



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

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научный журнал

Том 27. № 5 / 2025

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

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

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

Основан в 2003 году

Периодичность: 6 номеров в год

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

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

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

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

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

Подписано в печать 17.10.2025
Формат 60 84/8
Тираж 500 экз.

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

Главный научный редактор

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

Заместитель главного научного редактора:

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

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

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

Члены редакционного совета:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Иностранные члены редакционного совета:

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

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

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

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

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

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



Founder and Publisher:

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

Address of Founder and Publisher:

49, Timiryazevskaya str., Moscow,
127434, Russian Federation

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

Founded in 2003

Publication Frequency:

Bimonthly

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

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

EXECUTIVE EDITORS:

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

Editors' office address:

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

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

Passed for printing 17.10.2025
Format – 60 84/8
Circulation – 500 copies.

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

Science Editor-in-Chief

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

Deputy Science Editor-In-Chief:

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

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

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

Members of the Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

International members of the Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

А.Ю. Измайлов, А.С. Дорохов, И.Р. Рахимов, Н.В. Алдошин, Д.А. Ялалетдинов Обработка почвы с подачей сжатого воздуха – путь к быстрому восстановлению структуры почвы.....	4
Г.А. Перов, М.М. Ковалев, Р.А. Ростовцев, М.Г. Перов, И.Л. Абрамов Анализ динамической модели вспушвателя лент льна.....	14
В.А. Лазыкин, А.И. Бурков, А.Л. Глушков, В.Ю. Мокиев Агротехническая оценка машины для вытирания и скарификации семян бобовых трав КС-0,3П.....	23
Н.П. Тишанинов, А.В. Анашкин, С.В. Емельянович Взаимосвязь интенсивности выделения зерна триером со скоростным режимом работы	32
Т.А. Клевцова, А.В. Гвоздев, Я.А. Мирошниченко Алгоритм расчета параметров процесса сепарации зерна в гравитационном сепараторе.....	39
Т.Н. Толстоухова, И.В. Назаров, А.А. Поцелуев Модернизированная система автопоения на откормочных фермах КРС	47

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

В.М. Корнеев, Д.И. Петровский, Н.В. Корнеев Интенсификация процесса погружной очистки деталей ультразвуковыми колебаниями.....	54
В.И. Балабанов, Н.Н. Ивахненко, Д.В. Добряков Теоретические основы фрикционного нанесения антиизносных покрытий	61
Р.М. Касимов, Р.А. Алехина, Н.Д. Блинов, А.С. Свиридов Исследование влияния разбавителя на реологические и технологические свойства эпоксидных композитов.....	68
А.В. Серов, Н.В. Серов, Д.М. Скороходов Расчет размеров единичной сварочной площадки при электроконтактной приварке металлической ленты.....	75

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

М.И. Белов, Д.В. Белов, С.А. Андреев, Н.Е. Кабдин, Д.М. Селезнева Исследование процесса электронагрева газа в рабочем объеме дирижабля сельскохозяйственного назначения	82
---	----

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

И.В. Куламихина, Ж.Б. Есмурзаева, А.Ю. Алипичев Лингвистические аспекты формирования профессионального самоопределения студентов аграрного вуза: от семантического анализа к речевым стратегиям профориентации	90
--	----

CONTENTS

FARM MACHINERY AND TECHNOLOGIES

A.Yu. Izmaylov, A.S. Dorokhov, I.R. Rakhimov, N.V. Aldoshin, D.A. Yalaletdinov Soil treatment with compressed air as a way to restore the soil structure	4
G.A. Perov, M.M. Kovalev, R.A. Rostovtsev, M.G. Perov, I.L. Abramov Analysis of the dynamic model of a flax stem strip fluffer.....	14
V.A. Lazykin, A.I. Burkov, A.L. Glushkov, V.Yu. Mokiev Agrotechnical evaluation of the KS-0.3P machine for rubbing out and scarifying legume grass seeds	23
N.P. Tishaninov, A.V. Anashkin, S.V. Emelyanovich Relationship between the intensity of grain release by an indented cylinder separator and the speed mode of operation.....	32
T.A. Klevtsova, A.V. Gvozdev, Ya.A. Miroshnichenko Algorithm for calculating grain separation parameters in a gravity separator.....	39
T.N. Tolstoukhova, I.V. Nazarov, A.A. Potseluev Automatic watering system on cattle fattening farms	47

TECHNICAL SERVICE IN AGRICULTURE

V.M. Korneev, D.I. Petrovsky, N.V. Korneev Intensification of submersion cleaning of parts using ultrasonic oscillations.....	54
V.I. Balabanov, N.N. Ivakhnenko, D.V. Dobryakov Theoretical foundations of frictional application of anti-wear coatings	61
R.M. Kasimov, R.A. Alekhina, N.D. Blinov, A.S. Sviridov Study of the effect of a diluent on the rheological and technological properties of epoxy composites.....	68
A.V. Serov, N.V. Serov, D.M. Skorokhodov Calculation of welding point dimensions during electrical contact welding of a metal tape	75

POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

M.I. Belov, D.V. Belov, S.A. Andreev, N.E. Kabdin, D.M. Selezneva Electrical heating of gas in the working volume of agricultural airships	82
--	----

THEORY AND METHODOLOGY OF PROFESSIONAL EDUCATION

I.V. Kulamikhina, Zh.B. Esmurzaeva, A.Yu. Alipichev Linguistic aspects of building professional self-determination of agrarian university students: from semantic analysis to verbal strategies of career guidance	90
--	----

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.31:631.312.024:631.51.014

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-4-13>

Обработка почвы с подачей сжатого воздуха – путь к быстрому восстановлению структуры почвы

А.Ю. Измайлов¹, А.С. Дорохов², И.Р. Рахимов³, Н.В. Алдошин^{4✉}, Д.А. Ялалетдинов⁵^{1,2,4} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия³ Южно-Уральский государственный аграрный университет; г. Троицк, Челябинская область, Россия⁵ ООО «Челябинский компрессорный завод»; Челябинская область, Россия¹ vim@vim.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1143-7286>² dorokhov.vim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>³ ildarr@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0020-6634>⁴ naldoshin@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>⁵ den@chkz.ru

Аннотация. Многократное воздействие ходовых систем тяжелых машин в технологии возделывания сельскохозяйственных культур ведет к переуплотнению почвы и увеличению ее твердости, и как следствие – к увеличению тягового сопротивления. Можно ожидать, что использование сжатого воздуха в комбинации с классическими рабочими органами почвообрабатывающих машин позволит уменьшить трение почвы о рабочие органы машин, увеличить вспушиваемость обрабатываемого слоя и расширить зоны деформации обрабатываемых участков. Цель исследований – разработать способ обработки почвы с подачей сжатого воздуха к рабочим органам почвообрабатывающих машин, обеспечивающий снижение тягового сопротивления и восстановление структуры почвы. Сжатый воздух обеспечивает деформацию и рыхление почвы методом отрыва слоя почвы без его сжатия и смятия, после чего рабочие органы машин контактируют с уже разрыхленной средой. Для проверки теоретических предположений проведена обработка почвы с подачей сжатого воздуха машинно-тракторным агрегатом, состоящим из трактора, винтовой компрессорной установки КВ-5/10, чизельного орудия с разработанными рабочими органами и системы подачи пульсирующего сжатого воздуха. Экспериментально подтвердили эффективность применения сжатого воздуха при обработке почвы орудиями с чизельными рабочими органами и установленными наконечниками для подачи воздуха диаметром 3 и 5 мм: при давлении 0,9...1,1 МПа и частоте импульсов 10 Гц улучшается устойчивость хода чизельных рабочих органов по глубине обработки, повышается крошение почвы и увеличивается глубина и ширина зоны рыхления почвы на 30...90%, при этом снижается тяговое сопротивление до 33% и увеличивается производительность на 12...68%. В дальнейшем необходимо обосновать технологические параметры, режимы работы и диаметр наконечника для различных видов обработки почвы и почвенно-климатических условий; можно интегрировать систему дифференцированного впрыска жидких удобрений и привод винтового блока компрессора от вала отбора мощности трактора.

Ключевые слова: обработка почвы; обработка почвы с подачей сжатого воздуха; сжатый воздух; чизельный рабочий орган; винтовой компрессор; рыхление почвы; крошение почвы; вспушиваемость

Для цитирования: Измайлов А.Ю., Дорохов А.С., Рахимов И.Р., Алдошин Н.В., Ялалетдинов Д.А. Обработка почвы с подачей сжатого воздуха – путь к быстрому восстановлению структуры почвы // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 5. С. 4-13. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-4-13>

ORIGINAL ARTICLE

Soil treatment with compressed air as a way to restore the soil structure

A.Yu. Izmaylov¹, A.S. Dorokhov², I.R. Rakhimov³, N.V. Aldoshin⁴✉, D.A. Yalaletdinov⁵^{1,2,4} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia³ South Ural State Agrarian University; Troitsk, Chelyabinsk Region, Russia⁵ Chelyabinsk Compressor Plant; Chelyabinsk Region, Russia¹ vim@vim.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1143-7286>² dorokhov.vim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>³ ildarr@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0020-6634>⁴ naldoshin@yandex.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>⁵ den@chkh.ru

Abstract. Repeated impact of the running gear systems of heavy machines employed in agriculture leads to soil compaction and increased soil hardness, which consequently results in higher traction resistance. The use of compressed air in combination with traditional working tools of soil tillage machines is expected to reduce soil friction against the machine's working tools, increase the looseness of the treated layer, and expand the deformation zones of the cultivated areas. The research aims to develop a soil treatment method that supplies compressed air to the working tools of soil tillage machines, ensuring a reduction in traction resistance and the restoration of soil structure. Compressed air induces soil deformation and loosening by detaching a soil layer without compressing or crushing it, after which the machine's working tools contact the already loosened medium. To verify the theoretical assumptions, the authors performed soil treatment operations using a machine-tractor unit consisting of a tractor, a KV-5/10 screw compressor unit, a chisel cultivator with specially designed working tools, and a pulsating compressed air supply system. Experimental results confirmed the effectiveness of using compressed air in soil tillage operations by means of chisel working tools and air supply nozzles with diameters of 3 and 5 mm. At a pressure of 0.9 to 1.1 MPa and a pulse frequency of 10 Hz, the chisel working tools demonstrated improved stability as to the depth of operation; soil crushing increased, and the depth and width of the loosening zone expanded by 30 to 90%. At the same time, traction resistance decreased by up to 33%, and productivity increased by 12 to 68%. Further research should focus on justifying technological parameters, operational modes, and nozzle diameters for various tillage operations and soil-climatic conditions. Additionally, it is possible to integrate a system for differential liquid fertilizer injection and a drive for the screw compressor unit from the tractor's power take-off shaft.

Keywords: soil tillage; soil treatment with compressed air; compressed air; chisel working tool; screw compressor; soil loosening; soil crushing; looseness of soil

For citation: Izmaylov A.Yu., Dorokhov A.S., Rakhimov I.R., Aldoshin N.V., Yalaletdinov D.A. Soil treatment with compressed air as a way to restore the soil structure. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(5):4-13 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-4-13>

Введение

Развитие научно-технического прогресса в сельскохозяйственном производстве направлено на разработку и совершенствование технологии возделывания сельскохозяйственных культур, способов обработки почвы и посева, создание новых рабочих органов машин, способствующих снижению их тягового сопротивления, улучшающих структуру и плодородие почв [1-4].

Применение мощной тяжелой колесной техники (тракторы, комбайны, сельскохозяйственные машины для выполнения различных технологических операций, транспортные средства) приводит к переуплотнению почв. В зависимости от применяемой технологии возделывания сельскохозяйственных культур большая часть пашни подвергается ежегодно

3...10-кратному воздействию ходовых систем тяжелых машин, что ведет к переуплотнению почвы до 1,4...1,8 г/см³. Оптимальная плотность для большинства культур на суглинистых и глинистых почвах составляет 1,1...1,3 г/см³ [5-7]. Увеличение плотности почвы ведет к возрастанию ее твердости, вызывающей увеличение тягового сопротивления в зависимости от количества проходов агрегата на 16...90%, ухудшает условия развития корневой системы растений и снижает урожайность возделываемых культур. Кроме того, снижается водопроницаемость переуплотненной почвы, что ведет к смыву ее верхнего слоя при ливневых дождях и таянии снега [8-10].

Обработка почвы является одной из наиболее энергоемких операций при возделывании сельскохозяйственных культур, поэтому необходимо

решать задачу энергосбережения за счет снижения тягового сопротивления почвообрабатывающих орудий [11-14], разрабатывать новые, эффективные способы обработки почвы, которые за один проход почвообрабатывающего агрегата обеспечат восстановление структуры почвы в соответствии с агротехническими требованиями до оптимального уровня. Задача эта может решаться различными способами.

Известно, что при обработке почвы, чтобы обеспечить ее крошение за счет напряжений сжатия, необходимо приложить значительно большие усилия, чем при действии растягивающих напряжений. Поэтому создание рабочих органов почвообрабатывающих машин, работающих при воздействии на обрабатываемую почву, за счет растягивающих напряжений даст значительное сокращение энергозатрат. К сожалению, подавляющее большинство таких попыток не удалось реализовать в конкретных конструкциях машин.

Иной путь энергосбережения – это уменьшение трения почвы о рабочие органы почвообрабатывающих машин. Достичь этого можно использованием альтернативных металлу материалов – например, полимеров. К сожалению, пока нет эффективных технологий нанесения полимерных материалов на металлические поверхности рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Также возможным направлением решения поставленной задачи является использование сжатого воздуха. При этом использование струи сжатого воздуха в виде почвообрабатывающего рабочего органа является нерациональным, так как трудно обеспечить глубокое проникновение струи воздуха в почвенный горизонт, обрабатываемая площадь минимальна, а утечки воздуха значительны. В связи с этим целесообразно использовать сжатый воздух в комбинации с классическими рабочими органами почвообрабатывающих машин. Это позволит уменьшить трение почвы о рабочие органы машин, расширить зоны деформации обрабатываемых участков, увеличить впускаемость обрабатываемого слоя. Однако для таких машин необходимо иметь высокопроизводительное компрессорное оборудование, позволяющее обеспечивать сжатым воздухом полноразмерные высокопроизводительные почвообрабатывающие агрегаты.

Цель исследований: разработать способ обработки почвы с подачей сжатого воздуха к рабочим органам почвообрабатывающих машин, обеспечивающий снижение тягового сопротивления и восстановление структуры почвы.

Материалы и методы

В технологиях возделывания сельскохозяйственных культур для основной и дополнительной

обработок почвы без оборота пласта применяются чизельные рыхлительные рабочие органы, воздействующие на почву двугранным клином¹ [1, 4].

Действие клина выражается в двух последовательно чередующихся фазах. Первая фаза – сжатие и резание клином частиц почвы при его перемещении, их подъем из положения a в положение a' (рис. 1а) [6]. Вторая фаза наступает при достижении предельной величины сжатия, обусловленной прочностью почвы, и тогда происходит разрушение, излом или отрыв пласта, направление трещины при этом может быть различным в зависимости от типа и физико-механических свойств почвы. Далее этот процесс повторяется.

В зависимости от типа и свойств почвы характер деформации под действием клина имеет различные формы (рис. 1). Сухие, твердые и уплотненные почвы деформируются отрывом кусками неправильной формы, захватывая при этом дно борозды и делая его неровным (рис. 1а). Влажные, вязкие и задернелые почвы под воздействием клина отрываются и поступают на рабочую поверхность клина изгибом (рис. 1б). Малосвязные сыпучие почвы при перемещении клина распадаются на отдельные частицы и сгуживаются перед клином (рис. 1в).

Таким образом, клин рабочего органа в процессе перемещения деформирует почву наиболее энергоемким методом сжатия, смятия с дальнейшим отрывом пласта от монолита, расходуя силу тяги трактора на преодоление возникающих при этом нормальных сил и сил трения [6].

В процессе перемещения орудия массой m (кг) со скоростью V_a (м/с) клин шириной d (м) обрабатывает почву с удельным сопротивлением K_{Π} (кН/м²) на глубину a (м) и рыхлит почву на уровне поверхности поля на ширину b (м). Тогда согласно формуле академика В.П. Горячкина тяговое сопротивление рабочего органа P (кН), определяется по формуле²:

$$P = mgf + K_{\Pi} a \frac{b+d}{2} + \varepsilon a \frac{b+d}{2} V_a^2, \quad (1)$$

где f – коэффициент, характеризующий силы трения на протаскивание орудия в открытой борозде; ε – скоростной коэффициент, характеризующий форму поверхности рабочего органа и свойства почвы, кНс²/м⁴.

Использование сжатого воздуха при обработке почвы является перспективным и новым способом,

¹ Кулен А., Куиперс Х. Современная земледельческая механика. М.: Агропромиздат, 1986. 349 с.; Мазитов Н.К. Российская техника и технология производства продукции здорового жизнеобеспечения. М.: ООО «Сам Полиграфист», 2019. 260 с.

² Горячкин В.П. Собрание сочинений: В 3 т. М.: Машиностроение, 1967.

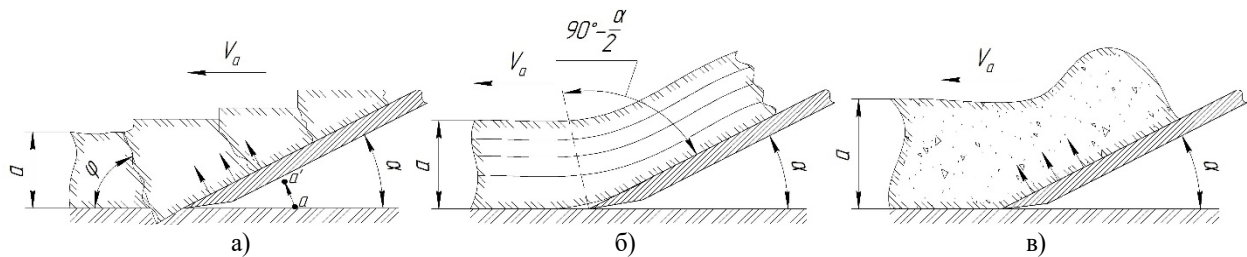


Рис. 1. Деформация пласта под действием клина:

- а) сухого уплотненного связного пласта; б) влажного связного задернелого пласта; в) сухого несвязного сыпучего пласта; V_a – скорость перемещения рабочего органа; a – глубина обработки; a' – величина, характеризующая деформацию смятия почвы; α – угол установки рабочей грани клина к горизонтальной плоскости; φ – угол наклона плоскости сдвига почвенного пласта к дну борозды

Fig. 1. Deformation of the layer under the action of a wedge:

- a) Dry compacted cohesive layer; b) Moist cohesive layer with a crust; c) Dry non-cohesive loose layer; V_a – velocity of the working tool; a – treatment depth; a' – parameter characterizing soil crushing deformation; α – angle of the wedge's working edge relative to the horizontal plane; φ – angle of the soil layer's shear plane inclination to the furrow bottom

способным снизить тяговое сопротивление и восстановить структуру и плодородие почвы при обработке уплотненных и твердых почв [7, 15-17].

Производство винтовых компрессоров высокой производительности в ООО «Челябинский компрессорный завод» позволяет разработать рабочие органы и машины для обработки почвы с использованием пульсирующего сжатого воздуха.

При данном способе обработки почвы к рабочим органам подается сжатый воздух на требуемую глубину обработки a (м), который производит деформацию и рыхление почвы методом отрыва слоя почвы без ее сжатия и смятия. Процесс можно описать математической моделью, предположив, что почва представляет собой однородное изотропное полупространство ($-\infty < x < \infty$; $-\infty < y < \infty$; $0 \leq z < \infty$) (рис. 2). Свободная энергия однородной упругой среды определяется выражением [8]:

$$F_y = \frac{\lambda}{2}(u_{xx}^2 + u_{yy}^2 + u_{zz}^2) + \mu(u_{xy}^2 + u_{xz}^2 + u_{yz}^2), \quad (2)$$

где u_{ij} ($i, j = x, y, z$) – тензор деформаций; λ, μ – коэффициенты Ламе.

Решая уравнение (2) относительно коэффициентов деформации почвы по осям x, y и z и при известном

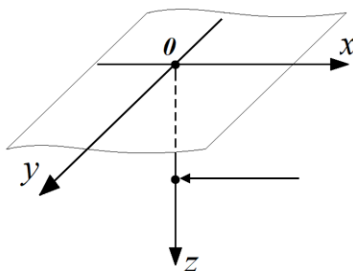


Рис. 2. Геометрия задачи

Fig. 2. Geometry of the problem

давлением и объеме подаваемого сжатого воздуха, можно определить зону рыхления почвы. При этом поданный в почвенный пласт сжатый воздух определенного объема под большим давлением p (МПа) и частотой пульсации ν (Гц), проникая по трещинам, каналам засохших корневых систем растений и ходам дождевых червей, под действием возникающей силы импульса P_δ (кН), расширяясь, производит рыхление и крошение почвы на мелкие фракции, образуя воздушные поры, создавая впереди и с боков рабочего органа зоны дилатансии L (м) (рис. 3) [8]. Одновременно с этим подаваемый воздух при прохождении рабочего органа в почве способствует снижению силы трения.

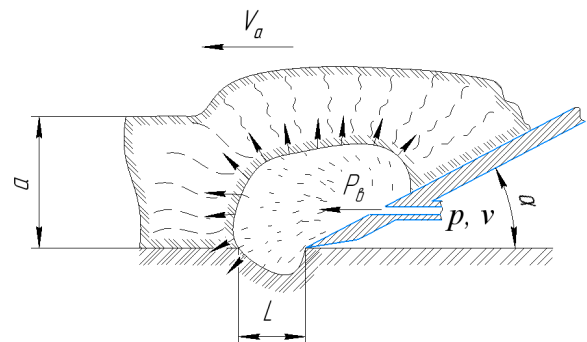


Рис. 3. Деформация пласта

под воздействием сжатого воздуха:

- V_a – скорость перемещения рабочего органа; L – зона дилатансии; P_δ – сила импульса; p – давление воздуха; ν – частота пульсации; a – глубина обработки; α – угол установки рабочей грани клина к горизонтальной плоскости

Fig. 3. Deformation of the layer under the influence of compressed air:

- V_a – velocity of the working tool; L – dilatancy zone; P_δ – impulse force; p – air pressure; ν – pulsation frequency; a – treatment depth; α – angle of the wedge's active face relative to the horizontal plane.

В процессе обработки почвы клин и стойка рабочего органа перемещаются по взрыхленной сжатом воздухом почве, что снижает удельное сопротивление почвы и тяговое сопротивление рабочего органа.

Тогда формула (1) примет вид:

$$P_{\text{в}} = mgf_{\text{в}} + K_{\text{в}} a \frac{b_{\text{в}} + d + 2L}{2} + \varepsilon_{\text{в}} \frac{b_{\text{в}} + d + 2L}{2} a V_{\text{а}}^2, \quad (3)$$

где $f_{\text{в}}$ – коэффициент, характеризующий силы трения на протаскивание орудия в открытой борозде; $K_{\text{в}}$ – удельное сопротивление почвы при подаче пульсирующего сжатого воздуха; $\varepsilon_{\text{в}}$ – скоростной коэффициент; $b_{\text{в}}$ – ширина зоны рыхления почвы на уровне поверхности поля под воздействием сжатого воздуха, м.

Таким образом, при подаче пульсирующего сжатого воздуха снижаются коэффициенты $f_{\text{в}}$, $K_{\text{в}}$, $\varepsilon_{\text{в}}$, увеличивается зона деформации почвы впереди и с боков рабочего органа и дна борозды на величину зоны дилатансии (L , м), что уменьшает тяговое сопротивление рабочего органа с подачей сжатого воздуха ($P_{\text{в}}$, кН). Это увеличивает площадь деформации почвы одним рабочим органом при одновременном увеличении крошения почвы, росте ее вспушенности и снижает удельные затраты энергии на единицу обработанной площади.

Основными требованиями при внедрении нового способа обработки почвы являются снижение удельных затрат энергии на выполнение работ, снижение тягового сопротивления орудия, повышение производительности агрегата при одновременном улучшении

агротехнических показателей работы. Рост производительности обуславливается увеличением рабочей скорости агрегата за счет снижения тягового сопротивления и ростом ширины захвата агрегата по причине расширения зон деформации почвы каждым рабочим органом и, соответственно, увеличения расстояний их расстановки по ширине (междуследий).

Для проверки теоретических предположений разработана схема конструкции чизельного рабочего органа с подачей пульсирующего сжатого воздуха (патент на полезную модель № 228363 [9]) (рис. 4) и проведены полевые опыты машинно-тракторного агрегата, состоящего из трактора, винтовой компрессорной установки КВ-5/10, чизельного орудия с разработанными рабочими органами и системы подачи пульсирующего сжатого воздуха (рис. 5). Винтовая компрессорная установка КВ-5/10 имеет следующие характеристики: производительность – 5 м³/мин; давление рабочее (избыточное) – 1,0 МПа; мощность номинальная – 35,3 кВт; частота вращения привода винтового блока – 2200 мин⁻¹.

Чизельный рабочий орган для обработки почвы пульсирующим сжатым воздухом состоит из стойки 1, долота 3 в сборе, жестко закрепленного на стойке под углом 28°, пневмотрубки 2, подводящей сжатый воздух к выходным сменным наконечникам 6, 7, 8 и 9 диаметром 3 и 5 мм, связанной с пневмомагистралью орудия через подводящий трубопровод 5 и электроклапан 4, создающий пульсирующий поток сжатого воздуха с частотой от 5 до 30 Гц,

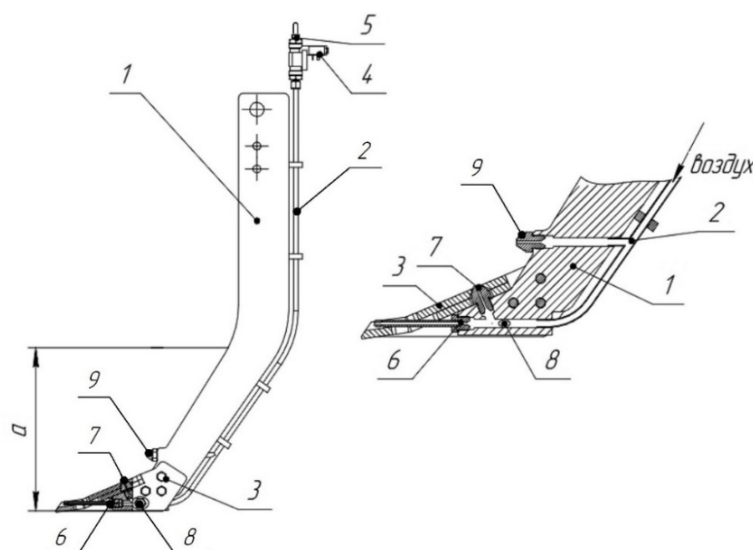


Рис. 4. Чизельный рабочий орган для обработки почвы пульсирующим сжатым воздухом:

- 1 – стойка; 2 – пневмотрубки; 3 – долото в сборе; 4 – электроклапан;
- 5 – подводящий трубопровод, связанный с пневмомагистралью;
- 6, 7, 8, 9 – наконечники подачи пульсирующего сжатого воздуха

Fig. 4. Chisel working tool for soil treatment with pulsating compressed air:

- 1 – tine; 2 – pneumatic tubes; 3 – combined chisel bit; 4 – solenoid valve; 5 – supply pipeline connected to the pneumatic main;
- 6, 7, 8, 9 – nozzles for pulsating compressed air supply

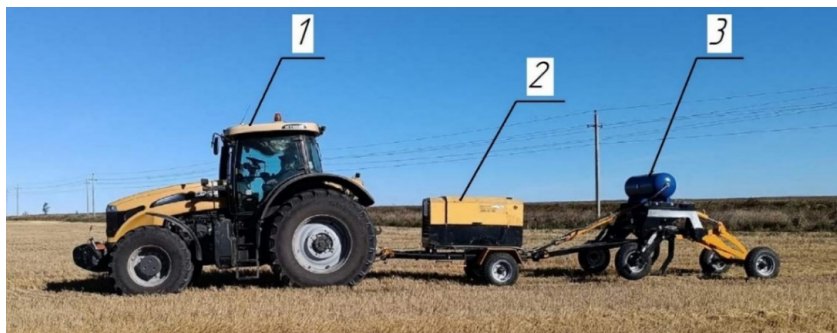


Рис. 5. Экспериментальный агрегат:

1 – трактор; 2 – компрессорная установка; 3 – экспериментальная установка с чизельными рабочими органами

Fig. 5. Experimental unit:

1 – tractor; 2 – compressor unit; 3 – experimental installation with chisel working tools

регулируемый через пульт управления. Давление воздуха в системе регулируется в пределах 0,5...1,1 МПа в зависимости от состояния почвы.

При проведении экспериментальных исследований использовали поверенные приборы и аппаратуру. Агротехнические и энергетические показатели работы рабочего органа определяли с использованием стандартных методик. Для определения тягового сопротивления использовали тензометрическое звено на 7 т, запись сигналов выполняли на измерительный комплекс МПС-200. Глубину обработки определяли щупом с точностью $\pm 0,5$ см. Для определения вспушенности, ширины и глубины развальной борозды, рельефа поверхности поля и дна борозды использовали координатную рейку. Проводили замеры через 5 см. Для определения крошения почвы использовали рулетку, секундомер, емкость с ситами разных размеров ячеек и весы электронные с точностью до 1 г.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальные исследования проведены в КФК «Берёзка» Чесменского района Челябинской области летом 2024 г. на стерневом фоне после уборки пшеницы. Рельеф поля – ровный. Среднее значение влажности почв на глубине 0...0,3 м составляло 18,37%, почва после проливных дождей была уплотнена, и ее твердость на глубине 0...0,05 м соответствовала 1,69 МПа, в слое 0,05...0,1 м – 3,38 МПа, в слое 0,1...0,2 м – 3,7 МПа, на глубине 0,2...0,3 м – 4,05 МПа. Тип почвы – средний суглинок.

Экспериментальные исследования показали, что подача сжатого воздуха в почву под определенным давлением и частотой улучшает устойчивость хода чизельных рабочих органов по глубине обработки, повышает крошение почвы и увеличивает глубину и ширину зоны рыхления почвы (рис. 6), а также снижает тяговое сопротивление и удельное сопротивление почвы. В дальнейшем, при внедрении компрессоров с приводом от ВОМ трактора, при обработке почвы

часть мощности трактора будет расходоваться на привод компрессора через ВОМ трактора. Это должно быть учтено при расчете эффективности внедрения способа обработки почвы с использованием сжатого воздуха. При этом агрегат будет более компактным.

Результаты экспериментальных исследований и расчетов мощности на привод компрессора приведены в таблице. Исследования провели при скоростях движения агрегата $V_a = 1,38$ и $1,94$ м/с и подаче сжатого воздуха под давлением $p = 0,9...1,1$ МПа с частотой пульсаций $\nu = 10$ Гц с установленными наконечниками диаметром $d_n = 3$ и 5 мм. Эксперимент повторили и без подачи сжатого воздуха. При этом тяговое сопротивление рабочих органов P , кН, находилось в пределах 5,05...7,60 кН.

Затраты мощности двигателя на протаскивание одного рабочего органа (N_e , кВт) определяли по формуле:

$$N_e = \frac{Pv_a}{\eta_m \eta_t},$$

где $\eta_m = 0,9$ – коэффициент использования силы тяги трактора; $\eta_t = 0,6$ – КПД трансмиссии трактора.



Рис. 6. Профиль поверхности поля после прохода экспериментального агрегата

Fig. 6. Profile of the field surface after being treated with the experimental unit

Общие затраты мощности на привод одного рабочего органа (N_0 , кВт) учитывают N_e и мощность двигателя трактора, используемую на привод компрессора (N_1), $N_0 = N_e + N_1$.

Удельные затраты мощности обработки –

$$K_{уд} = \frac{N_0}{S}, \text{ кВт/м}^2.$$

Ширина захвата агрегата с трактором –

$$B = \frac{N_{e0}}{K_{уд} a},$$

где N_{e0} – мощность двигателя $N_{e0} = 220$ кВт; a – глубина обработки, м;

Производительность агрегата (W , га/ч) –

$$W = 0,36 B v_a \tau,$$

где τ – коэффициент использования времени смены.

Значение мощности N_e , расходуемой на преодоление тягового сопротивления одного рабочего органа, находится в пределах от 12,9 до 27,3 (кВт). При обработке почвы с использованием сжатого воздуха на привод компрессора через ВОМ трактора расходуется 1,76...8,25 кВт в зависимости от диаметра наконечника. Суммарная мощность двигателя трактора

N_0 , используемая на работу одного рабочего органа, находится в диапазоне 14,9...30,91 кВт. Площадь зоны рыхления почвы S при работе одного рабочего органа с подачей сжатого воздуха соответствует 0,1919...0,2057 м², а без подачи сжатого воздуха – 0,1167...0,145 м², то есть снижается на 30...90%, что оказывает влияние на удельные затраты мощности на обработку почвы $K_{уд}$.

Расчетное значение ширины захвата чизельного орудия (B) для трактора К-730 с мощностью двигателя $N_0 = 220$ кВт при использовании сжатого воздуха увеличивается на 11...67% по сравнению с вариантом без подачи сжатого воздуха.

Расчеты показывают, что при подаче сжатого воздуха через три наконечника диаметром 5 мм производительность агрегата (W , га/ч) увеличивается на 24% при $v_a = 1,38$ м/с и на 12% при $v_a = 1,94$ м/с. При использовании одного наконечника диаметром 5 мм и двух наконечников диаметром 3 мм производительность увеличивается на 47% при $v_a = 1,38$ м/с, на 33% – при $v_a = 1,94$ м/с. При установке трех наконечников диаметром 3 мм увеличение производительности при $v_a = 1,38$ м/с составило 68%, при $v_a = 1,94$ м/с – 45%.

Энергетические показатели работы чизельных рабочих органов на обработке почвы на глубину 0,3 м с применением сжатого воздуха и без его использования

Таблица

Energy indicators of the chisel working tools during soil treatment at a depth of 0.3 m with and without the use of compressed air

Table

Давление в системе, p , МПа System pressure, p , MPa	Частота импульсов, ν , Гц Pulse frequency, ν , Hz	Скорость движения агрегата v , м/с Machine speed, v , m/s	Количество и диаметр наконечников, мм Number and diameter of nozzles, mm	Тяговое сопротивление одного рабочего органа, R , кН Traction resistance of one working tool, R , kN	Затраты мощности двигателя на протаскивание одного рабочего органа, N_e , кВт Power consumption for dragging one working tool, N_e , kW	Мощность двигателя трактора, используемая на привод компрессора, N_1 , кВт Tractor engine power used for compressor drive, N_1 , kW	Общие затраты мощности на привод одного рабочего органа N_0 , кВт Total power consumption for driving one working tool, N_0 , kW	Площадь зоны рыхления, S , м ² Loosening zone area, S , m ²	Удельные затраты мощности обработки, $K_{уд}$, кВт/м ² Specific processing power consumption, $K_{уд}$, kW/m ²	Ширина захвата агрегата с трактором B , м Unit's working width with tractor B , m	Производительность агрегата, W , га/ч Unit productivity, W , ha/h
0,9...1,1	10	1,38	3 шт. по 5 мм	5,05	12,90	8,25	21,15	0,2057	102,8	7,10	2,82
		1,94		6,31	22,66	8,25	30,91	0,1838	168,2	4,35	2,43
		1,38	1 шт. 5 мм 2 шт. 3 мм	5,36	13,69	3,92	17,61	0,2026	86,9	8,40	3,34
		1,94		6,43	23,10	3,92	27,02	0,1919	140,8	5,20	2,90
		1,38	3 шт. по 3 мм	5,36	13,69	1,76	15,45	0,2026	76,2	9,60	3,81
		1,94		6,43	23,10	1,76	24,86	0,1919	129,5	6,66	3,16
–	–	1,38	–	5,86	14,90	0	14,90	0,1167	127,7	5,70	2,26
–	–	1,94	–	7,60	27,30	0	27,30	0,1450	188,3	3,89	2,17

Результаты экспериментальных исследований и произведенные расчеты показывают эффективность внедрения использования сжатого воздуха при основной обработке почвы (чизелевании). С увеличением диаметра выходного отверстия наконечника затраты мощности двигателя на привод компрессора увеличиваются в квадратической зависимости, что снижает эффективность его использования. Поэтому диаметр отверстия $d_n = 5$ мм стоит применять только при обработке твердых и плотных почв, а также при обработке на глубину свыше 25 см. При уменьшении твердости и плотности почвы, а также при глубине обработки менее 20 см следует применять наконечники меньшего диаметра при уменьшении давления воздуха в системе до 0,5 МПа.

Результаты апробации экспериментального агрегата подтвердили гипотезу. Обработка почвы с подачей сжатого воздуха привела: к снижению тягового сопротивления и удельного сопротивления почвы; увеличению глубины и ширины и площади зоны рыхления почвы; увеличению ширины захвата орудия и междуследий между рабочими органами; повышению производительности агрегата. Также выявлены положительные стороны обработки почвы сжатым воздухом: увеличение крошения и вспушенности почвы, насыщение ее воздухом; увеличение устойчивости хода орудия по глубине; устранение развальной борозды; разрушение и устранение плужной подошвы; накопление влаги осенью и весной за счет устранения смыва и проникновения влаги в нижние слои; уничтожение корневой системы сорняков.

Применение сжатого воздуха является перспективным при основной обработке без оборота пласта с чизельными рабочими органами на глубину 20...35 см, при дополнительной обработке почвы рыхлительными рабочими органами до 10...16 см, при окучивании картофеля и других овощных культур, а также при рыхлении междурядий пропашных культур (морковь, капуста, свекла).

Необходимо проводить дальнейшие исследования с целью обоснования технологических параметров и режимов работы (давление, производительность, рабочая скорость, глубина расположения форсунок, частота пульсаций), а также конструктивных параметров (диаметр наконечника) для различных видов обработки почвы: основной для различных технологий возделывания, дополнительной для работы с пропашными культурами, в том

числе корнеклубнеплодами. Необходимо исследовать возможность изменения технологических параметров в процессе работы в зависимости от текущих почвенно-климатических условий, используя данные цифровых карт полей и датчиков, установленных на машинно-тракторном агрегате. Можно интегрировать в систему подачи воздуха систему дифференцированного впрыска органических или минеральных удобрений, различных биопрепаратов в жидком виде. Необходимо создавать новые виды рабочих органов, в которых отсутствуют элементы, предназначенные для сжатия или смятия почвы (лемех, долото).

Разработка привода винтового блока компрессора от вала отбора мощности трактора повысит мобильность и снизит стоимость системы сжатия и подачи воздуха. Разработка высокоэффективных фильтров, не оказывающих влияния на давление и производительность подаваемого сжатого воздуха, позволит устранить повышенное содержание масла в сжатом воздухе в связи с особенностями работы винтового блока компрессора.

Выводы

1. Рациональным является использование сжатого воздуха при обработке почвы орудиями с чизельными рабочими органами под давлением 0,9...1,1 МПа и частотой импульсов 10 Гц.

2. Для различных почвенных условий чизельные рабочие органы необходимо оснащать наконечниками для подачи воздуха диаметром 3 и 5 мм. При использовании одного наконечника диаметром 5 мм и двух наконечников диаметром 3 мм удельные затраты мощности на обработку почвы при скорости агрегата 1,38 м/с составляют 86,9 кВт/м², что на 32% меньше, чем без использования сжатого воздуха.

3. Использование сжатого воздуха при обработке почвы улучшает устойчивость хода чизельных рабочих органов по глубине. Также за счет увеличения вспушенности, расширения зон деформации почвы и междуследий рабочих органов увеличивается ширина захвата орудия – в среднем на 29%.

4. Почвообрабатывающий агрегат с использованием сжатого воздуха повышает крошение почвы и увеличивает глубину и ширину зоны рыхления (объемную деформацию) почвы на 30...90%.

5. За счет использования сжатого воздуха тяговое сопротивление снижается до 33% и увеличивается производительность почвообрабатывающего агрегата на 12...68%.

Список источников

1. Старовойтов С.И., Гринь А.М., Ахалая Б.Х. и др. Об интенсивности воздействия сжатого воздуха на поверхностный слой суглинистой почвы // Современные тенденции развития аграрной науки: Сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции. Брянск, 2023. С. 14-20. EDN: VKHOKT
2. Mamatov F., Aldoshin N., Mirzaev B. et al. Development of a frontal plow for smooth, furless plowing with cutoffs. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1030. VII International Scientific Conference «Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education», "IPICSE2020", 2021. P. 012135. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1030/1/012135>
3. Способ обработки почвы: Патент RU2457651 C1, МПК A01B79/02; заявка № 2011105850/13 / Н.К. Мазитов, В.В. Бледных, Ю.Б. Четыркин и др.; опубл. 10.08.2012. EDN: QRPKNQ
4. Mudarisov S.G., Farkhutdinov I.M., Khabibullin R.F., Imangulov V.Kh. Experimental analysis of traction resistance and fuel consumption of a strip tillage and sowing implement. Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University. 2024;203:333-345. EDN: BQEWAM
5. Коротченя В.М., Ценч Ю.С., Лобачевский Я.П. Разработка типажей сельскохозяйственных технологий для системы машин // Технический сервис машин. 2024. Т. 62, № 4. С. 136-148. EDN: IPGACC
6. Мударисов С.Г., Устинов Н.Н., Мартыненко А.С. Моделирование взаимодействия вибрационного рабочего органа почвообрабатывающей машины с почвой // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2024. № 4 (72). С. 142-147. EDN: CBRCLW
7. Алдошин Н.В., Васильев А.С., Голубев В.В. Обоснование приемов обработки почвы при освоении залежных земель // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. Т. 13, № 1 (64). С. 28-35. EDN: SLJVYK
8. Ялалетдинов Д.А., Рахимов И.Р., Куликова А.П. и др. Моделирование процессов рыхления почвы сжатым воздухом // Челябинский физико-математический журнал. 2024. Т. 9, № 1. С. 160-168. EDN: LVCIVQ
9. Чизельный рабочий орган для обработки почвы пульсирующим сжатым воздухом: Патент на полезную модель RU228363 U1, заявка № 2024109584 / Р.С. Рахимов, А.Р. Ялалетдинов, И.Р. Рахимов и др.; опубл. 26.08.2024. EDN: ZCTYCY
10. Алдошин Н.В. Моделирование качества выполнения механизированных работ // Горняцкие чтения: Сборник докладов 1-й Международной научно-практической конференции. 2013. С. 6-13. EDN: UNMDBP
11. Косолапов В.М., Цыгуткин А.С., Алдошин Н.В., Лылин Н.А. Агрономические основы инженерного обеспечения биологизации земледелия // Кормопроизводство. 2022. № 3. С. 41-47. EDN: IZUIQD
12. Лобачевский Я.П. Прочностные и деформационные свойства связанных задерненных почв // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2011. № 3. С. 18-20. EDN: NVAWBR
13. Сидоров С.А., Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Золотарев А.С. Влияние геометрических и установочных параметров плужных рабочих органов на агротехнические и силовые характеристики // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14, № 2. С. 10-16. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-2-10-16>
14. Лобачевский Я.П., Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х., Старовойтов С.И. Инновационный многофункциональный агрегат для альтернативной обработки почвы // Техника и оборудование для села. 2021. № 10 (292). С. 11-15. EDN: XRCZZN

References

1. Starovoytov S.I., Grin' A.M., Akhalaia B.Kh. et al. On the intensity of the impact of compressed air on the surface layer of loamy soil. In: Sovremennye tendentsii razvitiya agrarnoy nauki: Proceedings of the II International scientific and practical conference. Bryansk, 2023. Pp. 14-20. (In Russ.)
2. Mamatov F., Aldoshin N., Mirzaev B. et al. Development of a frontal plow for smooth, furless plowing with cutoffs. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1030. VII International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education", IPICSE2020. 2021. P. 012135. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1030/1/012135>
3. Mazitov N.K., Blednykh V.V., Chetyrkin Yu.B. et al. Soil treatment method: Patent, No. 2457651 Russian Federation, IPC A01B79/02 (2006.01), 2012. (In Russ.)
4. Mudarisov S.G., Farkhutdinov I.M., Khabibullin R.F., Imangulov V.Kh. Experimental analysis of traction resistance and fuel consumption of a strip tillage and sowing implement. Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University. 2024;203:333-345.
5. Korotchenya V.M., Tsench Yu.S., Lobachevskiy Ya.P. Development of types of agricultural technologies for the machine system. *Machinery Technical Service*. 2024;62;4:136-148. (In Russ.)
6. Mudarisov S.G., Ustinov N.N., Martynenko A.S. Simulation of interaction of a vibrating working tool of a soil tillage machine with the soil using the discrete element method. *Vestnik Bashkir State Agrarian University*. 2024;4:142-147. (In Russ.)
7. Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Golubev V.V. Justification of tillage methods in the development of fallow lands. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2020;13;1:28-35. (In Russ.)
8. Yalaletdinov D.A., Rakhimov I.R., Kulikova A.P. et al. Simulation of soil loosening processes with compressed air. *Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal*. 2024;9;1:160-168. (In Russ.)
9. Rakhimov R.S., Yalaletdinov A.R., Rakhimov I.R. et al. Chisel working tool for soil treatment with pulsating compressed air: Patent, No. 228363 Russian Federation, IPC A01B35/24 (2024.01), 2024. (In Russ.)
10. Aldoshin N.V. Modeling the quality of mechanized work. In: *Goryachkinskie chteniya*: Collection of reports of the 1st International scientific and practical conference, 2013:6-13. (In Russ.)
11. Kosolapov V.M., Tsygutkin A.S., Aldoshin N.V., Lylin N.A. Mechanized agronomy as means for arable farming biologization. *Kormoproizvodstvo*. 2022;3:41-47. (In Russ.)
12. Lobachevskiy Ya.P. Strength and deformation properties of cohesive soddy soils. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2011;3:18-20. (In Russ.)
13. Sidorov S.A., Lobachevskiy Ya.P., Mironov D.A., Zolotarev A.S. Influence of geometric and setup parameters of the arrangement of working tools on agrotechnical and power characteristics. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(2):10-16. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-2-10-16>
14. Lobachevskiy Ya.P., Akhalaya B.Kh., Shogenov Yu. Kh., Starovoytov S.I. Innovative multifunctional unit for alternative tillage. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;10:11-15. (In Russ.)
15. Starovoytov S.I. On the impact of a gas-jet emitter on surface layer of loamy soil. *Konstruirovaniye, ispolzovaniye i nadezhnost mashin selskokhozyaystvennogo naznacheniya*. 2024;1:49-56. (In Russ.)

