lg$, $\cos$, $\sin$, $\cos$, $\lg$, $\min$, $\max$ и др. приводятся в прямом начертании. Аббревиатуры должны быть пояснены. Диапазон любых значений указать в виде многоточия («...»: 13,25...13,50), кроме периода лет, где используется дефис («-»: 5-6).

2. **Рисунки** (иллюстрации, графики, диаграммы, схемы) должны иметь качество 300 dpi для растровых изображений (например, фотографий), их обрезка должна производиться до вставки в документ. Каждый график, диаграмма или схема вставляется в текст как объект MS Excel. Наименования осей, единицы измерения физических величин и прочие надписи должны быть выполнены на русском и английском языке.

Рисунки должны иметь сквозную нумерацию, название и ссылку в тексте: (рис. 1). Каждый рисунок должен иметь подрисуючную подпись, в которой даётся объяснение всех его элементов.

3. **Таблицы** должны иметь сквозную нумерацию и заголовки. К таблицам и рисункам необходим англоязычный перевод подрисуючных подписей и заголовков. Сокращать слова в таблице не допускается.

4. Для набора **формул** необходимо использовать программы Math Type (в приоритете) либо Equation. Недопустимо вставлять уравнения в текст в виде растровых либо векторных изображений. Простые математические выражения, не содержащие дробей, корней, сложных индексов и т.д. (цифры и буквы (русские, латинские, греческие; знаки, имеющиеся в таблице символов), размещаются в тексте без использования специальных программ. Формулы должны создаваться одним объектом, а не состоять из частей. Править стили отдельных букв (приводить их к прямому начертанию) в уравнении, набранном в разрешённых программах, неприемлемо.

Формулы и уравнения печатаются с новой строки и центрируются. Все обозначения в формулах должны быть объяснены с указанием единиц измерения в системе СИ. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи.

5. **Список 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