15. Старовойтов С.И. О воздействии газоструйного излучателя на поверхностный слой суглинистой почвы // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. 2024. № 1 (23). С. 49-56. EDN: QYQZOU

16. Mudarisov S.G., Lobachevsky Ya.P., Farkhutdinov I.M. et al. Justification of the soil dem-model parameters for predicting the plow body resistance forces during plowing. *Journal of Terramechanics*. 2023;109:37-44. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.06.001>

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

Информация об авторах

¹ Измайлов Андрей Юрьевич, академик РАН, д-р техн. наук, профессор, директор; vim@vim.ru;

<https://orcid.org/0000-0003-1143-7286>; SPIN-код: 9727-4472

² Дорохов Алексей Семенович, академик РАН, д-р техн. наук, профессор РАН, заместитель директора; dorokhov.vim@yandex.ru;

<https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>; SPIN-код: 6711-8971

³ Рахимов Илдар Раисович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Тракторы, сельскохозяйственные машины и земледелие»; ildarr@bk.ru;

<https://orcid.org/0000-0003-0020-6634>; SPIN-код: 4813-6930

⁴ Алдошин Николай Васильевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории почвообрабатывающих и мелиоративных машин; naldoshin@yandex.ru;

<https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>; SPIN-код: 6032-9021

⁵ Ялалетдинов Денис Альбертович, канд. техн. наук, генеральный директор ООО «Челябинский компрессорный завод»; den@chkz.ru

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

³ Южно-Уральский государственный аграрный университет; 457103, Российская Федерация, Челябинская область, г. Троицк, ул. им. Ю.А. Гагарина, 13

⁵ ООО «Челябинский компрессорный завод»; 456671, Российская Федерация, Челябинская область, Красноармейский район, 14-й километр автодороги Челябинск-Новосибирск

Вклад авторов:

А.Ю. Измайлов – общее руководство исследованием;
А.С. Дорохов – концептуализация, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
И.Р. Рахимов – методология, проведение исследования;
Н.В. Алдошин – администрирование проекта, создание черновика рукописи;
Д.А. Ялалетдинов – проведение исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 24.04.2025, после рецензирования и доработки 11.07.2025; принята к публикации 14.07.2025

16. Mudarisov S.G., Lobachevsky Ya.P., Farkhutdinov I.M. et al. Justification of the soil dem-model parameters for predicting the plow body resistance forces during plowing. *Journal of Terramechanics*. 2023;109:37-44. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.06.001>

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

Author Information

Andrey Yu. Izmaylov¹, Full Member of RAS, DSc (Eng), Professor, Director; vim@vim.ru;

<https://orcid.org/0000-0003-1143-7286>

Aleksei S. Dorokhov², Full Member of RAS, DSc (Eng), Professor, Deputy Director; dorokhov.vim@yandex.ru;

<https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

Ildar R. Rakhimov³, DSc (Eng), Professor of the Department of Tractors, Agricultural Machinery, and Land Cultivation; ildarr@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0020-6634>

Nikolay V. Aldoshin⁴, DSc (Eng), Professor, Chief Research Engineer of the Laboratory of Soil-Handling and Reclamation Machines; naldoshin@yandex.ru;

<https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>

Denis A. Yalaletdinov⁵, CSc (Eng), General Director of LLC “Chelyabinsk Compressor Plant”; den@chkz.ru

^{1, 2, 4} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Moscow, Russia, 1st Institutskiy Proezd Str., 5

³ South Ural State Agrarian University; 457103, Chelyabinsk Region, Troitsk, Imeni Yu.A. Gagarina Str., 13

⁵ LLC “Chelyabinsk Compressor Plant”; 456671, Chelyabinsk Region, Krasnoarmeysky District, 14th Kilometer of the Chelyabinsk-Novosibirsk Highway

Author Contributions:

A.Yu. Izmaylov – research supervision;
A.S. Dorokhov – conceptualization, writing – review and editing of the manuscript;
I.R. Rakhimov – methodology, investigation;
N.V. Aldoshin – project administration, writing – original draft;
D.A. Yalaletdinov – investigation.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Received 24.04.2025; Revised 11.07.2025; Accepted 14.07.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 633.521:631.358

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-14-22>

Анализ динамической модели впусивателя лент льна

Г.А. Перов^{1✉}, М.М. Ковалев², Р.А. Ростовцев³, М.Г. Перов⁴, И.Л. Абрамов⁵^{1, 2, 3, 4, 5} Федеральный научный центр лубяных культур; г. Тверь, Россия¹ g.perov@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>² m.kovalev@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2424-4205>³ r.rostovcev@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0368-1035>⁴ mexanikuspost@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0007-3847-3785>⁵ i.abramov@vniiml.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5777-2798>

Аннотация. Получение высококачественной льнотресты зависит от функционирования рабочих органов впусивателя лент льна и его конструкционных особенностей. Для более успешной модернизации агрегата предложили рассмотреть впусиватель лент льна как модель функционирования динамических систем, используя принцип системного анализа. Цель исследований – разработка динамической модели впусивателя лент льна как сложной динамической системы. Методика предполагала сравнительный анализ влияния структурных параметров микрорельефа поля на колебания впусивателя в горизонтальной и продольно-вертикальной плоскостях. Получена динамическая модель впусивателя и проведен глубокий анализ его динамики в полевых условиях. Тензометрирование провели на лентах вылежавшейся льнотресты при рабочей скорости разработанного экспериментального агрегата 2,2...5,0 м/с. Статистический анализ входного воздействия неровностей поверхности поля $Z(t)$ показал, что указанный процесс подчинен нормальному закону распределения и имеет низкочастотный характер: $\omega_c = 0...5 \text{ с}^{-1}$, причем процесс изменения входных воздействий $Z(t)$ вызывает колебания впусивателя в горизонтально-продольной и вертикально-продольной плоскостях, что изменяет высоту заглубления концов зубьев впусивающего барабана в поверхность льнища и выходные параметры качества работы. Разработаны устройства, обеспечивающие снижение влияния неровностей почвы $Z(t)$ на показатели качества работы за счет повышения плавности хода впусивателя. Изготовлен впусиватель лент льна с разработанными устройствами. Аprobация впусивателя с повышенной плавностью хода на площади 22 га при скоростях агрегата 4,2...5,5 м/с показала повышение надежности выполнения технологического процесса на 27% и показателей качества (полнота впусивания – 98,8%, увеличение растянутости стеблей в ленте – 1,3%, увеличение неравномерности расстила ленты – 5,2%).

Ключевые слова: впусиватель лент льна; динамическая модель впусивателя; микрорельеф поля; повышение плавности хода; колебания впусивателя; корреляционная функция; спектральная плотность; полнота впусивания

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

Для цитирования: Перов Г.А., Ковалев М.М., Ростовцев Р.А., Перов М.Г., Абрамов И.Л. Анализ динамической модели впусивателя лент льна // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 5. С. 14-22. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-14-22>

ORIGINAL ARTICLE

Analysis of the dynamic model of a flax stem strip fluffer

G.A. Perov¹✉, M.M. Kovalev², R.A. Rostovtsev³, M.G. Perov⁴, I.L. Abramov⁵^{1, 2, 3, 4, 5} Federal Research Center for Bast Fiber Crops; Tver, Russia¹ g.perov@fncl.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>² m.kovalev@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2424-4205>³ r.rostovtsev@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0368-1035>⁴ mexanikuspost@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0007-3847-3785>⁵ i.abramov@vniiml.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5777-2798>

Abstract. Obtaining a high-quality flax press depends on the work of the working tools of the flax stem strip fluffer and its design features. To improve the design of the unit, the authors proposed to consider a flax stem strip fluffer as a model for the functioning of dynamic systems using the principle of system analysis. The study purpose was to develop a dynamic model of a flax stem strip fluffer as a complex dynamic system. The methodology involved a comparative analysis of the effect of the structural parameters of the microrelief field on the oscillations of the fluffer in the horizontal and longitudinal-vertical planes. The authors obtained a dynamic model of the fluffer and carried out an in-depth analysis of its dynamics in field conditions. Strain gauge measurements were performed on flax stem strips that had been stored for some time at the working speed of the developed experimental unit, ranging from 2.2 to 5.0 m/s. Statistical analysis of the input surface irregularities $Z(t)$ showed that this process obeys a normal distribution law and has a low-frequency character: $\omega_c = 0$ to 5 s^{-1} . Moreover, the process of changing the input impacts $Z(t)$ causes horizontal-longitudinal and vertical-longitudinal oscillations of the fluffer, which alters the depth of engagement of the teeth ends of the fluffing drum with the flax surface and affects the output quality parameters. Devices were developed to reduce the influence of soil irregularities $Z(t)$ on quality indicators by increasing the smoothness of the fluffer operation. As a result, the authors manufactured a flax stem strip fluffer having the considered units. Testing the fluffing device with improved smoothness over an area of 22 hectares at speeds of 4.2 to 5.5 m/s demonstrated a 27% increase in process reliability and improvements in quality indicators (fluffing completeness – 98.8%, an increase in stem strip stretch – 1.3%, an increase in retting unevenness of stem strip – 5.2%).

Keywords: flax stem strip fluffer; dynamic model of the fluffer; field microrelief; increased smoothness of operation; fluffer oscillations; correlation function; spectral density; fluffing completeness

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

For citation: Perov G.A., Kovalev M.M., Rostovtsev R.A., Perov M.G., Abramov I.L. Analysis of the dynamic model of a flax stem strip fluffer. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(5):14-22 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-14-22>

Введение

Вспушиватель лент льна при работе в полевых условиях подвергается воздействию непрерывно изменяющихся нагрузок, обусловленных неровностью поверхности поля, исходными параметрами лент льнотресты, физико-механическими свойствами почвы и другими факторами, влияющими на показатели качества его работы.

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные отечественными и зарубежными

учеными, определили широкий круг задач по эффективной вылежке стеблей льна в тресту, а также перечень необходимых технических средств^{1,2} [1, 2]. Процесс вспушивания лент льна является неотъемлемым элементом современных способов получения высококачественной льнотресты [3-6]. Процесс вспушивания зависит от конструктивных особенностей агрегата, функционирования его рабочих органов и взаимодействия их со стеблями льна [7-9]. Возникает необходимость глубокого анализа рабочих органов

¹ Ковалев М.М., Лачуга Ю.Ф. Ресурсосберегающая технология комбинированной уборки льна-долгунца // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2006. № 1. С. 77-80. URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=33832400>.

² Инновационные технологии и технические средства нового поколения для производства и глубокой переработки лубяных культур / В.Г. Черников и др. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2010. 149 с. EDN: OUKGXC.

вспушивателя [10] с целью выявления влияния их параметров на показатели эффективности его работы и обоснования путей их улучшения.

Применение принципа системного анализа сложных технических систем и изучение вспушивателя лент льна как модель функционирования динамических систем будут способствовать более успешной модернизации агрегата^{3, 4, 5, 6} [11]. В данных исследованиях все свойства вспушивателя рассматриваем в единой системе. При этом важнейшими условиями будут являться сбор и обработка информации.

Цель исследований: разработка динамической модели вспушивателя лент льна как сложной динамической системы.

Материалы и методы

Заменяем систему вспушивателя лент льна микроуровневыми составляющими, то есть проведем декомпозицию сложной системы (рис. 1).

Отдельные элементы системы (микроуровни) объединены общим блоком (А-В), показывающим их неразрывную связь. Качество работы как вспушивателя в целом, так и его отдельных рабочих органов, оценивается как абсолютной, так и относительной растянутостью лент, углом перегиба стеблей в ленте и другими параметрами, от которых зависит выход длинного волокна при переработке на льнозаводе.

На этапе теребления стебли льна взаимодействуют с рабочими органами уборочных машин, в результате



Рис. 1. Графическое изображение вспушивателя лент льна

Fig. 1. Graphic representation of a flax stem strip fluffer

чего появляется неоднородность лент. Вытеребленные ленты льна характеризуются растянутостью стеблей в ленте (1,14 раза), что на 0,02% больше ярсности стеблестоя (1,12 раза), углом отклонения стеблей в ленте до 12° и неравномерностью расстила ленты – более 20% [3]. Все эти показатели являются исходными, так как при выполнении последующих операций по приготовлению льнотресты происходит их увеличение по отношению к исходным [3].

При вспушивании должна сохраняться прямолинейность ленты и должны быть исключены перепутывание и сгуживание стеблей. Согласно ГОСТ⁷ контролируются следующие показатели: полнота вспушивания (P_B) – не менее 95%; увеличение угла отклонения стеблей в ленте (α_n) – не более 8,0°; увеличение растянутости стеблей в ленте (λ_n) – не более 5,0%; увеличение неравномерности расстила стеблей в ленте (H_n) – не более 10,0%; увеличение разрывов в ленте (P_n) – не более 2,5%; повреждение стеблей, влияющих на выход длинного волокна (P_d), – не более 1,5%.

В технологическом процессе эти показатели вспушивателя могут изменяться на всех микроуровнях (А-В) (рис. 1) в сторону как увеличения, так и уменьшения. При прохождении ленты льна через микроуровни Б и В (рис. 1) получаем дополнительное увеличение угла отклонения стеблей и неравномерности расстила. Увеличение этих показателей отрицательно влияет на выход длинного волокна⁸ [12, 13].

Модель объекта исследований содержит рабочие органы вспушивателя лент льна (Р.О.), рабочую среду (ленты льна) (Р.С.), с которой они взаимодействуют по технологии (С) и их взаимосвязи (рис. 2).

В векторе входных воздействий $X(t)$ учитываются исходные показатели лент, полученных при тереблении льна. В векторе выходных характеристик $Y(t)$ подразумевается выход длинного волокна, зависящий от показателей качества работы вспушивателя ($Y_1(t)$, $Y_2(t)$, $Y_3(t)$, $Y_4(t)$, $Y_5(t)$, $Y_6(t)$).

Для формализации процесса вспушивания ленты льна с помощью дедуктивного метода построим

³ Черушева Т.В., Зверовщикова Н.В. Динамические системы: Учебное пособие. Пенза: Изд-во ПГУ, 2020. 294 с. URL: https://dep_vipm.pnzgu.ru/files/dep_vipm.pnzgu.ru/books/cherusheva_2020_dinamsist.pdf?ysclid=m9v3xv0duc689349751 (дата обращения: 24.04.2025)

⁴ Чернышов В.Н., Чернышов А.В. Теория систем и системный анализ: Учебное пособие. Тамбов: Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2008. 96 с. EDN: QMTTMV

⁵ Романов В.Н. Техника анализа сложных систем. СПб.: СЗТУ, 2011. 287 с. EDN: QMWEJL

⁶ ГОСТ 21878-76. Случайные процессы и динамические системы. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1976. 33 с. URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=159319&ysclid=mcykw4lou7265631093> (дата обращения: 11.07.2025).

⁷ ГОСТ 33734-2016. Техника сельскохозяйственная. Комбайны и машины для уборки льна. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2017. 50 с.

⁸ Ипатов А.М. Теоретические основы механической обработки стеблей лубяных культур. М.: Легпромиздат, 1989. 137 с. URL: https://korobkaknig.ru/promishl_proizvod/legkaya_prom/teoreticheskie-osnovy-mehanicheskoy-obrabotki-steblej-lubyanyh-kultur-60680.html/ (дата обращения: 24.04.2025)

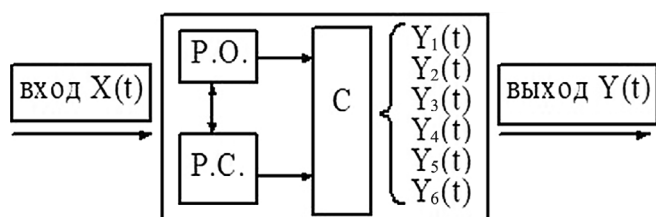


Рис. 2. Модель объекта исследований:

P.O. – рабочие органы вспушивателя лент льна;
P.C. – рабочая среда (ленты льна); C – технология;
 $X(t)$ – вектор входных воздействий;
 $Y(t)$ – вектор выходных характеристик;
 $Y_1(t), Y_2(t), Y_3(t), Y_4(t), Y_5(t), Y_6(t)$ –
выходные характеристики нижнего уровня

Fig. 2. Model of the research object:

P.O. – working tools of the flax stem strip fluffer;
R.S. – working environment (flax stem strips);
C – technology; $X(t)$ – vector of input effects;
 $Y(t)$ – vector of output characteristics;
 $Y_1(t), Y_2(t), Y_3(t), Y_4(t), Y_5(t), Y_6(t)$ –
output characteristics of the lower level

диаграмму воздействий в виде «дерева»^{9, 10, 11}. В диаграмме за главное событие B принят «выход длинного волокна». Предпосылкой этого события является наличие ленты льна, полученной в результате работы вспушивателя на поле, она является предпосылкой первого уровня и обозначена как 1. К возникновению предпосылки 1 приводит выполнение предпосылок второго уровня: F, G, H. Предпосылка F воспроизводится при событиях A или D, C или E. Под событием C закладываем условие – короткостебельный лен на поле, под событием E – длинностебельный лен на поле, A – лен густой, D – лен редкий.

Минимальное пропускное комбинирование, содержащее наименьшее число событий и предпосылок, наглядно показывающих путь к возникновению

главного события на примере увеличения угла $\alpha(t)$ отклонения стеблей в ленте, отображено на рисунке 3.

Алгебра событий, отражая рисунок 3, будет иметь следующий вид:

$$B = 1 = F \cdot G \cdot H,$$

где $F = (A+D)(C+E) = AC + DC + AE + DE$.

Под событиями заложены условия: лен на поле; AC – густой короткостебельный; DC – редкий короткостебельный; AE – густой длинностебельный; DE – редкий длинностебельный.

Полученная аналитическая модель процесса вспушивания ленты ориентирована на совершенствование этого процесса и решение задач, связанных с модернизацией рабочих органов вспушивателя, на уменьшение растянутости ленты льна, поврежденных стеблей, уменьшение угла отклонения в ленте, повышение вспушивания ленты.

Эксперименты проводили на изготовленном опытном вспушивателе лент стеблей льна на полях Федерального научного центра лубяных культур (рис. 4).

На раме средней секции вспушивателя закрепили дополнительные кронштейны 1 с установленными на них тензодатчиками 2 и 3 (рис. 4a). В качестве датчика определения микрорельефа поля использовали ультразвуковой датчик HC-SR04. Для определения углов отклонения $\beta(t)$ и $\theta(t)$ вспушивателя в горизонтальной плоскости $O-X$ и продольно-вертикальной плоскости $O-Y$ использовали 3-осевой акселерометр ADXL345.

Управление прибором осуществляли при помощи программируемого микроконтроллера ATmega 328P Arduino Uno R3. Для управления микроконтроллером разработали собственное программное обеспечение. Прием данных с контроллера и их предварительная

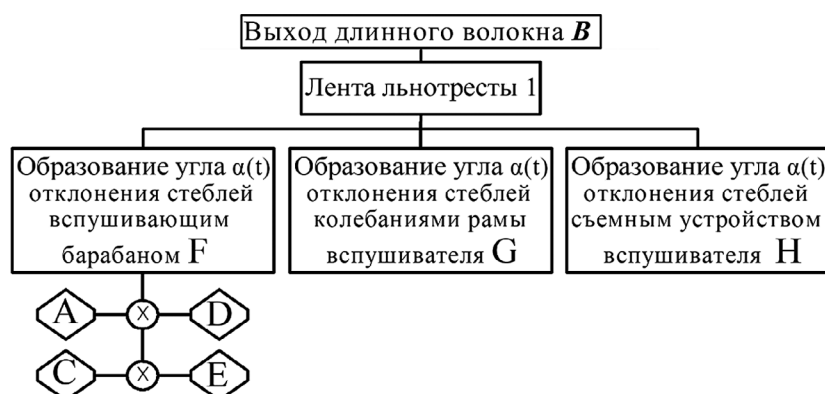


Рис. 3. «Дерево» событий процесса образования угла отклонения ленты

Fig. 3. “Tree” of events in the process of forming the deflection angle of the flax stem strips

⁹ Лурье А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1981;

¹⁰ Черушева Т.В. Динамические системы: учеб. пособие / Т.В. Черушева, Н.В. Зверовщикова. Пенза: Изд-во ПГУ, 2020. 294 с..

¹¹ Чернышов В.Н. Теория систем и системный анализ учеб. пособие / В.Н. Чернышов, А.В. Чернышов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. 2008. 96 с. EDN: QMTTMV.



Рис. 4. Полевая установка вдушивателя для тензометрирования:

а) расположение датчиков на средней секции; б) настройка аппаратуры;

1 – кронштейны датчиков; 2 – датчик определения микрорельефа поля;

3 – датчик определения колебаний секции в горизонтальной ОХ и продольно-вертикальной ОУ плоскостях

Fig. 4. Field installation of a strain gauge:

a) location of the sensors on the middle section; b) configuration of the equipment;

1 – sensor brackets; 2 – sensor for determining the field microrelief;

3 – sensor for determining the vibrations of the section in the horizontal OX and longitudinal-vertical OY planes

обработка осуществлялись на ПЭВМ в программном пакете Microsoft Excel 2019. Тензометрирование проводили на лентах вылежавшейся льнотресты при скорости агрегата 2,2...5,0 м/с.

Методика предполагала сравнительный анализ влияния структурных параметров микрорельефа поля $Z(t)$ на колебания $\beta(t)$ вдушивателя в горизонтальной плоскости $O-X$ и $\theta(t)$ продольно-вертикальной плоскости $O-Y$.

Общим для всех льноуборочных агрегатов является модель движения, учитывающая профиль поверхности поля $Z_H(t)$ и сопротивление $R(t)$ движению (компоненты входного вектора)^{12,13} [14, 15].

Динамическая модель вдушивателя представлена на рисунке 5.

Для вдушивателя составляющими входного вектора $\vec{F}_B$ будут: микрорельеф поля $Z(t)$; количество стеблей на 1 м² $U(t)$; ширина ленты $L(t)$; угол отклонения стеблей в ленте $\alpha(t)$; растянутость стеблей в ленте $\lambda(t)$; высота расположения ленты $h(t)$; влажность стеблей в ленте $w(t)$.

Выходными $\vec{Y}_B$ составляющими, определяющими технологические показатели (показатели качества его работы), будут являться полнота вдушивания Π_B , увеличение угла отклонения стеблей в ленте $\alpha_d(t)$,

увеличение растянутости стеблей в ленте $\lambda_d(t)$, увеличение неравномерности расстила $H_d(t)$, увеличение разрывов в ленте $P_d(t)$, повреждения стеблей $\Pi_d(t)$.

Вектор $\vec{L}_B$, отражающий динамику технологического процесса вдушивателя, включает толщину ленты на зубьях вдушивающего барабана $L_b(t)$, колебания вдушивателя в горизонтальной плоскости $O-X$ $\beta(t)$, колебания вдушивателя в продольно-вертикальной плоскости $O-Y$ $\theta(t)$, колебания рамы вдушивателя $\alpha(t)$.

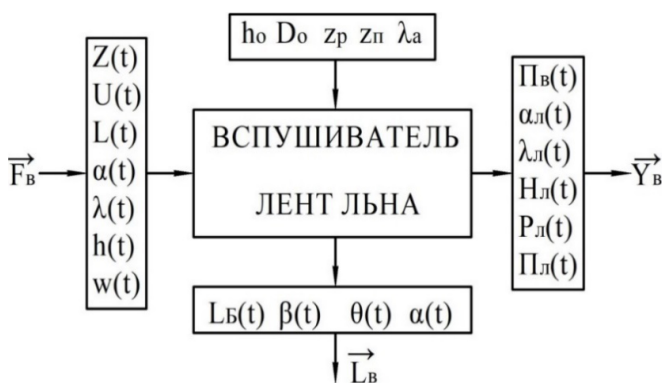


Рис. 5. Динамическая модель вдушивателя лент льна

Fig. 5. Dynamic model of a flax stem strip fluffer

¹² Лурье А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Колос, 1981. 382 с.; Черников В.Г., Перов Г.А., Ростовцев А.А. и др. Информационные параметры автоматизации, сигнализации и контроля режимов работы льноуборочных машин // Внедрение инновационных разработок в целях повышения экономической эффективности в льняном комплексе России: Материалы Международной научно-практической конференции (г. Вологда, 23 июня 2011 г.) Вологда, 2010. С. 136-140.

¹³ Горлач Б.А. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебно-методическое пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2022. 320 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/211082> (дата обращения: 25.04.2025).

В качестве управляемых параметров модели выбраны высота заглабления конца зуба впускающего барабана в поверхность льнища h_o , диаметр впускающего барабана D_o , количество зубьев в ряду z_p и количество рядов зубьев на барабане z_n , показатель кинематического режима λ_a .

Результаты и их обсуждение

В результате лабораторно-полевых опытов получили экспериментальные данные профиля микрорельефа поля и колебаний впускавателя в горизонтальной и продольно-вертикальной плоскостях. После их обработки статистическим пакетом STADIA-8.0¹⁴ получены математическое ожидание m_x , дисперсия D_x , корреляция $\rho(\tau)$ и спектральная плотность $\sigma(\omega)$. Согласно результирующим уровням значимости всех критериев ($P \gg 0,05$) принимаем гипотезу о нормальном распределении неровностей микрорельефа поля.

На основе числовых характеристик m_x , σ_x получили нормированные корреляционные функции $\rho(\tau)$ и спектральные плотности $\sigma(\omega)$ (рис. 6), изучили внутреннюю структуру и характер протекания входного воздействия $Z(t)$. Из характера кривых следует, что неровности поверхности поля как функция воздействия на впускаватель лент льна носят низкочастотный характер с $\omega = 1,0 \text{ с}^{-1}$ и $\omega = 3,0 \text{ с}^{-1}$. Полоса существенных частот ω_c лежит в пределах $0 \dots 5 \text{ с}^{-1}$, что соответствует 1,27 Гц.

Неровности поверхности льнища, являясь входным воздействием на впускаватель лент льна, вызывают его колебания в горизонтальной плоскости $O-X$ и продольно-вертикальной плоскости $O-Y$, изменяя при этом высоту h_o заглабления конца зуба

впускающего барабана в ленту льнотресты, что приводит к нестабильности технологического процесса впускавания.

Анализируя параметры $\beta(t)$ и $\theta(t)$, отражающие динамику технологического процесса впускавателя, видим, что полученные значения носят случайный характер. Среднее значение угла $\beta(t)$ составляет $4,14^\circ$, угла $\theta(t) - 0,914^\circ$ при среднеквадратичном отклонении $\sigma_x = 17,47^\circ$ и $\sigma_y = 17,56^\circ$. Такой значительный разброс колебаний впускавателя в горизонтальной и продольно-вертикальной плоскостях создает условия резкопеременных нагрузок на зубья впускавателя, его раму и отрицательно влияет на технологический процесс. В то же время на основании результирующих уровней значимости всех критериев ($P > 0,05$) можно принять гипотезу о нормальном распределении колебаний впускавателя в горизонтальной $O-X$ и продольно-вертикальной $O-Y$ плоскостях.

Нормированная корреляционная функция $\rho(\tau)$ и спектральная плотность $\sigma(\omega)$ колебаний $\beta(t)$ и $\theta(t)$ представлены на рисунках 7, 8. Характер кривых $\rho(\tau)$ и $\sigma(\omega)$ показывает, что колебания $\beta(t)$ и $\theta(t)$ носят низкочастотный характер, что отрицательно отражается на надежности агрегата и технологического процесса. Статистические характеристики $Z(t)$, $\beta(t)$ и $\theta(t)$ приведены в таблице.

Для более достоверного представления влияния неровностей поверхности поля (льнища) $Z(t)$ на колебания впускавателя в горизонтальной плоскости $\beta(t)$ и продольно-вертикальной плоскости $\theta(t)$ был проведен однофакторный дисперсионный анализ, который показал, что колебания впускавателя в целом различны на уровне значимости $6,64 \cdot 10^{-4}$. Последующий анализ парных сравнений Шеффе выявил

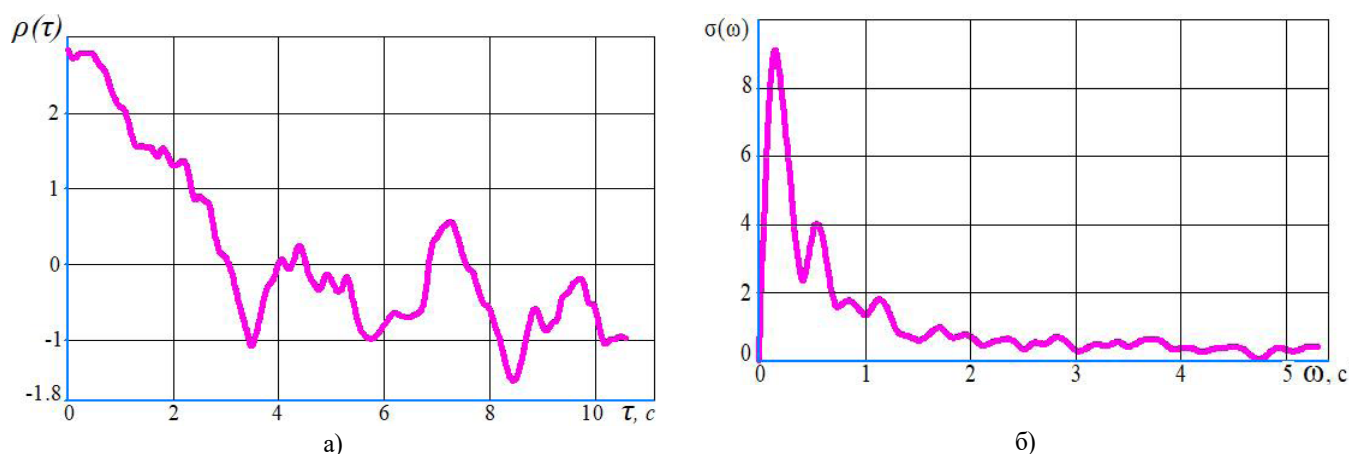


Рис. 6. Графики нормированной корреляционной функции $\rho(\tau)$ (а) и спектральной плотности $\sigma(\omega)$ (б)

Fig. 6. Graphs of the normalized correlation function $\rho(\tau)$ (a) and spectral density $\sigma(\omega)$ (b)

¹⁴ Кулаичев А.П. Полное собрание сочинений: В 3 т. Т. 1. Методы и средства анализа данных в среде Windows. STADIA. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Информатика и компьютеры, 1999. 341 с.

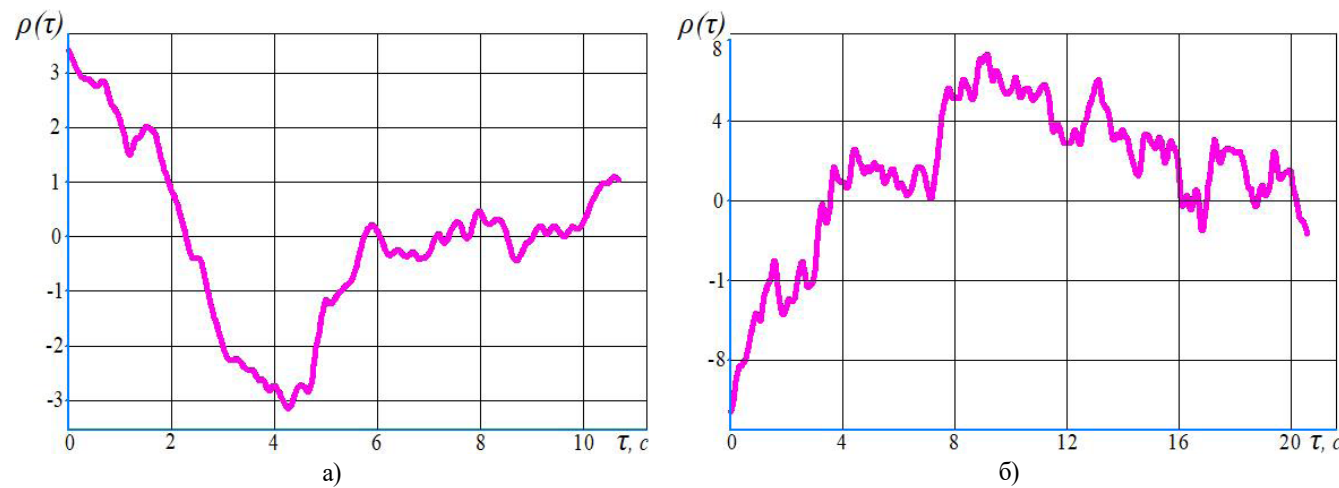


Рис. 7. График нормированной корреляционной функции $\rho(\tau)$ в горизонтальной плоскости O-X (a) и продольно-вертикальной плоскости O-Y (б)

Fig. 7. Graph of the normalized correlation function $\rho(\tau)$ in the horizontal plane O-X (a) and the longitudinal-vertical plane O-Y (b)

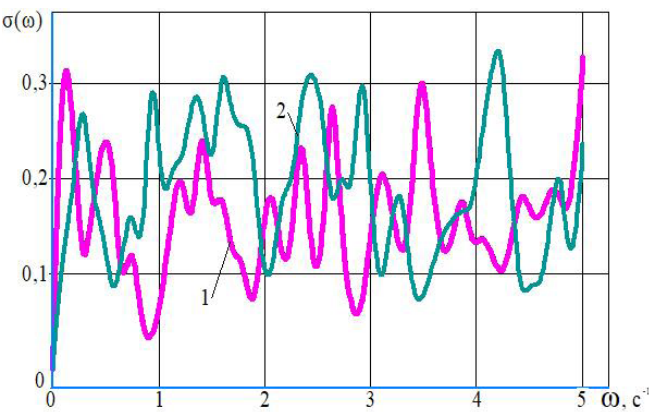


Рис. 8. График спектральной плотности $\sigma(\omega)$:
1 – $\beta(t)$ в горизонтальной плоскости O-X;
2 – $\theta(t)$ в продольно-вертикальной плоскости O-Y

Fig. 8. Graph of the spectral density $\sigma(\omega)$
1 – $\beta(t)$ in the horizontal plane O-X;
2 – $\theta(t)$ in the longitudinal-vertical plane O-Y

значимые отличия колебаний $\theta(t)$ от $Z(t)$. Тем самым эти колебания, видимо, в большей степени вызваны колебаниями $\beta(t)$. Дополнительное сравнение двух групп не выявляет значимых влияний.

По результатам исследований разработаны устройства, обеспечивающие снижение влияния фактора $Z(t)$ за счет повышения плавности хода вспушивателя. Изготовлен вспушиватель лент льна (патент № 231710) [16] с разработанными устройствами (рис. 9).

Апробация вспушивателя в условиях производства на площади 22 га при скорости агрегата 4,2...5,5 м/с показала повышение надежности выполнения технологического процесса на 27% за счет повышения плавности хода и улучшения показателей качества. Полнота вспушивания составила 98,8%, увеличение растянутости стеблей в ленте – 1,3%, увеличение неравномерности расстила ленты – 5,2%.

Статистические характеристики
Table
Statistical characteristics

Параметр Parameter	Значение параметра Parameter value		Математическое ожидание, m Mathematical expectation, m	Спектральная плотность, σ Spectral density, σ	$V, \%$
	min	max			
Микрорельеф поля, $Z(t)$, см / Field microrelief, $Z(t)$, cm	-5,5	5,5	0,3237	2,092	15,470
Колебания вспушивателя в горизонтальной плоскости, $\beta(t)$ Fluffer oscillations in horizontal plane, $\beta(t)$,	-41,4	51,9	-4,1390	17,470	23,690
Колебания вспушивателя в продольно-вертикальной плоскости, $\theta(t)$ Fluffer oscillations in longitudinal-vertical plane, $\theta(t)$	-50,5	40,7	0,9100	17,560	5,182



Рис. 9. Высокопроизводительный вспушиватель лент льна: общий вид (а); в работе (б)
Fig. 9. High-performance flax stem strip fluffer: general appearance (a); in operation (b)

Выводы

1. Впервые вспушиватель лент льна рассмотрен как модель функционирования сложных динамических систем, разработана его динамическая модель.

2. Статистический анализ входного воздействия (неровности поверхности поля $Z(t)$) показал его низкочастотный характер ($\omega_c = 0 \dots 5 \text{ c}^{-1}$) и подчинение нормальному закону распределения. Установлено, что изменение $Z(t)$ вызывает колебания вспушивателя

в горизонтальной и продольно-вертикальной плоскостях, что изменяет высоту заглубления концов зубьев вспушивающего барабана в поверхность льнища и выходные параметры качества работы.

3. Разработанные устройства, снижающие влияние неровности почвы $Z(t)$ за счет повышения плавности хода вспушивателя, позволили повысить надежность выполнения технологического процесса на 27% и увеличить полноту вспушивания до 98,8%.

Список источников

1. Поздняков Б.А., Великанова И.В. Актуальные проблемы формирования организационно-экономического механизма модернизации льняного подкомплекса // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2019. № 10. С. 53-55. <https://doi.org/10.31442/0235-2494-2019-0-10-53-55>
2. Ростовцев Р.А., Черников В.Г., Ущачповский 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. Перов М.Г. Анализ состояния и пути повышения качества льнотресты // Наука в центральной России Science in the central Russia. 2022. Т. 58, № 4. С. 53-61. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-4-53-61>
4. Перов М.Г., Ковалев М.М., Перов Г.А. Совершенствование технологии приготовления льнотресты росистой мочкой // Наука в центральной России Science in the Central Russia. 2025. Т. 75, № 3. С. 43-52. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2025-3-43-52>
5. Зинцов А.Н., Ковалев М.М., Перов Г.А. Анализ процессов формирования и сохранения прямолинейности лент растений при уборке льна // Инженерные технологии и системы. 2025;35(2):284-297. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.284-297>
6. 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>
7. Новиков М.А., Павлов С.Б. Анализ процесса работы ворошилки лент льна // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2021. № 1 (62). С. 190-198. <https://doi.org/10.24412/2078-1318-2021-1-190-198>
8. Зинцов А.Н., Соколов В.Н. Новый процесс вспушивания лент льнотресты // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 6. С. 91-100. <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2020-6-91-100>
9. Ковалев М.М., Перов М.Г., Перов Г.А., Галкин А.В. Инновационный вспушиватель лент стеблей

References

1. Pozdnyakov B.A., Velikanova I.V. Actual problems of formation of organizational and economic mechanism for modernization of flax subcomplex. *Economika selskokhozyaystvennykh i pererabatyvayushchikh predpriyatiy*. 2019;10:53-55. (In Russ.) <https://doi.org/10.31442/0235-2494-2019-0-10-53-55>
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. Perov M. Analysis of the state and ways to improve the quality of flax. *Science in the Central Russia*. 2022;58(4):53-61. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-4-53-61>
4. Perov M., Kovalev M., Perov G. Analysis of flax seed preparation technologies and their features. *Science in the Central Russia*. 2025;75(3):43-52. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2025-3-43-52>
5. Zintsov A.N., Kovalev M.M., Perov G.A. Analyzing the process of formation and retaining of straightness of flax stem strips during flax harvesting. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(2):284-297. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.284-297>
6. 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>
7. Novikov M.A., Pavlov S.B. Analysis of the operating process of the flax tedder. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2021;1(62):190-198. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2078-1318-2021-1-190-198>
8. Zintsov A.N., Sokolov V.N. New process for fluffing rotted straw. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2020;6:91-100. (In Russ.) <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2020-6-91-100>
9. Kovalev M.M., Perov M.G., Perov G.A., Galkin A.V. Innovative fiber flax stalk fluffer. *Selskiy Mekhanizator*. 2023;8:10-12. (In Russ.) <https://doi.org/10.47336/0131-7393-2023-8-10-11-12>

льна-долгунца // Сельский механизатор. 2023. № 8. С. 10-12. <https://doi.org/10.47336/0131-7393-2023-8-10-11-12>

10. Зинцов А.Н., Билан М.М. О необходимости совершенствования процесса вспушивания лент тресты льняной // Аграрный вестник Нечерноземья. 2022. № 2 (6). С. 38-44. https://doi.org/10.52025/2712-8679_2022_02_38

11. Зубина В.А., Годжаев Т.З. Сравнительный анализ методов решений оптимизационных задач для сельскохозяйственного машиностроения // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 1. С. 11-16. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-11-16>

12. 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. С. 56-58. EDN: SKODJP

13. 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>

14. Черников В.Г., Ростовцев Р.А., Романенко В.Ю. Исследование технологий уборки льна льноуборочными машинами // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17, № 1. С. 19-24. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-19-24>

15. Абрамов И.Л., Ковалев М.М., Перов Г.А. Моделирование микрорельефа поверхности почвенного слоя для уточненных расчетов рабочих органов на прочность // Наука в центральной России. 2024. № 2 (68). С. 77-85. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-77-85>

16. Вспушиватель лент льна: Патент № 231710 Российская Федерация, МПК A01D45/06 (2006.01) / Г.А. Перов, Р.А. Ростовцев, М.М. Ковалев, М.Г. Перов; завл. 25.07.2024; опубл. 06.02.2025, Бюл. № 4.

Информация об авторах

¹ Перов Геннадий Анатольевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; g.perov@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>; SPIN-код: 4478-4991

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

³ Ростовцев Роман Анатольевич, д-р техн. наук, чл.-корр. РАН, профессор РАН; директор; r.rostovtsev@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0368-1035>; SPIN-код: 9513-1220

⁴ Перов Михаил Геннадьевич, научный сотрудник; mexanikuspost@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0007-3847-3785>; SPIN-код: 3839-6192

⁵ Абрамов Игорь Львович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; i.abramov@vniiml.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5777-2798>; SPIN-код: 9735-923

^{1, 2, 3, 4, 5} Федеральный научный центр лубяных культур; 170041, Российская Федерация, г. Тверь, Комсомольский пр-т, 17/56

Вклад авторов

Г.А. Перов – методология, проведение исследований, формальный анализ, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование; М.М. Ковалев – концептуализация, руководство исследованиями; Р.А. Ростовцев – методология и администрирование проекта; М.Г. Перов – проведение исследований, формальный анализ и верификация данных, создание черновика рукописи; И.Л. Абрамов – разработка программного обеспечения и проведение исследований.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 07.05.2025, после рецензирования и доработки 26.08.2025; принята к публикации 29.08.2025

10. Zintsov A.N., Bilan M.M. On the need to improve the process of fluffing flax linen ribbons. *Agrarian Bulletin of Non-Chernozem Area*. 2022;2(6):38-44. (In Russ.) https://doi.org/10.52025/2712-8679_2022_02_38

11. Zubina V.A., Godzhayev T.Z. Comparative analysis of methods for solving optimization problems in agricultural engineering. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(1):11-16. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-11-16>

12. Petrachenko D.A., Koropchenko S.P. Influence of the preparatory operations on the process of layer forming on the output of long fibre. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2014;5-6:56-58. (In Russ.)

13. Zintsov A.N., Kovalev M.M., Perov G.A., Perov M.G., Dobretsov V.A. 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>

14. Chernikov V.G., Rostovtsev R.A., Romanenko V.Yu. Flax Harvesting Technologies for Flax Harvesting Machines. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(1):19-24. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-19-24>

15. Abramov I., Kovalev M., Perov G. Modeling the microrelief of the surface of the soil layer for refined calculations of working bodies for strength. *Science in the Central Russia*. 2024;68(2):77-85. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-77-85>

16. Perov G.A., Rostovtsev R.A., Koval M.M., Perov M.G. Flax stem strip fluffer: patent No. 231710 Russian Federation, IPC A01D45/06 (2006.01); applied on July 25, 2024; published on February 2, 2025.

Author Information

Gennady A. Perov¹, CSc (Eng), Lead Research Engineer; g.perov@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>

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

Roman A. Rostovtsev³, DSc (Eng), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences; Director; r.rostovtsev@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0368-1035>

Mikhail G. Perov⁴, Research Associate; mexani-kuspost@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0007-3847-3785>

Igor L. Abramov⁵, CSc (Eng), Lead Research Engineer; i.abramov@vniiml.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5777-2798>

^{1, 2, 3, 4, 5} Federal Scientific Center for Bast Crops; 17/56 Komsomolskiy Ave., Tver, 170041, Russian Federation

Author Contribution

G.A. Perov – methodology, research, formal analysis, writing – manuscript review and editing; M.M. Kovalev – conceptualization, research supervision; R.A. Rostovtsev – methodology, project administration; M.G. Perov – investigation, formal analysis and verification of data, writing – original draft; I.L. Abramov – software, investigation.

Conflict of interests

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

Received 07.05.2025; Revised 26.08.2025; Accepted 29.08.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.362.36

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-23-31>

Агротехническая оценка машины для вытирания и скарификации семян бобовых трав КС-0,3П

В.А. Лазыкин¹, А.И. Бурков², А.Л. Глушков³, В.Ю. Мокиев⁴^{1, 2, 3, 4} Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого; г. Киров, Россия¹ ellestar@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3910-8620>² burkov.46@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5287-1532>³ glandrey@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5287-1532>⁴ dizel154@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3368-1151>

Аннотация. Производство качественного семенного материала многолетних трав позволяет обеспечить высокую урожайность культур, предназначенных для откорма крупного рогатого скота. Ранее авторами была разработана клеверотерка-скарификатор КС-0,3П, включающая в себя раму, корпус с установленным внутри вращающимся барабаном и деку овального типа со скарифицирующими пластинами, приемный бункер, питающее устройство, пневмосепарирующий канал, циклон и тканевый пылеуловитель. Цель исследований – определение агротехнических показателей клеверотерки КС-0,3П. Совместно с агрооценкой клеверотерки при вытирании семян из пыжины клевера и при скарификации семян козлятника восточного выполнена энергетическая оценка машины. Семена из пыжины клевера соответствовали требованиям технического задания: влажность – 3,7%; содержание свободных семян клевера – 1,12...2,81%, дробленых семян – 0,02...0,30%, грубых солоmistых примесей – 0,1...0,3%. Семена козлятника восточного соответствовали категории «Репродукционные семена» согласно ГОСТ Р 52325-2005. В трех опытах подача материала – пыжины клевера лугового – соответствовала 0,28; 0,39; 0,46 т/ч, а семян козлятника восточного – 0,28; 0,37; 0,49 т/ч. В результате испытаний определили агротехнические показатели клеверотерки КС-0,3П при вытирании: производительность – 0,39...0,46 т/ч; степень вытирания – 95,4...95,6%; дробление семян – 0,1...1,0%, эффект очистки от легких примесей – 73,6...77,7%. При скарификации производительность составила 0,37...0,49 т/ч, степень скарификации – 95,8...96,5%, дробление семян – 0,3...0,8%. Удельный расход электроэнергии в трех опытах при вытирании семян составил 3,28; 3,79; 4,75 кВт·ч/т, а при скарификации – 4,32; 4,62; 6,12 кВт·ч/т (по ТЗ – не более 12,0 кВт·ч/т). Все показатели соответствовали требованиям технического задания. В процессе испытаний клеверотерки при оценке безопасности конструкции несоответствия требованиям не выявлены. Показатели уровня шума и концентрация пыли в воздухе рабочей зоны составили 80,0 дБА и 3,8 мг/м³, что не превышает нормативные значения. Машину КС-0,3П рекомендуем к применению в сельскохозяйственном производстве.

Ключевые слова: пыжина; клевер; вытирание семян; скарификация семян; клеверотерка-скарификатор; козлятник; частота вращения барабана; подача материала

Для цитирования: Лазыкин В.А., Бурков А.И., Глушков А.Л., Мокиев В.Ю. Агротехническая оценка машины для вытирания и скарификации семян бобовых трав КС-0,3П // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 5. С. 23-31. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-23-31>

ORIGINAL ARTICLE

Agrotechnical evaluation of the KS-0.3P machine for rubbing out and scarifying legume grass seeds

V.A. Lazykin¹✉, A.I. Burkov², A.L. Glushkov³, V.Yu. Mokiev⁴

^{1,2,3,4} Federal Agricultural Research Center of the North-East named after N.V. Rudnitsky; Kirov, Russia

¹ ellestar@bk.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-3910-8620>

² burkov.46@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5287-1532>

³ glandrey@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5287-1532>

⁴ dizel154@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3368-1151>

Abstract. Production of high-quality seed material from perennial grasses ensures high yields of crops intended for cattle fattening. Previously, the authors developed the KS-0.3P clover grater-scarifier, which includes a frame, a housing with a rotating drum inside, an oval-type deck with scarifying plates, a receiving hopper, a feeding device, a pneumatic separation channel, a cyclone, and a fabric dust collector. The purpose of this study is to determine the agrotechnical indicators of the KS-0.3P clover grater. Along with the agro-evaluation of the clover grater for rubbing out seeds from clover wad and scarifying Caucasian goat's rue (*Galega orientalis*) seeds, the authors conducted an energy assessment of the machine. Clover wad seeds met the technical requirements: moisture content – 3.7%, free clover seeds – 1.12 to 2.81%, crushed seeds – 0.02 to 0.30%, coarse straw impurities – 0.1 to 0.3%. Caucasian goat's rue seeds met the “reproductive seeds” category according to GOST R52325-2005. In three experiments, the feed rate of clover wad was 0.28, 0.39, and 0.46 t/h, and for Caucasian goat's rue seeds – 0.28, 0.37, and 0.49 t/h. As a result of the tests, the agrotechnical indicators of the KS-0.3P clover grater were determined. For rubbing out seeds: productivity – 0.39 to 0.46 t/h, rubbing-out degree – 95.4 to 95.6%, seed crushing – 0.1 to 1.0%, effect of separating light impurities – 73.6 to 77.7%. For scarification: productivity – 0.37 to 0.49 t/h, scarification degree – 95.8 to 96.5%, seed crushing rate – 0.3 to 0.8%. The specific electricity consumption in three experiments for seed rubbing out was 3.28; 3.79; and 4.75 kWh/t; for scarification – 4.32; 4.62; 6.12 kWh/t (according to the technical specification, not more than 12.0 kWh/t). All indicators met the technical requirements. The safety assessment of the clover grater design showed the absence of non-compliance with requirements. Noise level and dust concentration in the working area air were 80.0 dBA and 3.8 mg/m³, which do not exceed regulatory values. The KS-0.3P machine is recommended for use in agricultural production.

Keywords: wad; clover; seed rubbing out; seed scarification; clover grater and scarifier; Caucasian goat's rue (*Galega orientalis*); drum speed; material feed rate

For citation: Lazykin V.A., Burkov A.I., Glushkov A.L., Mokiev V.Yu. Agrotechnical evaluation of the KS-0.3P machine for rubbing out and scarifying legume grass seeds. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(5):23-31 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-23-31>

Введение

Многолетние травы – ценный компонент рациона крупного рогатого скота, обеспечивающий питательность кормов и здоровье животных. Они богаты белками, витаминами и минералами, необходимыми для роста, развития и продуктивности. Включение многолетних трав в рацион снижает зависимость от концентрированных кормов, уменьшает затраты и повышает рентабельность^{1,2,3,4} [1].

В связи с этим производство семенного материала многолетних трав приобретает особую актуальность. Важными аспектами являются разработка и внедрение эффективных технологий выращивания семенных посевов, обеспечивающих высокую урожайность и качество семян, что включает в себя оптимальный выбор предшественников, систему удобрений, защиту от вредителей и болезней, своевременную и качественную уборку урожая,

¹ Перспективная ресурсосберегающая технология производства семян клевера для Северного региона Нечерноземной зоны России: Методические рекомендации / Под общ. ред. М.И. Тумасовой. Киров: ФГБНУ «НИИСХ Северо-Востока», 2015. 72 с.

² Киселев Н.П., Кормщиков А.Д., Никифорова Е.В., Прозорова И.Н. и др. Вятские клевера. Киров: ГИПП «Вятка», 1995. 276 с.

³ Новоселов Ю.К., Шпаков А.С., Харьков Г.Д. Полевое кормопроизводство как фактор стабилизации кормовой базы и биологизации земледелия // Кормопроизводство России: Сборник научных трудов. М.: ВИК, 1997. С. 30-42.

⁴ Фигурин В.А. Выращивание многолетних трав на корм. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2013. 188 с.

а также применение современных технологических устройств для получения семян высшего сорта. Применение современных агротехнических приемов и использование высокопродуктивных сортов клевера позволяют значительно повысить рентабельность его выращивания и обеспечить животноводство качественным кормом в необходимом количестве [2].

Для получения семян многолетних трав в послеуборочной технологии используются машины специального назначения – клеверотерки, а для повышения всхожести твердосемянных культур – скарификаторы [3-6]. В ФАНЦ Северо-Востока в настоящее время проведены исследования по модернизации клеверотерки-скарификатора КС-0,2 [7]. На базе данной машины создана новая клеверотерка-скарификатор К-0,3П, которая имеет увеличенные размеры диаметра барабана до 0,45 м и длину деки до 0,7 м, пневмосепарирующее устройство (ПСК), циклон и тканевый пылеуловитель [8]. Данная модернизация повышает производительность на 25...30% и позволяет проводить очистку вытертых семян от легких примесей. Эффект очистки вытертых семян от легких примесей при подаче исходного материала 0,3 т/ч при угле наклона скатной доски 45° и глубине ПСК, равной 0,09 м, составляет 75,2% при потерях семян в отходы согласно агротехническим требованиям (не более 1,5%)⁵.

Цель исследований: определение агротехнических показателей клеверотерки КС-0,3П.

Материалы и методы

Клеверотерка-скарификатор КС-0,3П (далее – клеверотерка) должна вытирать семена клевера из пыжины влажностью до 16%, предварительно очищенной от грубых, крупных и солоmistых примесей. При скарификации твердых семян бобовых трав их влажность и засоренность должны соответствовать не ниже категории «Репродукционные семена».

Клеверотерка КС-0,3П содержит следующие основные сборочные единицы и механизмы (рис. 1): раму 1; корпус 2 с установленным внутри барабаном и декой овального типа со скарифицирующими пластинами; приемный бункер 7 с питающим устройством; входной и выходной патрубки, пневмосепарирующий канал (ПСК) 6; циклон 5 с электро-вентилятором; тканевый пылеуловитель 4; приемники семян и отходов; механизмы привода барабана

и питающего устройства; электрооборудование, включающее в себя ящик управления 3, два электродвигателя, кабели для подключения электродвигателей от ящика управления.

Технологический процесс выполняется следующим образом. Клеверную пыжину загружают в приемный бункер 6 (рис. 2), откуда она под действием силы тяжести с помощью ворошилки 7, виброслонки 8 и питающего валика 9 подается в загрузочную горловину 10 терочного устройства. Из загрузочной горловины пыжина попадает в зазор между барабаном 11 и декой 12. При вращении барабана его энтрогнерная поверхность захватывает пыжину, протаскивает ее по овальной терочной поверхности деки, и в результате происходит вытирание семян.

Перетертая пыжина с помощью криволинейного выходного патрубка 4 направляется через загрузочное окно 14 в вертикальный ПСК 15, где воздушным потоком, создаваемым вентилятором циклона 3 и поступающим из атмосферы, очищается от легких примесей (мелкие солоmistые примеси, разрушенные оболочки бобиков, семена сорных растений). Очищенные семена под

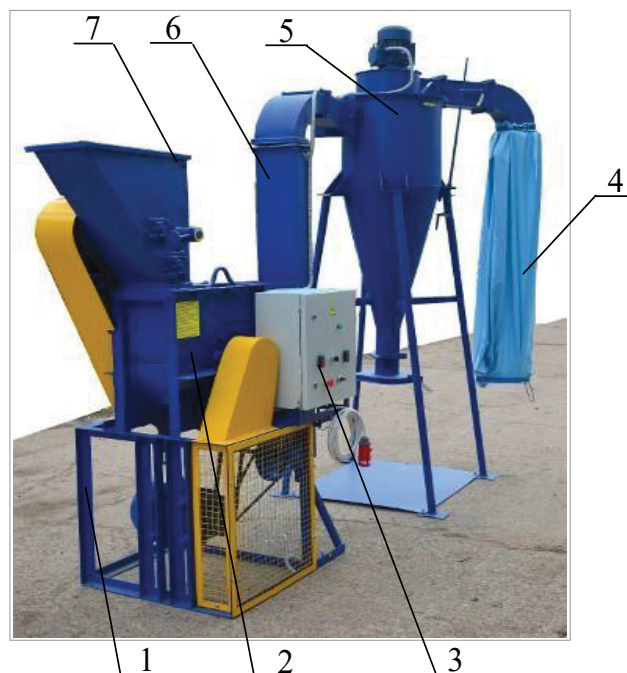


Рис. 1. Клеверотерка-скарификатор КС-0,3П (вид спереди справа):

- 1 – рама; 2 – корпус; 3 – ящик управления;
- 4 – тканевый фильтр; 5 – циклон;
- 6 – вертикальный пневмосепарирующий канал;
- 7 – приемный бункер

Fig. 1. Clover grater and scarifier KS-0.3P (front right view):

- 1 – frame; 2 – housing; 3 – control box; 4 – fabric filter;
- 5 – cyclone; 6 – vertical pneumatic separation channel;
- 7 – receiving hopper

⁵ Протокол № 06-01-2024 (9060016) от 4 апреля 2024 г. испытаний клеверотерки-скарификатора КС-0,3П. Оричи: ФГБУ «Кировская МИС», 2024. 37 с.

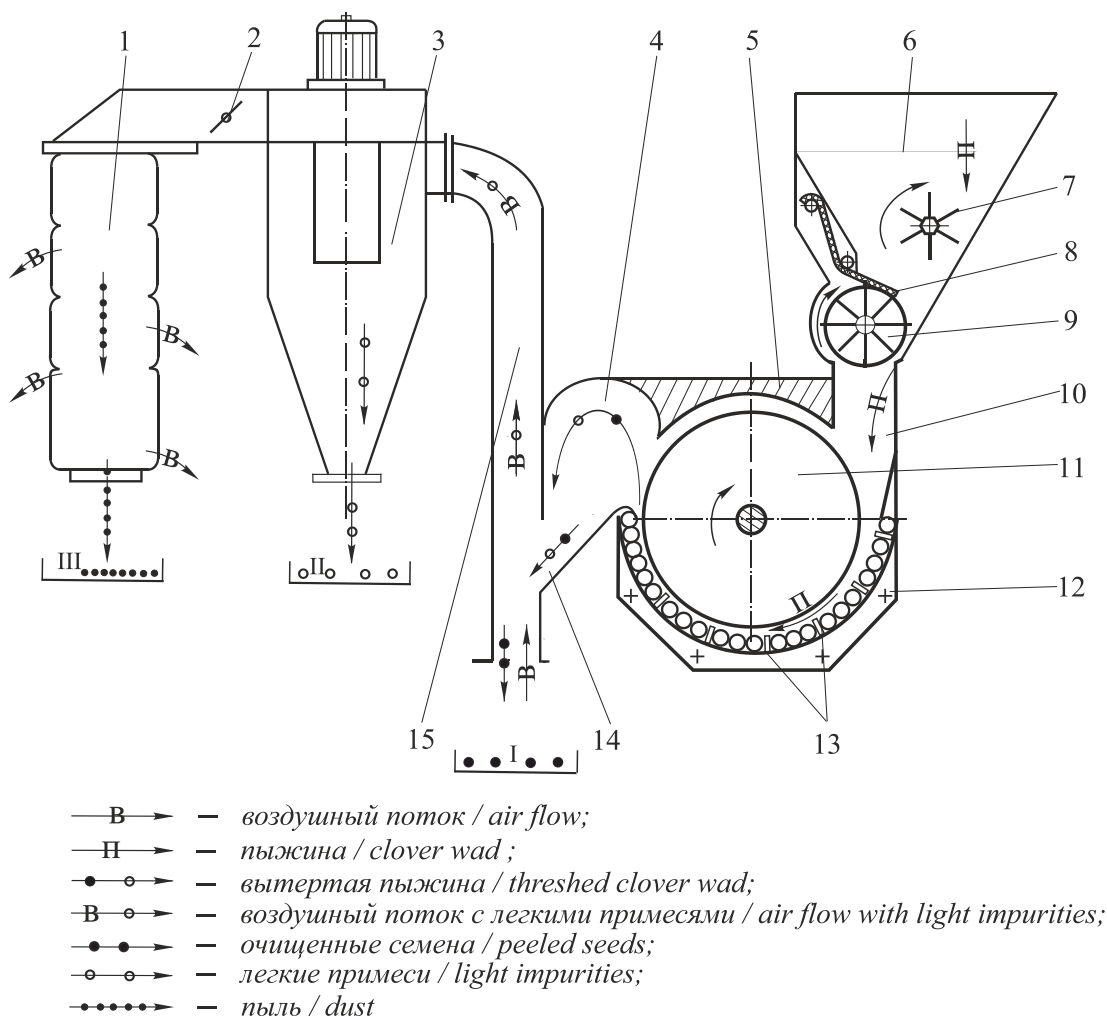


Рис. 2. Технологическая схема клеверотерки-скарификатора КС-0,3П:

- 1 – пылеулавливающее устройство; 2 – дроссельная заслонка; 3 – циклон с электровентилятором;
 4 – выходной патрубок; 5 – корпус; 6 – приемный бункер; 7 – ворошилка;
 8 – гибкая виброзаслонка; 9 – лопастной питающий валик; 10 – загрузочная горловина;
 11 – барабан со сплошной энтгранерной поверхностью; 12 – дека с овальной поверхностью;
 13 – вытирающие пластины; 14 – загрузочное окно; 15 – вертикальный пневмосепарирующий канал;
 I, II, III – приемники обработанных семян, легких примесей и пыли соответственно

Fig. 2. Process flow design of the clover grater and scarifier KS-0.3P:

- 1 – dust collecting device; 2 – throttle valve; 3 – cyclone with fan; 4 – outlet pipe;
 5 – housing; 6 – receiving hopper; 7 – agitator; 8 – flexible vibration damper;
 9 – blade feeding roller; 10 – loading neck; 11 – drum; 12 – deck with oval surface;
 13 – rubbing plates; 14 – loading window; 15 – vertical pneumatic separation channel;
 I, II, III – receivers, respectively, of treated seeds, light impurities and dust

действием силы тяжести попадают в приемник I, а воздушный поток с легкими примесями по воздухоотводящему каналу вентилятором направляется в циклон 3 и далее в тканевый пылеуловитель 1 (рис. 2). Уловленные легкие примеси и пыль собираются в приемники II и III. При скарификации твердых семян бобовых трав движение материала происходит аналогично описанному выше процессу.

Подача материала регулируется изменением положения гибкой виброзаслонки 8. Частота вращения

барабана клеверотерки зависит от настройки частотного преобразователя. Молотильные зазоры устанавливаются при подготовке клеверотерки на определенный вид работы. Скорость воздушного потока в ПСК регулируется изменением положения дроссельной заслонки 2 в воздуховоде, параметры воздушного потока измеряются при помощи микроманометра ММН-2400 и трубки Пито-Прандтля.

Технические характеристики клеверотерки КС-0,3П представлены в таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики клеверотерки КС-0,3П

Table 1

Technical specifications of the clover grater KS-0.3P

Показатель <i>Indicator</i>	Значение / Value	
	Техническое задание <i>Performance specification</i>	Испытания <i>Tests</i>
Тип машины / <i>Machine type</i>	стационарный / <i>stationary</i>	
Суммарная установленная мощность, кВт / <i>Total installed capacity, kW</i>	3,7	3,7
Установленная мощность электродвигателя клеверотерки, кВт <i>Installed power of the electric motor of a clover grater, kW</i>	2,2	2,2
Установленная мощность электродвигателя вентилятора, кВт <i>Installed power of the fan electric motor, kW</i>	1,5	1,5
Производительность за 1 ч основного времени, т: / <i>Productivity per 1 hour of main time, tn:</i>		
– при вытирании семян из клевера* / <i>when rubbing out clover seeds*</i>	0,3	0,39
– при скарификации твердых семян бобовых трав / <i>when scarifying hard seeds of leguminous grasses</i>	0,3	0,37
Диаметр барабана, мм / <i>Drum diameter, mm</i>	454	454
Длина барабана, мм / <i>Drum length, mm</i>	–	200
Частота вращения барабана максимальная, мин ⁻¹ / <i>Maximum drum speed, min⁻¹</i>	1100	1050
Размеры поперечного сечения канала, мм / <i>Dimensions of the channel cross-section, mm</i>	90x200	90x200
Площадь тканевого фильтра, м ² / <i>Fabric filter area, m²</i>	3,0	3,0
Высота загрузки, мм / <i>Loading height, mm</i>	–	1870
Высота выгрузки, мм / <i>Unloading height, mm</i>	–	350

* Влажность до 14%, содержание грубых солоmistых примесей – не более 0,5%, свободных семян – не более 1,0%

* with a moisture content of up to 14%, the content of coarse straw impurities is no more than 0.5%, free seeds are no more than 1.0%

Результаты и их обсуждение

Испытания клеверотерки КС-0,3П⁶ проведены на базе семяочистительного комплекса ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого», г. Киров (рис. 3).

Показатели качества технологического процесса и режимы работы клеверотерки определены по ГОСТ 12036-85, ГОСТ 12037-81, ГОСТ 12038-81, ГОСТ 12041-82, ГОСТ 33735-2016, СТО АИСТ 8.20-2010.

Агротехническая оценка испытаний клеверотерки выполнена на вытирании семян из пыжины лугового клевера при подачах 0,28; 0,39; 0,46 т/ч и последующей их очистке от легких примесей воздушным потоком, и на скарификации семян козлятника восточного (галеги восточной) при подачах 0,28; 0,37; 0,49 т/ч.

Исходный материал для проведения вытирания семян трав (пыжина клевера лугового) был предварительно высушен до кондиционной влажности и очищен от грубых, крупных и солоmistых примесей. Влажность пыжины клевера составила 3,7%, что соответствует требованиям технического задания (ТЗ – до 16%). Содержание грубых солоmistых примесей в исходном материале не превысило допустимых значений, предусмотренных ТЗ (не более 0,5%), и составило 0,01...0,03% в зависимости от опытов. Содержание свободных семян в исходном материале клевера составило 1,12...2,81% (по ТЗ – не более 1,0%). При этом несоответствие данного показателя требованиям ТЗ в процессе испытаний не повлияло на качество выполнения технологического процесса. Скорость витания легких примесей

⁶ Протокол № 06-01-2024 (9060016) от 4 апреля 2024 г. испытаний клеверотерки-скарификатора КС-0,3П. Оричи: ФГБУ «Кировская МИС», 2024. 37 с



Рис. 3. Клеверотерка-скарификатор КС-0,3П в работе

Fig. 3. Clover grater and scarifier KS-0.3P in operation

Таблица 2

Агротехнические показатели клеверотерки КС-0,3П при вытирании семян

Table 2

Agrotechnical indicators of the clover grater KS-0.3P when rubbing out seeds

Показатель / Indicator	Техническое задание Performance specification	Данные испытаний According to test data		
		опыт 1 experiment No. 1	опыт 2 experiment No. 2	опыт 3 experiment No. 3
Частота вращения барабана, мин ⁻¹ / Drum speed, min ⁻¹	до 1100 / up to 1100	700	750	800
Молотильный зазор на входе, мм / Inlet clearance, mm	7...9	8		
Молотильный зазор на выходе, мм / Outlet clearance, mm	2...4	3		
Скорость воздушного потока в канале, м/с Air flow velocity in the channel, m/s	2...8	3,8		
Культура / Agricultural crop	Бобовые и злаковые травы Legumes and cereal grasses	Пыжина клевера Heads with clover seeds		
Подача, т/ч / Feed, t/h	0,3	0,28	0,39	0,46
Содержание свободных семян (чистота), % Free seed contents, %	–	67,99	73,27	67,06
Содержание дробленых семян, % / Contents of crushed seeds	–	0,52	1,36	1,43
Дробление семян, % / Seed crushing	не более 1,5 / no more than 1.5	1,1	0,1	1,0
Степень вытирания семян, % / Degree of rubbing out%	не менее 95,0 / not less than 95.0	95,4	95,6	95,6
Эффект очистки от легких примесей, % Effect of separating light impurities, %	не менее 60 / not less than 60	73,7	77,7	73,6
Потери семян клевера, % / Clover seed losses, %	не более 1,5 / no more than 1.5	1,3	1,1	1,2

составляла 0,1...3,8 м/с, бобиков с семенами – 3,8...6,0 м/с, семян клевера – 4,2...7,6 м/с, тяжелых примесей – более 10,0 м/с.

В результате испытаний степень вытирания семян клевера составила 95,4...95,6%, что соответствует требованиям ТЗ (не менее 95%) (табл. 2). Дробление семян в процессе вытирания пыжины клевера составило 0,1...1,1%, что не превышает требования ТЗ (не более 1,5%). Потери свободных семян клевера при пневмосепарации составили 1,1...1,3%, что также не превышает требования ТЗ (не более 1,5%). Эффект очистки семян клевера от легких примесей после вытирания их из пыжины соответствует требованиям ТЗ на всех подачах и составляет 73,6...77,7% (по ТЗ – не менее 60%). Эффект очистки определяли по формуле:

$$E_{\text{лпк}} = (1 - m_{\text{лпк}} / m_{\text{лпк}}) \cdot 100, \%,$$

где $m_{\text{лпк}}$ – масса легких примесей, не выделенных из материала после вытирания при включенном ПСК, г; $m_{\text{лпк}}$ – масса легких примесей в материале после вытирания без включенного ПСК, г.

Исходный материал козлятника восточного был очищен от легких примесей, семян сорняков и других видов трав и соответствовал требованиям ТЗ. Согласно ТЗ исходный материал должен соответствовать требованиям ГОСТ Р 52325-2005 «Сортовые и посевные качества. Общие технические условия» для категории семян не ниже РС (репродукционные семена). Влажность семян козлятника составила 10,9%, чистота семян – 96,46%, энергия прорастания семян – 78,0%, всхожесть семян – 98,0%. При этом в исходном материале отмечено 19,0% твердых семян. Согласно ГОСТ 12038-84 при определении всхожести у кормовых бобовых трав твердые семена относят к всхожим.

Исходный материал козлятника восточного был единым для всех подач. Для оценки качества скарификации введены показатели, непосредственно характеризующие процесс скарификации: дробление семян, степень скарификации и изменение количества проросших семян [9].

В результате испытаний установлено увеличение энергии прорастания семян козлятника после

Таблица 3

Агротехнические показатели клеверотерки КС-0,3П при скарификации семян

Table 3

Agrotechnical indicators of the clover grater KS-0.3P during seed scarification

Показатель <i>Indicator</i>	Техническое задание <i>Performance specification</i>	Данные испытаний <i>According to test data</i>		
		опыт 1 <i>experiment No. 1</i>	опыт 2 <i>experiment No. 2</i>	опыт 3 <i>experiment No. 3</i>
Частота вращения барабана, мин ⁻¹ / <i>Drum speed, min⁻¹</i>	до 1100 / <i>up to 1100</i>	505		
Молотильный зазор на входе, мм / <i>Inlet clearance, mm</i>	7...9	8		
Молотильный зазор на выходе, мм / <i>Outlet clearance, mm</i>	2...4	3		
Скорость воздушного потока в канале, м/с <i>Air flow velocity in the channel, m/s</i>	2...8	3,8		
Культура <i>Agricultural crop</i>	Бобовые и злаковые травы <i>Legumes and cereal grasses</i>	Козлятник восточный <i>Caucasian goat's rue (Galega orientalis)</i>		
Подача, т/ч / <i>Feed, t/h</i>	0,3	0,28	0,37	0,49
Дробление семян, % / <i>Seed crushing, %</i>	Не более 2 / <i>no more than 2</i>	1,1	0,8	0,3
Энергия прорастания, % / <i>Germination energy, %</i>	–	97,5	96,0	95,4
Всхожесть семян, % / <i>Seed germination, %</i>	Не менее 70 / <i>not less than 70</i>	99,5	99,0	98,2
Степень скарификации, % / <i>Scarification degree, %</i>	Не менее 95,0 / <i>not less than 95,0</i>	95,0	96,5	95,8
Степень изменения количества проросших семян, % <i>Degree of change in the number of germinated seeds, %</i>	–	19,8	19,6	18,9

проведения скарификации с 78,0 до 95,4...97,5% в зависимости от подачи. Степень скарификации составила 95,0...96,5% и на всех подачах соответствует требованиям ТЗ (не менее 95%). Дробление семян в результате скарификации составило 0,3...1,1%, что не превышает требования ТЗ (не более 1,5%) (табл. 3).

Энергетическая оценка клеверотерки выполнена совместно с агрооценкой при вытирании семян из пыжины клевера и при скарификации семян козлятника восточного. При этом выявлено следующее.

Установленная мощность электродвигателей привода терочного барабана и вентилятора циклона составила 2,2 и 1,5 кВт, что соответствует требованиям ТЗ и обеспечивает выполнение технологического процесса. При вытирании семян из пыжины клевера (подача 0,28; 0,39; 0,46 т/ч) суммарная потребляемая электродвигателями из сети активная мощность составила 1,33; 1,48; 1,51 кВт. При этом коэффициенты загрузки электродвигателя привода терочного барабана составили 0,29; 0,34; 0,35.

Суммарная потребляемая электродвигателями из сети активная мощность при скарификации семян козлятника восточного (подача 0,28; 0,37; 0,49 т/ч) составила 1,71; 1,80; 1,99 кВт. При этом коэффициенты загрузки электродвигателя привода барабана составили 0,43; 0,46; 0,53.

Удельный расход электроэнергии при вытирании семян из пыжины клевера (подача 0,28; 0,39; 0,46 т/ч) и при скарификации семян козлятника восточного (подача 0,28; 0,37; 0,49 т/ч) составил 3,28; 3,79; 4,75 и 4,32; 4,62; 6,12 кВт·ч/т соответственно (по ТЗ – не более 12,0 кВт·ч/т).

В процессе испытаний клеверотерки при оценке безопасности конструкции несоответствия требованиям ССБТ не выявлены. Цепная и ременные передачи закрыты защитными ограждениями,

окрашенными в сигнальный цвет. Защитное заземление выполнено в соответствии с требованиями стандарта. Конструкция ящика управления отвечает требованиям электробезопасности. Усилие на рукоятке рычага-фиксатора приемного устройства при перемещении рукой составляет до 25 Н, усилие, прилагаемое рукой к рычагу заслонки циклона, составляет 28 Н и соответствует ГОСТ 33738-2016 (до 150 Н). Измеренные показатели уровня шума и концентрация пыли в воздухе рабочей зоны составляют 80,0 дБА и 3,8 мг/м³ и не превышают нормативных значений по ГОСТ 33738-2016 (80,0 дБА и 4,0 мг/м³ соответственно). Имеются обозначенные места для строповки.

Выводы

1. Машина КС-0,3П качественно выполняет три технологические операции: вытирание семян из пыжины клевера, скарификацию твердых семян бобовых трав и очистку от легких примесей; соответствует основным требованиям технического задания и нормативной документации по показателям назначения, энергооценке и безопасности конструкции:

- производительность машины при вытирании – 0,39...0,46 т/ч, при скарификации – 0,37...0,49 т/ч;
- степень вытирания семян клевера лугового – 95,4...95,6% при дроблении – 0,1...1%, степень скарификации семян козлятника восточного – 95,8...96,5% при дроблении 0,3...0,8%;
- уровень шума и концентрация пыли в воздухе рабочей зоны – 80 дБа и 3,8 мг/м³;
- удельный расход электроэнергии при вытирании семян составил 3,28; 3,79; 4,75 кВт·ч/т, при скарификации – 4,32; 4,62; 6,12 кВт·ч/т (по ТЗ – не более 12,0 кВт·ч/т);
- эффект очистки вытертых семян от легких примесей составил 73,6...77,7%.

2. Машина КС-0,3П рекомендуется к применению в сельскохозяйственном производстве.

Список источников / References

1. Kosolapov V.M., Kostenko S.I., Tyurin Yu.S. et al. Perennial forage grasses – the basis for greening agricultural production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;663:012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/663/1/012022>
2. Kosolapov V.M., Cherniavskih V.I., Dumacheva E.V. et al. The role of perennial grasses in the protection of soil resources of erosive ecosystems with active development of linear erosion. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;901:012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/901/1/012007>
3. Bouteiller X.P., Porté A.J., Mariette S., Monty A. Using automated sanding to homogeneously break

- seed dormancy in black locust (*Robinia pseudoacacia* L., Fabaceae). *Seed Science Research*. 2017;27(3):243-250. <https://doi.org/10.1017/S0960258517000150>
4. Lukas S.B., DeFrank J., Baldos O.C. Optimization of *Waltheria indica* seed dormancy relief treatments and seed storage parameters. *HortScience*, 2016;51(9):1184-1187. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI10720-16>
5. Luo J., Sun J., Yang L. et al. Design and experiment of type 9BQS-3.0 pneumatic scarifying and sowing compound operation machine. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2013;44(1):51-55,66 <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.010>

6. Чугунов С.В., Рожков Г.А. Обзор устройств для вытирания и скарификации семян трав // Журнал передовых исследований в области естествознания. 2020. № 9. С. 60-62. EDN: YFBYMN

Chugunov S.V., Rozhkov G.A. Review of devices for drying and scarification of seeds of grasses. *Journal of Advanced Research in Natural Science*. 2020;9:60-62. (In Russ.)

7. Бурков А.И., Глушков А.Л., Лазыкин В.А., Мокиев В.Ю. Барабанная клеверотерка с пневмосепарирующим устройством // Сельский механизатор. 2020. № 5-6. С. 8-9. EDN: LGFPRP

Burkov A.I., Glushkov A.L., Lazykin V.A., Mokiev V.Yu. Drum clover grater with pneumatic separator. *Selskiy Mekanizator*. 2020;5-6:8-9. (In Russ.)

8. Бурков А.И., Глушков А.Л., Лазыкин В.А., Мокиев В.Ю. Обоснование основных конструктивно-технологических

параметров пневмосепарирующего устройства клеверотерки-скарификатора // Агроинженерия. 2021. № 4. С. 9-13. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-4-9-13>

Burkov A.I., Glushkov A.L., Lazykin V.A., Mokiev V.Yu. Determination of the basic design and technological parameters of the pneumatic separating device of a clover thresher and scarifier. *Agricultural Engineering*, 2021;4(104):9-13. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-4-9-13>

9. Бурков А.И., Симонов М.В., Мокиев В.Ю. Определение показателей качества работы скарификаторов семян трав // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2014. № 3. С. 19-20. EDN: UXVWDF

Burkov A.I., Simonov M.V., Mokiev V.Yu. Determination of indicators of the quality of the scarifiers grass seed. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva*. 2014;3:19-20. (In Russ.)

Информация об авторах

¹Лазыкин Виктор Алексеевич, канд. техн. наук, научный сотрудник; ellestar@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3910-8620>; SPIN-код: 2180-6764

²Бурков Александр Иванович, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник; burkov.46@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5287-1532>; SPIN-код: 6469-1959

³Глушков Андрей Леонидович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; glandrey@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1448-9930>; SPIN-код: 6378-8155

⁴Мокиев Валентин Юрьевич, канд. техн. наук, научный сотрудник; dizel154@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3368-1151>; SPIN-код: 2330-1404

^{1, 2, 3, 4} Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого»; 610007, г. Киров, ул. Ленина, 166а, Россия

Вклад авторов

В.А. Лазыкин – описание результатов и формирование выводов исследований, подготовка начального варианта текста;
А.И. Бурков – концептуализация;
А.Л. Глушков – формальный анализ и верификация данных, доработка рукописи и ее редактирование;
В.Ю. Мокиев – представление результатов, подготовка графических материалов.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 16.04.2025, после рецензирования и доработки 27.08.2025; принята к публикации 27.08.2025

Author Information

V.A. Lazykin¹, CSc (Eng), Research Engineer;

<https://orcid.org/0000-0002-3910-8620>; ellestar@bk.ru

A.I. Burkov², DSc (Eng), Professor, Chief Research Engineer;

<https://orcid.org/0000-0002-5287-1532>; burkov.46@mail.ru

A.L. Glushkov³, CSc (Eng), Senior Research Engineer;

<https://orcid.org/0000-0002-1448-9930>;

glandrey@yandex.ru

V.Yu. Mokiyev⁴, CSc (Eng), Research Engineer;

<https://orcid.org/0000-0002-3368-1151>; dizel154@bk.ru

^{1,2,3,4} Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky; 166a, Lenina Str., Kirov, Russia, 610007

Author Contributions

V.A. Lazykin – description of results and formulation of research conclusions, writing – original draft;
A.I. Burkov – conceptualization;
A.L. Glushkov – formal analysis and data verification, writing – manuscript review and editing;
V.Yu. Mokiev – visualization.

Conflict of interest

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

Received 16.04.2025; Revised 27.08.2025; Accepted 27.08.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.362.34

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-32-38>

Взаимосвязь интенсивности выделения зерна триером со скоростным режимом работы

Н.П. Тишанинов^{1✉}, А.В. Анашкин², С.В. Емельянович³^{1,2,3} Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве; г. Тамбов, Россия¹ vnitinlab5@mail.ru ✉² av-anashkin@mail.ru³ seruvarovo@yandex.ru

Аннотация. Оптимальная работа триера при очистке зерна от длинных примесей зависит от правильно подобранных параметров его работы. С целью повышения качества триерной очистки проведены экспериментальные исследования по установлению рациональных режимов работы триера. Подача зерносмеси изменялась в диапазоне 1840...4420 кг/ч, при этом скоростной режим работы триера соответствовал 36,0...43,0 об/мин. Установлено, что с ростом частоты вращения цилиндра в диапазоне 36,0...39,0 об/мин при подаче 1840 кг/ч остаточная масса снижается в 2,77 раза, образуя свободный участок ячеистой поверхности до 0,75 м, который создает риски существенного увеличения остаточной засоренности. С увеличением загрузки триера до 4420 кг/ч длина свободной ячеистой поверхности сокращается до 0,2 м. Рабочие диапазоны скоростного режима с ростом подачи увеличиваются при расширении границ диапазонов. Установлено, что в начале диапазонов частоты вращения цилиндра величина интенсивности выделения зерновок возрастает на 4,1...26% пропорционально величине загрузки, а с последующим ростом скоростного режима стабилизируется в связи с ухудшением условий западания зерновок в ячеи. Исполнение ячеистых цилиндров под наклоном к горизонту в 1° позволяет существенно выравнивать распределение интенсивности выделения чистого зерна по их длине, что обеспечивает при равных режимах работы сокращение технологических потерь и рисков роста остаточной засоренности зерна. Интенсивность выделения зерна триером при различной загрузке обусловлена соответствующим скоростным режимом. При загрузке 1,84 т/ч рекомендуемая частота вращения ячеистого цилиндра составляет 36,2...36,5 об/мин, при 2,49...3,1 т/ч – 38,0...39,0 об/мин, при 3,77 т/ч – 40,0...41,0 об/мин, при 4,42 т/ч – 40,0...41,5 об/мин. Установленные диапазоны скоростных режимов работы обеспечивают допустимый уровень технологических потерь 0,99...2,38%.

Ключевые слова: триер; режим работы триера; качество очистки зерна; интенсивность выделения зерна; скоростной режим работы триера; технологические потери

Для цитирования: Тишанинов Н.П., Анашкин А.В., Емельянович С.В. Взаимосвязь интенсивности выделения зерна триером со скоростным режимом работы // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 5. С. 32-38. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-32-38>

ORIGINAL ARTICLE

Relationship between the intensity of grain release by an indented cylinder separator and the speed mode of operation

N.P. Tishaninov^{1✉}, A.V. Anashkin², S.V. Emelyanovich³^{1,2,3} All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture; Tambov, Russia¹ vnitinlab5@mail.ru ✉² av-anashkin@mail.ru³ seruvarovo@yandex.ru

Abstract. Optimal performance of an indented cylinder separator relies on carefully selected settings and operating parameters. To enhance the cleaning efficiency, the authors conducted experimental studies to determine rational operating modes. The obtained results demonstrate that increasing the cylinder speed from 36.0 to 39.0 rpm at a feed rate of 1840 kg/h reduces residual mass by a factor of 2.77. At this feed rate, a free section of the cellular surface forms, reaching up to 0.75 m, which can increase residual contamination. Increasing the feed rate to 4420 kg/h reduces this free cellular surface to only 0.2 m. The authors observed that the effective speed ranges broaden as feed rates

are increased. Within these ranges, grain separation intensity initially increases by 4.1 to 26%, but then stabilizes due to less effective grain capture. Importantly, inclining the cylinder by 1° significantly equalizes grain separation intensity. This equalization minimizes process losses and reduces the risk of increased residual grain contamination under consistent operating conditions. By utilizing the established operating speed ranges for different loading values of an indented cylinder separator, one can ensure acceptable process losses, ranging from 0.99 to 2.38%,

Keywords: indented cylinder separator; grain mixture; separation; operating modes; quality; process losses

For citation: Tishaninov N.P., Anashkin A.V., Emelyanovich S.V. Relationship between the intensity of grain release by an indented cylinder separator and the speed mode of operation. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(5):32-38 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-32-38>

Введение

В работах [1, 2] представлены результаты распределения интенсивности выделения зерна (W_b) по длине ячеистой поверхности. Подтверждено, что на конечном участке ячеистого цилиндра захват зерновок ячеями становится маловероятным по причине нарушения сплошности циркулирующих слоев зерна, когда задние стенки (по направлению вращения цилиндра) ячеи оказывают силовое воздействие на зерновки, превышающее их инерцию и гравитацию. В этом заключается причина снижения качественных показателей процесса. Активизация осевого смещения циркулирующих слоев зерна за счет наклона цилиндра (α) могла бы компенсировать их сплошность на конечном участке цилиндра и сократить технологические потери. Однако объективных результатов исследований о взаимосвязи W_b со скоростным режимом работы (n) при наклоне цилиндра к горизонту недостаточно. Авторы работ^{1,2,3,4,5} [3] использовали оценочные критерии, не связанные с традиционными показателями качества процесса. Они не располагали средствами объективного контроля распределения W_b по длине цилиндра, поэтому получили ошибочные результаты. Авторы^{5,6} также не имели возможности контролировать W_b и неоправданно завышали угол

наклона цилиндра к горизонту (до 10°). В работах^{7,8} авторы связывают распределение W_b с углом охвата зернового клина в цилиндре, что опровергается исследованиями ФГБНУ ВНИИТиН [1, 2]. Сторонники характеризовать процесс показателем «вычерпывающей» способности^{2,3,9} считают, что она линейно связана со скоростным режимом работы триера. Результаты исследователей триерных технологий [3-11] также не позволяют получать объективные закономерности протекания процесса. Актуальность исследований по выравниванию распределения W_b по длине ячеистого цилиндра за счет его наклона к горизонту обусловлена существенными резервами качества процесса.

Цель исследований: повысить качество очистки зерна и семян за счет обеспечения рациональных параметров работы триера.

Материалы и методы

Исследования проводили на экспериментальной установке [12], обеспечивающей воспроизводимость условий опытов за счет отдельной подачи компонентов зерносмеси в триер и стабилизации процесса при непрерывном кольцевом движении рабочей среды, контролируемой по сходам. Установка включает в себя перевалочную норию, дозатор, триер, возвратный скребковый транспортер, ленточный питатель для примесного компонента. Триер снабжен гидроподъемником, уровнемером, электронным тахометром, видеокамерой с автоматизированным дистанционным управлением, расположенной внутри ячеистого цилиндра. Установка обеспечена также

¹Павловский Г.Т. Исследование технологического процесса в цилиндрических триерах // Сборник научных трудов ВИМ. 1952. Т. 17.

²Викторова Н.Н., Ивлиева Н.М., Кубышев В.А. Влияние параметров цилиндрического триера на эффективность его работы // Труды ВНИИЗ. 1962. Вып. 42. С. 245-253.

³Викторова Н.Н. Влияние скорости вращения на эффективности работы триерных цилиндров (при очистке семян от длинной примеси) // Труды ЧИМЭСХ. 1965. С. 21-22.

⁴Ивлиева Н.М. Экспериментальное исследование процесса движения обрабатываемого материала в цилиндрическом триере // Труды ЧИМЭСХа. 1965. Вып. 5.

⁵Ивлиева Н.М. Исследование влияния нагрузки цилиндра и угла его наклона к горизонту на производительность и качество работы цилиндрического триера: Дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 1952.

⁶Павловский Г.Т. Исследование технологических процессов в цилиндрических триерах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1950. 13 с.

⁷Терсков Г.Д. Основные закономерности процесса прохождения семян в отверстия решет и ячеек триеров // Труды ЧИМЭСХа. 1969. Вып. 36.

⁸Урханов Н.А. Исследование технологического процесса работы цилиндрического триера с целью повышения производительности и качества разделения смеси: Дис. ... канд. техн. наук. 1968. 130 с.

⁹Викторова Н.Н. Исследование процесса работы цилиндрического триера при максимальной производительности и изыскания его оптимальных параметров: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 1964. 27 с.

электронными весами, распределительными коробками без днища с защитными стенками, мерными емкостями. План эксперимента представлен в таблице.

Результаты и их обсуждение

В результате исследований процесса триерной очистки зерна с режимами работы при угловом положении выводного лотка $\gamma_n = 55^\circ$ и наклоне ячеистого цилиндра к горизонту под углом $\alpha = 1^\circ$ установлена зависимость: при подаче зерна в триер $W_n = 1840$ кг/ч и увеличении частоты вращения ячеистого цилиндра в диапазоне 36,0...39,0 об/мин остаточная масса зерна в ячеистом цилиндре ($m_{ост}$) снизилась с 18,95 до 6,85 кг, то есть в 2,77 раза, а интенсивность выделения зерна (W_b) увеличилась на 4,2% при росте n с 36,0 до 37,0 об/мин (рис. 1).

Взаимосвязь $W_b = f(n)$ при $\alpha = 1^\circ$ подчиняется общей закономерности, которая, как и для других режимов работы триера, заключается в интенсивном росте W_b в начале диапазона n и последующей ее

стабилизации по мере роста n . Стабилизация W_b объясняется уравниванием потенциального роста производительности с увеличением скоростного режима и отрицательного влияния на нее ухудшающихся условий западания зерновок в ячейки (рис. 2, 3).

Интенсивность выделения зерна (W_b) при $\alpha = 1^\circ$ и подаче $W_n = 2490$ кг/ч с приращением скоростного режима работы на 0,5 об/мин сначала возрастает на 4,1% в диапазоне $n = 37,0...39,0$ об/мин, а затем стабилизируется (рис. 3).

Скоростной режим работы триера на подаче $W_n = 2490$ кг/ч следует ограничивать диапазоном $n = 37,0...38,0$ об/мин, когда технологические потери (Π) сохраняются на допустимом уровне – 2,05...1,60%. При $n = 37,0$ об/мин величина $\Pi = 5,45\%$ больше допустимого значения. При $n = 39,0$ об/мин длина свободного участка ячеистой поверхности – $l_{св} = 0,3$ м, что создает риски повышения остаточной засоренности зерна (3_o).

Таблица

Диапазоны и интервалы варьирования исследуемых факторов

Table

Ranges and intervals of variation of the factors under study

Фактор Factor	Диапазон варьирования Range of variation	Интервал варьирования Variation interval
Подача зерносмеси, W , т/ч / Feeding of grain mixture, t/h	1,84...4,42	0,5
Исходная засоренность зерносмеси, 3 / Initial contamination, %	0	–
Угол наклона цилиндра, β , град. / Cylinder inclination angle, β , degrees	1	–
Частота вращения ячеистого цилиндра, n , об/мин / Speed of the indented cylinder, n , rpm	36...43	0,5
Угол подъема рабочей кромки лотка, γ , град. / Inclination angle of the tray's working edge, γ , degrees	55	–

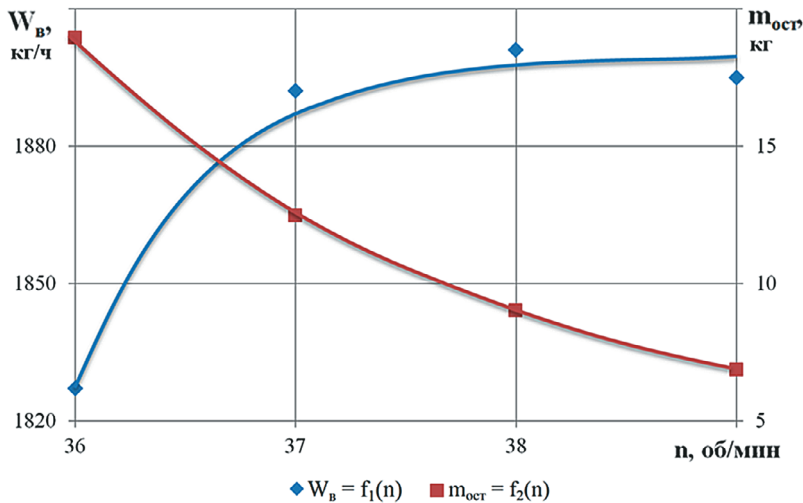


Рис. 1. Интенсивность выделения (W_b) и остаточная масса зерна ($m_{ост}$) при подаче 1840 кг/ч и наклоне цилиндра 1°

Fig. 1. Relationship between the intensity of separation and the residual mass of grain with the speed mode at a feed rate of 1840 kg/h and a cylinder tilt of 1°

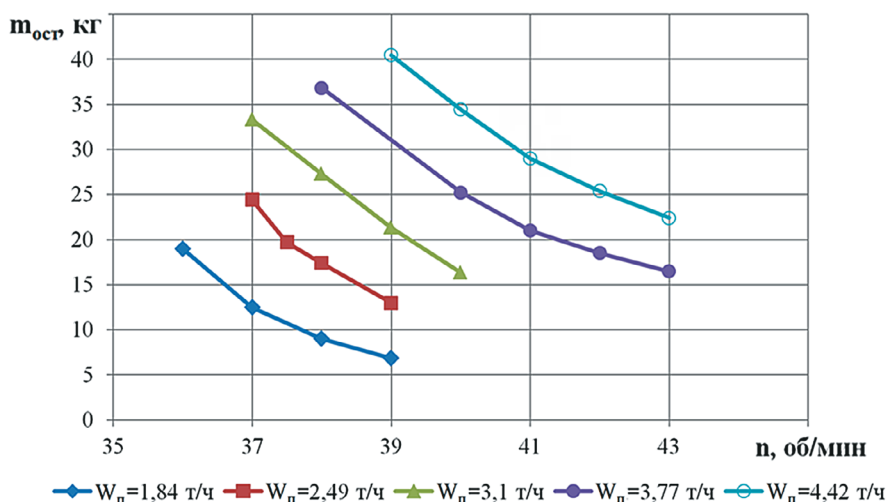


Рис. 2. Зависимость остаточной массы зерна в цилиндре от режимов работы триера при наклоне цилиндра 1°

Fig. 2. Relationship between the residual grain mass in the cylinder and operating modes at a cylinder tilt of 1°

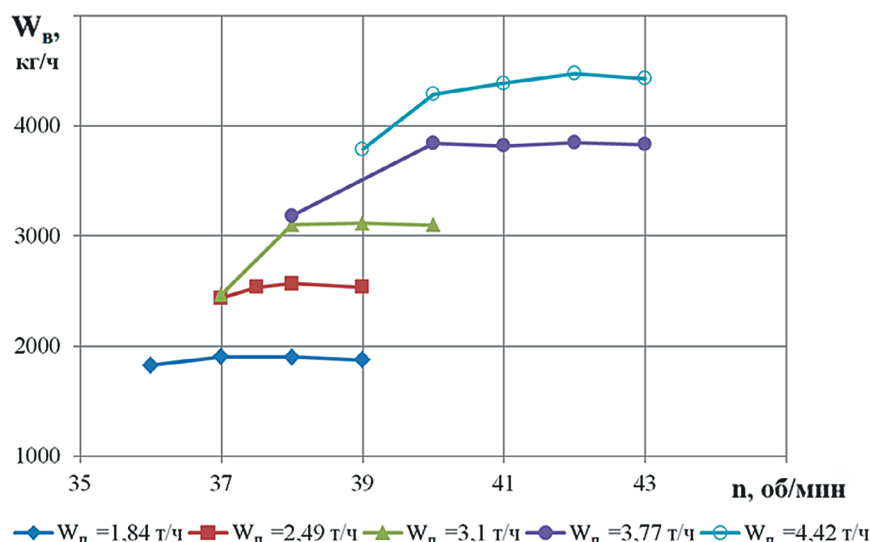


Рис. 3. Интенсивность выделения чистого зерна при разных режимах работы и наклоне цилиндра 1°

Fig. 3. Relationship between the intensity of clean grain separation and operating modes at a cylinder tilt of 1°

Сравнение интенсивности выделения чистого зерна (W_B), полученной при подачах 2490 и 1840 кг/ч ($\alpha = 1^\circ$), показывает, что при большей подаче величина W_B на 28,0...35,3% выше, чем при меньшей. Соотношение подач (2490/1840) составляет 1,353 (их разница достигает тех же 35,3%), что является причиной противоречивых толкований реально-го технологического процесса в триерах.

Сомнений нет: производительность триера с меньшей подачей зерна в него не может быть выше, чем с большей, если не принимать во внимание экстремальные условия протекания процесса. Однако считаем, что при $W_{n1} > W_{n2}$ угол охвата ($\gamma_{охв}$) сегмента выше, следовательно, число ячеек, использованных для выделения зерновок за один оборот цилиндра, также выше, поэтому и $W_{B1} > W_{B2}$. Однако в непрерывном технологическом процессе число задействованных в работе ячеек, приходящихся на один

оборот ячеистого цилиндра, не зависит от $\gamma_{охв}$ циркулирующего сегмента. И если отсутствуют причины, определяющие различия условий западания зерновок в ячей в сравниваемых вариантах, то независимо от $\gamma_{охв}$ i -тые участки сегмента единичной длины обеспечивают непрерывный вклад в интенсивность выделения зерна – W_{B1} . Кроме того, больший $\gamma_{охв}$ приходится (совпадает) на большее число циркулирующих слоев зерносмеси в сегменте элементарной длины, что усиливает эффект динамического «выедания» зерновок из ячеек. Поэтому в реальном процессе интенсивность выделения зерна W_B и коэффициент заполнения ячеек зерновками K_3 (расчетное значение числа зерновок, захваченных одной ячейкой) от начала ячеистого цилиндра (места загрузки) непрерывно возрастают до некоторого $W_{B\max}$ и $K_{3\max}$ при уменьшении числа циркулирующих слоев зерносмеси до 4...5 шт. и $\gamma_{охв\text{opt}}$.

Из изложенного следует, что при допустимых технологических потерях в варианте большей загрузки триера из сравниваемых вариантов и существенной разницы между ними ($W_{п1} \gg W_{п2}$) реализация процесса с подачей $W_{п2}$ будет сопровождаться появлением свободного участка ячеистой поверхности ($l_{св2}$). Иными словами, реализация процесса с большей подачей обеспечивается увеличением длины задействованной ячеистой поверхности, где коэффициент заполнения ячеек зерновками основной культуры непрерывно возрастает: $K_3 \rightarrow K_{3\max}$. Затем W_B убывает по параболическому закону с одинаковым темпом независимо от $W_{п1}$ при прочих равных условиях. Это подтверждается экспериментальными результатами. При подаче $W_{п1} = 2490$ кг/ч в диапазоне $n = 37,0 \dots 39,0$ об/мин величина интенсивности выделения зерна составила $W_{B1} = 2435 \dots 2536$ кг/ч, а в сравниваемом варианте при $W_{п2} = 1840$ кг/ч и идентичных скоростных режимах работы $W_{B2} = 1874 \dots 1903$ кг/ч. При этом выполняются ожидаемые соотношения исходных условий и результатов опытов:

$$W_{п1} / W_{п2} \approx W_{B1} / W_{B2}. \quad (1)$$

При загрузке $W_{п1} = 3100$ кг/ч характер изменения интенсивности выделения зерна аналогичен предыдущим, полученным при меньших величинах загрузки триера (рис. 3). В начале диапазона скоростных режимов работы ($37,0 < n < 38,0$ об/мин) интенсивность выделения чистого зерна (W_B) резко возрастает, а при последующем увеличении n стабилизируется. Рост W_B при $n = 37,0 \dots 38,0$ об/мин составляет 26%, а изменение показателя интенсивности выделения зерна с последующим увеличением n не превышает 0,5%. Величина остаточной массы зерна в ячеистом цилиндре с ростом скоростного режима работы в диапазоне $n = 37,0 \dots 40,0$ об/мин снижается от 33,32 до 16,36 кг, то есть в 2,04 раза.

Следует отметить, что соизмеримая кратность понижения остаточной массы зерна в ячеистом цилиндре при сопоставимых скоростных режимах работы триера наблюдается и при меньших загрузках триера (1840 и 2490 кг/ч). Скоростной режим работы триера при подаче $W_{п1} = 3100$ кг/ч с допустимыми технологическими потерями ($\Pi = 3,2 \dots 1,54\%$) составляет $n = 38,0 \dots 39,0$ об/мин. С уменьшением n до 37,0 об/мин технологические потери в 4,6 раза превышают допустимые значения ($\Pi = 23,04\%$). Повышение n до 40,0 об/мин недопустимо ввиду появления свободного участка ячеистой поверхности длиной 0,3 м, который создает риски роста остаточной засоренности очищенного зерна 3_0 .

Взаимосвязь интенсивности выделения зерна со скоростным режимом работы триера при загрузке

$W_{п1} = 3770$ кг/ч (75,4% от номинальной) отражает общие закономерности, характерные и для других вариантов загрузки триера: на начальном участке скоростного диапазона показатель W_B резко возрастает, а затем стабилизируется с незначительной вариацией W_B . В анализируемой серии опытов приращение W_B в диапазоне $n = 38,0 \dots 40,0$ об/мин составляет 20,6%, а вариация W_B в последующем интервале скоростного диапазона не превышает 0,7% (рис. 3). Взаимосвязь $m_{ост} = f(n)$ при $W_{п1} = 3770$ кг/ч и $\alpha = 1^\circ$ в сравнении с меньшими $W_{п1}$ является подобной, она близка к линейной. Прирост остаточной массы зерна в ячеистом цилиндре с увеличением загрузки триера является опережающим. Сопоставление показателя $m_{ост}$ при равных n показывает, что с увеличением загрузки в 2 раза остаточная масса зерна увеличилась в 4 раза. На подаче $W_{п1} = 3770$ кг/ч допустимый скоростной режим по показателю технологических потерь ($\Pi = 1,35 \dots 0,99\%$) составляет $n = 40,0 \dots 41,0$ об/мин. При $n = 38,0$ об/мин величина $\Pi = 17,9\%$ (в 3,6 раза больше допустимой), а с увеличением n до 42,0 об/мин величина $l_{св} = 0,2$ м.

При подаче $W_{п1} = 4420$ кг/ч и $\alpha = 1^\circ$ диапазон рабочих скоростей – $n = 40,0 \dots 41,0$ об/мин ($\Pi = 2,38 \dots 1,33\%$), а характер протекания процесса идентичен в сравнении с меньшими подачами. Снижение n до 39,0 об/мин повышает технологические потери до 15,8%, а с повышением n до 42,0 об/мин приводит к появлению свободного участка ячеистой поверхности длиной 0,1 м.

Особенность взаимосвязи $W_B = f(n)$ при подаче $W_{п1} = 4420$ кг/ч заключается в том, что она не содержит традиционного для меньших режимов загрузки триера участка стабилизации процесса с увеличением n . В начале исследуемого диапазона скоростей (до 40,0 об/мин) интенсивность выделения зерна возрастает на 13,2%, а в последующем интервале $n = 40,0 \dots 43,0$ об/мин показатель W_B возрастает на 4,4%. Это в несколько раз больше, чем на аналогичных участках взаимосвязи $W_B = f(n)$ при меньших величинах подачи (рис. 3). Характер взаимосвязи $m_{ост} = f(n)$ так же, как и при меньших загрузках триера, близок к линейному.

Взаимосвязь результативных показателей работы триера с величиной его загрузки представляет существенный интерес для управления технологическим процессом и повышения его эффективности. Однако обеспечить сопоставимость оценок этих взаимосвязей сложно, так как с ростом величины $W_{п1}$ диапазоны скоростных режимов работы сдвигаются в сторону увеличения по условиям обеспечения показателей качества работы. Вместе с тем локальные обобщения взаимосвязей, необходимых для управления технологическим процессом в производстве, возможны.

На рисунке 4 представлены обобщенные взаимосвязи $W_b(m_{ост}) = f_{1(2)}(W_n)$ для $\alpha = 1^\circ$; $\gamma_n = 55^\circ$; $n = 39$ об/мин. С ростом загрузки W_n увеличивается $m_{ост}$ опережающим темпом. Существенная доля прироста $m_{ост}$ обусловлена недостаточным скоростным режимом работы триера относительно величины подачи.

Взаимосвязь $W_b = f_1(W_n)$ представляет собой убывающую кривую, так как с ростом величины подачи возрастают случайные технологические потери и в большей степени проявляется эффект динамического «выедания» зерновок из ячеек на начальном участке ячеистой поверхности.

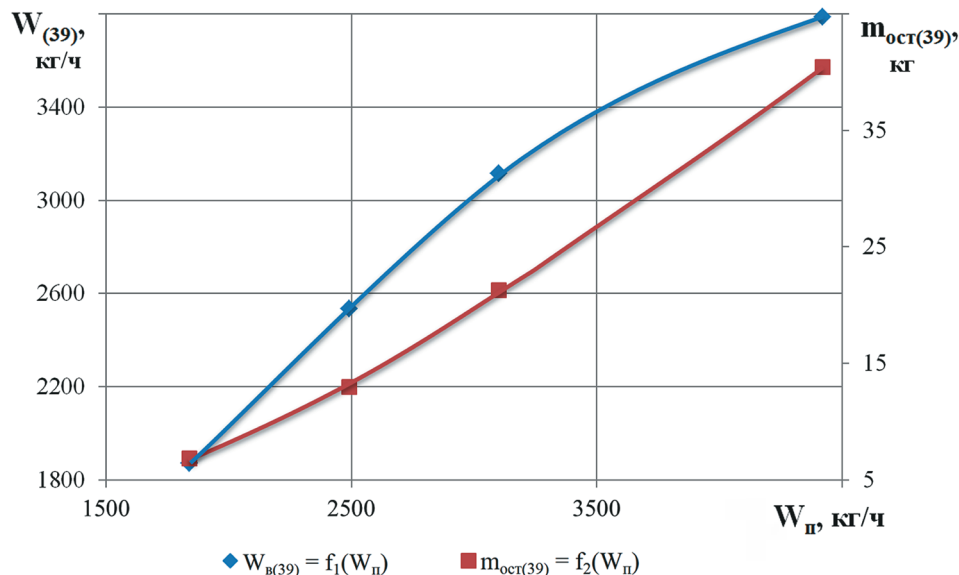


Рис. 4. Взаимосвязь остаточной массы $m_{ост}$ и интенсивности выделения чистого зерна W_b с подачей W_n
Fig. 4. Relationship between residual mass $m_{ост}$ and intensity of clean grain release W_b with feed W_n

Выводы

1. Интенсивность выделения зерна (W_b) триером при различной загрузке имеет ограниченные качественными показателями диапазоны скоростных режимов работы: $W_n = 1,84$ т/ч $\rightarrow n = 36,2 \dots 36,5$ об/мин; $W_n = 2,49$ т/ч $\rightarrow n = 38,0 \dots 39,0$ об/мин; $W_n = 3,1$ т/ч $\rightarrow n = 38,0 \dots 39,0$ об/мин; $W_n = 3,77$ т/ч $\rightarrow n = 40,0 \dots 41,0$ об/мин; $W_n = 4,42$ т/ч $\rightarrow n = 40,0 \dots 41,5$ об/мин.

2. Характер взаимосвязи $W_b = f(n)$ не зависит от степени загрузки триера: в начале

диапазона n величина W_b резко возрастает, а с последующим ростом n стабилизируется с вариацией в 0,5...0,7%.

3. Остаточная масса зерна в триере с ростом n снижается по закону, близкому к линейному, ее величина пропорциональна загрузке.

4. Наклон ячеистого цилиндра под углом 1° к горизонту активирует осевое смещение циркулирующих слоев зерна, компенсирует их сплошность на конечном участке, что повышает качество очистки зерна.

Список источников

1. Тишанинов Н.П., Анашкин А.В., Емельянович С.В. Динамика процесса триерного разделения зерносмеси на различных режимах работы // Наука в центральной России. 2024. № 3 (69). С. 16-28. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-3-16-28>
2. Тишанинов Н.П., Анашкин А.В., Тишанинов К.Н., Альшинайин Х.Д.Д. Динамика выделения колотых зерновок ячменя из зерносмеси // Наука в Центральной России. 2021. № 1 (49). С. 29-36. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-1-29-36>
3. Бурков А.И., Одинцов Д.В. Оптимизация частоты вращения триерных цилиндров с полимерной ячеистой поверхностью // Техника в сельском хозяйстве. 2008. № 4. С. 49-51. EDN: KAWKKH
4. Бекаров А.Д., Габаев А.Х. Оптимизация частоты вращения цилиндрического триера для условий Кабардино-Балкарской Республики // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 1 (99). С. 106-110. EDN: BYVPUU

References

1. Tishannov N.P., Anashkin A.V., Emelyanovich S.V. Dynamics of the process of trier separation of the grain mixture at different operating modes. *Science in Central Russia*. 2024;3(69):16-28. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-3-16-28>
2. Tishannov N.P., Anashkin A.V., Tishannov K.N., Alshinayin H.J.J. Dynamics of separation of barley grains from the grain mixture. *Science in the Central Russia*. 2021;1(49):29-36. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-1-29-36>
3. Burkov A.I., Odintsov D.V. Optimization of the speed of indented cylinders with a polymer cellular surface. *Tekhnika v selskom khozyaystve*. 2008;4:49-51. (In Russ.)
4. Bekarov A.D., Gabaev A.Kh. Optimization of the rotation frequency of the cylindrical trier for the conditions of the Kabardino-Balkarian Republic. *Izvestia Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2023;1(99):106-110. (In Russ.)

5. Абидуев А.А., Раднаев Д.Н., Тогмидон А.Ю., Шагжиев А.Д., Абидуев А.А. Очистка семенного зерна ячменя в условиях Республики Бурятия // Вестник ВСГУТУ. 2023. № 1 (88). С. 46-52. EDN: AFVYLQ
6. Медведев А.В. Автоматизация управления зерноочистительными машинами // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: Материалы Международной научно-практической конференции. Воронеж, 2024. С. 240-245. EDN: DUGONH
7. Мироненко Д.Н. Исследования работы фрикционного триерного цилиндра // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2009. № 2 (21). С. 45-49. EDN: LEVOWH
8. Абидуев А.А., Пехутов А.С., Балданов М.Б., Тогмидон, А.Ю. Очистка семян ячменя от трудноотделимых примесей // Дальневосточный аграрный вестник. 2022. Т. 16, № 3. С. 74-80. EDN: RVKSDJ
9. Meng X., Jia F., Qiu H. et al. DEM study of white rice separation in an indented cylinder separator. Powder Technology. 2019;348:1-12 <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.03.013>
10. Kim M.H., Park S.J. Analysis of broken rice separation efficiency of a laboratory indented cylinder separator. Journal of Biosystems Engineering. 2013;38(2):5-102. <http://dx.doi.org/10.5307/JBE.2013.38.2.095>
11. Запевалов М.В., Коваленко Н.В., Редреев Г.В. Технология очистки семян зерновых культур от длинных примесей // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2022. № 4 (48). С. 200-206. https://doi.org/10.48136/2222-0364_2022_4_200
12. Тишанинов Н.П., Анашкин А.В., Емельянович С.В. Оценка чувствительности процесса триерной очистки зерна к режимам работы // Наука в Центральной России. 2024. № 1 (67). С. 23-31. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-23-31>

Информация об авторах

- ¹ **Тишанинов Николай Петрович**, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории управления качеством технологических процессов в сельском хозяйстве; vniitinlab5@mail.ru[✉]; SPIN-код: 6821-8589
- ² **Анашкин Александр Витальевич**, д-р техн. наук, заведующий лабораторией управления качеством технологических процессов в сельском хозяйстве; av-anashkin@mail.ru; SPIN-код: 4928-6784
- ³ **Емельянович Сергей Владимирович**, младший научный сотрудник лаборатории управления качеством технологических процессов в сельском хозяйстве; seruvarovo@yandex.ru; SPIN-код: 9275-0720
- ^{1,2,3} Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве; 392022, Россия, г. Тамбов, Переулок Ново-рубужный, 28

Вклад авторов

Н.П. Тишанинов – концептуализация, руководство исследованиями, разработка экспериментального оборудования, верификация данных, формулирование выводов;
А.В. Анашкин – методология, руководство проведением экспериментальных исследований, визуализация, формальный анализ, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
С.В. Емельянович – ресурсы, проведение исследований, формальный анализ.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 11.04.2025, после рецензирования и доработки 11.09.2025; принята к публикации 12.09.2025

5. Abiduev A.A., Radnaev D.N., Togmidon A.Yu., Shagzhiev A.D., Abiduev A.A. Barley seed grain cleaning under conditions Republic of Buryatia. *ESSUTM Bulletin*. 2023;1(88):46-52. (In Russ.)
6. Medvedev A.V. Automation of grain cleaning machine control. *Tendentsii razvitiya tekhnicheskikh sredstv i tekhnologii v APK*. Proceedings of the International scientific and practical conference. Voronezh. 2024. P. 240-245. (In Russ.)
7. Mironenko D.N. Research on the functioning of an indented cylinder separator. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2009;2(21):45-49. (In Russ.)
8. Abiduev A.A., Pekhutov A.S., Baldanov M.B. Barley seeds cleaning from hard-separable impurities. *Dalnevostochniy agrarniy vestnik*. 2022;3:74-80. (In Russ.)
9. Meng X., Jia F., Qiu H. et al. DEM study of white rice separation in an indented cylinder separator. Powder Technology. 2019;348:1-12 <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.03.013>
10. Kim M.H., Park S.J. Analysis of broken rice separation efficiency of a laboratory indented cylinder separator. Journal of Biosystems Engineering. 2013;38(2):5-102. <http://dx.doi.org/10.5307/JBE.2013.38.2.095>
11. Zapevalov M.V., Kovalenko N.V., Redreev G.V. Technology for cleaning grain seeds from long impurities. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022;4(48):200-206. (In Russ.) https://doi.org/10.48136/2222-0364_2022_4_200
12. Tishaninov N.P., Anashkin A.V., Emelyanovich S.V. Assessment of the sensitivity of the trier grain cleaning process to operating modes. *Science in Central Russia*. 2024;1(67):23-31. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-23-31>

Author Information

- Nikolay P. Tishaninov**^{1✉}, DSc (Eng), Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Quality Management of Technological Processes in Agriculture; vniitinlab5@mail.ru[✉]
Aleksandr V. Anashkin², DSc (Eng), Head of the Laboratory of Quality Management of Technological Processes in Agriculture; av-anashkin@mail.ru
Sergey V. Emelyanovich³, Junior Research Engineer, Laboratory of Quality Management of Technological Processes in Agriculture; seruvarovo@yandex.ru
^{1,2,3} All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture; 28, Novo-Rubezhny Lane, Tambov, 392022, Russia

Author Contribution

N.P. Tishaninov – conceptualization, general research supervision, resources, critical analysis of the results and formulation of conclusions;
A.V. Anashkin – research methodology, investigation supervision, data curation, visualization, writing – review and editing of the manuscript;
S.V. Emelyanovich – literature review; resources; investigation; data curation and formal analysis.

Conflict of interests

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

Received 11.04.2025; Revised 11.09.2025; Accepted 12.09.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.171:631.363

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-39-46>

Алгоритм расчета параметров процесса сепарации зерна в гравитационном сепараторе

Т.А. Клевцова¹, А.В. Гвоздев², Я.А. Мирошниченко³^{1,2,3} Мелитопольский государственный университет; г. Мелитополь, Россия¹ klevtsoval204@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7319-9266>² gav11gvozdev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1401-8434>³ vj-slim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8399-5979>

Аннотация. В производстве комбикормов для эффективной предварительной очистки зерна нужен компактный сепаратор, отличающийся простотой конструкции и минимальными затратами энергии. Такими характеристиками обладают гравитационные сепараторы. С целью определения оптимальных по эффективности сепарации геометрических параметров щелевого отверстия сепарирующего органа разработали алгоритм расчета процесса сепарации зерна в гравитационном сепараторе на основе системного подхода и математического моделирования. Пришли к выводу о том, что необходимым условием для выделения частицы цилиндрической формы в щелевое отверстие гравитационного сепаратора является превышение критической скорости частиц относительно скорости их схода с предыдущей поверхности сепаратора. Разработали блок-схему и алгоритм расчета параметров процесса сепарации зерна сквозь щелевые отверстия гравитационного сепаратора, моделирующую движение частицы. При заданных условиях разделения и размера частиц представленный алгоритм позволяет определить критическую скорость частицы и проверить выполнение условий ее выделения с учетом случайных воздействий. Провели апробацию алгоритма при варьировании ширины щелевого отверстия и высоты между противоположными кромками разгонных поверхностей. Результаты показали, что отклонение интенсивности выделения и теоретических значений варьируемых параметров гравитационного сепаратора от экспериментальных данных не превышает 9%, что свидетельствует об адекватности моделирования. Применение алгоритма позволяет с достаточной точностью и минимальными затратами проводить полнофакторный эксперимент по определению влияния параметров сепарируемой массы и конструктивно-технологических параметров гравитационного сепаратора на эффективность сепарации.

Ключевые слова: зерно; гравитационный сепаратор; алгоритм расчета параметров процесса сепарации; эффективность сепарации; движение частицы; скорость частицы; щелевое отверстие

Для цитирования: Клевцова Т.А., Гвоздев А.В., Мирошниченко Я.А. Алгоритм расчета параметров процесса сепарации зерна в гравитационном сепараторе // *Агроинженерия*. 2025. Т. 27, № 5. С. 39-46. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-39-46>

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания.

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

ORIGINAL ARTICLE

Algorithm for calculating grain separation parameters in a gravity separator

T.A. Klevtsova¹, A.V. Gvozdev², Ya.A. Miroshnichenko³^{1,2,3} Melitopol State University; Melitopol, Russia¹ klevtsoval204@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7319-9266>² gav11gvozdev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1401-8434>³ vj-slim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8399-5979>

Abstract. Effective grain pre-cleaning in compound feed production demands compact, energy-efficient separators with simple designs, like gravity separators. To optimize the design of these separators, specifically, the slotted opening geometry, to ensure maximum separation efficiency, the authors developed a novel algorithm based on a systematic approach and mathematical modeling of grain separation. The simulations made by the authors revealed that successful passage of a grain particle through the slot requires its velocity relative to the separator

surface to exceed a critical threshold. The authors present a flowchart and algorithm to calculate the key parameters of grain separation, modeling particle flow through the slotted openings. Given specific separation conditions and particle size, this algorithm helps determine the critical velocity and ensure optimal separation, even considering random factors. The algorithm testing, involving variations in slot width and height difference between opposite acceleration surfaces, demonstrated a close match (within 9% deviation) between predicted and experimental separation intensity, validating the model's accuracy. The algorithm provides a powerful, cost-effective tool for exploring the impact of material properties and the gravity separator design on overall separation performance.

Keywords: grain; gravity separator; algorithm for calculating separation parameters; separation efficiency; particle flow; particle velocity; slotted hole

Financing. The work financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the State Assignment.

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

For citation: Klevtsova T.A., Gvozdev A.V., Miroshnichenko Ya.A. Algorithm for calculating grain separation parameters in a gravity separator. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(5):39-46 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-39-46>

Введение

Предварительное (промежуточное) сепарирование зерна позволяет контролировать качество готовых фракций [1-4]. Для реализации этого технологического приема используют различные сепараторы центробежного и вибрационного типов с плоскими и цилиндрическими решетками, а также виброцентрифуги [5-8]. Основными недостатками существующих сепараторов являются их сложная конструкция, высокая стоимость и значительный расход энергии. С экономической точки зрения их применение для предварительной обработки зерна нецелесообразно, особенно для небольших сельскохозяйственных предприятий и фермерских хозяйств. Для оптимизации процесса предварительной очистки зерна в производстве комбикормов требуется компактный сепаратор простой конструкции с низким энергопотреблением и минимальным использованием металла. Такими характеристиками обладают гравитационные сепараторы [9-11].

В процессе сепарации непрерывно подаваемый материал последовательно пропускается через систему элементарных сепараторов (решет, воздушных, клиновидных и щелевых каналов и др.). На каждом из них материал по одному из физико-механических показателей разделяется на две фракции: проход и сход. При этом каждая частица индивидуально (дискретно) как бы оценивается по принадлежности одной из фракций.

При расчете оптимальных геометрических параметров щелевого отверстия сепарирующего органа должно учитываться условие достижения критической скорости центра масс зерновки при столкновении ее со следующей кромкой сепарирующей поверхности [11].

Можно ожидать, что алгоритм расчета параметров процесса сепарации зерна в гравитационном сепараторе поможет подобрать оптимальные значения параметров для эффективного разделения фракций.

Цель исследований: на основе системного подхода и математического моделирования разработать алгоритм расчета процесса сепарации зерна в гравитационном сепараторе для подбора оптимальных (по эффективности сепарации) геометрических параметров щелевого отверстия сепарирующего органа.

Материалы и методы

Расчет параметров процесса гравитационного сепарирования зерна в щелевые отверстия сепарирующего органа базировался на разработанном нами системном подходе к процессу гравитационного сепарирования зерна в щелевые отверстия (рис. 1). Поскольку данный процесс зависит от технологических параметров зерновой массы, положения зерновых частиц в слое и конструктивно-технологических параметров сепарирующего органа, критерии исследуемой системы сепарирования определяли после тщательного анализа исходных данных.

Разрабатывали алгоритм моделирования с использованием подхода «Снизу-вверх». В первую очередь моделировали состояние частиц зерновой массы на сепарирующей поверхности как подсистему с учетом ее функциональной взаимосвязи с другими подсистемами. Затем данную подсистему рассматривали в контексте всей системы (рис. 2).

На основе математического моделирования процесса сепарации зерна через щелевые отверстия гравитационного сепаратора [11, 12] и полученных уравнений движения и сепарации система

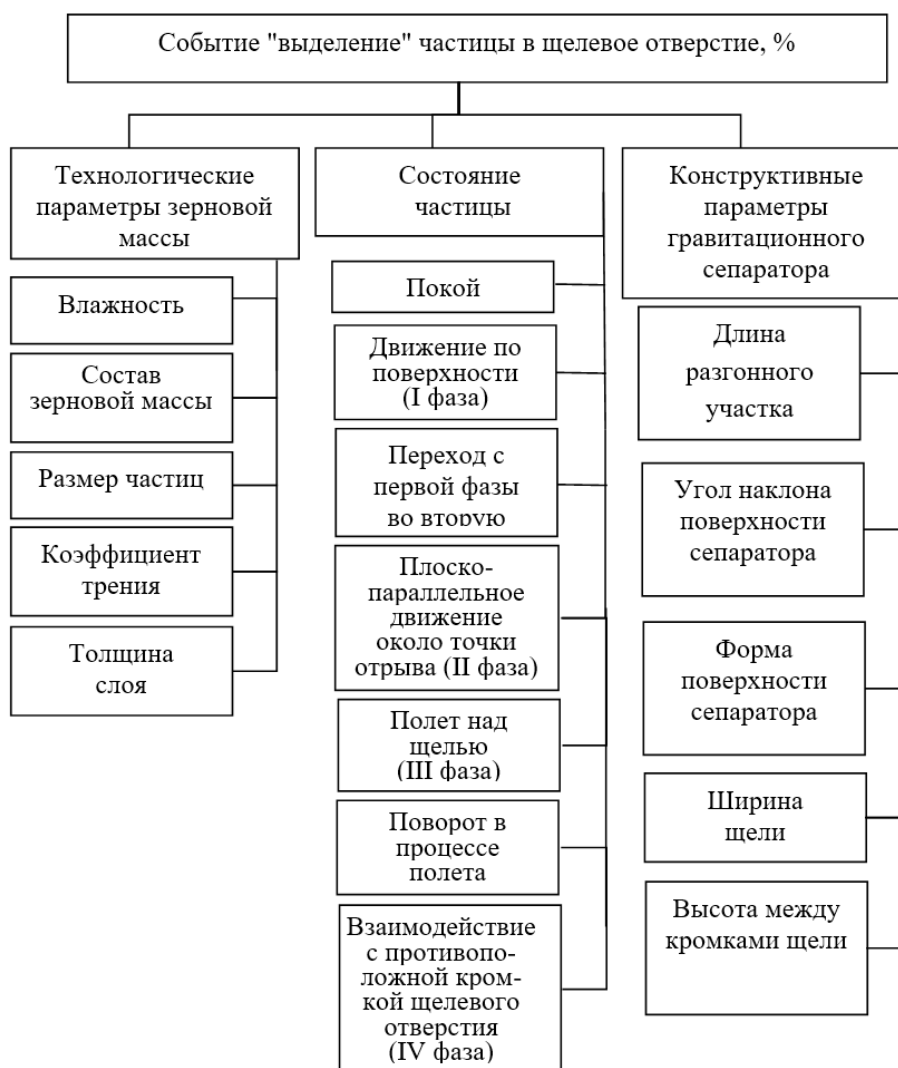


Рис. 1. Схема системы гравитационного сепарирования зерна в щелевые отверстия сепарирующего органа

Fig. 1. Diagram of the system of gravitational separation of grain into the slotted holes of the separating unit

характеризуется шестью взаимосвязанными подсистемами: состоянием покоя, движением, полетом, переходом между различными фазами, вращением частицы во время сепарирования и взаимодействием частицы с противоположной кромкой щелевого отверстия.

Для каждого элемента системы (позиции частицы в каждой фазе и при переходе между фазами) разработали соответствующую расчетную схему и математическую модель.

Результаты и их обсуждение

С учетом ранее полученных теоретических исследований [6, 9, 11, 12] разработали методику, описывающую состояние частицы и ее положение на разгонной поверхности гравитационного сепаратора, и алгоритм расчета прохождения зерна через щелевые отверстия гравитационного сепаратора. При анализе учли тот факт, что четвертое состояние частицы «Переход из предыдущей фазы

в следующую» (рис. 2) имеет преимущество перед состоянием 6 «Взаимодействие частицы с противоположной кромкой щелевого отверстия гравитационного сепаратора» (рис. 3).

При прохождении частицы через гравитационный сепаратор в случае, когда ее центр масс расположен над щелевым отверстием, а край – над противоположной кромкой, возможен контакт частицы с этой кромкой. В результате такого контакта могут произойти два события: выделение частицы в щель сепаратора и сход частицы на следующую поверхность сепаратора. При этом учитывали эффективность взаимодействия частицы с противоположной кромкой щелевого отверстия (рис. 2, 3).

Для обеспечения эффективного выделения цилиндрических частиц через щель гравитационного сепаратора необходимым является выполнение условия, при котором критическая скорость v_k этих частиц превышает скорость их отрыва от предыдущей поверхности сепаратора v_0 , то есть $v_k > v_0$ [12].

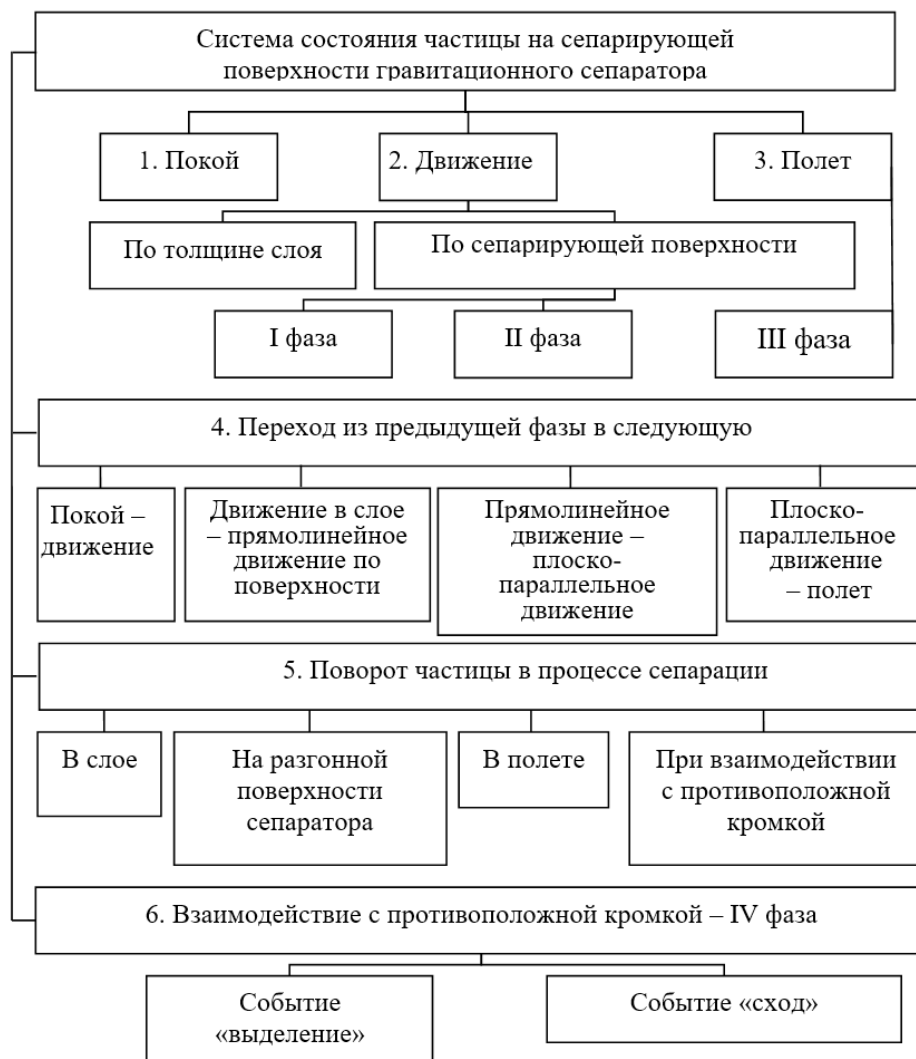


Рис. 2. Схема системы состояния частицы на сепарирующей поверхности гравитационного сепаратора

Fig. 2. Diagram of the particle's position on the separating surface of a gravity separator

В этом случае момент импульса частицы, определяемый скоростью v_0 , будет больше момента импульса, обусловленного ее вращением вокруг центра масс [11]:

$$v_k > \frac{k_v v_0 (L + fr)}{6(H + r)}, \quad (1)$$

где L – ширина щели между противоположными кромками поверхностей гравитационного сепаратора, мм; H – разность по высоте между кромками, мм; f – коэффициент трения скольжения частицы о сепарирующую поверхность; r – размер частицы (радиус), мм; k_v – коэффициент соотношения скоростей v_0 и v_k в зависимости от ширины L щелевого просеивающего отверстия между противоположными кромками поверхностей гравитационного сепаратора; fr – сдвиг точки схода частицы в форме цилиндра с предыдущей сепарирующей поверхности в щелевое отверстие относительно центра масс цилиндра вдоль оси x (рис. 3), мм [12].

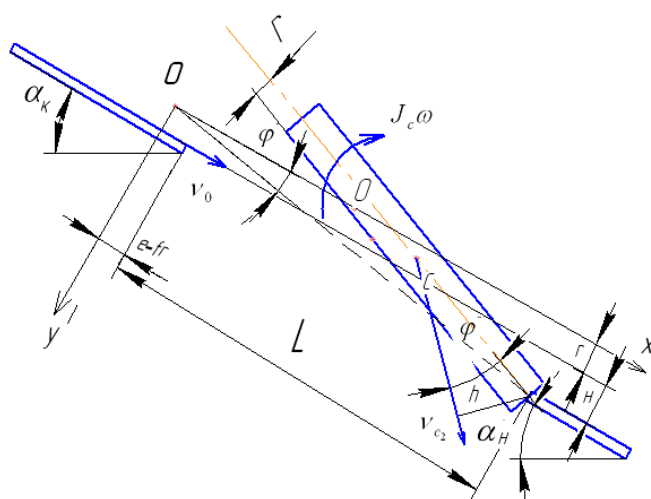


Рис. 3. Схема взаимодействия частицы цилиндрической формы с противоположной кромкой щелевого просеивающего отверстия

Fig. 3. Diagram of interaction of a cylinder-shaped particle with the opposite edge of a slotted screening hole

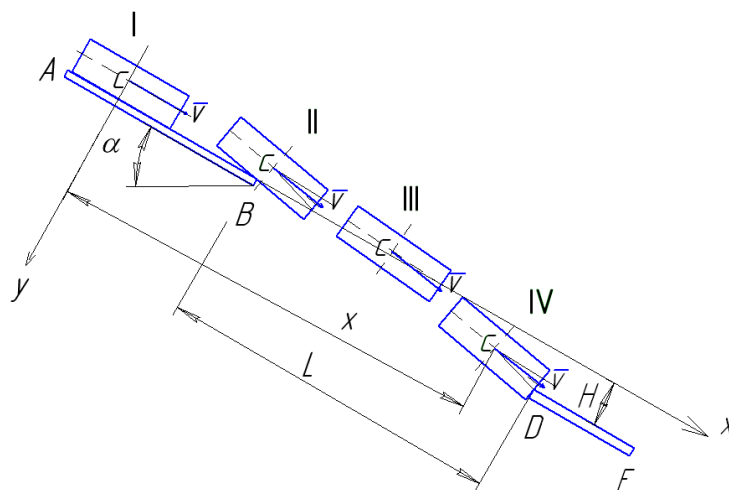


Рис. 4. Схема выделения частицы в форме цилиндра в щелевое сепарирующее отверстие:

- I – скольжение частицы по сепарирующей поверхности;
 II – плоскопараллельное движение частицы относительно точки отрыва;
 III – полет частицы над щелевым отверстием после отрыва ее от сепарирующей поверхности;
 IV – взаимодействие частицы с противоположной кромкой щелевого отверстия

Fig. 4. Diagram of the separation of a cylinder-shaped particle into a slotted separating opening:

- I – sliding of the particle along the separating surface; II – plane-parallel flow of the particle relative to the point of separation;
 III – floating of the particle over the slotted opening, after its separation from the separating surface;
 IV – interaction of the particle with the opposite edge of the slotted opening

Ранее [13] было обосновано оптимальное превышение критической скорости v_k над начальной скоростью v_0 как минимум на 50% для достижения 92% эффективности сепарации, то есть

$$\frac{k_v(L + fr)}{6(H + r)} \geq 1,0 \dots 1,5. \quad (2)$$

Для всех указанных состояний (покой, движение, полет и взаимодействие частицы с противоположной кромкой щели гравитационного сепаратора) разработали расчетные схемы и математические модели, схематично представленные на рисунке 4. Эти модели заложены в основу алгоритма для расчета параметров процесса гравитационного разделения зерна через щелевые отверстия гравитационного сепаратора (рис. 5).

Блок-схема алгоритма (рис. 5) демонстрирует процесс сепарации зерна сквозь щелевые отверстия сепаратора. Перемещение частиц в щелях и переход из одной фазы в другую моделируются с использованием операторов сравнения.

Для любого заданного начального состояния сепарации (рис. 5) решение дифференциальных уравнений движения частицы, учитывающее влияние случайных факторов, позволяет определить ее критическую скорость. Если выполняется условие $v_k > v_0$, то происходит событие «Выделение» для заданного размера частиц [11-13].

При условии равновероятности всех уровней каждого случайного фактора и учета всех

возможных положений частицы с равномерным воздействием соседних частиц достижение 50%-ной достоверности выполнения уравнения (1) является необходимым критерием для полученных интервалов варьирования существенных факторов (ширины щели L , разности высот H , начальной скорости v_0 и размера частицы r), и возможно проведение полнофакторного эксперимента с достаточной точностью.

Алгоритм расчета параметров процесса сепарации зерна сквозь щелевые отверстия гравитационного сепаратора реализуется следующим образом. Согласно блок-схеме (рис. 5) начальные условия сепарирования выбираются или вычисляются с учетом влияния случайных факторов на каждой фазе расчета, выявленных на основе априорной информации, теоретических исследований и моделирования [11, 12].

Проведем расчеты по предложенному алгоритму. Размер компонентов исходного материала принимаем с эквивалентным диаметром $d = 5 \dots 6$ мм, длину разгонного участка сепарирующей поверхности – $S_0 = 0,15 \dots 0,20$ м. Коэффициент трения скольжения частицы о сепарирующую поверхность принимаем равным $f = 0,36$, а угол наклона сепарирующей поверхности – $\alpha = 30^\circ$. При длине разгонного участка сепарирующей поверхности $S_0 = 0,15 \dots 0,20$ м начальная скорость частицы v_0 в момент схода с поверхности кромки сепарирующей поверхности равна $0,55 \dots 0,72$ м/с [11-13].

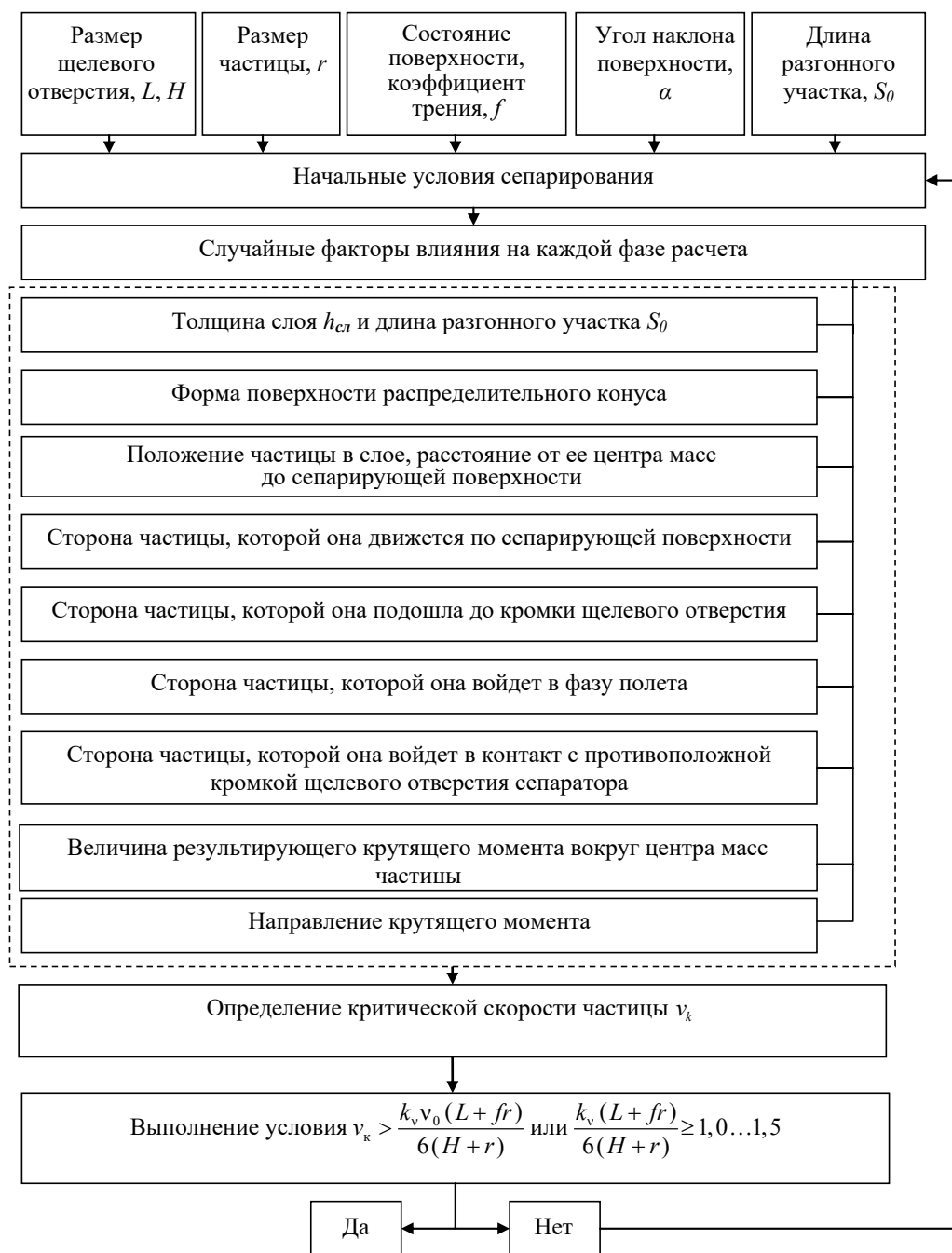


Рис. 5. Блок-схема алгоритма расчета параметров процесса сепарации зерна сквозь щелевые отверстия гравитационного сепаратора

Fig. 5. Block diagram of the algorithm for calculating the parameters of the grain separation process through the slotted holes of a gravity separator

Коэффициент соотношения скоростей v_0 и v_k , зависящий от ширины L щелевого просеивающего отверстия между противоположными кромками поверхностей гравитационного сепаратора, находится в пределах $k_v = 1,03 \dots 1,27$ [11].

Для каждой фракции исходного материала при заданных значениях эквивалентного диаметра d компонентов определили ширину щелевого просеивающего отверстия L между противоположными кромками разгонных поверхностей

брахистохронного свойства (ширина отверстия) по формуле:

$$L = 1,21d^2 - 7,98d + 23,27. \quad (3)$$

Для нашего случая $L = 13 \dots 19$ мм.

Далее определили высоту H между противоположными кромками разгонных поверхностей брахистохронного свойства:

$$H = 0,2L + d(0,1f - 0,5). \quad (4)$$

Для нашего случая $H = 0,5 \dots 1,7$ мм.

Исходя из полученных значений L и H , определили значение критической скорости частицы v_k и сравнили ее с начальной v_0 путем выполнения условия из формулы 2.

Для полученных интервалов значений факторов L и H выполнено условие (2): превышение критической скорости относительно начальной составляет 0,9...1,3, поэтому возможно проведение полнофакторного эксперимента с достаточной точностью.

Экспериментальные исследования, проведенные с варьированием факторов по разработанному алгоритму, показали, что для выделения через щелевое отверстие компонентов исходного материала с эквивалентным диаметром $d = 5...6$ мм при длине разгонного участка сепарирующей поверхности $S_0 = 0,15...0,20$ м и интенсивности выделения 90...92% необходимо обеспечить ширину щели L в диапазоне 12...20 мм и высоту H в диапазоне 1,0...2,0 мм [11, 13].

Отклонение интенсивности выделения и теоретических значений параметров L , H от экспериментальных данных не превышает 9%, что свидетельствует об адекватности моделирования.

Список источников

1. Смышляев А.А., Мерчалов С.В., Оробинский В.И. и др. Совершенствование конструкции сепаратора для промежуточного разделения измельченного зерна в комбикормовом производстве // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 1 (207). С. 113-120. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-207-1-113-120>
2. Петров А.А., Шахов В.А., Наумов Д.В. и др. Повышение производительности дробилки зерна за счет улучшения сепарации // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 3 (89). С. 159-162. EDN: BAFJOJ
3. Морозов Н.М., Кирсанов В.В. Направления развития технического прогресса в механизации и автоматизации животноводства // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы XV Международной научно-практической конференции. М.: Росинформагротех, 2023. С. 29-54. EDN: GPMYKH
4. Клевцова Т.А., Гвоздев А.В. Разработка устройства для предварительной сепарации зерна в дробилке прямого удара // Инновационные направления интеграции науки, образования и производства: Сборник материалов V Международной научно-практической конференции. Керчь: КГМТУ, 2024. С. 10-16. EDN: QZMNVM
5. Васильев А.М., Мачихин С.А., Стрелюхина А.Н., Рындин А.А. Повышение эффективности процессов сепарирования зерновых смесей на рифленной поверхности // Хранение и переработка сельхозсырья. 2018. № 3. С. 98-105. EDN: YVSGYP
6. Фоминых А.В., Мекшун Ю.Н., Лопарев Д.В., Кошкова Н.А. Теоретические исследования движения зерна по решетку, совершающему колебания в своей плоскости // Вестник Курганской ГСХА. 2019. № 3 (31). С. 72-74. EDN: HIBFWZ
7. Попов И.П., Чумаков В.Г., Родионов С.С. и др. Оптимизация мощности решетных зерноочистительных машин // Достижения науки и техники АПК. 2017. Т. 31, № 5. С. 53-56. EDN: ZCPUTN

Выводы

Для обеспечения 92%-ного выделения цилиндрических частиц в щелевые отверстия гравитационного сепаратора необходимо, чтобы критическая скорость этих частиц превышала скорость их отрыва от предыдущей поверхности сепаратора как минимум на 50%.

Представленный алгоритм расчета параметров процесса сепарации зерна сквозь щелевые отверстия в гравитационном сепараторе позволяет с достаточной точностью и минимальными затратами проводить полнофакторный эксперимент по определению влияния параметров сепарируемой массы и конструктивно-технологических параметров гравитационного сепаратора на эффективность сепарации.

Экспериментальные исследования, проведенные с варьированием факторов, полученных с использованием разработанного алгоритма, показали, что отклонение теоретических значений ширины щелевого просеивающего отверстия, высоты между противоположными кромками разгонных поверхностей и интенсивности выделения от экспериментальных данных не превышает 9%, что свидетельствует об адекватности моделирования.

References

1. Smyshlyayev A.A., Merchalov S.V., Orobinskiy V.I. et al. Improvement of separator design for intermediate separation of crushed grain in compound feed production. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022;1:113-120. (In Russ.) <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-207-1-113-120>
2. Petrov A.A., Shakhov V.A., Naumov D.V. et al. Increasing the productivity of the grain crusher due to improved separation. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;3:159-162. (In Russ.) <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-89-3-159-162>
3. Morozov N.M., Kirsanov V.V. Development trends of the technical progress in mechanization and automation of livestock farming. *Nauchno-informatsionnoe obespechenie innovatsionnogo razvitiya APK: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference*. Moscow, Rosinformagrotekh, 2023:29-53. (In Russ.)
4. Klevtsova T.A., Gvozdev A.V. Development of a device for pre-separation of grain in a direct impact crusher. *Innovatsionnye napravleniia integratsii nauki, obrazovaniia i proizvodstva: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference*. Kerch: KGMTU, 2024:10-16. (In Russ.)
5. Vasil'ev A.M., Machihin S.A., Ryndin A.A., Strel'juhina A.N. Improvement of grain mixture separation on corrugated surface. *Storage and Processing of Farm Products*. 2018;3:98-105. (In Russ.)
6. Fominykh A.V., Mekshun Iu.N., Loparev D.V., Koshkova N.A. Theoretical researches of grain motion according to the grille committing oscillations in its plane. *Vestnik Kurganskoi GSKhA*. 2019;3:72-74. (In Russ.)
7. Popov I.P., Chumakov V.G., Rodionov S.S. et al. Optimization of the power of sieve grain cleaners. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2017;31;5:53-56. (In Russ.)

8. Невзоров В.Н., Кох Д.А., Кох Ж.А. и др. Технология сепарации зерна на вибрационной машине // Вестник Красноярского ГАУ. 2018. № 5. С. 198-202. EDN: YQNUXJ

9. Шацкий В.П., Оробинский В.И., Попов А.Е. Моделирование движения зернового потока в гравитационном сепараторе // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2015. № 4. С. 72-79. EDN: VAUAML

10. Гвоздев А.В., Клевцова Т.А., Мирошниченко Я.А. Совершенствование процесса гравитационной сепарации зерна // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы XV Международной научно-практической конференции. М.: Росинформагротех, 2023. С. 117-124. EDN: FMQDMB

11. Гвоздев А.В., Клевцова Т.А., Мирошниченко Я.А. Обоснование процесса гравитационной сепарации зерна методом моделирования // Вестник аграрной науки Дона. 2023. Т. 16, № 4. С. 32-40. EDN: ZDMCNU

12. Шпиганович Т.О. Математичне моделювання сепарації зерна через щільні отвори між розгінними ділянками розподільного конуса // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2011. Вип. 11. Т. 1. С. 256-267. EDN: TCVWDH

13. Шпиганович Т.О., Болтянский Б.В. Номограмный метод анализа результатов многофакторного эксперимента // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2013. Вип. 13. Т. 3. С. 86-91. EDN: SJBAPL

Информация об авторах

¹ Клевцова Татьяна Александровна, канд. техн. наук, заведующий кафедрой технологии и оборудования пищевых производств; klevtsova1204@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-7319-9266>; SPIN-код: 7512-9026

² Гвоздев Александр Викторович, канд. техн. наук, доцент; gav11gvozdev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1401-8434>; SPIN-код: 4472-7859

³ Мирошниченко Ярослав Александрович, аспирант; vj-slim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8399-5979>; SPIN-код: 5543-8174

^{1,2,3} Мелитопольский государственный университет; Российская Федерация, г. Мелитополь, пр. Б. Хмельницкого, 18

Вклад авторов

Т.А. Клевцова – методология, создание черновика рукописи, формальный анализ, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

А.В. Гвоздев – концептуализация, формальный анализ, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

Я.А. Мирошниченко – ресурсы, создание черновика рукописи, проведение исследования.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 27.03.2025, после рецензирования и доработки 07.09.2025; принята к публикации 08.09.2025

8. Nevzorov V.N., Kokh D.A., Kokh Zh.A. et al. The technology of grain separation by vibration car. *Bulletin of KSAU*. 2018;5:198-202. (In Russ.)

9. Shatsky V.P., Orobinsky V.I., Popov A.E. Simulation of grain flow motion in a gravitational separator. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2015;4:72-79. (In Russ.)

10. Gvozdev A.V., Klevtsova T.A., Miroshnichenko Ya.A. Process improvement gravity separation of grain. In: *Nauchno-informatsionnoe obespechenie innovatsionnogo razvitiya APK: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference*. 2023:117-124. (In Russ.)

11. Gvozdev A.V., Klevtsova T.A., Miroshnichenko Ya.A. Substantiation of the process of gravitational grain separation by modeling method. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2023;16;4:32-40. (In Russ.) https://doi.org/10.55618/20756704_2023_16_4_32-40

12. Shpiganovich T.A. Mathematical modeling of the separation of grain by slots between boost sections of the distribution cone. *Pratsi Tavriyskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu = Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University*. 2011;11;1:256-267. (In Ukr.)

13. Shpiganovich T.A., Boltjanskij B.V. Nomogramic method for multifactorial experiment results analysis. *Pratsi Tavriyskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu = Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University*. 2013;13;3:86-91. (In Ukr.)

Author Information

Tatyana A. Klevtsova¹, CSc (Eng); klevtsova1204@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-7319-9266>

Aleksandr V. Gvozdev², CSc(Eng), Associate Professor; gav11gvozdev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1401-8434>

Yaroslav A. Miroshnichenko³, postgraduate student; vj-slim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8399-5979>
^{1,2,3} Melitopol State University; 18 B. Khmeltsky Ave., Melitopol, 722312, Russian Federation

Authors Contribution

T.A. Klevtsova – methodology; writing – original draft preparation; formal analysis; writing – review and editing of the manuscript;

A.V. Gvozdev – conceptualization; formal analysis; writing – review and editing of the manuscript;

Ya.A. Miroshnichenko – resources; writing – original draft preparation; investigation.

Conflict of interests

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

Received 27.03.2025; Revised 07.09.2025; Accepted 08.09.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.22:628.1:636.083.3

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-47-53>

Модернизированная система автопоения на откормочных фермах КРС

Т.Н. Толстоухова¹✉, И.В. Назаров², А.А. Поцелуев³¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия^{2,3} Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ; г. Зерноград, Россия¹ t.tolstouhova@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0003-3095-7316>² niv671@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0482-0842>³ potseluev.a@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7762-2284>

Аннотация. На фермах по откорму крупного рогатого скота система водообеспечения и отдельные ее подсистемы выполняются как по тупиковой, так и по кольцевой схемам. Кольцевая подсистема автопоения обеспечивает более равномерный напор и постоянную температуру воды, однако характеризуется большим расходом материала и затратами на монтаж. Тупиковая подсистема автопоения имеет меньшую протяженность, дешевле в монтаже, но не обеспечивает циркуляцию воды. В холодный период при отсутствии циркуляции воды в тупиковых ее точках возможно охлаждение и даже замерзание воды, приводящее к размораживанию трубопровода, что негативно сказывается на состоянии животных и приводит к снижению их продуктивности. Цель исследований – совершенствование конструкции тупиковых систем автопоения, обеспечение требуемого температурного режима и повышение надежности их работы. Модернизированная система водообеспечения с подсистемой автопоения и регулирующей емкостью разработана на основе метода системного анализа научных данных и технико-технологических решений систем водообеспечения животноводческих ферм и подсистем автопоения крупного рогатого скота. Предлагаемая подсистема автопоения, выполненная по типу «Труба в трубе», обеспечивает периодическую циркуляцию воды, поддерживает температуру в заданных пределах и исключает размораживание подсистемы автопоения. Представлена методика гидравлического расчета по обоснованию глубины вакуума в опорожнителе. Согласно расчетам предлагаемое конструктивно-технологическое решение системы водообеспечения животноводческого объекта с подсистемой автопоения КРС, выполненной по типу «Труба в трубе», позволяет снизить ее себестоимость на 15...20%, повысить надежность работы, обеспечить температуру воды в автопоилках в пределах 12...15°C и снизить стоимость ее монтажа и обслуживания на 10%. Результаты исследований помогут в дальнейшем изготовить модернизированную систему автопоения и исследовать параметры ее работы.

Ключевые слова: система водообеспечения; система автопоения на фермах КРС; подсистема автопоения; тупиковая подсистема автопоения; опорожнитель; внутренний трубопровод; распределительный трубопровод; автопоилки

Для цитирования: Толстоухова Т.Н., Назаров И.В., Поцелуев А.А. Модернизированная система автопоения на откормочных фермах КРС // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 5. С. 47-53. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-47-53>

ORIGINAL ARTICLE

Automatic watering system on cattle fattening farms

T.N. Tolstoukhova¹✉, I.V. Nazarov², A.A. Potseluev³¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia^{2,3} Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of FSBEI HE Don State Agrarian University; Zernograd, Russia¹ t.tolstouhova@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0003-3095-7316>² niv671@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0482-0842>³ potseluev.a@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7762-2284>

Abstract. Cattle fattening farms utilize both dead-end and ring configurations for water supply systems and their individual subsystems. While ring systems provide uniform pressure and consistent water temperature in automatic watering subsystems, they incur higher material and installation costs. Dead-end systems, conversely, are shorter and less expensive but fail to provide water circulation. This absence of circulation in cold weather can lead to water cooling or even freezing at dead ends, potentially causing pipeline damage and negatively impacting livestock health

and productivity. This research aims to improve the design of dead-end automatic watering systems by ensuring a stable temperature mode and enhancing operational reliability. By systematically analyzing scientific data and existing technical solutions for livestock water supply and automatic watering, the authors developed a modernized water supply system featuring an automatic watering subsystem with a regulating tank. This subsystem, designed as a “pipe-in-a-pipe” configuration, enables periodic water circulation, maintains water temperature within specified limits, and prevents thawing. The article presents a hydraulic calculation method for determining the optimal vacuum depth in a humidifier. The calculations indicate that this “pipe-in-a-pipe” design reduces system cost by 15-20%, improves reliability, maintains water temperature in automatic drinkers within 12-15°C, and lowers installation and maintenance expenses by 10%. These results will facilitate the future production of an upgraded automatic watering system and further study of its operational parameters.

Keywords: water supply system; automatic watering system on cattle farms; automatic watering subsystem; dead-end automatic watering subsystem; desiccant; internal pipeline; distribution pipeline; automatic drinkers

For citation: Tolstoukhova T.N., Nazarov I.V., Potseluev A.A. Automatic watering system on cattle fattening farms. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(5):47-53 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-47-53>

Введение

Качественное обеспечение водой технологических процессов обслуживания животных и отдельных технологических операций с учетом нормативных зоотехнических требований [1] и норм технологического проектирования¹ [2] позволяет повысить качество и количество производимой продукции [3]. Технологическое оборудование влияет на качество и себестоимость производимой продукции² [4].

Система водообеспечения, а также отдельные ее подсистемы и структурные элементы оказывают непосредственное влияние на производственные показатели животноводческого объекта и затраты на производство конечной продукции [2, 5].

На животноводческих объектах по откорму крупного рогатого скота используют систему водообеспечения технологических процессов [3, 6] с забором воды из открытых источников воды или резервированием подземных вод в водонапорных башнях.

Процесс водоснабжения животноводческой фермы из открытых источников включает в себя такую последовательность технологических операций: забор воды, ее очистка от механических примесей, отстаивание, обеззараживание, транспортировка к месту потребления, резервирование и распределение по потребителям.

Обеспечение фермы водой из закрытых источников осуществляется посредством забора подземных вод,

транспортировки к месту потребления, накопления и распределения по потребителям. При этом системы водообеспечения могут иметь емкость резервирования воды с водонагревателем (рис. 1) или не иметь ее.

По способу распределения воды по местам ее разбора животными или для выполнения отдельных технологических операций – таких, как поение животных, обработка их кожного покрова, обработка кормов перед скармливанием, системы водообеспечения и отдельные их подсистемы выполняются как по тупиковой (рис. 2), так и по кольцевой схемам (рис. 3).

Достоинствами тупиковой подсистемы автопоения по сравнению с кольцевыми являются простота конструкции, снижение ее металлоемкости

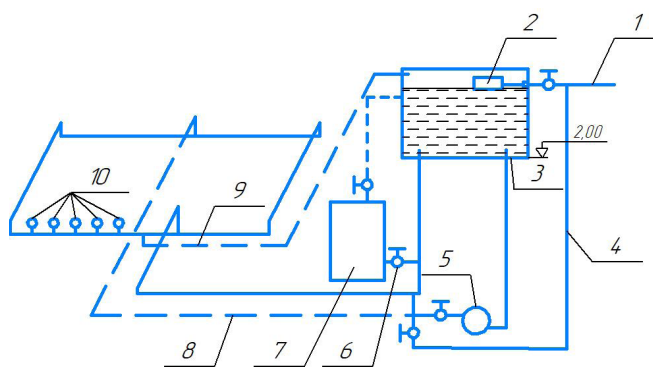


Рис. 1. Схема системы автопоения с накопительной емкостью и подогревом воды:

- 1 – вводной трубопровод;
- 2 – клапанно-поплавковый механизм;
- 3 – накопительная емкость; 4 – обводной трубопровод;
- 5 – центробежный насос; 6 – запорный вентиль;
- 7 – водонагреватель; 8, 9 – циркуляционные водопроводы; 10 – автопоилки

Fig. 1. Diagram of an automatic watering system with a storage tank and water heating:

- 1 – inlet pipeline; 2 – valve-float mechanism;
- 3 – storage tank; 4 – bypass pipeline; 5 – centrifugal pump;
- 6 – shut-off valve; 7 – water heater;
- 8, 9 – circulating water lines; 10 – automatic drinkers

¹ Трухачев В.И., Капустин И.В., Злыднев Н.З., Капустина Е.И. Технологическая модернизация и реконструкция ферм крупного рогатого скота: Монография. Ставрополь: АГРУС Ставропольского государственного аграрного университета, 2017. 336 с.

² Система машин для механизации и автоматизации выполнения процессов при производстве продукции животноводства и птицеводства на период до 2030 года / Н.М. Морозов, П.И. Гриднев, В.И. Сыроватка и др. М.: Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, 2021. 180 с.

и, соответственно, капиталовложений. Однако в зимний период тупиковая подсистема автопоения не обеспечивает равномерность температуры воды по всей длине распределительных трубопроводов, что приводит к заболеваниям животных, снижению их продуктивности. При низких температурах в крайних точках распределительного трубопровода может происходить размораживание, что снижает надежность его работы [7]. Несмотря на этот недостаток, тупиковая схема подсистемы автопоения очень распространена.

Кольцевая подсистема автопоения обеспечивает циркуляцию воды, исключая ее замерзание, создает более равномерный напор воды по всей длине магистрали, снижая вероятность гидравлического удара [8-10]. Однако в сравнении с тупиковыми системами водообеспечения кольцевые системы дороже в изготовлении и монтаже.

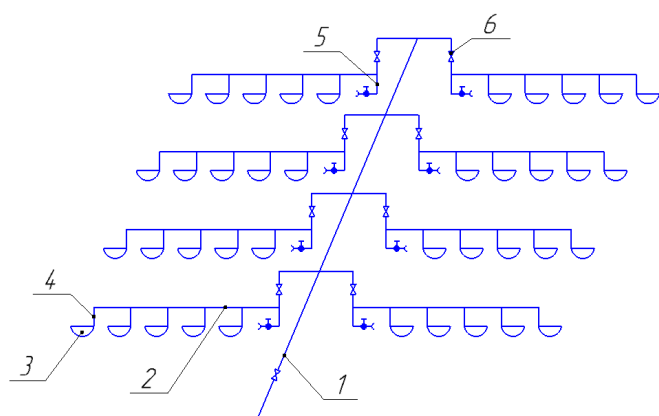


Рис. 2. Схема подсистемы автопоения с тупиковыми распределительными водопроводами:

1 – магистральный трубопровод; 2 – распределительный трубопровод; 3 – автопоилка; 4 – отвод; 5 – поливочный кран; 6 – запорный вентиль

Fig. 2. Diagram of the automatic watering subsystem with dead-end distribution water pipes:

1 – main pipeline; 2 – distribution pipeline; 3 – automatic drinker; 4 – outlet; 5 – irrigation faucet; 6 – shut-off valve

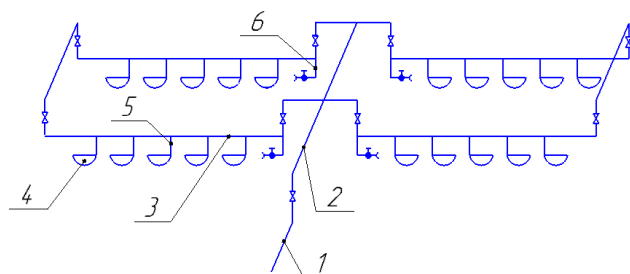


Рис. 3. Схема кольцевой подсистемы автопоения:

1 – ввод; 2 – магистральный трубопровод; 3 – распределительный трубопровод; 4 – автопоилка; 5 – отвод; 6 – поливочный кран

Fig. 3. Diagram of the ring subsystem of automatic watering:

1 – input; 2 – main pipeline; 3 – distribution pipeline; 4 – automatic watering bowl; 5 – branch; 6 – watering tap

Можем предположить, что тупиковая подсистема автопоения КРС, выполненная по типу «Труба в трубе», позволит обеспечить циркуляцию воды и поддержание равномерности ее температуры по всей длине трубопровода.

Цель исследований: совершенствование конструкции тупиковых подсистем автопоения, обеспечение требуемого температурного режима и повышение надежности их работы.

Материалы и методы

В качестве основы для проведенных исследований применили метод системного анализа научных данных [3, 5-7] и технико-технологических решений систем водообеспечения животноводческих ферм и подсистем автопоения крупного рогатого скота [7]. Уровень потребления воды коровами исследован ранее в работах [6, 8].

В подсистеме автопоения с тупиковыми распределительными водопроводами от главной магистрали отходят отдельные, не связанные между собой распределительные трубопроводы, вода в которых движется в одном направлении (рис. 2). Кольцевая подсистема автопоения состоит из магистрального трубопровода и одного или нескольких замкнутых распределительных колец для обеспечения циркуляции воды (рис. 3).

Усовершенствованная подсистема автопоения КРС на откорме разработана нами на основе анализа достоинств и недостатков существующих подсистем автопоения.

Результаты и их обсуждение

С целью устранения недостатков рассмотренных подсистем автопоения [9] предложили усовершенствованную систему водообеспечения животноводческого объекта с подсистемой автопоения, выполненной по тупиковой схеме с обеспечением циркуляции воды и поддержанием равномерности ее температуры по всей длине трубопроводов (рис. 4). Базовыми элементами предлагаемого технико-технологического решения системы водообеспечения являются водонапорная башня, подающий трубопровод, узел фильтрации воды, линия ввода воды в животноводческое помещение, бак-накопитель, магистральный и распределительные трубопроводы с комплектом автопоилок. Для обеспечения обратной циркуляции воды и возврата ее в бак-накопитель внутри распределительных трубопроводов установлены внутренние трубопроводы с перфорацией на конце. В торцах распределительных трубопроводов устанавливаются термодатчики, управляемые электромагнитным клапаном, смонтированным на входе в опорожнитель. Бак-накопитель воды одновременно может являться составной частью подсистем,

обслуживающих отдельные технологические процессы и операции (рис. 4). При обслуживании нескольких технологических операций бак изготавливается многосекционным.

Предлагаемая конструкция подсистемы автопоения обладает достоинствами как тупиковых, так и кольцевых систем. Она работает следующим образом. Из водонапорной башни 1 вода поступает в узел фильтрации 3 и далее, по подающему трубопроводу 4 через клапанно-поплавковый механизм 6, подается в бак-накопитель 22. Поплавок клапанно-поплавкового механизма через шток заблокирован с мембранным вакуумным насосом, который откачивает воздух из опорожнителя 9. Работа мембранного вакуумного насоса осуществляется в период подъема и опускания поплавкового клапана. Из бака-накопителя вода по магистральному трубопроводу 20 поступает в распределительные трубопроводы подсистемы автопоения, и далее – к автопоилкам. При снижении температуры воды ниже установленных значений (менее 8°C [9]) срабатывают термодатчики 23, установленные в торцах распределительных трубопроводов,

и подают сигнал на электромагнитный клапан 25 опорожнителя, открывающийся за счет созданного в опорожнителе разрежения. Тогда вода через отверстия поступает во внутренний трубопровод 24, и далее – в обратный 11, по которому подается в опорожнитель. Когда вес воды, накопленной в опорожнителе, превышает усилие закрытия его крышки, то она открывается, и вода поступает в бак-накопитель. Таким образом, осуществляется циркуляция воды в подсистеме автопоения и исключается снижение ее температуры ниже заданных параметров.

Если глубины вакуума, создаваемого мембранным насосом, в опорожнителе недостаточно, то опорожнитель подключают к ресиверу системы вакуумирования коровника, в которой вакуум создается либо вакуумным насосом, либо имеющейся в нем системой вентиляции.

С целью обеспечения циркуляции воды в предлагаемой конструкции подсистемы автопоения определим требуемую глубину вакуума, создаваемого в опорожнителе. Расчетная схема рассматриваемой подсистемы автопоения представлена на рисунке 5.

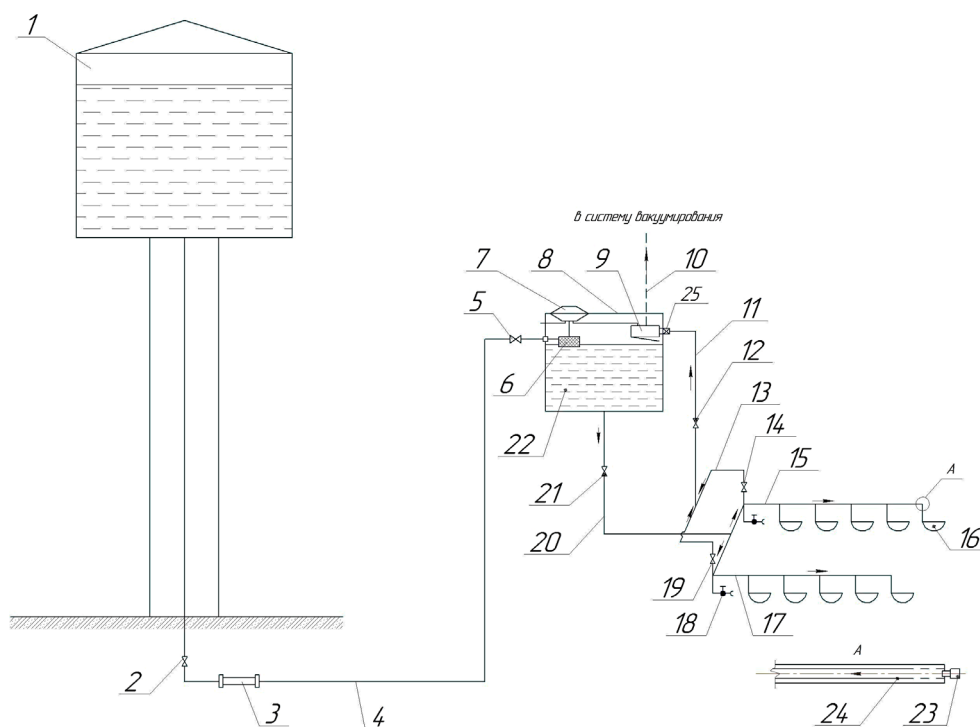


Рис. 4. Усовершенствованная подсистема автопоения КРС на откорме:

- 1 – водонапорная башня; 2, 5, 12, 14, 19, 21 – вентили; 3 – фильтр; 4 – подающий трубопровод;
6 – клапанно-поплавковый механизм; 7 – мембранный вакуумный насос; 8 – крышка бака-накопителя;
9 – опорожнитель; 10 – вакуумпровод; 11, 13 – обратные трубопроводы; 15, 17 – распределительные трубопроводы;
16 – автопоилки; 18 – поливочный кран; 20 – магистральный трубопровод; 22 – бак-накопитель;
23 – термодатчик; 24 – внутренний трубопровод, 25 – электромагнитный клапан

Fig. 4. Diagram of the improved subsystem of automatic watering for fattened cattle:

- 1 – water tower; 2, 5, 12, 14, 19, 21 – valves; 3 – filter; 4 – feed pipeline; 6 – valve-float mechanism;
7 – diaphragm vacuum pump; 8 – storage tank cover; 9 – drainer; 10 – vacuum line; 11, 13 – return pipelines;
15, 17 – distribution pipelines; 16 – automatic drinkers; 18 – watering tap; 20 – main pipeline;
22 – storage tank; 23 – temperature sensor; 24 – internal pipeline, 25 – solenoid valve

Глубина вакуума в опорожнителе ($P_{он}$, Па), необходимая для создания циркуляционного давления в подсистеме автопоения, может быть определена по формуле [11]:

$$P_{он} = P_{ц} + \sum P_l + \sum P_m, \quad (1)$$

где $P_{ц}$ – циркуляционное давление воды, Па; P_l – потери давления по длине циркуляционных трубопроводов, Па; P_m – потери напора от местных сопротивлений, Па.

Рассмотрим давление воды в подсистеме автопоения справа от сечения 1-1 ($P_{пр}$, Па):

$$P_{пр} = P_a + h_2 \cdot g \cdot \rho_o + h_3 \cdot g \cdot \rho_o = P_a + (h_2 + h_3) \cdot g \cdot \rho_o, \quad (2)$$

где P_a – атмосферное давление, Па; h_2 – высота столба воды между расчетными точками 4 и 6, м; g – ускорение силы тяжести, м/с²; ρ_o – плотность охлажденной воды, °С; h_3 – высота столба воды между расчетными точками 8 и 9, м.

Давление слева от сечения 1-1 ($P_{лев}$, Па) определяется по формуле:

$$P_{лев} = P_a + h_4 \cdot g \cdot \rho_n + h_1 \cdot g \cdot \rho_n = P_a + (h_1 + h_4) \cdot g \cdot \rho_n, \quad (3)$$

где h_1 – высота столба воды между расчетными точками 1 и 2, м; ρ_n – плотность воды в баке-накопителе, °С; h_4 – высота столба воды в баке-накопителе, м.

Разность давлений в подсистеме автопоения, обеспечивающая циркуляционный напор ($P_{ц}$, Па), будет равна

$$P_{ц} = P_{пр} - P_{лев} = P_a + (h_2 + h_3) \cdot g \cdot \rho_o - P_a + (h_1 + h_4) \cdot g \cdot \rho_n, \quad (4)$$

Преобразовав уравнение (4), получим

$$P_{ц} = (h_2 + h_3) \cdot g \cdot \rho_o - (h_1 + h_4) \cdot g \cdot \rho_n = g \cdot (\rho_n - \rho_o) \cdot (h_2 + h_3 - h_1 - h_4). \quad (5)$$

При циркуляции возникают потери напора по длине трубопроводов и от местных сопротивлений [11].

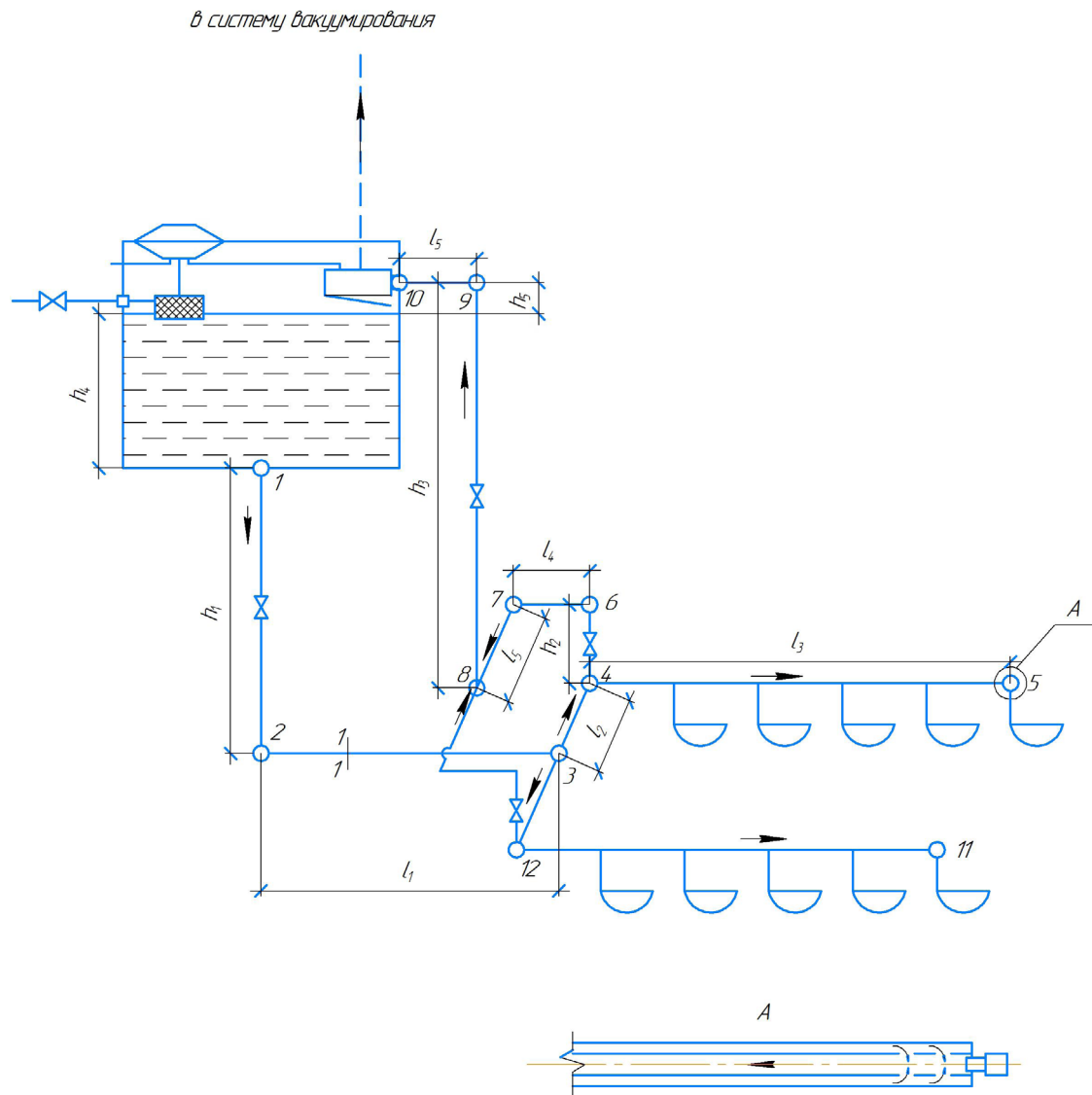


Рис. 5. Расчетная схема усовершенствованной подсистемы поения КРС на откорме

Fig. 5. Design model of the improved watering subsystem for fattened cattle

Потери напора по длине циркуляционных трубопроводов (P_p , Па) определим по формуле:

$$P_l = \lambda_b \cdot \frac{l_b}{d_b} \cdot \frac{\rho_0 \cdot v_b^2}{2} + \lambda_n \cdot \frac{l_n}{d_n} \cdot \frac{\rho_n \cdot v_n^2}{2}, \quad (6)$$

где λ_b – коэффициент гидравлического сопротивления внутреннего трубопровода; l_b – длина внутреннего трубопровода, м; d_b – диаметр внутреннего трубопровода, м; v_b – скорость движения воды во внутреннем трубопроводе, м/с; λ_n – коэффициент гидравлического сопротивления наружного трубопровода; l_n – длина наружного трубопровода, м; d_n – диаметр наружного трубопровода, м; v_n – скорость движения воды в наружном трубопроводе, м/с.

Потери напора в местных сопротивлениях (P_m , Па) будут равны

$$P_m = \sum \zeta_b \cdot \frac{\rho_0 \cdot v_b^2}{2} + (\sum \zeta_n + \zeta_{\text{п}}) \cdot n_{\text{п}} \cdot \frac{\rho_n \cdot v_n^2}{2}, \quad (7)$$

где ζ_b – коэффициент местных сопротивлений во внутреннем трубопроводе; ζ_n – коэффициент местных сопротивлений в наружном трубопроводе; $\zeta_{\text{п}}$ – коэффициент местных сопротивлений в месте подключения автопоилок; $n_{\text{п}}$ – число установленных в подсистеме автопоения автопоилок, шт.

Преобразовав уравнения 5, 6 и 7, получим уравнение, позволяющее определить необходимую глубину вакуума в опорожнителе:

$$P_{\text{оп}} = h_s \cdot g \cdot (\rho_{\text{п}} - \rho_0) + \lambda_b \cdot \frac{l_b}{d_b} \cdot \frac{\rho_0 \cdot v_b^2}{2} + \lambda_n \cdot \frac{l_n}{d_n} \cdot \frac{\rho_n \cdot v_n^2}{2} + \sum \zeta_b \cdot \frac{\rho_0 \cdot v_b^2}{2} + (\sum \zeta_n + \zeta_{\text{п}}) \cdot n_{\text{п}} \cdot \frac{\rho_n \cdot v_n^2}{2}. \quad (8)$$

Список источников

1. Макконахи Х., Мортенсен Т. Обеспечение чистой водой улучшает продуктивность молочного скота // Животноводство России. 2021. № 9. С. 42-44. EDN: IJDBRS
2. Vtoryi V., Vtoryi S., Gordeev V. et al. Effect of water temperature in drinkers and their location on water intake by cows. Engineering for Rural Development: 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, ERD2021-Proceedings. 2021;20:379-385. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF079>
3. Ковалев С.В., Гордеев В.В., Миронова Т.Ю. Анализ водопользования на фермах КРС // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 2 (115). С. 108-123. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-2115-108-122>
4. Скоркин В.К., Гаджиев А.М., Аксенова В.П. Совершенствование технологий производства молока на молочных фермах с поголовьем 200-400 голов // Техника и технологии в животноводстве. 2022. № 4 (48). С. 4-9. <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-4-4>
5. Вторый В.Ф., Вторый С.В., Ильин Р.М. Оценка влияния основных факторов на водопотребление дойных коров // Агро-ЭкоИнженерия. 2021. № 2 (107). С. 106-115. EDN: YOTKON
6. Гордеев В.В., Гордеева Т.И., Миронова Т.Ю., Ковалев С.В. Алгоритм расчета расхода воды

Полученная зависимость позволяет обосновать глубину вакуума, создаваемого в опорожнителе, обеспечивающую циркуляцию воды в подсистеме автопоения при снижении температуры воды в ней ниже заданных значений.

В дальнейшем планируется изготовить модернизированную подсистему автопоения и исследовать параметры и режимы ее работы.

Выводы

1. Основными недостатками тупиковых систем автопоения являются неравномерность температуры воды по длине трубопровода и возможность их размораживания при низких температурах воздуха, что приводит к заболеваниям животных, снижению их продуктивности, а также к росту затрат на ремонт и восстановление работоспособности системы автопоения при выходе ее из строя.

2. Основным недостатком кольцевых систем автопоения является высокая их металлоемкость по сравнению с тупиковыми системами.

3. Как показывают результаты расчетов, предлагаемое конструктивно-технологическое решение системы водообеспечения животноводческого объекта с подсистемой автопоения КРС, выполненной по типу «Труба в трубе», позволяет снизить ее себестоимость на 15...20%, повысить надежность работы, обеспечить температуру воды в автопоилках в пределах 12...15°C и снизить стоимость ее монтажа и обслуживания на 10%.

References

1. Mcconaughey H., Mortensen T. Provision of clean water improves performance of dairy cattle. *Zhivotnovodstvo Rossii*. 2021;9:42-44. (In Russ.)
2. Vtoryi V., Vtoryi S., Gordeev V. et al. Effect of water temperature in drinkers and their location on water intake by cows. Engineering for Rural Development: 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, ERD2021 – Proceedings. 2021;20:379-385. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF079>
3. Kovalev S.V., Gordeev V.V., Mironova T.Ju. Analysis of water use on cattle farms. *AgroEkoInzheneriya*. 2023;2:108-123. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-2115-108-122>
4. Skorkin V.K., Gadzhiev A.M., Akseanova V.P. Improvement of milk production's technologies on 200-400 cows dairy farms. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2022;4(48):4-9. (In Russ.) <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-4-4>
5. Vtoryi V.F., Vtoryi S.V., Ilyn R.M. Assessment of main factors effect on water consumption of milking cows. *AgroEkoInzheneriya*. 2021;2:106-115. (In Russ.)
6. 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. *Agricultural Science*

на молочной ферме КРС с привязным и беспривязным 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>

7. Нигматов Л.Г., Медведев В.Е., Бибарсов В.Ю. Совершенствование конструкции групповой автоматической поилки для крупного рогатого скота // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 2 (148). С. 144-150. EDN: XWEQNB

8. Vtoryi V., Vtoryi S., Gordeev V. et al. Water consumption for cow watering under loose housing system. Engineering for Rural Development: 19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, Proceedings. 2020;19:518-524. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF118>

9. Поцелуев А.А., Назаров И.В., Толстоухова Т.Н. Система водо- и теплообеспечения процесса автопоения КРС на откорме ресурсосберегающей направленности // Вестник аграрной науки Дона. 2019. № 4 (48). С. 55-62. EDN: FTEZSS

10. Катков А.А., Лукманов Р.Л., Ковалев П.В. Обоснование параметров устройства для поения коров подогретой водой // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 4 (44). С. 26-30. EDN: YTSMFN

11. Поцелуев А.А., Назаров И.В., Толстоухова Т.Н. Циркуляционное давление в ресурсосберегающей системе автопоения животных // Современная техника и технологии. 2017. № 4 (68). С. 49-55. EDN: YNEFDF

Информация об авторах

¹ Толстоухова Татьяна Николаевна, канд. техн. наук, доцент, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; t.tolstouhova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3095-7316>; SPIN-код: 7579-2083

² Назаров Игорь Васильевич, канд. техн. наук, доцент, Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донского государственного аграрного университета в г. Зернограде; 347740, Российская Федерация, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Ленина, 21; niv671@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0482-0842>; SPIN-код: 5102-6333

³ Поцелуев Александр Александрович, д-р техн. наук, профессор, Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донского государственного аграрного университета в г. Зернограде; 347740, Российская Федерация, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Ленина, 21; potseluev.a@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7762-2284>, SPIN-код: 4427-0935

Вклад авторов

Т.Н. Толстоухова – методология, верификация данных, проведение исследований, создание черновика рукописи; И.В. Назаров – методология, верификация данных, проведение исследований, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; А.А. Поцелуев – концептуализация, методология, создание черновика рукописи, руководство исследованиями.

Конфликт интересов

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

Статья поступила в редакцию 08.04.2025; поступила после рецензирования и доработки 11.07.2025; принята к публикации 17.07.2025

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

7. Nigmatov L.G., Medvedev V.E., Bibarsov V.Ju. Improving the design of group automatic cattle drinker. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017;2(148):144-150. (In Russ.)

8. Vtoryi V., Vtoryi S., Gordeev V. et al. Water consumption for cow watering under loose housing system. Engineering for Rural Development: 19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, Proceedings. 2020;19:518-524. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF118>

9. Potseluev A.A., Nazarov I.V., Tolstoukhova T.N. Resource-efficient water and heating system for automatic watering of fattened cattle. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2019;4(48):55-62. (In Russ.)

10. Katkov A.A., Lukmanov R.L., Kovalev P.V. Parameter justification of a device for giving heated water to cows. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2018;4(44):26-30. (In Russ.)

11. Potseluyev A.A., Nazarov I.V., Tolstoukhova T.N. Circulating pressure in resource-saving system avtopoeniya animals. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii*. 2017;4(68):49-55. (In Russ.)

Authors Information

Tatiana N. Tolstoukhova¹, CSc (Eng), Associate Professor; Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation, Timiryazevskaya Str., 49; t.tolstouhova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3095-7316>

Igor V. Nazarov², CSc (Eng), Associate Professor; Azov-Black Sea Engineering Institute – Branch of Don State Agrarian University in Zernograd, Rostov region, Zernograd, Russia; niv671@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0482-0842>

Aleksandr A. Potseluev³, DSc (Eng), Professor; Azov-Black Sea Engineering Institute – Branch of Don State Agrarian University in Zernograd, Rostov region, Zernograd, Russia; potseluev.a@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7762-2284>

Author Contribution

T.N. Tolstoukhova – methodology; data verification; investigation; writing – original draft preparation; I.V. Nazarov – methodology; data verification; investigation; writing – manuscript review and editing; A.A. Potseluev – conceptualization; methodology, writing – original draft preparation; research supervision

Conflict of interests

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

Received 08.04.2025; Revised 11.07.2025; Accepted 17.07.2025

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.7.024:62-2

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-54-60>



Интенсификация процесса погружной очистки деталей ультразвуковыми колебаниями

В.М. Корнеев^{1✉}, Д.И. Петровский², Н.В. Корнеев³

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

³ 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 swy16@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8405-1195>

Аннотация. Интенсификация процесса погружной очистки деталей зависит от физико-химической активности моющей жидкости и силы механического воздействия жидкости на очищаемую поверхность. Перспективным способом интенсификации погружной очистки является создание в потоке моющей жидкости ультразвуковых колебаний. Исследования проведены с целью обоснования целесообразности применения ультразвука для интенсификации процесса погружной очистки деталей и определения оптимальных значений параметров технологического режима процесса интенсифицированной очистки. Очистку проводили в погружной моечной машине, представляющей собой ванну с вращающейся в моющем растворе корзиной, оснащенной двумя погружными источниками ультразвука, закрепленными на ее стенках. В качестве объекта очистки использовали сетчатые фильтрующие элементы гидравлических систем, имеющие на рабочей поверхности масляно-грязевые загрязнения. Для очистки фильтрующих элементов применяли водный раствор технического моющего средства Лабомид-203. Экспериментальные исследования влияния параметров и режимов процесса очистки на его эффективность проводили при температуре моющего раствора 40, 50, 60 и 70°C, концентрации моющего средства в растворе 5, 10, 15 и 20 г/л, продолжительности очистки 2, 4, 6, 8, 10, 12 и 14 мин, частоте ультразвуковых колебаний 15, 20, 25, 30 и 35 кГц, интенсивности ультразвуковых колебаний 1, 2, 3 и 4 Вт/см². Качество очистки фильтрующих элементов от загрязнений оценивали весовым методом. Экспериментально определили оптимальные значения параметров технологического режима процесса интенсифицированной очистки фильтрующих элементов: частота колебаний – 30 кГц, интенсивность колебаний – 3 Вт/см², концентрация моющего средства в растворе – 14...17 г/л, температура моющего раствора – 50...55°C, продолжительность очистки – 10 мин. Нами подтверждена целесообразность применения ультразвука для активации моющей жидкости при интенсификации погружной очистки.

Ключевые слова: интенсификация процесса погружной очистки; загрязнения; ультразвук; частота колебаний; интенсивность колебаний; концентрация моющего средства; температура моющего раствора; продолжительность очистки; эффективность очистки

Для цитирования: 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>

ORIGINAL ARTICLE

Intensification of submersion cleaning of parts using ultrasonic oscillations

V.M. Korneev¹✉, D.I. Petrovsky², N.V. Korneev³^{1,2} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia³ Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia¹ tsmo@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8945-9875>² petrovsky@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8162-1789>³ swy16@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8405-1195>

Abstract. The intensification of the submersion cleaning process of parts depends on the physicochemical activity of the cleaning fluid and the mechanical force of the fluid's impact on the surface being cleaned. A promising method for intensifying submersion cleaning is to produce ultrasonic oscillations in the flow of cleaning fluid. The authors conducted research to justify the feasibility of using ultrasound to intensify the submersion cleaning process of parts and to determine the optimal values of the technological parameters of the intensified process. The cleaning process was carried out in a submersion washing machine, which is a tank with a basket rotating in the cleaning solution, equipped with two submersion-type ultrasound sources attached to its walls. Mesh filtering elements of hydraulic systems, having oil-and-dirt contamination on their working surface, were used as the cleaning object. An aqueous solution of the technical detergent Labomid-203 was used to clean the filtering elements. Experimental studies were carried out at the following parameters: cleaning solution temperature of 40, 50, 60 and 70°C; detergent concentration in the solution of 5, 10, 15 and 20 g/l; cleaning duration of 2, 4, 6, 8, 10, 12 and 14 min; ultrasonic oscillation frequency of 15, 20, 25, 30 and 35 kHz, and ultrasonic oscillation intensity of 1, 2, 3 and 4 W/cm². To assess the cleaning quality of the filtering elements from contamination, use was made of a weighing method. The optimal values of the technological parameters of the intensified cleaning of filtering elements were experimentally determined: oscillation frequency – 30 kHz, oscillation intensity – 3 W/cm², detergent concentration in the solution – 14 to 17 g/l, cleaning solution temperature – 50 to 55°C, cleaning duration – 10 min. The study confirmed the feasibility of using ultrasound to activate the cleaning fluid when intensifying submersion cleaning.

Keywords: intensification of submersion cleaning; contamination; ultrasound; oscillation frequency; oscillation intensity; detergent concentration; cleaning solution temperature; cleaning duration; cleaning effectiveness

For citation: 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>

Введение

Анализ способов очистки показал, что для удаления прочно связанных загрязнений с поверхностями деталей со сложной конфигурацией рекомендуется использовать ультразвуковую очистку. Сущность этого способа очистки заключается в механическом воздействии на загрязненную поверхность деталей кавитационных пузырьков, образующихся в моющей жидкости под действием ультразвуковых колебаний. При схлопывании кавитационных пузырьков возникают ударные волны, под действием которых загрязнения разрушаются, а затем и удаляются непрерывным потоком жидкости [1, 2].

Процесс ультразвуковой очистки обусловлен рядом явлений, возникающих в моющей среде: акустической кавитацией, акустическими течениями, звуковым давлением и звукокапиллярным эффектом. Перечисленные явления в свою очередь определяются такими контролируемыми в процессе очистки параметрами ультразвукового поля, как частота

колебаний, интенсивность ультразвуковых колебаний и статическое давление [3, 4].

В настоящее время ультразвуковая очистка широко применяется во многих отраслях промышленности. Однако в ремонтном производстве ее применение ограничивается недостаточной изученностью воздействующих факторов и отсутствием критериев обоснованного выбора оптимальных режимов и параметров процесса [5, 6].

Практика показывает, что выбор параметров ультразвукового поля определяется видом и свойствами загрязнения. Так, слабо связанные с поверхностью загрязнения удаляются под воздействием пульсирующих (несхлопывающихся) кавитационных пузырьков и акустических течений. И наоборот, прочно связанные с поверхностью загрязнения удаляются под действием кавитационной эрозии в результате микроударного воздействия схлопывающихся кавитационных пузырьков. Эффективность ультразвуковой очистки повышается при оптимальном соотношении

между параметрами ультразвукового поля. Таким образом, исследование погружной очистки при интенсификации процесса ультразвуковыми колебаниями имеет научную и практическую направленность [7, 8].

Цель исследований: обоснование целесообразности применения ультразвука для интенсификации процесса погружной очистки деталей; определение оптимальных значений параметров технологического режима процесса интенсифицированной очистки.

Материалы и методы

Теоретические исследования по обоснованию возможности интенсификации процесса погружной очистки созданием в моющей жидкости ультразвуковых колебаний основывались на работах в области акустической кавитации.

Для изучения влияния кавитационных явлений на эффективность удаления загрязнений использовалась погружная моечная машина, реализующая воздействие ультразвука на моющую жидкость (рис. 1).

Принцип работы экспериментальной установки для исследования процесса интенсифицированной очистки заключается в следующем. Объекты, подлежащие очистке, закрепляют в сетчатой корзине в вертикальном положении. Корзина вращается в моющем растворе относительно двух ультразвуковых излучателей, закрепленных на стенках ванны. При этом турбулентному потоку моющей жидкости сообщается дополнительная энергия в виде ультразвуковых

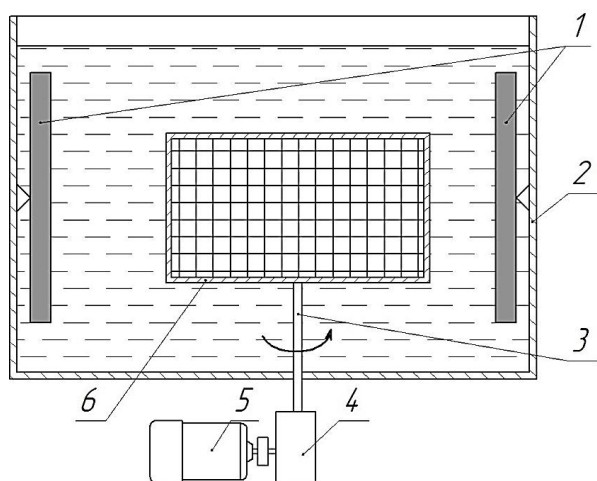


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – ультразвуковые излучатели погружного типа;
- 2 – ванна с моющей жидкостью; 3 – ось;
- 4 – редуктор; 5 – электродвигатель; 6 – корзина сетчатая

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental installation:

- 1 – submersion-type ultrasonic emitters;
- 2 – tank with cleaning fluid; 3 – axis; 4 – gearbox;
- 5 – electric motor; 6 – mesh basket

колебаний, вызывающих кавитационные явления, сопровождающиеся значительным местным повышением давления и температуры жидкости. Таким образом, создаются наиболее эффективные условия для взаимодействия моющей жидкости с частицами загрязнений: ультразвуковые колебания способствуют эффективному отрыву частиц загрязнений, а поток моющей жидкости – их удалению.

Для генерирования высокочастотных ультразвуковых колебаний в ванне с моющей жидкостью использовали модуль ПСБ-150×150.50-35, состоящий из излучателя 1 и генератора 3 (рис. 2).

Объектом очистки являлись сетчатые фильтрующие элементы гидравлических систем, имеющие на металлической поверхности масляно-грязевые загрязнения. Количество очищенных фильтрующих элементов – 480 шт.

Для удаления масляно-грязевых загрязнений в погружной машине применяли водный раствор технического моющего средства Лабомид-203 на основе синтетических поверхностно-активных веществ.

Эксперименты проводили при температуре моющего раствора 40, 50, 60 и 70°C, концентрации моющего средства в растворе 5, 10, 15 и 20 г/л, продолжительности очистки 2, 4, 6, 8, 10, 12 и 14 мин, частоте ультразвуковых колебаний 15, 20, 25, 30 и 35 кГц, интенсивности ультразвуковых колебаний 1, 2, 3 и 4 Вт/см².

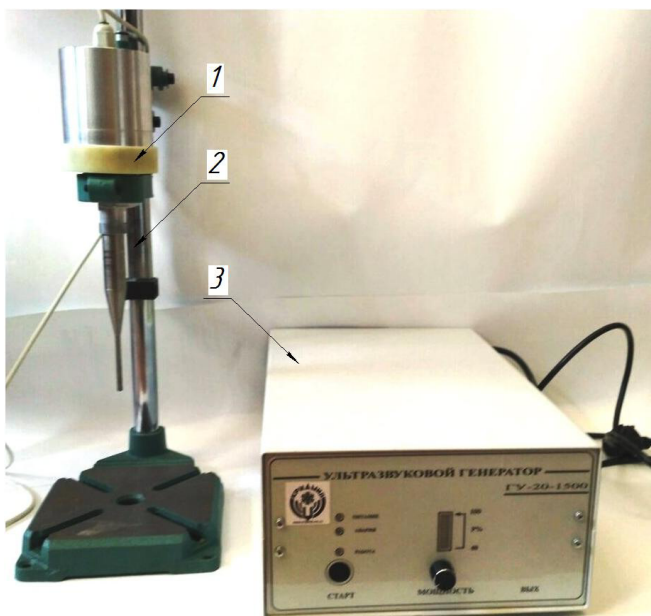


Рис. 2. Схема погружного ультразвукового излучателя:

- 1 – ультразвуковой излучатель; 2 – держатель;
- 3 – ультразвуковой генератор

Fig. 2. Schematic diagram of the submersion ultrasonic emitter:

- 1 – ultrasonic emitter; 2 – holder; 3 – ultrasonic generator

В экспериментальном исследовании определяли оптимальные значения параметров технологического режима погружной очистки при интенсификации процесса за счет воздействия ультразвука на моющую жидкость.

Для контроля качества очистки использовали весовой метод. По истечении фиксированного времени очистки определенного технологического режима выполняли оценку количества остаточного загрязнения. В качестве показателя эффективности очистки при исследуемом режиме принимали отношение количества остаточного загрязнения к его первоначальному количеству:

$$K = \frac{m_{\text{ост}}}{m_{\text{исх}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $m_{\text{ост}}$ – масса загрязнения на поверхности фильтрующего элемента после очистки, г; $m_{\text{исх}}$ – масса загрязнения на поверхности фильтрующего элемента до очистки, г.

Взвешивание фильтрующих элементов производили на весах «Sartorius MP-8» (электронные – 1 класс точности) с ценой показания 0,001 г.

Результаты и их обсуждение

Теоретические исследования показали, что эффективность ультразвуковой очистки зависит от параметров ультразвукового поля, ультразвуковых явлений и физико-химических свойств моющей жидкости (рис. 3).

При этом установлено, что частота колебаний определяет интенсивность микроударного воздействия схлопывающихся кавитационных пузырьков. Увеличение частоты приводит к уменьшению радиуса парогазового пузырька. В результате снижаются потенциальная энергия давления и глубина проникновения кумулятивных струй моющей жидкости в слой загрязнений. При низких частотах создаются благоприятные условия для возникновения кавитационных явлений, сопровождающихся значительным местным повышением давления и температуры жидкости. Проводить ультразвуковую очистку на низких частотах следует в случае необходимости удаления прочно связанных загрязнений. Исходя из вышеизложенного рекомендуется оптимальный диапазон частоты ультразвуковых колебаний 20...50 кГц. При увеличении амплитуды колебаний от 2 до 30 мкм продолжительность очистки в водных растворах синтетических моющих средств снижается в 3...3,5 раза.

Эффективное воздействие на процессы отрыва загрязнений от очищаемой поверхности и их переноса потоком моющей жидкости из зоны очистки оказывает интенсивность ультразвуковых колебаний.

Так, повышение интенсивности ультразвука приводит к возникновению пульсирующих (несхлопывающихся) кавитационных пузырьков. При малых значениях интенсивности снижается активность ультразвуковых явлений. Выявлено, что удаление слабо связанных загрязнений без примесей органических веществ достигается при интенсивности 1...3 Вт/см², а удаление слабо связанных загрязнений с примесью органических веществ – при 3...10 Вт/см². Прочно связанные загрязнения рекомендуется удалять при интенсивности свыше 10 Вт/см².

Повышение статического давления до определенных значений позволяет создать оптимальные условия для удаления загрязнений за счет максимальной кавитационной активности. Однако необходимо принимать меры по ограничению роста гидростатического давления во избежание образования каверн на металлической поверхности очищаемой детали, являющихся результатом кавитационной эрозии, вызываемой местными гидравлическими ударами жидкости.

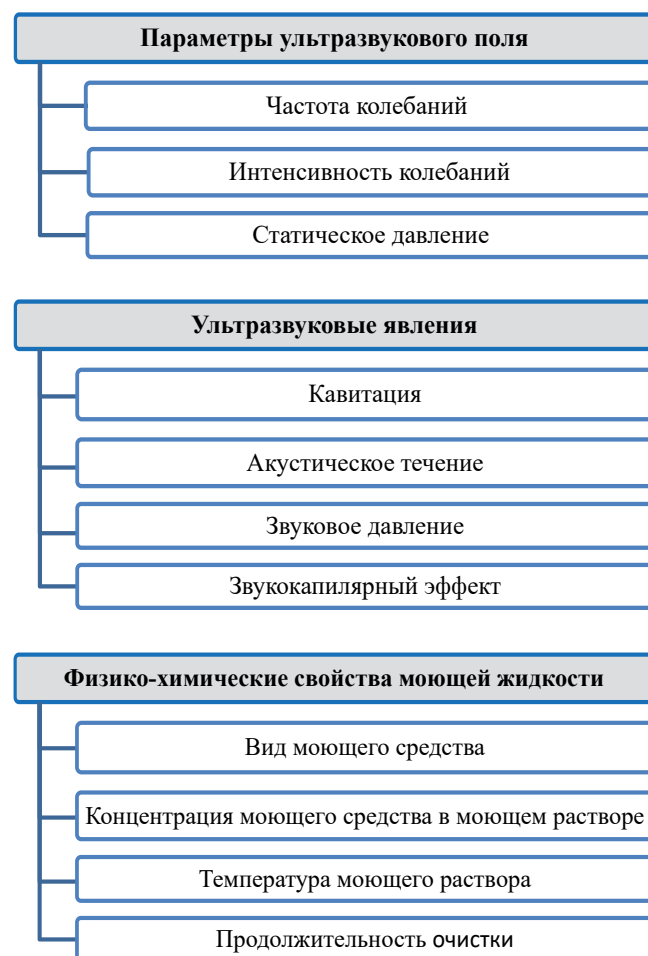


Рис. 3. Факторы, влияющие на эффективность ультразвуковой очистки
Fig. 3. Factors affecting the effectiveness of ultrasonic cleaning

Эффективность очистки деталей при воздействии ультразвука также зависит от физико-химических свойств моющих жидкостей. При выборе моющих средств следует иметь в виду, что органические растворители имеют высокую упругость парогазовых пузырьков и тем самым снижают эффективность механизма моющего действия в ультразвуковом поле.

В качестве моющей жидкости рекомендуется использовать водные растворы щелочных синтетических моющих средств, обладающих низким давлением насыщенных паров и лучшими кавитационными свойствами.

На интенсивность ультразвуковой очистки влияет температура моющей жидкости. Выявлено, что повышение температуры целесообразно лишь до некоторого значения, а затем начинается уменьшение эффективности удаления загрязнений. Это объясняется тем, что при повышении температуры моющей жидкости возрастает давление паровых кавитационных пузырьков и уменьшается сила локальных гидроударов в процессе их схлопывания.

В результате теоретического исследования показана целесообразность инициирования в моющей жидкости ультразвуковых колебаний для интенсификации процесса погружной очистки деталей. При этом необходимо отметить, что эффективность удаления загрязнений с поверхностей деталей в условиях турбулентного режима движения моющей жидкости и воздействия на нее ультразвука определяется технологическим режимом процесса очистки. Под режимом очистки понимается совокупность параметров, характеризующих условия протекания процесса. К параметрам технологического режима, обеспечивающим эффективный отрыв частиц загрязнений от очищаемых поверхностей и их перевод в поток жидкости, относятся величина частоты и интенсивности ультразвуковых колебаний, концентрация моющего средства в растворе, температура моющего раствора и продолжительность процесса очистки.

На первом этапе экспериментальных исследований мы определяли оптимальные значения параметров ультразвукового поля, характеризующих интенсивность кавитационных явлений.

Очистку фильтрующих элементов проводили при температуре раствора 60°C и концентрации моющего средства (Лабомид-203) в растворе 30 г/л в течение 8 мин. График зависимости качества очистки от величины частоты ультразвуковых колебаний приведен на рисунке 4.

На рисунке 5 показана зависимость качества очистки от величины интенсивности ультразвуковых колебаний.

Исходя из данных, представленных на рисунках 4 и 5, установили наибольшую эффективность очистки при частоте колебаний 30 кГц и интенсивности 3 Вт/см².

Таким образом, определили оптимальные значения параметров ультразвукового поля, при которых на втором этапе эксперимента исследовали параметры, характеризующие технологический режим комбинированной очистки (концентрация моющего средства, температура моющего раствора и продолжительность очистки).

По результатам выполненных исследований установили, что при температуре раствора 60°C , концентрации Лабомид-203 в растворе 14...17 г/л и продолжительности процесса 8 мин обеспечивается эффективный отрыв частиц загрязнений от очищаемых поверхностей фильтрующих элементов (рис. 6).

Оптимальный диапазон температуры моющей жидкости составил 50...55 $^{\circ}\text{C}$ (рис. 7).

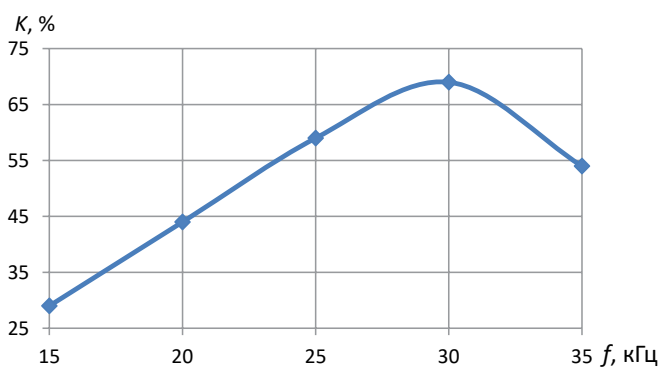


Рис. 4. Качество очистки в зависимости от величины частоты ультразвуковых колебаний
(режим очистки: $t = 8$ мин; $T = 60^{\circ}\text{C}$; $C = 30$ г/л)

Fig. 4. Cleaning quality as a function of the ultrasonic oscillation frequency
(cleaning mode: $t = 8$ min; $T = 60^{\circ}\text{C}$; $C = 30$ g/l)

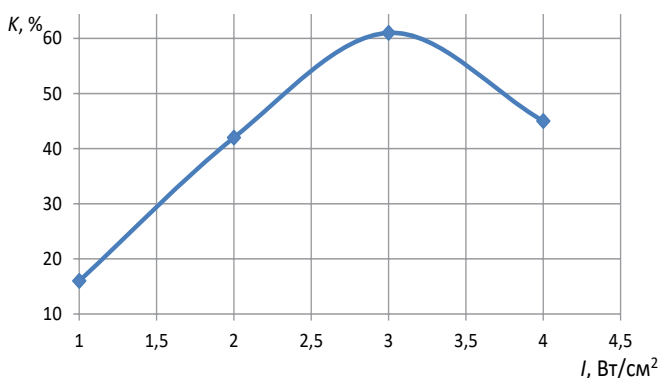


Рис. 5. Качество очистки в зависимости от величины интенсивности ультразвуковых колебаний
(режим очистки: $t = 8$ мин; $T = 60^{\circ}\text{C}$; $C = 30$ г/л)

Fig. 5. Cleaning quality as a function of the ultrasonic oscillation intensity
(cleaning mode: $t = 8$ min; $T = 60^{\circ}\text{C}$; $C = 30$ g/l)

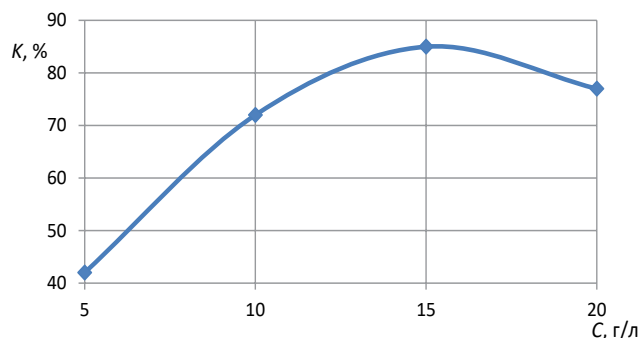


Рис. 6. Влияние концентрации моющего средства в растворе на качество очистки
(режим очистки: $t = 8$ мин; $T = 60^\circ\text{C}$)

Fig. 6. Influence of detergent concentration in the solution on the cleaning quality
(cleaning mode: $t = 8$ min; $T = 60^\circ\text{C}$)

С повышением температуры моющего средства выше 55°C эффективность очистки снижается. Это объясняется тем, что с повышением температуры жидкости возрастает упругость пара, что снижает кинетическую энергию кавитационных пузырьков и мощность микровзрывов при их схлопывании.

Исследовали интенсивность удаления частиц загрязнений с поверхности сетчатых фильтрующих элементов, характеризуемой временем их очистки. Оптимальное значение продолжительности очистки составило 10 мин (рис. 8).

Проведенные исследования показали, что очистка фильтрующих элементов в погружной машине с использованием ультразвуковых колебаний в жидкости является эффективным способом интенсификации процесса.

Управлять эффективностью процесса очистки можно путем подбора параметров ультразвукового поля и параметров технологического режима.

Выводы

1. Интенсификация процесса погружной очистки обеспечивается при оптимальных параметрах

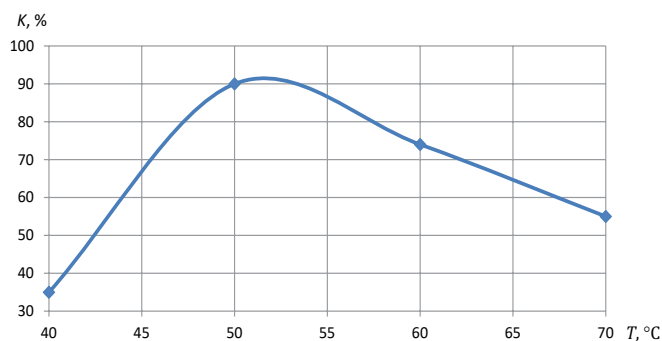


Рис. 7. Влияние температуры моющего раствора на качество очистки
(режим очистки: $t = 8$ мин; $C = 15$ г/л)

Fig. 7. Influence of cleaning solution temperature on the cleaning quality
(cleaning mode: $t = 8$ min; $C = 15$ g/l)

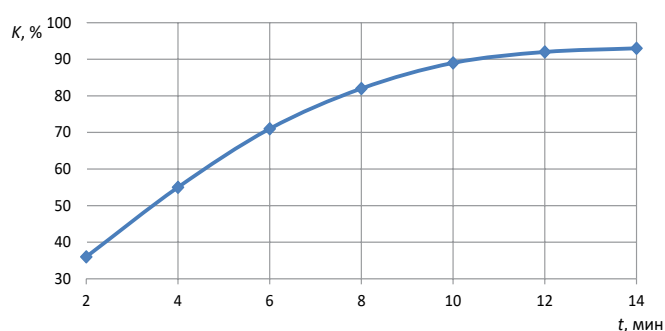


Рис. 8. Влияние продолжительности очистки на ее качество
(режим очистки: $T = 50^\circ\text{C}$; $C = 15$ г/л)

Fig. 8. Influence of cleaning duration on its quality
(cleaning mode: $T = 50^\circ\text{C}$; $C = 15$ g/l)

ультраузового поля, концентрации и температуры моющего раствора и продолжительности процесса.

2. Оптимальными значениями параметров технологического режима процесса интенсифицированной очистки сетчатых фильтрующих элементов являются частота ультразвуковых колебаний 30 кГц, интенсивность ультразвуковых колебаний 3 Вт/см², концентрация моющего средства в растворе 14...17 г/л, температура моющего раствора 50...55°C, продолжительность очистки 10 мин.

Список источников

1. Приходько В.М., Нигметзянов Р.И., Фатюхин Д.С. и др. Ультразвуковая очистка. Состояние и перспективы // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 1. С. 21-28. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-1-21-28>
2. Котухов А.В., Гаврилюк В.С., Минчук В.С., Дежкун 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>
3. Бутько А.С., Шмаков М.С. Удаление загрязнений анилоксных валов ультразвуковым методом в присутствии поверхностно-активных веществ // Труды

References

1. Prikhodko V.M., Nigmatzyanov R.I., Fatyukhin D.S. et al. Ultrasonic cleaning. Status and prospects. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2022;1:21-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-1-21-28>
2. 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>
3. Butsko S.A., Shmakov M.S. Removal of contaminated anilox rolls ultrasonic methods in the presence of surface-active substances. *Proceedings of BSTU. Is . Print- and Mediatechnologies*. 2018;1:20-29. (In Russ.)

Белорусского государственного технологического университета. Серия 4 «Принт- и медиатехнологии». 2018. № 1. С. 20-29. EDN: XQDELB

4. Приходько В.М., Симонов Д.С. Применение ультразвука для очистки от загрязнений ответственных деталей автотракторной техники // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2018. № 3 (17). С. 4. EDN: VAKLZI

5. Жарова В.Д. Применение ультразвуковых технологий при очистке изделий // Science Time. 2019. № 12. С. 68-72. EDN: JNBBDK

6. Петрик Д.Ю., Корнеев В.М., Петрик В.Ю. Интенсификация процесса очистки деталей в погружных моечных машинах // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 5. С. 73-77. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-73-77>

7. Петрик Д.Ю., Корнеев В.М., Петрик В.Ю. Определение оптимальных технологических параметров процесса очистки деталей в погружных моечных машинах // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 81-84. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-81-84>

8. Петрик Д.Ю., Корнеев В.М., Петрик В.Ю. Факторы интенсификации процессов очистки деталей в погружных моечных машинах (на примере ультразвукового метода очистки) // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 1 (127). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.24>

Информация об авторах

¹ Корнеев Виктор Михайлович, канд. техн. наук, доцент; tsmo@rgau-msha.ru; SPIN-код: 5464-0703

² Петровский Дмитрий Иванович, канд. техн. наук, доцент; petrovsky@rgau-msha.ru; SPIN-код: 5948-9799

³ Корнеев Николай Викторович, аспирант; swy16@mail.ru

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

³ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, пр-д 1-й Институтский, 5

Вклад авторов

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

Статья поступила в редакцию 14.04.2025; поступила после рецензирования и доработки 04.09.2025; принята к публикации 05.09.2025

4. Prikhodko V.M., Simonov D.S. Application of ultrasound for cleaning from pollution of responsible parts of autotractor engineering. *Avtomobil. Doroga. Infrastruktura*. 2018;3:4. (In Russ.)

5. Zharova V.D. Application of Ultrasonic Technologies in Parts Cleaning. *Science Time*. 2019;12:68-72. (In Russ.)

6. Petrik D.Yu., Korneev V.M., Petrik V.Yu. Intensifying the process of cleaning parts in submersible washing machines. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(5):73-77. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-73-77>

7. Petrik D.Yu., Korneev V.M., Petrik V.Yu. Determining the optimum technological parameters of cleaning parts in submersible washing machines. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(4):81-84. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-81-84>

8. Petrik D.Y., Korneev V.M., Petrik V.Y. The factors of intensification of parts cleaning processes in submerged washing machines (On the example of ultrasonic cleaning method). *International Research Journal*. 2023;1(127). (In Russ.) <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.24>

Author Information

Viktor M. Korneev¹, CSc (Eng), Associate Professor; tsmo@rgau-msha.ru

Dmitry I. Petrovskiy², CSc (Eng), Associate Professor; petrovsky@rgau-msha.ru

Nikolay V. Korneev³, postgraduate student; swy16@mail.ru

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

³ Federal Scientific Agroengineering Centre VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 5, 1st Institutskiy Proezd Str.

Author Contribution

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

Received 14.04.2025; Revised 04.09.2025; Accepted 05.09.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 620.179.112

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-61-67>**Теоретические основы фрикционного нанесения антиизносных покрытий****В.И. Балабанов^{1✉}, Н.Н. Ивахненко², Д.В. Добряков³**^{1,2} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия³ Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований

по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса («Росинформагротех»); р.п. Правдинский, Россия

¹ vbalabanov@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>² ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0002-7328-7634>³ dimasdobr@rambler.ru

Аннотация. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) позволяет обеспечить повышенную износостойкость восстановленных поверхностей трения. Повышение износостойкости и задиристости получаемых покрытий требует уточнения и строгого соблюдения режимов нанесения покрытия, а именно давления натирающего инструмента на обрабатываемую поверхность. Цель исследований – теоретическое определение и экспериментальное подтверждение необходимого давления прижатия натирающего инструмента для фрикционного нанесения антиизносного покрытия высокого качества. На основании теоретических исследований разработана математическая зависимость для определения необходимого давления прижатия натирающего инструмента при фрикционно-химическом способе нанесения качественного антиизносного покрытия. Экспериментально подтвердили результаты теоретических расчетов необходимого давления прижатия натирающего инструмента в зоне нанесения антиизносного покрытия, равного 17,5 МПа, которое согласуется с результатами других исследований (10...20 МПа). Финишную антифрикционную безабразивную обработку шеек коленчатого вала проводили на токарно-винторезном станке при следующих режимах: скорость нанесения антиизносного покрытия – 0,25 м/с, необходимое давление прижатия натирающего инструмента – 17...18 МПа, минимальное количество рабочих проходов – 4. В натирающем инструменте использовали два конструкционных материала: латунь Л 63 ГОСТ 15527-2004 и алюминиевый сплав АД-31 ГОСТ 4782-97. Для процесса ФАБО разработана новая технологическая жидкость (среда), проведена оптимизация режимов нанесения и применен новый материал (алюминий) для натирающих инструментов. Результаты исследований указывают на необходимость применения присадок, содержащих химические соединения меди и алюминия, для сохранения антиизносных и антифрикционных свойств обработанных деталей в последующей эксплуатации автотракторной техники.

Ключевые слова: финишная антифрикционная безабразивная обработка; ФАБО; скорость нанесения антиизносного покрытия; давление прижатия натирающего инструмента; количество рабочих проходов; технологическая жидкость (среда)

Для цитирования: Балабанов В.И., Ивахненко Н.Н., Добряков Д.Ю. Теоретические основы фрикционного нанесения антиизносных покрытий // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 5. С. 61-67. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-61-67>

ORIGINAL ARTICLE

Theoretical foundations of frictional application of anti-wear coatings**V.I. Balabanov^{1✉}, N.N. Ivakhnenko², D.V. Dobryakov³**^{1,2} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia³ Russian Research Institute of Information and Feasibility Studies for Engineering and Technical Support of the Agribusiness Sector; Pravdinsky, Moscow Region, Russia¹ vbalabanov@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>² ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0002-7328-7634>³ dimasdobr@rambler.ru

Abstract. Finishing antifriction non-abrasive treatment (FANT) ensures increased wear resistance of restored friction surfaces. Enhancing the wear resistance and scoring resistance of the resulting coatings requires clarification

and strict adherence to coating application modes, namely, the pressure of the rubbing tool on the surface being treated. The research objective is the theoretical determination and experimental verification of the required pressing pressure of the rubbing tool for frictional application of a high-quality anti-wear coating. Based on theoretical studies, the authors have developed a mathematical relationship to determine the necessary pressing pressure of the rubbing tool in the friction-chemical method of applying a high-quality anti-wear coating. Experimental results confirmed the theoretical calculations of the required application pressure of the rubbing tool in the anti-wear coating application zone, equal to 17.5 MPa, which is consistent with the results of other studies (10 to 20 MPa). Finishing antifriction non-abrasive treatment of crankshaft journals was carried out on a lathe at the following modes: anti-wear coating application speed – 0.25 m/s, required pressing pressure of the rubbing tool – 17 to 18 MPa, minimum number of working passes – 4. Two structural materials were used in the rubbing tool: brass L 63 GOST 15527-2004 and aluminum alloy AD-31 GOST 4782-97. A new technological fluid (medium) has been developed for the FANT process, the application modes have been optimized, and a new material (aluminum) has been used for the rubbing tools. The research results indicate the need to use additives containing chemical compounds of copper and aluminum to preserve the anti-wear and antifriction properties of the treated parts in the subsequent operation of automotive equipment

Keywords: finishing antifriction non-abrasive treatment (FANT); anti-wear coating; anti-wear coating application speed; application pressure of the rubbing tool; number of working passes; process fluid (medium)

For citation: Balabanov V.I., Ivakhnenko N.N., Dobryakov D.V. Theoretical foundations of frictional application of anti-wear coatings. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(5):61-67 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-61-67>

Введение

Разработке, исследованию и внедрению технологий восстановления и ремонта деталей автотракторной и сельскохозяйственной техники методами нанесения антиизносных и противозадирных покрытий посвящены работы А.В. Антипова, Д.Н. Гаркунова, И.Г. Голубева, С.А. Ищенко, М.Н. Ерохина, Л.И. Куксеновой, В.Н. Лозовского, В.А. Погоньшева, В.Я. Сковородина и других известных ученых [1-3].

Анализ источников литературы, технологий ремонта и данных эксплуатации автотракторной техники позволил установить, что наиболее прогрессивными технологиями восстановления шеек коленчатых валов являются плазменное и газопламенное напыления, а самым дешевым и распространенным способом – шлифование под ремонтный размер. В то же время недостаточная износостойкость восстановленных коренных и шатунных шеек приводит к снижению межремонтного ресурса двигателя в целом в 1,5...2 раза [3-5].

Установлено, что повышение износостойкости восстановленных поверхностей трения может быть обеспечено за счет фрикционно-химического (трением в присутствии технологической среды) нанесения антиизносных и антифрикционных покрытий [1, 2, 4, 5].

Метод ФАБО обеспечивает выглаживание обработанной поверхности шеек коленчатого вала с уменьшением их шероховатости; способствует упрочнению подповерхностного слоя за счет наклепа, образованию в результате диффузии пластичной

антиизносной композиционной структуры поверхности; препятствует проникновению свободного водорода во внутренние структуры металла (защита от водородного изнашивания); создает на обработанных поверхностях слой твердосмазочного антифрикционного композиционного покрытия, что благоприятно воздействует на вкладыши коленчатого вала вследствие частичного переноса на них с обработанных шеек пластичного покрытия при их эксплуатации [6, 7].

В результате теоретического анализа источников литературы, освящающих процесс нанесения фрикционных покрытий методом ФАБО, установлен факт повышения износостойкости нанесенных покрытий за счет активизации химического, механического, вакансионно-дислокационного и термического процессов. Для их обеспечения и повышения качества нанесения покрытий разработана новая технологическая жидкость (среда), оптимизированы режимы нанесения и применен более эффективный материал (алюминий) для натирающих инструментов [8-10].

Для дальнейшего повышения износостойкости и задиростойкости получаемых покрытий необходима разработка мероприятий по изменению других составляющих технологии нанесения: применяемых материалов, устройств и режимов (активации механического, вакансионно-дислокационного и термических каналов).

Активация механического канала требует уточнения и последующего строгого соблюдения режимов нанесения покрытия, в большей степени – давления

натирающего инструмента на обрабатываемую поверхность.

Цель исследований: теоретическое определение и экспериментальное подтверждение необходимого давления прижатия натирающего инструмента для фрикционного нанесения качественного антиизносного покрытия.

Материалы и методы

Процесс нанесения фрикционных покрытий осуществляется за счет явления переноса и (или) восстановления металла при трении в присутствии технологической среды, содержащей соли металла покрытий. В натирающем инструменте применяли два конструкционных материала: латунь Л 63 15527-2004 и алюминиевый сплав АД-31 ГОСТ 4782-97. Восстановление и осаждение содержащихся в составе солей металлов позволяют получить более равномерное

покрытие с высокими антифрикционными и антиизносными свойствами.

Для обработки шеек коленчатого вала использовали токарно-винторезный станок, способный удерживать и вращать обрабатываемую деталь.

На токарно-винторезный станок устанавливали коленчатый вал, на одну или несколько шеек коленчатого вала – одно или несколько приспособлений для фрикционно-механического нанесения покрытий (рис. 1, 2). Поверхность обрабатываемой шейки смачивали составом для нанесения покрытий трением, содержащим алюминий (Патент на изобретение RU № 2821971).

Натирающие элементы устройства вводили в соприкосновение с обрабатываемой поверхностью, прижимали с определенным усилием и включали вращающее устройство. Резкий свистящий звук указывал на протекание процесса нанесения покрытия (табл. 1).

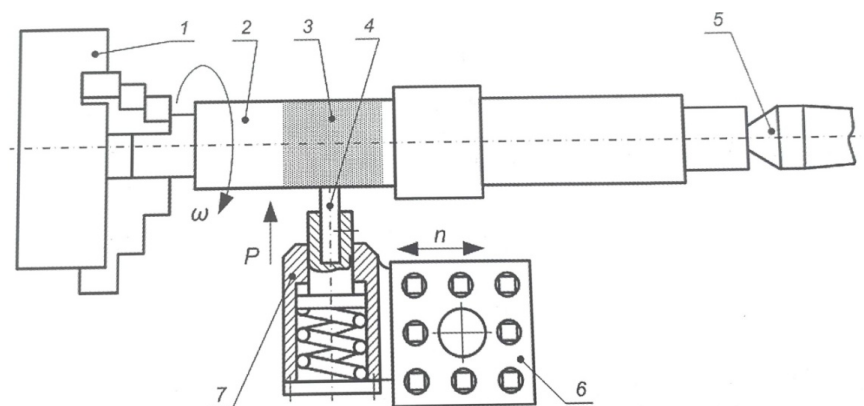


Рис. 1. Принципиальная схема фрикционного алитирования:

1 – привод вращения станка; 2 – деталь; 3 – алюминийсодержащее покрытие;
4 – алюминиевый натирающий инструмент; 5 – подвижный центр задней бабки;
 P – сила прижатия натирающего инструмента; n – продольная подача резцедержателя станка;
 w – угловая скорость детали

Fig. 1. Process diagram of friction alitizing:

1 – machine rotation drive; 2 – component; 3 – aluminum-containing coating;
4 – aluminum rubbing tool; 5 – movable center of tailstock; P – rubbing tool pressing force;
 n – longitudinal feed of machine tool holder; w – angular speed of a component

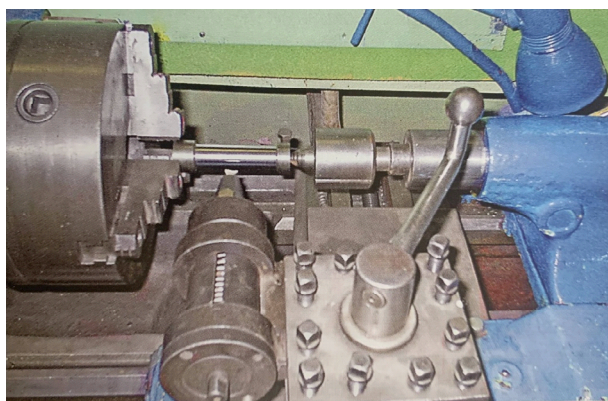


Рис. 2. Внешний вид устройства для нанесения антифрикционных покрытий

Fig. 2. External view of a unit for applying anti-friction coatings

Таблица 1

Режимы нанесения фрикционного покрытия АД-31 и Л 63 на стальную шейку вала

Table 1

Modes of applying friction coating AD-31 and L 63 on a steel bearing journal

Режимы обработки / Processing modes				
Линейная скорость продольной подачи инструмента, V , м/с <i>Linear speed of longitudinal feed of tool, V, m/s</i>	Частота вращения обрабатываемой детали, S , мм/об <i>Speed of the workpiece, S, mm/rev</i>	Давление прижатия, P , МПа <i>Application pressure, P, MPa</i>	Число рабочих проходов, i , ед. <i>Number of working passes, i, units</i>	Технологическая жидкость (среда) ¹ <i>Process fluid (medium)</i>
0,1...0,3	0,2	17...18	3...4	Соли меди, олова, никеля и алюминия, глюкоза, глицерин, вода <i>Copper, tin, nickel and aluminum salts, glucose, glycerin, water</i>

Обработку производили до получения равномерного покрытия без пропусков и крупных частиц перенесенного металла.

Обработанные поверхности мыли 5%-ным водным раствором глицерина и просушивали, после чего привод станка выключали, коленчатый вал снимали со станка.

Результаты и их обсуждение

В работах, освящающих метод ФАБО [2, 9], предлагалось выражение для определения давления прижатия натирающего инструмента, при котором может быть реализовано внешнее трение (образование фрикционного покрытия):

$$P_p \leq (0,125 \sigma_T / \delta^2) (1 - 6\tau_n / \sigma_T)^2, \quad (1)$$

где P_p – расчетное давление, обеспечивающее нанесение качественного антифрикционного покрытия, МПа; σ_T – физический предел текучести, МПа; δ – комплексный параметр, характеризующий шероховатость обрабатываемой поверхности ($0 < \delta < 1$), мм; τ_n – касательные напряжения в зоне контакта натирающего инструмента и обрабатываемой поверхности ($\tau_n = 0,3 \sigma_s$), МПа.

Однако следует учесть, что ряд пластичных материалов, в том числе медные и алюминиевые сплавы, не имеет фактической площадки предела текучести. Поэтому нами предложено использовать параметр предела прочности при растяжении (σ_b) как имеющего реальные значения для применяемых материалов натирающих инструментов и более полно характеризующего напряженное состояние зоны контакта.

Нами произведен проверочный расчет теоретически выведенной зависимости для определения необходимого давления прижатия натирающего

инструмента для нанесения качественных композиционных антифрикционных покрытий трением к конкретным условиям обработки.

С учетом того, что в разработанном нами способе нанесения композиционных антифрикционных покрытий одновременно применяются два конструкционных материала натирающих инструментов, имеющих средние значения пределов прочности при растяжении $\sigma_{b1} = 360$ МПа (латунь Л 63) и $\sigma_{b2} = 200$ МПа (алюминиевый сплав АД-31), для простоты расчетов предлагаем использовать их среднее значение, определяемое по формуле:

$$\sigma_{ср} = \frac{1}{2} (\sigma_{b1} + \sigma_{b2}); \quad (2)$$

$$\sigma_{ср} = \frac{1}{2} (360 + 200) = 280.$$

В этом случае расчетная формула давления прижатия (1) примет следующий вид:

$$P_p \leq K_i \cdot (0,125 \sigma_{ср} / \delta^2) \cdot (1 - 6\tau_n / \sigma_{ср})^2, \quad (3)$$

где $K_i = \frac{1}{n}$ – коэффициент усредненного давления на каждом (i) из двух натирающих инструментов ($n = 2$).

Рассчитаем теоретическое значение необходимого давления в зоне трения по предложенной формуле (3):

$$P_p = \frac{1}{2} (0,125 \cdot 280 / 0,8^2) \cdot (1 - 504 / 280)^2 = 17,5 \text{ МПа.}$$

Следует учесть, что применяемые нами конструкционные материалы покрытия (натирающих инструментов) могут испытывать различную степень деформации, а предел текучести материала подложки может также существенно отличаться от указанных

¹Технологический состав для фрикционно-механического нанесения покрытия натирающим инструментом: Патент № 2821971 С1 Российская Федерация, МПК C23C26/00, C10M 103/06: заявка № 2023122292: заявл. 28.08.2023; Опубл. 28.06.2024 / В.И. Балабанов, Д.В. Добряков. EDN: TPLHVJ.

значений. Все это требует соответствующей корректировки режимов обработки непосредственно в процессе нанесения композиционных антифрикционных покрытий на шейки коленчатого вала в зависимости от качества обработки, которое может контролироваться посредством сравнения с эталонным образцом² [11, 12].

Производственная отработка режимов нанесения композиционных антифрикционных покрытий с использованием специального устройства (рис. 1), имеющего возможность регулирования давления натирающего инструмента, для ФАБО деталей типа «Вал» позволила подтвердить результаты теоретического расчета необходимого давления прижатия натирающего инструмента в зоне нанесения покрытия ($P_p = 17,5$ МПа), которое согласуется с имеющимися теоретическими данными (10...20 МПа) [1-5].

В эксперименте все покрытия наносили при следующих режимах: скорость нанесения – 0,25 м/с; необходимое давление устанавливалось равным теоретически рассчитанному 17...18 МПа, минимальное количество рабочих проходов $i = 4$.

Коэффициент сходимости (K_{cx}) теоретических и практических данных определялся по формуле:

$$K_{cx} = R_{\text{теоретические}} / R_{\text{опытные}}, \quad (4)$$

где R – значения, показатели, величины.

Приближенный расчет коэффициента степени деформации контактирующих материалов (оптимальных условий образования качественных антифрикционных покрытий), с учетом применения двух различных конструкционных материалов по разработанной технологии нанесения композиционных антифрикционных покрытий на шейки коленчатого вала (приближенное значение $\sigma_m = 250$ МПа), подтверждает выдвинутые нами теоретические предположения:

$$K_{cx} = (280 / 250) = 1,12. \quad (5)$$

Отклонение составляет менее 5%, что допустимо. Однако, как указано выше, снижение производительности в целом не оказывает влияния на антифрикционные свойства нанесенных покрытий.

Исследование разработанной технологии нанесения композиционных антифрикционных покрытий трением и анализ источников литературы позволили разработать критерии оценки качества натирания коленчатых валов на этапе обработки (табл. 2).

Анализ теоретических и практических данных показывает необходимость применения специальных присадок, содержащих химические соединения меди и алюминия, для сохранения антиизносных и антифрикционных свойств обработанных деталей в процессе эксплуатации автотракторной техники^{3,4} [1, 5, 13, 14].

Таблица 2

Критерии оценки качества покрытия коленчатых валов

Table 2

Criteria for assessing the quality of crankshaft coating

Критерий оценки <i>Assessment criterion</i>	Цвет покрытия <i>Coating color</i>	Истирание материала <i>Material abrasion</i>	Пропуски покрытия <i>Coating gaps</i>	Шероховатость покрытия <i>Coating roughness</i>
Отлично <i>Excellent</i>	Красновато-желтый <i>Reddish-yellow</i>	Нет (0,0...0,2 мкм) <i>No (0.0 to 0.2 μm)</i>	Нет <i>No</i>	Ниже исходной <i>Below original</i>
Хорошо <i>Good</i>	Красный <i>Red</i>	Малое (0,3...0,5 мкм) <i>Small (0.3 to 0.5 μm)</i>	Немного <i>A little</i>	На уровне исходной <i>At the original level</i>
Удовлетворительно <i>Satisfactory</i>	С матовыми просветами <i>With matte gaps</i>	Среднее (0,6...0,9 мкм) <i>Average (0.6 to 0.9 μm)</i>	Умеренно <i>Moderate</i>	На уровне исходной <i>At the original level</i>
Плохо <i>Bad</i>	Очень просветленный <i>Very brightened</i>	Большое (более 1 мкм) <i>Large (more than 1 μm)</i>	Очень много <i>Very much</i>	Выше исходной <i>Higher than original</i>
Брак <i>Defective</i>	Покрытия нет <i>No coating</i>	Деформирование стержня <i>Rod deformation</i>	Покрытия нет <i>No coating</i>	Много выше <i>Much higher</i>

² Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Лаптева В.Г. Износостойкость конструкционных материалов. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 240 с.

³ Балабанов В.И. Нанотехнологии и нанопрепараты для автотракторной техники // Применение нанотехнологий и наноматериалов в АПК: Сборник докладов. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. С. 77-81.

⁴ Синельников А.Ф., Балабанов В.И. Автомобильные масла: Краткий справочник. М.: ООО Книжное издательство «За рулем», 2005. 176 с.

Выводы

1. Теоретически разработана и экспериментально подтверждена математическая зависимость позволяющая определить необходимое давление прижатия натирающих инструментов для нанесения качественных антиизносных покрытий методом ФАБО.

2. Расчетное значение необходимого давления прижатия натирающих инструментов для нанесения

качественных антиизносных покрытий методом ФАБО, равное 17,5 МПа, согласуется с теоретическими данными.

3. Разработанный новый способ повышения износостойкости поверхностей трения методом нанесения на шейки коленчатых валов алюминийсодержащих антифрикционных покрытий позволит продлить срок службы деталей автотракторной техники.

Список источников

1. Гаркунов Д.Н. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) поверхностей трения деталей // Ремонт, восстановление и модернизация. 2009. № 2. С. 10-17. EDN: KNXBUH; 2009. № 3. С. 36-41. EDN: KXIXAZ; 2009. № 4. С. 20-24. EDN: KXIXEV; 2009. № 5. С. 24-29. EDN: KXIXKP; 2009. № 6. С. 38-422. EDN: KXIXRN

2. Балабанов В.И., Голубев И.Г., Добряков Д.В. Совершенствование технологического процесса фрикционного нанесения защитных покрытий // Техника и оборудование для села. 2023. № 10 (316). С. 31-34. EDN: FCIBDY

3. Pogonyshev V.A., Belous N.M., Torikov V.E. et al. Tribotechnical characteristics of composite coatings deposited by spraying. *Materials Today: Proceedings*. 2021;38(4):1849-1851. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.434>

4. Погоньшев В.А., Логунов В.В. Повышение износостойки шеек коленчатого вала путем нанесения пленок пластичных металлов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 6. С. 47-48. EDN: QAXYQF

5. Ищенко С.А. Диагностирование и восстановление деталей гусеничного движителя рисозерноуборочных комбайнов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2008. № 12. С. 20-25. EDN: KTNEDP

6. Ипатов А.Г., Шмыков С.Н. Синтез антифрикционных покрытий методом ФАБО // Технический сервис машин. 2021. № 1 (142). С. 140-147. EDN: BKMHLQ

7. Сковородин В.Я., Антипов А.В. Оптимизация режима отделочно-антифрикционной обработки шеек коленчатого вала по параметрам износостойкости поверхности // Известия Международной академии аграрного образования. 2018. № 41-1. С. 31-37. EDN: YQHANI

8. Ипатов А.Г., Шмыков С.Н. Характеристики работоспособности модифицированных антифрикционных покрытий на основе металлической композиции // Технический сервис машин. 2020. № 1 (138). С. 186-194. EDN: WFPYLE

9. Balabanov V.I. Self-organization of friction conditions when using repair and recovery additives to lubricants. *Journal of the Balkan Tribological Association*. 2019;25(3):805-812. EDN: MBUGSH

10. Ostrikov V.V., Sazonov S.N., Safonov V.V. et al. Study of the mechanism of the transformation and transfer of contact layers in the lubricating medium-surface tribopair system. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2018;12(2):336-342. <https://doi.org/10.1134/S1990793118020094>

11. Сковородин В.Я., Антипов А.В. Влияние режима отделочно-антифрикционной обработки шеек коленчатого вала на параметры шероховатости поверхности // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2017. № 49. С. 245-251. EDN: YOKAYQ

12. Сковородин В.Я., Антипов А.В. Влияние режима финишной обработки шеек коленчатого вала на антифрикционные свойства поверхности // Известия Международной

References

1. Garkunov D.N. Finishing antifriction abrasive treatment (FANT) of friction surfaces of parts. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2009;2:10-17;2009;3:36-41;2009;4:20-24;2009;5:24-29;2009;6:38-422. (In Russ.)

2. Balabanov V.I., Golubev I.G., Dobryakov D.V. Improving the technological process of frictional application of protective coatings. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;10(316):31-34. (In Russ.)

3. Pogonyshev V.A., Belous N.M., Torikov V.E. et al. Tribotechnical characteristics of composite coatings deposited by spraying. *Materials Today: Proceedings*. 2021;38(4):1849-1851. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.434>

4. Pogonyshev V.A., Logunov V.V. Improving wear resistance of crankshaft necks by covering them with ductile metal films. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2013;6:47-48. (In Russ.)

5. Ishchenko S.A. Diagnosis and restoration of caterpillar mover parts of rice-grain harvesters. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2008;12:20-25. (In Russ.)

6. Ipatov A.G., Shmykov S.N. Synthesis of antifriction coatings by FANT method. *Machinery Technical Service*. 2021;1(142):140-147. (In Russ.)

7. Skovorodin V.Ya., Antipov A.V. Optimization of mode of finishing antifriction machining of crankshaft journals in the parameters of wear resistance of the surface. *Izvestiya Mezhdunarodnoy Akademii Agrarnogo Obrazovaniya*. 2018;41-1:31-37. (In Russ.)

8. Ipatov A.G., Shmykov S.N. Performance characteristics of modified antifriction coatings based on the metal composition. *Machinery Technical Service*. 2020;1(138):186-194. (In Russ.)

9. Balabanov V.I. Self-organization of friction conditions when using repair and recovery additives to lubricants. *Journal of the Balkan Tribological Association*. 2019;25(3):805-812.

10. Ostrikov V.V., Sazonov S.N., Safonov V.V. et al. Study of the mechanism of the transformation and transfer of contact layers in the lubricating medium-surface tribopair system. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2018;12(2):336-342. <https://doi.org/10.1134/S1990793118020094>

11. Skovorodin V.Ya., Antipov A.V. Influence of the finishing and antifriction treatment of crankshaft journals on the parameters of surface roughness. *Izvestiya Saint Petersburg State Agrarian University*. 2017;49:245-251. (In Russ.)

12. Skovorodin V.Ya., Antipov A.V. Influence of the crankshaft necks finishing mode on the antifriction properties of the surface. *News of the International Academy of Agrarian Education*. 2018;1(41):38-44. (In Russ.)

13. Katkov D.S. On ways of decreasing the intensity of tribounits depreciation. *Nauchnoe obozrenie*. 2012;2:358-363. (In Russ.)

14. Kuzharov A.S., Kuzharov A.A. Again and a little bit differently about metal-cladding, "ANF" and wearless. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk*. 2011;13(4(3)):772-775. (In Russ.)

академии аграрного образования. 2018. Т. 1, № 41. С. 38-44. EDN: YQNAHR

13. Катков Д.С. О путях снижения интенсивности трибосопряжений // Научное обозрение. 2012. № 2. С. 358-363. EDN: PCCVKT

14. Кужаров А.С., Кужаров А.А. Еще раз и несколько иначе о металлоплакировании, ФАБО и безысности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, № 4-3. С. 772-775. EDN: PCLSJJ

Информация об авторах

¹ **Балабанов Виктор Иванович**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой организации и технологий гидромелиоративных и строительных работ; vbalabanov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>; SPIN-код: 1885-6817

² **Ивахненко Наталья Николаевна**, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры физики; ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0002-7328-7634>; SPIN-код: 5082-0613

³ **Добряков Дмитрий Викторович**, аспирант; dimasdobr@rambler.ru

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

³ Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса («Росинформагротех»); 141261, Российская Федерация, Московская обл, р.п. Правдинский, ул. Лесная, 60

Вклад авторов

В.И. Балабанов – руководство исследованием, концептуализация, методология;

Н.Н. Ивахненко – формальный анализ, концептуализация, методология, проведение исследований;

Д.В. Добряков – концептуализация, проведение исследований, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, визуализация.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 09.04.2025, после рецензирования и доработки 27.08.2025; принята к публикации 29.08.2025

Author Information

Viktor I. Balabanov¹, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Organization and Technologies of Irrigation and Construction Works; vbalabanov@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>; Scopus author ID: 7005293644, Researcher ID: L-7456-2017.

Natalya N. Ivakhnenko², CSc (Phys-Math), the Department of Physics; ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0002-7328-7634>; Scopus author ID: 6701812393, Researcher ID: AAD-3021-2022.

Dmitry V. Dobryakov³, postgraduate student; dimasdobr@rambler.ru

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

³ Russian Research Institute of Information and Feasibility Studies for Engineering and Technical Support of the Agribusiness Sector (Rosinformagrotekh); 60, Lesnaya Str., Pravdinsky, Moscow Region, 141261, Russian Federation

Author Contributions

V.I. Balabanov – research supervision, conceptualization, methodology;

N.N. Ivakhnenko – formal analysis, conceptualization, methodology, investigation;

D.V. Dobryakov – conceptualization; investigation; writing – original draft preparation, manuscript review and editing; visualization.

Conflict of interest

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

Received 09.04.2025; Revised 27.08.2025; Accepted 29.08.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 62-2:691.175.2

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-68-74>

Исследование влияния разбавителя на реологические и технологические свойства эпоксидных композитов

Р.М. Касимов¹, Р.А. Алехина², Н.Д. Блинов³, А.С. Свиридов⁴^{1,2,3,4} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия¹ ruslankm@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0316-4272>² rioraya9@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-1194-392X>³ nik.blinov76@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-8734-2885>⁴ sviridov.vim@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9396-2281>

Аннотация. Условия работы сельскохозяйственной техники вызывают необходимость повышения эксплуатационных характеристик и срока службы деталей. Полимерные композиционные материалы в отличие от металлов не подвергаются коррозии, а изделия из них имеют длительный срок службы. Исследования провели с целью определения влияния типа разбавителя и его концентрации на реологические и технологические свойства эпоксидных композитов, предназначенных для изготовления экстерьера сельскохозяйственной техники. Особое внимание уделили изучению влияния разбавителя на вязкость и формирование микроструктуры композита. В качестве полимерной матрицы использована эпоксидная смола ЭД20, наполнитель – стекломат эмульсионный EMC450-1250-E. Исследовали два типа разбавителей: инактивный (уайт-спирит и растворитель 646) и активный (ДЭГ-1). Вязкость смесей определяли по методике ГОСТ 25276-82 с помощью ротационного вискозиметра. Пористость композита определяли методом мультипараметрической микроскопии. Исследовали зависимость вязкости эпоксидной смолы ЭД-20 при введении активного и инактивного разбавителя в количестве 5, 10 и 15 масс.%. В результате исследований выбран активный разбавитель ДЭГ-1. Провели анализ количества пор в композиционном материале на основе эпоксидной смолы и стекломата с содержанием разбавителя ДЭГ-1 в количестве 5, 10 и 15 масс.%. Результаты экспериментальных исследований показали, что введение ДЭГ-1 существенно снижает вязкость смолы, способствуя лучшему проникновению ее в волокна наполнителя. Определили оптимальную концентрацию разбавителя ДЭГ-1-10 масс.%, при которой обеспечивается снижение вязкости смолы на 60% и ее равномерное распределение в волокнах стекломата, а также минимальное образование пор в композиционном материале (30 пор/см²). При производстве полимерных композитов для деталей экстерьера сельскохозяйственной техники рекомендуем использовать разбавитель ДЭГ-1 в количестве 10 масс.%.

Ключевые слова: эпоксидная смола; ЭД20; разбавитель; ДЭГ-1; пористость; пористость композита; вязкость; вязкость смолы; стекломат; композит

Для цитирования: Касимов Р.М., Алехина Р.А., Блинов Н.Д., Свиридов А.С. Исследование влияния разбавителя на реологические и технологические свойства эпоксидных композитов // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 5. С. 68-74. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-68-74>

ORIGINAL ARTICLE

Study of the effect of a diluent on the rheological and technological properties of epoxy composites

R.M. Kasimov¹, R.A. Alekhina², N.D. Blinov³, A.S. Sviridov⁴^{1,2,3,4} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia¹ ruslankm@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0316-4272>² rioraya9@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-1194-392X>³ nik.blinov76@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-8734-2885>⁴ sviridov.vim@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9396-2281>

Abstract. Conditions of agricultural machinery operation necessitate improving the operational characteristics and service life of parts. Polymer composite materials, unlike metals, are not subject to corrosion and have a long service life. Research was conducted to determine the influence of the type and concentration of a diluent on the rheological and technological properties of epoxy composites intended for manufacturing the exterior

parts of agricultural machinery. Special attention was paid to studying the effect of the diluent on the viscosity and microstructure formation of the composite. Epoxy resin ED20 was used as the polymer matrix, and the filler was an emulsion glass mat EMC450-1250-E. Two types of diluents were investigated: inactive (white spirit and solvent 646) and active (DEG-1). The viscosity of the mixtures was measured according to GOST 25276-82 using a rotational viscometer. The porosity of the composite was determined by a multi-parameter microscopy method. The authors studied the relationship between the viscosity of ED-20 epoxy resin and the addition of active and inactive diluents at 5, 10, and 15 wt.%. As a result of the research, the active diluent DEG-1 was selected. An analysis was conducted of the porosity in the composite material based on epoxy resin and glass mat with 5, 10, and 15 wt.% of the DEG-1 diluent. Experimental results showed that the introduction of DEG-1 significantly reduces the resin viscosity, facilitating better penetration into the fibers of the filler. The optimal concentration of the DEG-1 diluent was determined to be 10 wt.%, which provides a 60% reduction in resin viscosity, uniform distribution in the glass fiber matrix, and minimal porosity in the composite material (30 pores/cm²). For manufacturing polymer composites for exterior parts of agricultural machinery, it is recommended to use the DEG-1 diluent at a concentration of 10 wt.%.

Keywords: epoxy resin; ED20; diluent; DEG-1; porosity; composite porosity; viscosity; resin viscosity; glass mat; composite

For citation: Kasimov R.M., Alekhina R.A., Blinov, N.D., Sviridov A.S. Study of the effect of a diluent on the rheological and technological properties of epoxy composites. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(5):68-74 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-68-74>

Введение

Сельскохозяйственная техника и оборудование ориентированы на обеспечение высокой производительности и эффективности работ [1]. Однако в условиях агрессивной эксплуатации, такой, как интенсивное солнечное излучение, высокая влажность, перепады температур и механические воздействия, детали экстерьера сельскохозяйственной техники и оборудования подвергаются интенсивному износу, коррозии и ухудшению внешнего вида [2, 3].

Изготовление деталей экстерьера из полимерных композиционных материалов является перспективным направлением, которое может значительно улучшить качество и производительность сельскохозяйственной техники [4]. Полимерные композиционные материалы по сравнению с металлами не подвержены коррозии, что продлевает срок службы изготовленных из них изделий [5]. Помимо этого, композиты обладают высокой прочностью при меньшем весе, что позволяет снизить общий вес техники. Из полимерных композиционных материалов можно изготавливать внешние корпусные детали экстерьера сельскохозяйственной техники – такие, как капот, крыло, крыша кабины.

Для изготовления деталей экстерьера используются композиционные материалы на основе полимерной матрицы из эпоксидной или полиэфирной смолы, которыми пропитывают либо стеклянные, либо углеродные волокна. Однако для достижения оптимальных характеристик конечного продукта крайне важны параметры технологического процесса – в частности, свойства исходных материалов [6].

Одним из ключевых факторов, влияющих на качество композитного изделия, является вязкость разбавителя эпоксидного композита [7]. Разбавитель снижает вязкость исходной смолы, способствуя улучшению адгезии компонентов [8]. Именно этот параметр определяет степень проникновения смолы в волокна стекломата, равномерность распределения материала и, как следствие, механическую прочность и долговечность готовой детали [9]. Недостаточное или, наоборот, чрезмерно высокое значение вязкости может привести к образованию дефектов – таких, как незаполненные полости внутри материала или неравномерное сцепление компонентов, что негативно сказывается на эксплуатационных характеристиках конечного изделия [10].

Помимо контроля вязкости, важное значение имеет анализ пористости материалов, используемых при производстве деталей экстерьера сельскохозяйственной техники. Пористость влияет на механическую прочность, устойчивость к внешним воздействиям и долговечность конечной конструкции [11]. Компьютерная обработка данных позволяет проводить детальное моделирование и измерение пористых структур, что способствует оптимизации технологических режимов и улучшению качества изделий.

Повышение эффективности производства и качества композиционных материалов, используемых в агропромышленном комплексе, в перспективе может способствовать снижению эксплуатационных расходов и увеличению срока службы сельскохозяйственной техники.

Можно ожидать, что улучшение технологических свойств композиционных материалов будет

обеспечено оптимальным выбором типа и концентрации разбавителя.

Цель исследований: определить влияние типа разбавителя (инактивного – уайт-спирит и растворитель 646, активного – ДЭГ-1) и его концентрации на реологические и технологические свойства эпоксидных композитов, выявить оптимальный разбавитель и его концентрацию.

Материалы и методы

В качестве связующего использовали эпоксидно-диановую смолу ЭД-20 – одну из самых доступных и широко используемых эпоксидных составов, применяемых в различных отраслях промышленности. ЭД-20 содержит приблизительно 20 эпоксидных групп. Смола прозрачна, по консистенции похожа на сгущенное молоко, ее вязкость варьируется в диапазоне 16000...20000 мПа·с.

Отвердителем для эпоксидных смол является ПЭПА (полиэтиленполиамин), представляющий собой соединение, в основе которого лежат этиленовые полиамины или их аналоги с пиперазиновыми компонентами. Это вещество полностью растворяется в воде и спиртах, что делает его универсальным в использовании. При длительном контакте с воздухом, особенно при нарушении герметичности хранения, материал активно впитывает влагу и углекислый газ, что приводит к утрате его первоначальных свойств. ПЭПА представляет собой однородную прозрачную жидкость без видимых механических примесей. Цвет материала может варьироваться от светло-желтого до темно-бурого, а в некоторых случаях – приобретать зеленоватый оттенок.

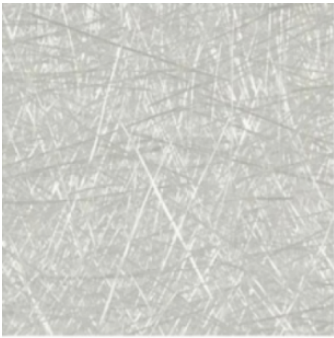


Рис. 1. Стекломат эмульсионный EMC450-1250-E
Fig. 1. Emulsion glass mat EMC450-1250-E

В качестве наполнителя композиционного материала выбрали стекломат эмульсионный EMC450-1250-E, произведенный в Республике Беларусь. Этот материал изготавливается из рубленых волокон Е-стекла, хаотично уложенных, но равномерно распределенных в горизонтальной плоскости, и связанных между собой эмульсионным связующим (рис. 1). Он отличается небольшим удельным весом, хорошо укладывается и легко принимает сложные формы. Благодаря своей структуре материал быстро и равномерно пропитывается смолами, что способствует созданию прочных изделий, выдерживающих значительные разрывные нагрузки. Изделия, изготовленные из стекломата EMC450-1250-E, обладают высокими механическими характеристиками и демонстрируют отличную стойкость к атмосферным воздействиям в течение длительного времени.

Физико-механические характеристики полимерного связующего и наполнителя представлены в таблице.

Физико-механические свойства компонентов эпоксидного композита

Таблица
Table

Physical and mechanical properties of selected components

Характеристики компонентов / Characteristic	Значение / Value
EMC450-1250-E (толщина 0,5 мм) / EMC450-1250-E (0.5 mm thick) emulsion glass mat	
Поверхностная масса, г/м² / Surface weight, g/m²	450 ± 45
Содержание связующего, % / Binder content, %	2...7
Прочность на разрыв, Н / Tensile strength, N	Не менее 60 / Not less than 60
Удельная разрывная нагрузка по вертикали, Н/мм / Specific tensile load (vertically), N/mm	60
Удельная разрывная нагрузка по горизонтали, Н/мм / Specific tensile load (horizontally), N/mm	60
ЭД-20 + ПЭПА / ED20 + PEPA (polyethylenepolyamine)	
Плотность, при t = 23°C, г/см³ / Density, at t = 23°C, g/cm³	1,16...1,25
Изгибающее напряжение при разрушении, МПа / Bending stress at failure, MPa	Не менее 60 / Not less than 60
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа / Compressive strength, MPa	100...200
Относительное удлинение при разрыве, % / Relative elongation at break, %	4,6...4,9
Прочность при разрыве, МПа / Tensile strength, MPa	80...140

В качестве разбавителей использовали активный разбавитель ДЭГ-1 и инактивный – уайт-спирит и растворитель 646. Активные разбавители содержат функциональные группы (эпоксидные, гидроксильные), которые участвуют в реакции отверждения и становятся частью полимерной сетки. Инактивные разбавители не вступают в химические реакции и испаряются в процессе отверждения, временно снижая вязкость смеси.

Исследование вязкости композиционных смесей с различной концентрацией разбавителя проводили согласно ГОСТ 25276-82 «Полимеры. Метод определения вязкости ротационным вискозиметром при определенной скорости сдвига» на ротационном вискозиметре ROTAVISC lo-vi Complete немецкой фирмы IKA-WERKE. Полученные данные о вязкости смолы при разных скоростях сдвига использовали для построения кривой вязкости. Из анализа кривой делали вывод о текучести смолы: например, насколько она подвержена пластическим деформациям при различных условиях эксплуатации. Оценивали точку, в которой кривая начинает показывать нелинейное поведение, что может указывать на текучесть материала.

Отвержденная смола по цвету отличается от цвета стекломата, что позволило визуализировать места выхода пропитки оптической микроскопией. Микроскопия предоставляет возможность получить лишь увеличенное изображение (микрофотографию), поэтому использовали мультипараметрическую микроскопию, сочетающую в себе оптическую микроскопию и компьютерную обработку. Исследования проводили с помощью микроскопа Levenhuk MedPro 600 FLUO и программ DG Analyser 1.5, AFMVision.

Результаты и их обсуждение

В результате эксперимента получили зависимость вязкости эпоксидной смолы ЭД-20 от количества активного и инактивного разбавителя (рис. 2).

При температуре 21°C эпоксидная смола имеет вязкость 16000 мПа·с. Добавление к эпоксидной смоле 5%-ного ДЭГ-1 снижает вязкость до 6300 мПа·с, при 10%-ном содержании разбавителя показатель снижается до 3200 мПа·с, а при 15%-ном – до 1200 мПа·с. Для сравнения: вязкость моторного масла 5W-40 при температуре 40°C составляет 700...1000 мПа·с. Согласно полученным экспериментальным данным вязкость исследуемой эпоксидной смолы ЭД-20 соответствует ее паспортным данным.

Инактивные разбавители (уайт-спирит и растворитель 646) снижают вязкость смолы более эффективно, чем ДЭГ-1. При 5%-ном содержании ДЭГ-1 в эпоксидной смоле вязкость смеси составляет 6300 мПа·с, что на 60% ниже исходной вязкости, тогда как вязкость смеси с инактивным разбавителем составляет 3000 мПа·с, что более чем в 5 раз ниже исходной величины. Однако исследования показали, что с увеличением доли инактивного разбавителя его влияние на снижение вязкости постепенно уменьшается. При содержании инактивного разбавителя в количестве 10 масс.% вязкость смолы достигает 1200 мПа·с, что ниже изначальной величины более чем на 90%. Увеличение содержания данного растворителя с 5 до 10% и с 10 до 15% приводит к снижению вязкости уже не так эффективно, как при добавлении 5%. Такой эффект объясняется ограниченной растворимостью эпоксидной смолы в данном типе растворителя. Процесс разбавления можно

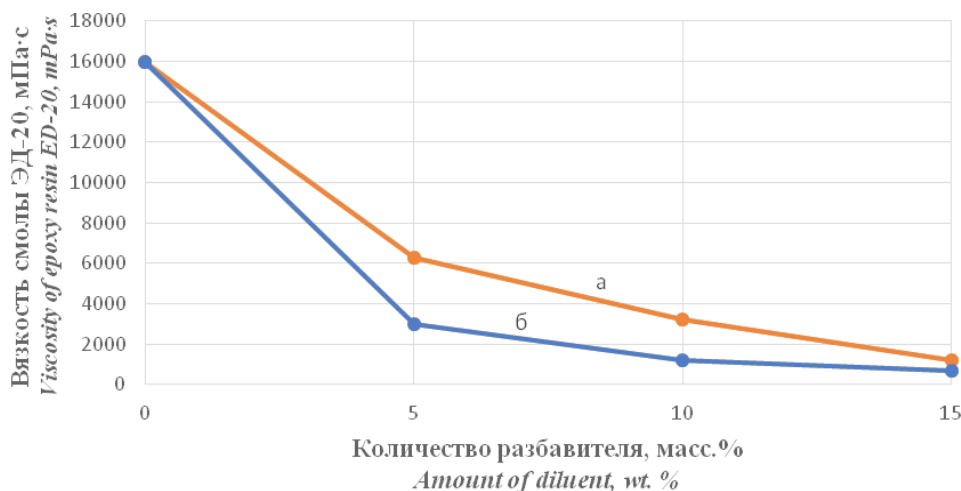


Рис. 2. Зависимость вязкости эпоксидной смолы ЭД-20 от введения различных разбавителей:
а – ДЭГ-1; б – уайт-спирит/растворитель 646

Fig. 2. Dependency of the viscosity of epoxy resin ED-20 on the introduction of various diluents:
a – DEG-1; б – White spirit/Solvent 646

рассматривать как ограниченное набухание, представляющее собой взаимодействие олигомерных молекул с низкомолекулярной жидкостью (инактивным разбавителем).

В отличие от использования инактивного разбавителя изменение вязкости эпоксидной смолы при добавлении активного разбавителя (ДЭГ-1) имеет практически линейный характер. Это обусловлено тем, что в данном случае процесс разбавления происходит за счет взаимодействия с низкомолекулярными олигомерными фракциями. Однако такой подход требует большего количества активного разбавителя для достижения уровня вязкости, сопоставимого с результатами применения инертного разбавителя.

В дальнейших испытаниях исследовали образцы с добавлением ДЭГ-1. Выбор ДЭГ-1 обоснован тем, что несмотря на необходимость его большего количества для достижения сопоставимого снижения вязкости, он вступает в реакцию отверждения и становится частью полимерной сетки, не испаряясь и не вызывая образования дефектов структуры. В отличие от инертных разбавителей, которые лишь временно уменьшают вязкость и при испарении провоцируют рост пористости и неоднородности материала, ДЭГ-1 обеспечивает более стабильные реологические свойства и формирование равномерной микроструктуры композита.

Анализ пористости выполняли с помощью программы DG Analyser 1.5. От каждого вида композиционного материала отбирали по 3 образца (рис. 3).

Согласно полученным данным увеличение процентного содержания разбавителя ДЭГ-1 приводит к росту количества пор, образующихся и распределяющихся неравномерно по всему объему образца, и формированию отдельных участков с высокой

концентрацией пор. Такое действие можно объяснить повышением текучести компонента, в результате чего в составе образца появляются микроскопические воздушные пузырьки, которые за счет быстрой текучести остаются в пропитанном материале. В образцах с разным содержанием разбавителя (рис. 2 а, б, в) количество пор равно 28, 30, 34 пор/см² соответственно.

Отслеживать поры можно с помощью анализа светимости пикселей. Для этого применяют моделирование светорассеяния на поверхности или выполняют оценку рельефа по методу атомно-силовой микроскопии (АСМ). Метод АСМ позволяет получать микрорельеф образца, однако оборудование для его проведения является дорогостоящим и малораспространенным. Обработка файлов в формате BMP дает возможность смоделировать принцип работы АСМ с использованием анализа светимости пикселей: чем выше яркость, тем ближе данный участок к наблюдателю и, соответственно, тем выше рельеф. Моделирование проводили с использованием программного обеспечения «AFM Vision». Результаты представлены на рисунке 4.

По результатам моделирования микрорельефа поверхности образцов с разным содержанием разбавителя ДЭГ-1 можно увидеть локальные зоны с высокой концентрацией пор, что может быть связано с неполной пропиткой материала (рис. 4а). На рисунке 4б поверхность образца более однородная, и наблюдается меньшее скопление пор. При дальнейшем увеличении содержания разбавителя (рис. 4в) смола становится слишком жидкой, что приводит к появлению большого числа пор. Поскольку пузырьки воздуха легче «запираются» внутри материала, заметны более выраженные перепады рельефа, связанные с неоднородностью образца.

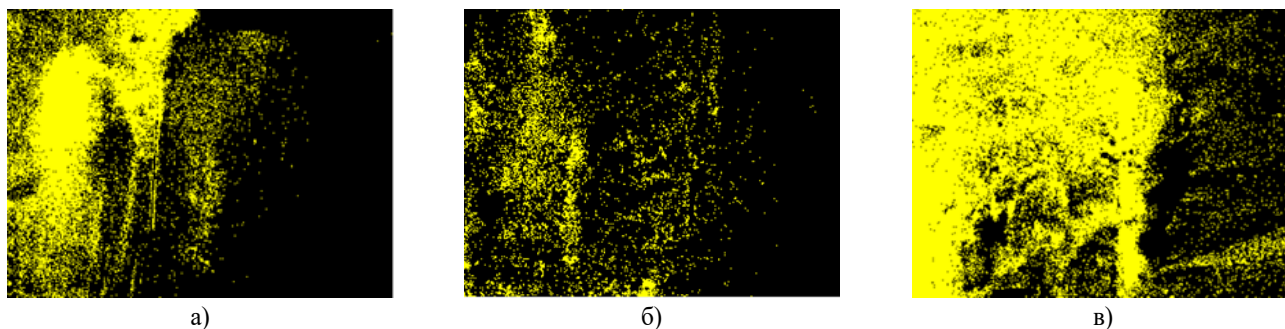


Рис. 3. Анализ количества пор в композиционном материале на основе эпоксидной смолы и стекломата с различным содержанием разбавителя ДЭГ-1:
а) 5 масс.%; б) 10 масс.%; в) 15 масс.%

Fig. 3. Analysis of the number of pores for a composite material based on epoxy resin and glass mat with different diluent contents:
а) 5 wt.%; б) 10 wt.%; в) 15 wt.%

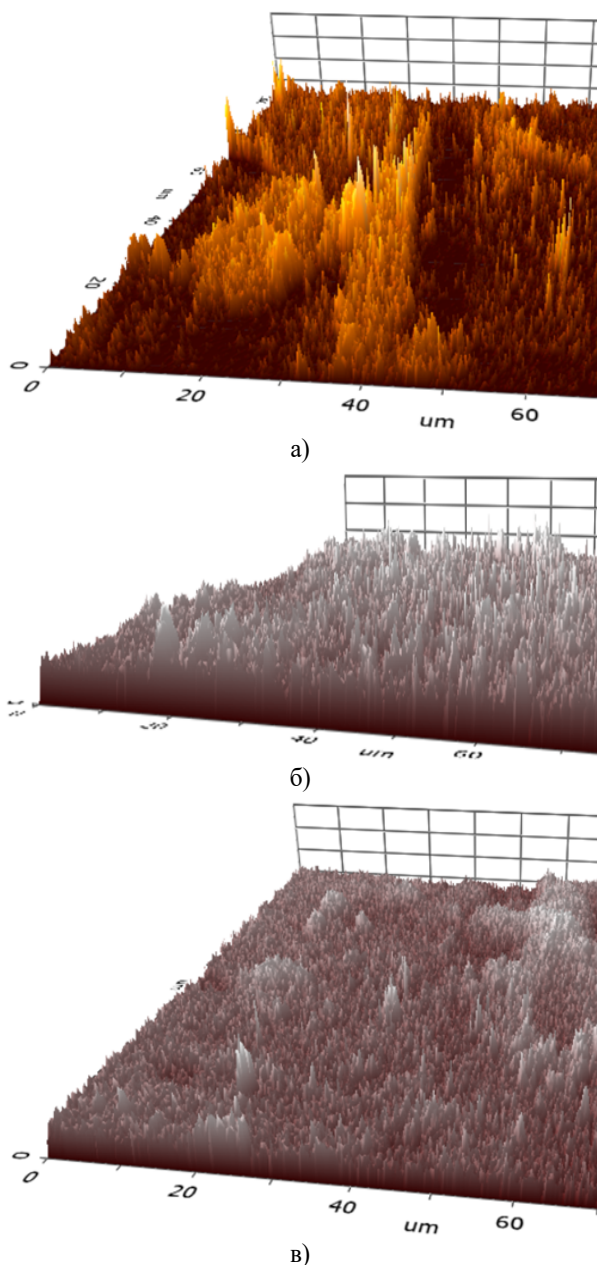


Рис. 4. Моделирование рассеяния света по поверхности образцов с различным содержанием разбавителя ДЭГ-1:

а) 5 масс.%; б) 10 масс.%; в) 15 масс.%

Fig. 4. Simulation of light scattering over the surface of samples with different diluent contents:

а) 5 wt.%; б) 10 wt.%; в) 15 wt.%

Список источников

1. Костомахин М.Н. Оценка режимов работы сельскохозяйственной техники // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14, № 4. С. 78-83. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-4-78-83>
2. Гончарова Ю.А., Денисов В.А. Анализ отказов полимерных деталей сельскохозяйственной техники // Технический сервис машин. 2021. № 3. С. 146-154. <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-3-146-154>
3. Ризаев Д.А. Современные тенденции развития сельскохозяйственного машиностроения // Академическая публицистика. 2023. № 4-1. С. 96-98. EDN: GJFJRF

Исходя из данных мультипараметрической микроскопии, можно сделать следующие выводы: 1) при текущих условиях создания материала более равномерная пористость композита со средним значением 30 пор/см² наблюдается у образца с 10 масс.% ДЭГ-1; 2) однородность распределения пор и характер их скопления в различных участках зависят не только от природы материала, но и от совокупности технологических факторов – таких, как вязкость смолы, тип и концентрация разбавителя, режим отверждения, условия пропитки наполнителя и скорость удаления летучих компонентов; 3) наблюдаемые при оптической микроскопии картины пористости свидетельствуют о формировании неоднородной микроструктуры, что может вызывать изменения физических, механических и прочностных характеристик композита, влияя на его эксплуатационные свойства и долговечность.

Предположение о влиянии типа и концентрации разбавителя на технологические свойства композиционных материалов подтверждено.

Выводы

Тип и концентрация разбавителя существенно влияют на реологические и технологические свойства композиционных материалов. Данные параметры необходимо контролировать для равномерного распределения материала и формирования однородного микрорельефа. Инактивный разбавитель (растворитель 646) эффективно снижает вязкость системы, но ограниченная растворимость эпоксидной смолы в нем приводит к формированию неоднородной структуры, поэтому более предпочтительным является использование активного разбавителя ДЭГ-1. Кривая вязкости эпоксидного композита с ДЭГ-1 практически линейна, однако чрезмерное разбавление вызывает рост пористости. Среди изученных составов оптимальным является состав с 10 масс.% ДЭГ-1, обеспечивающий снижение вязкости эпоксидной смолы на 60% и равномерную пористость композита.

References

1. Kostomakhin M.N. Evaluation of Agricultural Machinery Operation Modes. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(4):78-83. (In Russ.)
2. Goncharova Y.A., Denisov V.A. Failures of polymer parts of agricultural machinery. *Machinery Technical Service*. 2021;144(3):146-154. (In Russ.)
3. Rizaev D.A. Modern trends in the development of agricultural engineering. *Akademicheskaya Publitsistika*. 2023;4-1:96-98. (In Russ.)
4. Kasimov R.M., Alekhina R.A., Sviridov A.S., Blinov N.D. Methods for increasing the fluidity of two-component resins for the

4. Касимов Р.М., Алехина Р.А., Свиридов А.С., Блинов Н.Д. Методы повышения текучести двухкомпонентных смол для производства деталей экстерьера сельскохозяйственной техники // Технический сервис машин. 2024. Т. 62, № 4. С. 117-122. <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2024-62-4-117-122>

5. Алдошин Н.В., Голубев В.В., Васильев А.С. и др. Перспективы использования пластиковых деталей сельскохозяйственных машин // Агроэкоинженерия. 2023. № 3 (116). С. 20-34. EDN: IFEBHA

6. Загора А.Г., Ткачук А.И., Терехов И.В., Мухаметов Р.Р. Методы химической модификации эпоксидных олигомеров (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 7. С. 73-85. EDN: PQCSJR

7. Rudawska A., Frigione M. Effect of diluents on mechanical characteristics of epoxy compounds. *Polymers*. 2022;14(11):2277. <https://doi.org/10.3390/polym14112277>

8. Pastarnokienė L., Jonikaitė-Švėgždienė J., Lapinskaitė N. et al. The effect of reactive diluents on curing of epoxy resins and properties of the cured epoxy coatings. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2023;20:1207-1221. <https://doi.org/10.1007/s11998-022-00737-4>

9. Блазнов А.Н., Бычин Н.В., Сакошев Е.Г. и др. Исследование возможности применения разбавителя Cardura E10P в эпоксидных композициях // Пластические массы. 2024. № 4. С. 27-30. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2024-04-27-30>

10. Морозов С.В., Павлов Н.А., Зенин М.Н. Исследование влияния состава эпоксидного связующего на его физико-механические характеристики // Ползуновский вестник. 2020. № 1. С. 140-144. EDN: EWNQAW

11. Симонов-Емельянов И.Д., Ломовской В.А., Шмбель Н.Л. и др. Влияние пористости и температуры термообработки на релаксационные и механические свойства полимерных и углеродных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2009. № 1. С. 33-39. EDN: JXMFTV

Информация об авторах

¹ Касимов Руслан Михайлович, ведущий инженер; ruslankm@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0316-4272>; SPIN-код: 7689-3869

² Алехина Раиса Ашотовна, инженер; rioraya9@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-1194-392X>; SPIN-код: 7863-0285

³ Блинов Никита Дмитриевич, младший научный сотрудник; nik.blinov76@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-8734-2885>; SPIN-код: 5033-8004

⁴ Свиридов Алексей Сергеевич, младший научный сотрудник; sviridov.vim@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9396-2281>; SPIN-код: 7334-3624

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

Вклад авторов

Касимов Р.М. – концептуализация, методология, визуализация; Свиридов А.С. – руководство исследованием, ресурсы, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; Алехина Р.А. – создание черновика рукописи, проведение исследования;

Блинов Н.Д. – проведение исследования, верификация данных.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 04.03.2025; после рецензирования и доработки 21.08.2025; принята к публикации 25.08.2025

production of exterior parts of agricultural machinery. *Machinery Technical Service*. 2024;62(4):117-122. (In Russ.)

5. Aldoshin N.V., Golubev V.V., Vasiliev A.S. et al. Application potential of plastic parts of agricultural machines. *Agroekoinzheneriya*. 2023;3(116):20-34. (In Russ.)

6. Zagora A.G., Tkachuk A.I., Terekhov I.V., Mukhametov R.R. Methods of chemical modification of epoxy oligomers (review). *Proceedings of VIAM*. 2021;101(7):73-85. (In Russ.)

7. Rudawska A., Frigione M. Effect of diluents on mechanical characteristics of epoxy compounds. *Polymers*. 2022;14(11):2277.

8. Pastarnokienė L., Jonikaitė-Švėgždienė J., Lapinskaitė N. et al. The effect of reactive diluents on curing of epoxy resins and properties of the cured epoxy coatings. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2023;20:1207-1221. <https://doi.org/10.1007/s11998-022-00737-4>

9. Blaznov A.N., Bychin N.V., Sakoshev E.G. et al. Study of the possibility of using Cardura E10P thinner in epoxy compositions. *Plasticheskie massy*. 2024;(4):27-30. (In Russ.)

10. Morozov S.V., Pavlov N.A., Zenin M.N. Study of the influence of the composition of the epoxy binder on its physical and mechanical characteristics. *Polzunovskiy Vestnik*. 2020;1:140-144. (In Russ.)

11. Simonov-Emelianov I.D., Lomovskoy V.A., Shmebel N.L. et al. Porosity and heat treating temperature influence on the relaxation and mechanical properties of polymer and carbon composite materials. *Composite Materials Constructions*. 2009;1:33-39. (In Russ.)

Author Information

Ruslan M. Kasimov¹, Lead Engineer; ruslankm@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0316-4272>

Raisa A. Alekhina², Engineer; rioraya9@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-1194-392X>

Nikita D. Blinov³, Junior Research Engineer; nik.blinov76@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-8734-2885>

Aleksei S. Sviridov⁴, Junior Research Engineer; sviridov.vim@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9396-2281>

^{1, 2, 3, 4} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Moscow, Russia, 1st Institutskiy Proezd Str., Bld. 5

Authors Contribution

R.M. Kasimov – conceptualization, methodology, visualization; A.S. Sviridov – research supervision, resources, writing – manuscript review and editing;

R.A. Alekhina – writing – original draft preparation, investigation;

N.D. Blinov – investigation, data verification.

Conflict of interest

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

Received 04.03.2025; Revised 21.08.2025; Accepted 25.08.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.791.763

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-75-81>

Расчет размеров единичной сварочной площадки при электроконтактной приварке металлической ленты

*А.В. Серов¹, Н.В. Серов^{2✉}, Д.М. Скороходов³*¹ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет); г. Москва, Россия^{2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ av_serov@vk.com; <https://orcid.org/0000-0001-6114-7354>² n.serov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7676-4344>³ d.skorokhodov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>

Аннотация. Абразивное изнашивание деталей и узлов сельскохозяйственной техники приводит к выходу ее из строя. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники и их упрочнение функциональными покрытиями проводят с помощью электроконтактной приварки (ЭКП) металлических лент. Свойства и качество получаемых покрытий зависят от регулируемых (сила сварочного тока, скорость сварки и величина подачи) и нерегулируемых параметров ЭКП, а также от размера единичной сварочной площадки (ЕСП). Цель исследований – получение расчетных формул для определения размеров ЕСП и осадки присадочного материала при ЭКП металлической ленты. Установлено, что размеры эллиптической ЕСП зависят от силы сжатия, диаметра восстанавливаемой поверхности, ширины и диаметра роликовых электродов, физических и механических свойств присадочного материала (твердость, модуль упругости Юнга и коэффициент Пуассона). При этом свойства материала – такие, как упругость и прочность, не поддаются регулировке в процессе приварки. Регулировать размеры ЕСП можно только усилием сжатия и изменением ширины и/или диаметра электродов. В свою очередь, уменьшение или увеличение усилия сжатия электродов приводят к изменению характера контактирования поверхностей в зоне соединения, а следовательно, электрического сопротивления и степени пластической деформации, что отражается на качестве покрытий. В результате теоретических исследований и применения метода моделирования предложена математическая модель расчета геометрических параметров ЕСП при ЭКП. Произведенные по полученным зависимостям расчеты подтвердили результаты других исследований: рекомендуемая 30%-ная пластическая деформация (осадка) присадочного материала для детали диаметром 40 мм достигается при ширине электродов 6,3...9 мм, а для диаметра 80 мм – при 4,6...6,4 мм. Применение формул для расчета размеров ЕСП позволит повысить качество и эффективность электроконтактной приварки.

Ключевые слова: покрытия; восстановление деталей; упрочнение; ремонт; электроконтактная приварка; деформация; металлическая лента

Для цитирования: Серов А.В., Серов Н.В., Скороходов Д.М. Расчет размеров единичной сварочной площадки при электроконтактной приварке металлической ленты // *Агроинженерия*. 2025. Т. 27, № 5. С. 75-81. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-75-81>

ORIGINAL ARTICLE

Calculation of welding point dimensions during electrical contact welding of a metal tape

*A.V. Serov¹, N.V. Serov^{2✉}, D.M. Skorokhodov³*¹ Bauman Moscow State Technical University; Russia, Moscow^{2,3} Russian Timiryazev State Agrarian University; 127434, Russia, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49¹ av_serov@vk.com; <https://orcid.org/0000-0001-6114-7354>² n.serov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7676-4344>³ d.skorokhodov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>

Abstract. Abrasive wear causes widespread failure of agricultural machinery parts and assemblies. Electrical contact welding (ECW) of metal tapes is a common method for restoring and reinforcing these parts with functional coatings. The properties and quality of the resulting coatings are influenced by both regulated (welding current,

speed, and feed rate) and unregulated ECW parameters, as well as the size of a single welding site (SWS). This study aims to develop calculation formulas for determining the SWS dimensions and the filler material upset during ECW of a metal tape. The authors have established that the elliptical SWS dimensions depend on compression force, the diameter of the restored surface, electrode width and diameter, and physical and mechanical properties of the mounting material (hardness, Young's modulus, Poisson's ratio). While material properties like elasticity and strength are inherent, SWS size can be adjusted by manipulating compression force and/or electrode dimensions. However, altering the compression force affects contact characteristics of the surfaces in the joint area, electrical resistance, and the degree of plastic deformation, which ultimately influences coating quality. Through theoretical research using physical and mathematical models, the authors have derived a mathematical model for calculating SWS geometric parameters for ECW. Calculations based on these dependencies confirmed previous findings: achieving the recommended 30% plastic deformation (upset) of filler material for a 40 mm diameter part requires an electrode width of 6.3 to 9 mm, while a diameter of 80 mm requires 4.6 to 6.4 mm. The use of these SWS calculation formulas will improve the quality and efficiency of electrical contact welding.

Keywords: coatings; restoration; hardening; repair; electrical contact welding; deformation; metal tape

For citation: Serov A.V., Serov N.V., Skorokhodov D.M. Calculation of welding point dimensions during electrical contact welding of a metal tape. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(5):75-81 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-75-81>

Введение

Причиной выхода из строя сельскохозяйственной техники является абразивное изнашивание деталей и узлов под воздействием твердых частиц почвы и агрессивных сред. На фоне постоянного повышения стоимости и дефицита некоторых запасных частей актуальным является совершенствование технологий ремонта машин и оборудования. Перспективным методом получения функциональных покрытий является электроконтактная приварка (ЭКП) металлических лент. Процесс ЭКП имеет множество задаваемых, регулируемых и нерегулируемых параметров, оказывающих большое влияние на свойства и качество получаемых покрытий.

При назначении регулируемых параметров процесса электроконтактной приварки (ЭКП) металлических лент [1-3] – таких, как сила сварочного тока, скорость сварки и величина подачи, важно знать размеры единичной сварочной площадки (ЕСП) [4, 5].

Регулировать размеры ЕСП можно только усилием сжатия и изменением ширины и/или диаметра электродов. При ЭКП диаметр роликов, как правило, больше диаметра восстанавливаемой наружной цилиндрической поверхности, поэтому геометрические параметры ЕСП будут определяться шириной роликовых электродов и диаметром восстанавливаемой поверхности, а также свойствами присадочного материала. При этом для образования соединения необходимо создать усилие сжатия, обеспечивающее следующие воздействия: механический контакт соединяемых материалов; оптимальный электрический контакт; упругая деформация – запас потенциальной энергии; пластическая деформация, проявляющаяся в изменении

структуры (повышение плотности дислокаций) и выделении теплоты [5].

Цель исследований: получение расчетных формул для определения размеров ЕСП при электроконтактной приварке металлической ленты.

Материалы и методы

В исследованиях использованы методы физического и математического моделирования, проведен обзор источников и теории электроконтактной приварки металлических лент.

Результаты и их обсуждение

Для определения размеров ЕСП необходимо рассмотреть деформацию присадочного материала между электродом и заготовкой.

При приварке ленты шириной меньше длины заготовки, но превышающей ширину рабочей части электрода b_3 , электрод-ролик вдавливаются в ленту подобно индентору при измерении твердости. Под действием нагрузки в плоскости, проходящей через центр заготовки и перпендикулярной ее поверхности, происходит деформация: материал ленты обтекает заготовку, электрод вытесняется вперед и назад вдоль оси, а также в поперечном направлении.

Полная поперечная деформация ленты при этом будет складываться из суммы ее деформации вокруг заготовки и от вдавливания электрода:

$$\Delta h = \Delta h_3 + \Delta h_d, \quad (1)$$

где Δh – полная усадка ленты, м; Δh_3 – осадка ленты под электродом; Δh_d – осадка ленты над заготовкой.

Необходимо отметить, что полная деформация будет складываться из упругой и пластической деформаций.

Площадь поперечного сечения ЕСП контакта в общем случае будет представлять собой эллипс, а в частном случае – окружность (рис. 1).

Меньшую полуось эллиптической ЕСП в случае радиусных фасок электрода вычислим из прямого треугольника CFD , предположив, что ширина контакта не может быть больше ширины роликового электрода, м:

$$2b = b_3 + 2FD = b_3 + 2\sqrt{CD^2 - CF^2} = \\ = b_3 + 2\sqrt{r_\phi^2 - (r_\phi - \Delta h_3)^2} = b_3 + 2\sqrt{\Delta h(2r_\phi - \Delta h)}. \quad (2)$$

В случае фаски с прямолинейной поверхностью ширину ЕСП можно найти как

$$2b = b_3 + 2\Delta h \tan \beta, \quad (3)$$

где r_ϕ – радиус фаски роликового электрода, м.

Значение твердости по шкале Мартенса с достаточной точностью позволит вычислить величину упругопластической деформации ленты при вдавлении в нее электрода и заготовки [6-7].

При вычислении твердости по рассматриваемой шкале приложенную нагрузку F делят на функцию площади поверхности $A_s(h)$ рабочей части наконечника – в частности, для алмазного наконечника Виккерса формула для определения твердости имеет вид, Па:

$$HM = \frac{F}{A_s(h_m)}. \quad (4)$$

Следовательно, из определения твердости можно считать, что для конкретного материала при одинаковых условиях отношение нагрузки к площади контакта будет постоянным:

$$\frac{P}{A_3} = \frac{P}{A_d} = HM, \quad (5)$$

где P – усилие сжатия электродов, Н; A_3 и A_d – площади отпечатков электрода и детали на присадочном материале (ленте) соответственно, м².

Из выражения (5) получим:

$$A_3 = A_d = \frac{P}{HM}. \quad (6)$$

Приблизненно площадь поверхности отпечатка роликового электрода можно найти как произведение длины дуги сегмента электрода, вдавленного в присадочный материал, на его ширину:

$$A_3 = A_d = 2bl_3 = 2bl_d, \quad (7)$$

где l_3 и l_d – длина дуги сегмента электрода и детали вдавленных в поверхность присадочного материала, м. Поскольку они равны, примем

$$l = l_3 = l_d = \frac{A_3}{2b}, \quad (8)$$

с учетом (6) –

$$l = \frac{\frac{P}{HM}}{2b} = \frac{P}{2bHM}. \quad (9)$$

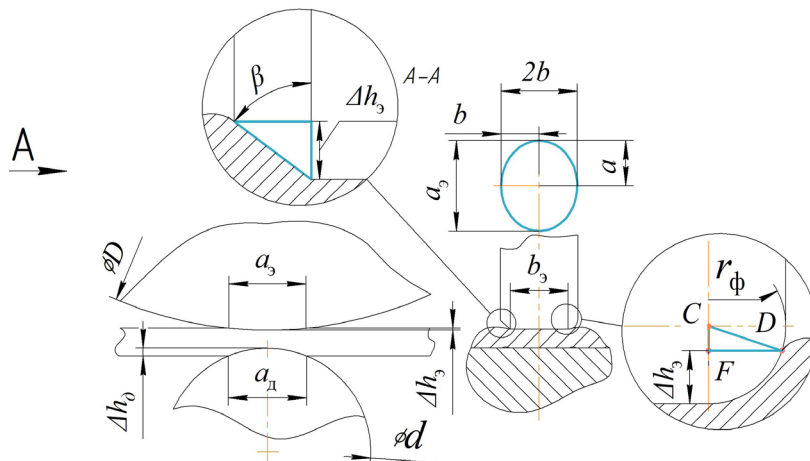


Рис. 1. Схема деформации присадочного материала при электроконтактной приварке:

D – диаметр роликового электрода; d – диаметр детали; Δh_3 – осадка ленты под электродом; Δh_0 – осадка ленты над заготовкой; b_3 – ширина роликового электрода; r_ϕ – радиус скругления роликового электрода; β – угол катета фаски; a_d – длина ЕСП со стороны детали; a_3 – длина ЕСП со стороны электрода

Fig. 1. Schematic diagram of the deformation of the filler material during electrical contact welding:

D – diameter of the roller electrode; d – diameter of the part; Δh_3 – tape upset under the electrode; Δh_d – tape upset over the workpiece; h – tape thickness; b_3 – width of the roller electrode; radius of rounding of the roller electrode r_ϕ ; β – angle of the chamfer catheter; a_d – length of the SWS on the part side; a_3 – length of the SWS on the electrode side

Длиной ЕСП в соответствии с данными рисунка 1 является хорда, образованная окружностями электродов и детали, а значит:

$$a_3 = D \sin(\alpha), \quad (10)$$

где α – центральный угол, рад.

Со стороны электрода

$$\alpha_3 = \frac{l}{D}, \quad (11)$$

со стороны детали –

$$\alpha_d = \frac{l}{d}. \quad (12)$$

Для первоначальных расчетов примем $b = b_3$, тогда

$$a_3 = D \sin\left(\frac{P}{Db_3HM}\right). \quad (13)$$

Аналогично можно найти деформацию со стороны детали:

$$a_d = d \sin\left(\frac{P}{db_3HM}\right). \quad (14)$$

Значения твердости по Мартенсу известны не для всех материалов, поэтому на практике чаще используются значения твердости по Бринеллю или Виккерсу [8], которые в пределах интервала измерения твердости по шкале Бринелля различаются незначительно, а данных по этим методам для различных материалов и условий испытаний (температуре) накоплено достаточно. Тогда

$$a_3 = D \sin\left(\frac{P}{Db_3HB_{HV}}\right); \quad (15)$$

$$a_d = d \sin\left(\frac{P}{db_3HB_{HV}}\right). \quad (16)$$

При наличии данных о твердости по обеим шкалам предпочтительной является твердость по Бринеллю, так как сферический индентор по форме ближе к рассматриваемому случаю, чем алмазная пирамида.

Зная хорду, вычислим величину пластической деформации ленты со стороны электродов Δh_3^n и детали Δh_d^n , м:

$$\Delta h_3^n = \frac{D(1 - \cos\left(\frac{P}{Db_3HB_{HV}}\right))}{2}; \quad (17)$$

$$\Delta h_d^n = \frac{d(1 - \cos\left(\frac{P}{db_3HB_{HV}}\right))}{2}. \quad (18)$$

Однако при измерениях эти методы не учитывают упругую деформацию, поэтому ее величину определим с помощью расчетной модели Г.Р. Герца.

Упругая составляющая деформации (a^y , м) ленты под действием усилия сжатия по модели Г.Р. Герца (рис. 2) определяется по выражению:

$$a^y = 2\sqrt{\frac{F_i R}{\pi C}}, \quad (19)$$

где F_i – равномерно распределенная по длине сила на единицу длины рабочей поверхности индентора (интенсивность силы), Н/м.

$$F_i = \frac{P}{b_3}; \quad (20)$$

$$C = \frac{E}{1 - \mu^2}, \quad (21)$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга, Па. Тогда

$$a^y = 2\sqrt{\frac{P}{b_3} \frac{R_{3-d}}{\pi C}}. \quad (22)$$

Длина ЕСП при упругом контакте –

$$a_3^y = 4\sqrt{\frac{(1 - \mu^2) PD}{2E\pi b_3}}; \quad (23)$$

$$a_d^y = 4\sqrt{\frac{(1 - \mu^2) Pd}{2E\pi b_3}}. \quad (24)$$

Для определения величины упругой деформации необходимо вычислить центральный угол при известных значениях хорды и диаметра:

$$\alpha_3^y = \sin^{-1}\left(\frac{a_3^y}{D}\right); \quad (25)$$

$$\alpha_d^y = \sin^{-1}\left(\frac{a_d^y}{d}\right). \quad (26)$$

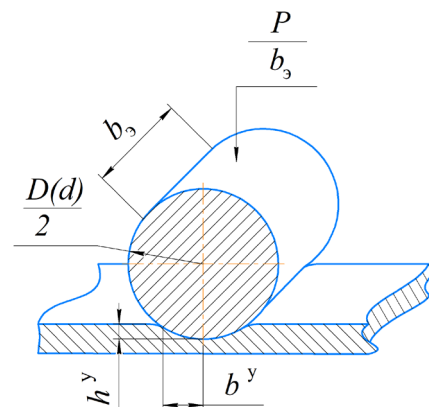


Рис. 2. Схема для расчета упругой деформации при вдавливании цилиндра по модели Г.Р. Герца
Fig. 2. Scheme for calculating elastic deformation during cylinder indentation according to the G.R. Hertz model

Упругая осадка ленты под электродом и над деталью, соответственно, находятся по выражениям:

$$\Delta h_y = \frac{D \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{a_y}{D} \right)^2} \right)}{2}; \quad (27)$$

$$\Delta h_d = \frac{d \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{a_d}{d} \right)^2} \right)}{2}. \quad (28)$$

Следовательно, полная деформация с учетом (17) и (18) –

$$\Delta h_y = \Delta h_y^n + \Delta h_y^y = \frac{D \left(1 - \cos \left(\frac{P}{Db_y HB_{HV}} \right) \right)}{2} + \frac{D \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{a_y}{D} \right)^2} \right)}{2}; \quad (29)$$

$$\Delta h_d = \Delta h_d^n + \Delta h_d^y = \frac{d \left(1 - \cos \left(\frac{P}{db_y HB_{HV}} \right) \right)}{2} + \frac{d \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{a_d}{d} \right)^2} \right)}{2}, \quad (30)$$

а с учетом формул 23 и 24 получим:

$$\Delta h_y = \frac{D \left(1 - \cos \left(\frac{P}{Db_y HB_{HV}} \right) \right)}{2} + \frac{D \left(1 - \sqrt{1 - 16 \frac{(1-\mu^2)P}{2DE\pi b_y}} \right)}{2}; \quad (31)$$

$$\Delta h_d = \frac{d \left(1 - \cos \left(\frac{P}{db_y HB_{HV}} \right) \right)}{2} + \frac{d \left(1 - \sqrt{1 - 16 \frac{(1-\mu^2)P}{2dE\pi b_y}} \right)}{2}. \quad (32)$$

Полная длина ЕСП –

$$a_y = D \sin \alpha_y; \quad (33)$$

$$a_d = d \sin \alpha_d. \quad (34)$$

После тригонометрического преобразования получим:

$$\alpha_y = \cos^{-1} \left(1 - 2 \frac{\Delta h_y}{D} \right); \quad (35)$$

$$\alpha_d = \cos^{-1} \left(1 - 2 \frac{\Delta h_d}{d} \right). \quad (36)$$

Окончательно длину ЕСП можно найти по выражениям:

$$a_y = D \sin \left(\cos^{-1} \left(1 - 2 \frac{\Delta h_y}{D} \right) \right) = D \sqrt{1 - \left(1 - 2 \frac{\Delta h_y}{D} \right)^2}; \quad (37)$$

$$a_d = d \sin \left(\cos^{-1} \left(1 - 2 \frac{\Delta h_d}{d} \right) \right) = d \sqrt{1 - \left(1 - 2 \frac{\Delta h_d}{d} \right)^2}. \quad (38)$$

На рисунке 3 представлены расчеты площади ЕСП для диаметра восстанавливаемой поверхности 50 мм и ширины роликовых электродов $b = 10$ мм в зависимости от твердости присадочной ленты и усилия сжатия электродов.

Прогнозируемая осадка присадочного материала показана на рисунке 4. Диаметр указан для меньшего из размеров, то есть если диаметр заготовки меньше размера электрода, то расчет производится по диаметру электрода, и наоборот. Деформация роликовых электродов и детали не учитывается.

Если осадка будет превышать толщину материала, то он практически весь будет вытесняться из-под электродов.

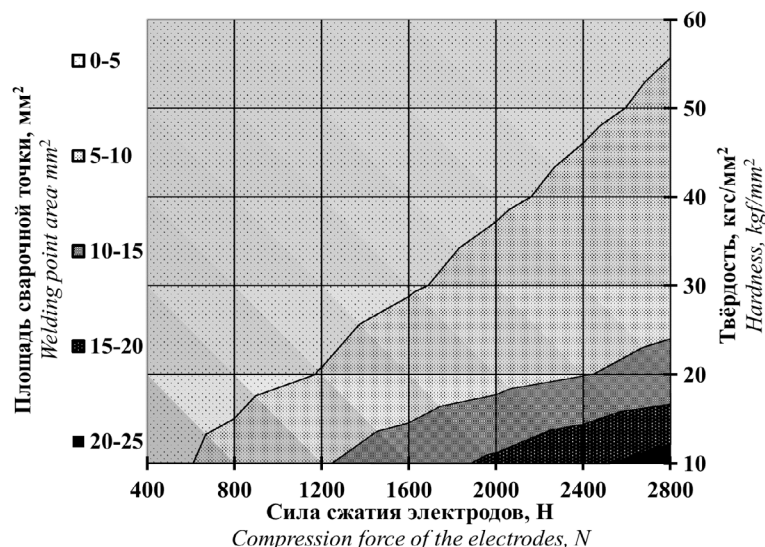


Рис. 3. Характер влияния твердости и силы сжатия на площадь ЕСП, мм²

Fig. 3. Effect of hardness and compressive force on the area of the welding point, mm²

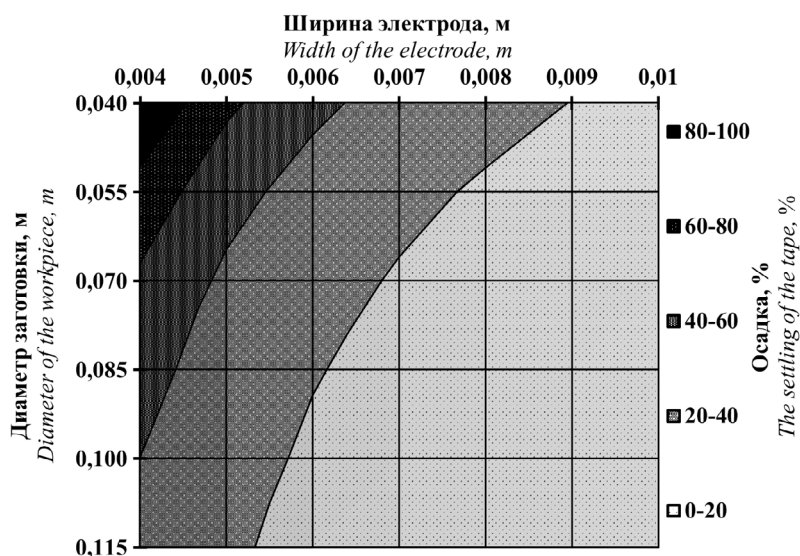


Рис. 4. Прогнозируемая осадка присадочного материала в зависимости от диаметра восстанавливаемой поверхности или электродов и ширины электродов

Fig. 4. Predicted upset of filler material depending on the diameter of the surface to be repaired or the electrodes and the width of the electrodes

Из графика (рис. 4) следует, что деформация 20...40% для диаметра детали 40 мм достигается при ширине электродов 6,3...9 мм, а для диаметра 80 мм – при 4,6...6,4 мм. Результаты расчетов согласуются с данными различных исследований. Так, учеными¹ [4, 9] установлено, что при электроконтактной приварке ленты из стали марки 50ФХА на вал диаметром 40 мм электродами шириной 10 мм и усилия сжатия 1,7 кН достигались оптимальные условия приварки, а пластическая деформация (осадка) присадочного материала при этом составляла 20...30%.

Выводы

1. Предложена физическая и математическая модель для расчета геометрических параметров единичной сварочной площадки ЕСП, образуемой электроконтактной приваркой металлической ленты к цилиндрической поверхности с помощью роликовых электродов.

¹ Серов Н.В. Восстановление и упрочнение деталей машин и оборудования агропромышленного назначения электроконтактной приваркой: Учебно-методическое пособие. Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2021. 25 с. EDN: JXTNEK

Список источников

1. Berezshnaya O.V., Gribkov E.P., Borovik P.V., Kassov V.D. The finite element modulation of thermostressed state of coating formation at electric contact surfacing of "shaft" type parts. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 2019. P. 7601792. <https://doi.org/10.1155/2019/7601792>
2. Латыпов Р.А., Серов А.В., Серов Н.В., Игнаткин И.Ю. Утилизация отходов машиностроения и металлургии при упрочнении и восстановлении деталей машин // *Металлург*. 2021. № 5. Ч. 1. С. 81-87. https://doi.org/10.52351/00260827_2021_05_81

2. Размеры эллиптической единичной сварочной площадки зависят от силы сжатия, ширины, диаметра роликовых электродов и диаметра восстанавливаемой поверхности, а также от физических и механических свойств присадочного материала: твердости, модуля упругости Юнга и коэффициента Пуассона.

3. В процессе приварки (сварки) не регулируются упругие и прочностные свойства материала, поэтому изменять величину осадки присадочного материала можно только варьированием ширины сварочных электродов: для увеличения осадки уменьшать ширину электродов, для уменьшения – наоборот, увеличивать.

4. Рассчитали, что при обработке поверхности диаметром 40...80 мм ширина электродов должна составлять 4,6...9 мм. При меньшей ширине осадка будет значительно больше, что приведет к снижению полезной толщины покрытия. При большей ширине не будет достигаться оптимальная пластическая деформация, что отрицательно отразится на качестве самого покрытия и на прочности соединения основы с присадочным материалом.

References

1. Berezshnaya O.V., Gribkov E.P., Borovik P.V., Kassov V.D. The finite element modulation of thermostressed state of coating formation at electric contact surfacing of "shaft" type parts. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019;2019:7601792. <https://doi.org/10.1155/2019/7601792>
2. Latypov R.A., Serov A.V., Serov N.V., Ignatkin I.Y. Utilization of wastes from mechanical engineering and metallurgy during strengthening and restoration of machine parts. Part 1. *Metallurg*. 2021;5:81-87. (In Russ.) https://doi.org/10.52351/00260827_2021_05_81

3. Yunusbaev N.M., Gabitov I.I., Farkhshatov M.N. et al. Perspective method of restoration of autotractor parts by electrocontact welding of powder materials in the magnetic field. *Tribology in Industry*. 2019;41(1):115-125. <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.01.13>

4. Бурак П.И., Серов А.В. Оптимизация процесса электроконтактной приварки металлической и аморфной лент с использованием статистического моделирования // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2011. № 1 (46). С. 59-61. EDN: RASSZV

5. Серов А.В., Латыпов Р.А., Серов Н.В., Чернов В.В. Расчетно-экспериментальная оценка сопротивления зоны соединения при электроконтактной приварке с использованием промежуточного слоя // *Электromеталлургия*. 2024. № 5. С. 19-30. EDN: PCZZOO

6. Асланиян А.Э., Асланиян Э.Г., Гаврилкин С.М. и др. Государственный первичный эталон твердости по шкалам Мартенса и шкалам индентирования ГЭТ 211-2014 // *Измерительная техника*. 2016. № 6. С. 3-6. EDN: WMCFBH

7. Асланиян А.Э. Влияние скорости приближения наконечника к образцу на твердость по шкалам индентирования // *Метрология в XXI веке: Материалы V научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов, Менделеево, Московская область, 23 марта 2017 г. М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»*, 2018. С. 106-109. EDN: YQLGNN

8. Тыллануров Ы. Зависимость давления и твердости материала по методу Виккерса // *Матрица научного познания*. 2023. № 9-1. С. 133-136. EDN: NPASNX

9. Бурак П.И., Латыпов Р.А., Серов А.В., Серов Н.В. Использование цифровых технологий при исследовании и моделировании процессов, протекающих при электроконтактной приварке // *Технический сервис машин*. 2019. № 1 (134). С. 113-121. EDN: VNWZTU

3. Yunusbaev N.M., Gabitov I.I., Farkhshatov M.N. et al. Perspective method of restoration of autotractor parts by electrocontact welding of powder materials in the magnetic field. *Tribology in Industry*. 2019;41(1):115-125. <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.01.13>

4. Burak P.I., Serov A.V. Optimization of electric welding of metal and amorphous ribbons using statistical modeling. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2011;1(46):59-61. (In Russ.)

5. Serov A.V., Latypov R.A., Serov N.V., Chernov V.V. Computational-and-experimental evaluation of resistance of joint zone during electrical contact welding with use of intermediate layer. *Elektrometallurgiya*. 2024;5:19-30. (In Russ.)

6. Aslanyan A.E., Aslanyan E.G., Gavrilkin S.M. et al. State primary hardness standard according to the Martens scales and GET 211-2014 indentation scales. *Izmeritel'naya tekhnika*. 2016;6:3-6. (In Russ.)

7. Aslanyan A.E. Influence of the tip approach velocity to the sample on hardness according to indentation scales. *Metrologiya v 21 veke: Proceedings of the V Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Postgraduates and Specialists, Mendeleev, March 23, 2017. FSUE "VNIIFTRI". Mendeleev, Moscow Region: Federal State Unitary Enterprise "All-Russian Scientific Research Institute of Physico-Technical and Radio-Technical Measurements"*, 2018, pp. 106-109. (In Russ.)

8. Tyllanurov Y. Dependence of pressure and hardness according to the Vickers method. *Matritsa nauchnogo poznaniya*. 2023;9-1:133-136. (In Russ.)

9. Burak P.I., Latypov R.A., Serov A.V., Serov N.V. The use of digital technologies in case of a research and simulation of the processes proceeding in case of an electrocontact welding. *Machinery Technical Service*. 2019;1(134):113-121. (In Russ.)

Информация об авторах

¹ Серов Антон Вячеславович, канд. техн. наук, доцент; av_serov@vk.com; <https://orcid.org/0000-0001-6114-7354>; SPIN-код: 8269-4840

² Серов Никита Вячеславович, канд. техн. наук, доцент; n.serov@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-7676-4344>; SPIN-код: 3364-1840

³ Скороходов Дмитрий Михайлович, канд. техн. наук, доцент; d.skorokhodov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>; SPIN-код: 9791-9002

¹ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет); 105505, Российская Федерация, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

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

Вклад авторов

А.В. Серов – создание черновика рукописи, теоретические исследования, концептуализация, визуализация;
Н.В. Серов – верификация данных, методология, формальный анализ, ресурсы, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
Д.М. Скороходов – верификация данных, методология, формальный анализ, ресурсы.

Статья поступила 28.04.2025, после рецензирования и доработки 15.09.2025; принята к публикации 16.09.2025

Author Information

Anton V. Serov¹, CSc (Eng), Associate Professor; av_serov@vk.com, <https://orcid.org/0000-0001-6114-7354>; Scopus Author ID: 55346731200; Researcher ID: MTG-6373-2025

Nikita V. Serov^{2✉}, CSc (Eng), Associate Professor; n.serov@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-7676-4344>; Scopus Author ID: 57226809065; Researcher ID AAE-5293-2022

Dmitry M. Skorokhodov³, CSc (Eng), Associate Professor; d.skorokhodov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>; Scopus Author ID: 57223623999; Researcher ID AFH-8012-2022

¹ Bauman Moscow State Technical University, 105505

Russian Federation, Moscow, 2nd Baumanskaya Str., 5, bld. 1

^{2,3} Russian Timiryazev State Agrarian University; 127434,

Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49

Author Contribution

A.V. Serov – writing – original draft preparation, theoretical research, conceptualization, visualization;
A.V. Serov – data verification, methodology, formal analysis, resources, writing – review and editing of the manuscript;
D.M. Skorokhodov – data verification, methodology, formal analysis, resources.

Received 28.04.2025; Revised 15.09.2025; Accepted 16.09.2025

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 629.733.5-62:621.365.4

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-82-89>



Исследование процесса электронагрева газа в рабочем объеме дирижабля сельскохозяйственного назначения

М.И. Белов¹, Д.В. Белов², С.А. Андреев³✉, Н.Е. Кабдин⁴, Д.М. Селезнева⁵

^{1,2,3,4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва; Россия

¹ belov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9907-8825>

² dmitri.belov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>

³ energo-andreev@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0001-8608-9904>

⁴ energo-nek@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4104-4187>

⁵ energo-dms@rgau-msha.ru

Аннотация. Мониторинг местности, наблюдение за сельскохозяйственными животными, ретрансляцию радиосигналов с наземных датчиков можно осуществлять с помощью дистанционно управляемого дирижабля. Регулировать высоту полета дирижабля сельскохозяйственного назначения целесообразно изменением температуры газа в рабочем объеме. Быстрый и равномерный электронагрев газа можно осуществлять за счет энергии бортовой сети. Предложено выполнить электронагреватель в виде параллелепипеда, расположенного внутри рабочего объема дирижабля. При этом ребра параллелепипеда – это токопроводящие элементы, обладающие большим удельным сопротивлением. Снижение массы конструкции обеспечивается сокращением проводов с большим сечением. Подвод электрической энергии от бортового аккумулятора к электронагревателю предложено провести к двум наиболее удаленным точкам. Критерием подбора сопротивлений ребер параллелепипеда является одинаковая скорость выделения тепловой энергии при протекании электрического тока через единицу длины токопроводящих элементов электронагревателя. С целью определения параметров электронагревателя из токопроводящих элементов представлен алгоритм вычислительных операций. На основании законов Кирхгофа установлена связь между сопротивлениями нагревательных элементов, напряжения источника питания и током в каждом нагревательном элементе. Для вычисления сопротивлений нагревательных элементов определены дополнительные условия и составлены 3 системы из 25 алгебраических уравнений, связывающих электротехнические параметры процесса. Установлено, что сопротивления токопроводящих элементов нагревателя, обеспечивающие одинаковое тепловыделение во всех элементах на единицу длины, однозначно связаны с отношением максимальной и минимальной длин элементов, напряжением источника тока и его мощностью. Определены условия изменения мощности и выделяемой теплоты изменением сопротивлений электронагревателя. Представлен алгоритм расчета параметров электронагревателя. Алгоритм позволяет оперативно вычислять величины сопротивлений токопроводящих элементов, обеспечивающих одинаковое выделение тепловой энергии во всех участках разветвленной электрической цепи.

Ключевые слова: дирижабль сельскохозяйственного назначения; подъемная сила; нагрев; электронагрев газа; электронагреватель; токопроводящие элементы; параллелепипед; сопротивление; ток; мощность; алгоритм расчета параметров электронагревателя

Для цитирования: Белов М.И., Белов Д.В., Андреев С.А., Кабдин Н.Е., Селезнева Д.М. Исследование процесса электронагрева газа в рабочем объеме дирижабля сельскохозяйственного назначения // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 5. С. 82-89. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-82-89>

ORIGINAL ARTICLE

Electrical heating of gas in the working volume of agricultural airships

M.I. Belov¹, D.V. Belov², S.A. Andreev³, N.E. Kabdin⁴, D.M. Selezneva⁵

^{1,2,3,4,5} Russian Timiryazev State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow; Russia

¹ belov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9907-8825>

² dmitri.belov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>

³ energo-andreev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8608-9904>

⁴ energo-nek@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4104-4187>

⁵ energo-dms@rgau-msha.ru

Abstract. Remotely controlled airships offer promising solutions for terrain monitoring, livestock observation, and relaying signals from ground-based sensors in agricultural settings. Controlling an airship's altitude by adjusting the gas temperature within its working volume presents an efficient approach. This can be achieved through rapid and uniform electrical heating of the gas using onboard power. This article proposes a parallelepiped-shaped electric heater, positioned inside the airship's working volume, where the edges of the parallelepiped act as high-resistivity, current-conducting elements. To minimize weight, the design reduces the number of thick wires by supplying electrical energy from the onboard battery to two of the most distant points on the heater. The key design criterion is achieving a uniform heat release rate per unit length across all current-conducting elements. To determine the necessary parameters, the authors developed an algorithm to calculate the required resistances. Based on Kirchhoff's laws, they established the relationship between element resistances, power source voltage, and current distribution. The algorithm incorporates additional conditions to solve three systems of 25 algebraic equations, linking the electrical parameters. The results demonstrate that the ratio of maximum to minimum element lengths, the source voltage, and the desired power uniquely determine the resistances ensuring uniform heat release per unit length across all elements. Furthermore, the algorithm identifies conditions for adjusting power and heat release by modifying the electric heater's resistances. The presented algorithm enables rapid calculation of resistance values for the current-conducting elements, guaranteeing consistent heat generation throughout the branched electrical circuit.

Keywords: agricultural airship; lift; heating; electrical heating of gas; electric heater; current-conducting elements; parallelepiped; resistance; current; power; algorithm for calculating the parameters of an electric heater

For citation: Belov M.I., Belov D.V., Andreev S.A., Kabdin N.E., Selezneva D.M. Electrical heating of gas in the working volume of agricultural airships. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(5):82-89 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-82-89>

Введение

Бурное развитие электроники и техники связи существенно изменило техническое оснащение сельскохозяйственной авиации. На смену пилотируемым легким самолетам пришли беспилотные летательные аппараты, среди которых особое место могут занять дистанционно управляемые дирижабли [1, 2]. Основным преимуществом беспилотных дирижаблей сельскохозяйственного назначения является их способность длительного пребывания в условиях полета при минимальных затратах энергии. При отсутствии горизонтального перемещения дирижаблей затраты энергии могут обратиться в нуль. Большие габариты, тихоходность и высокая парусность дирижаблей не препятствуют их эффективному применению для мониторинга местности, наблюдения за сельскохозяйственными

животными, ретрансляции радиосигналов с наземных датчиков и в других технологических процессах АПК.

Одной из актуальных задач современного дирижаблестроения является поиск технических решений, обеспечивающих безопасное и энергосберегающее увеличение подъемной силы. Подъемная сила однозначно влияет на грузоподъемность дирижаблей и обеспечивает их подъем на значительную высоту, что позволяет расширить круг выполняемых производственных задач. Увеличение подъемной силы может быть достигнуто использованием газа с минимальной плотностью или увеличением рабочего объема летательного аппарата¹.

¹Щербаков Ю.В. Теория полета дирижаблей. М.: Издательство ЛКИ, 2019. 89 с.

Последний прием не всегда оправдан, поскольку влечет за собой резкий рост стоимости конструкции и создает дополнительные сложности при управлении полетом.

Поскольку плотность газов или их смесей существенно зависит от температуры^{2,3}, управление подъемной силой несложно реализовать нагревом или охлаждением рабочего объема [3]. При этом принудительный нагрев осуществляется за счет бортового источника энергии, а охлаждение – естественным образом, за счет рассеяния тепла в окружающую среду. Для обеспечения постоянства высоты полета дирижабля применяют подачу тепловой энергии с некоторым смещением, благодаря которому нулевой вес конструкции достигается при небольшом нагреве газа относительно окружающей среды. В качестве бортовых источников энергии обычно используются теплогенераторы на жидком или газообразном топливе, однако с появлением высокоэффективных химических аккумуляторов и легких фотоэлектрических элементов становятся перспективными электрические нагреватели. При проектировании таких нагревателей одним из простых технических решений является размещение в рабочем объеме дирижабля объемной токопроводящей решетки из проволоки с большим удельным сопротивлением [4]. Это позволяет достичь равномерного и достаточно быстрого нагрева газа, не применяя устройства для его перемешивания [5].

В связи с наличием ограничений массы конструкции дирижабля подвод электрической энергии от бортового аккумулятора к электронагревателю производится только к двум точкам. Это позволяет сократить применение проводов большого сечения в питающих цепях, однако значительно усложняет расчет электронагревателя. Компьютерное моделирование электрической цепи открывает возможность определения соотношения сопротивлений проводников в различных участках электронагревателя в соответствии с требуемым количеством выделяющейся теплоты [6].

Цель исследований: составить алгоритм расчета параметров электронагревателя в виде параллелепипеда, образуемого токопроводящими элементами и располагаемого внутри рабочего объема дирижабля.

²Термодинамические свойства гелия / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов и др. М.: Изд-во стандартов, 1984. 320 с.

³Справочник по физике / Х. Кухлинг; Пер. с нем. М.: Мир, 1985. 520 с.

Материалы и методы

В процессе исследования электронагрева газа в рабочем объеме дирижабля использованы законы электротехники, сведения из теории электрических цепей, методы математического анализа и программирования в среде Lazarus.

Результаты и их обсуждение

Наиболее распространенная форма современных дирижаблей соответствует эллипсоиду вращения, длинная ось которого располагается параллельно поверхности Земли. С целью максимального заполнения внутреннего пространства дирижабля объемной электронагревательной решеткой примем ее конфигурацию в виде параллелепипеда. Параллелепипед вписан во внутренний объем эллипсоида без контакта с его поверхностью, а источник энергии подключен к наиболее удаленным точкам электронагревателя. Объем газа и параметры дирижабля выбираются таким образом, чтобы при незначительном нагреве газа подъемная сила и сила тяжести находились в равновесии [7, 8].

Введем обозначения: $Oxyz$ – прямоугольная декартова система координат с горизонтальной осью Ox и вертикальной осью Oz ; U – номинальное напряжение источника тока, В; e – емкость источника тока, А·ч; t – максимальное время работы источника тока, ч; W – мощность источника тока, Вт; i, j – номера вершин (узлов) нагревателя в виде прямоугольного параллелепипеда ($1 \leq i < j; j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$); R_{ij} – сопротивление ребра (токопроводящего элемента) нагревателя между вершинами с номерами i, j соответственно, Ом; I_{ij} – ток на участке между узлами с номерами i, j соответственно, А; a – длина нагревательного элемента, представляющего малое ребро параллелепипеда вдоль осей Oy и Oz , м; b – длина нагревательного элемента, представляющего большое ребро параллелепипеда вдоль оси Ox , м; Q – среднее количество теплоты, выделяемое нагревательным элементом под действием тока в единицу времени на единицу длины нагревательного элемента, Вт/м.

Электрическая схема нагревателя с токопроводящими элементами в виде ребер прямоугольного параллелепипеда и источником постоянного тока, создающего разность потенциалов между вершинами параллелепипеда, показана на рисунке 1.

Сопротивления ребер параллелепипеда при заданных размерах требуется подобрать таким образом, чтобы скорость выделения теплоты от тока в токопроводящих элементах нагревателя на единицу

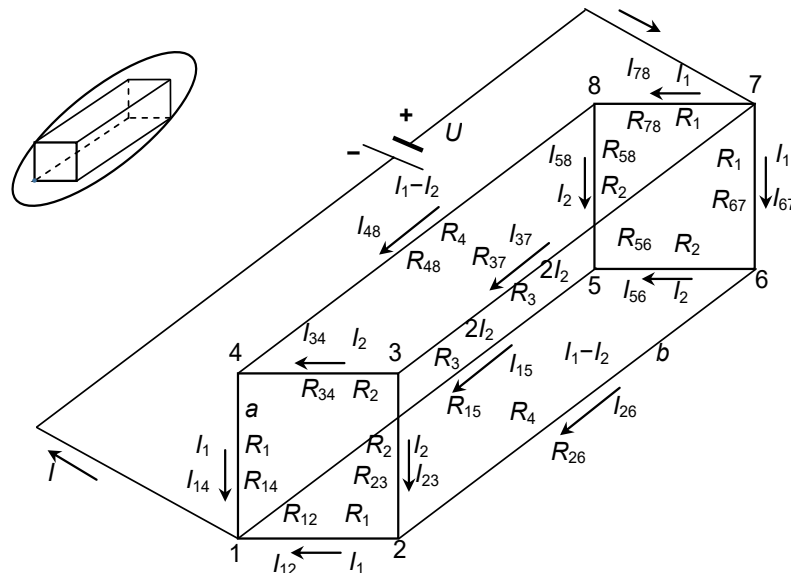


Рис. 1. Электрический нагреватель с источником тока:

1-2, 2-3, 3-4, 1-4, 5-6, 6-7, 7-8, 5-8, 1-5, 2-6, 3-7, 4-8 – нагревательные элементы (проводники) между узлами соответственно 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4, 1 и 4, 5 и 6, 6 и 7, 7 и 8, 1 и 5, 2 и 6, 3 и 7, 4 и 8

Fig. 1. Electric heater with a current source:

1-2, 2-3, 3-4, 1-4, 5-6, 6-7, 7-8, 5-8, 1-5, 2-6, 3-7, 4-8 – heating elements (conductors) between nodes 1 and 2, 2 and 3, 3 and 4, 1 and 4, 5 and 6, 6 and 7, 7 and 8, 1 and 5, 2 and 6, 3 and 7, 4 and 8, respectively

длины провода оставалась постоянной. Уравнения Кирхгофа позволяют установить связь между сопротивлениями нагревательных элементов, напряжением источника питания и током в каждом нагревательном элементе [9]. Запишем их в следующем виде⁴:

$$\begin{cases}
 I_{12} + I_{14} + I_{15} - I = 0, \text{ узел } 1 \\
 I_{23} + I_{26} - I_{12} = 0, \text{ узел } 2 \\
 I_{37} - I_{23} - I_{34} = 0, \text{ узел } 3 \\
 I_{34} + I_{48} - I_{14} = 0, \text{ узел } 4 \\
 I_{56} + I_{58} - I_{15} = 0, \text{ узел } 5 \\
 I_{67} - I_{26} - I_{56} = 0, \text{ узел } 6 \\
 I - I_{37} - I_{67} - I_{78} = 0, \text{ узел } 7
 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases}
 R_{12}I_{12} - R_{14}I_{14} + R_{23}I_{23} - R_{34}I_{34} = 0, \text{ контур } 1, 2, 3, 4, 1 \\
 R_{56}I_{56} - R_{58}I_{58} + R_{67}I_{67} - R_{78}I_{78} = 0, \text{ контур } 5, 6, 7, 8, 5 \\
 R_{12}I_{12} - R_{56}I_{56} + R_{26}I_{26} - R_{15}I_{15} = 0, \text{ контур } 1, 2, 6, 5, 1 \\
 R_{67}I_{67} - R_{23}I_{23} + R_{26}I_{26} - R_{37}I_{37} = 0, \text{ контур } 2, 6, 7, 3, 2 \\
 R_{34}I_{34} - R_{78}I_{78} + R_{37}I_{37} - R_{48}I_{48} = 0, \text{ контур } 3, 7, 8, 4, 3 \\
 R_{15}I_{15} - R_{48}I_{48} + R_{58}I_{58} - R_{14}I_{14} = 0, \text{ контур } 1, 5, 8, 4, 1 \\
 R_{14}I_{14} + R_{48}I_{48} + R_{78}I_{78} - U = 0, \text{ контур } 1, 4, 8, 7, 1.
 \end{cases} \quad (2)$$

В качестве неизвестных переменных выступают величины тока I_{ij} между узлами с номерами i, j и ток I в цепи источника напряжения U между

узлами 1, 7. При заданных сопротивлениях проводников и номинальном напряжении источника тока 7 уравнений (1) и 6 из 7 уравнений (2) позволяют определить 13 неизвестных токов в проводниках между узлами. Чтобы найти сопротивления нагревательных элементов, необходимо определить дополнительные условия и составить соответствующие дополнительные уравнения. Таким условием служит одинаковое для всех нагревательных элементов выделение тепла с единицы их длины [10]. Данные условия на основании закона Джоуля-Ленца для проводников длиной a и b запишем следующим образом⁵:

$$\begin{cases}
 R_{ij}I_{ij}^2 = Qa, 1 \leq i \leq 7; i < j \leq 8 \text{ контуры } 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 \\
 R_{ij}I_{ij}^2 = Qb, 1 \leq i \leq 7; i < j \leq 8 \text{ боковые четыре контура, } (3)
 \end{cases}$$

где

$$Q = W / (8a + 4b). \quad (4)$$

Система нелинейных алгебраических уравнений (1), (2), (3) содержит 25 уравнений для определения 13 неизвестных токов и 12 неизвестных сопротивлений. Решение этой системы можно произвести на компьютере при использовании стандартных пакетов программ⁶.

⁵ Калашников С.Г. Электричество. М.: Физматлит, 2003. 624.

⁶ Полянин А.Д., Зайцев В.Ф. Справочник по нелинейным уравнениям математической физики: точные решения. М.: Физматлит, 2002. 432 с.

⁴ Алешкевич В.А. Электромагнетизм. М.: Физматлит, 2014. 404 с.

Другой доступный путь заключается в том, чтобы упростить эту систему, воспользовавшись геометрической и электрической симметрией нагревательных элементов относительно центра параллелепипеда. Для этого примем равенство сопротивлений симметричных нагревательных элементов (рис. 1):

$$\begin{cases} R_1 = R_{12} = R_{14} = R_{67} = R_{78} \\ R_2 = R_{23} = R_{34} = R_{56} = R_{58} \\ R_3 = R_{15} = R_{37} \\ R_4 = R_{26} = R_{48} \end{cases} \quad (5)$$

Ввиду симметрии токи $I_{12}, I_{14}, I_{67}, I_{78}$ равны между собой. Введя переменную I_1 , запишем данные равенства:

$$I_{12} = I_{14} = I_{67} = I_{78} = I_1. \quad (6)$$

Аналогично токи $I_{23}, I_{34}, I_{56}, I_{58}$ равны между собой и равны I_2 :

$$I_{23} = I_{34} = I_{56} = I_{58} = I_2. \quad (7)$$

Уравнения (1) для узлов 3, 5 с учетом равенств (7) позволяют найти переменные I_{15}, I_{37} , обозначенные как I_3 , в виде:

$$I_3 = I_{15} = I_{37} = 2I_2. \quad (8)$$

Подставляя выражения (8) для I_{15}, I_{37} в уравнения (1) для узлов 1, 7 и учитывая равенства (6), выразим I через переменные I_1, I_2 :

$$I = 2I_1 + 2I_2. \quad (9)$$

Из уравнений (1) для узлов 2, 4, 6 с учетом равенств (5), (6) выразим оставшиеся токи I_{26}, I_{48} , обозначенные как I_4 , через переменные I_1, I_2 :

$$I_4 = I_{26} = I_{48} = I_1 - I_2. \quad (10)$$

Таким образом, с помощью уравнений (6)-(10) 13 неизвестных по токам выражаются через две неизвестные: I_1 и I_2 . В то же время и 12 неизвестных сопротивлений выражаются через 4 неизвестных значения R_1, R_2, R_3, R_4 . Для определения 6 неизвестных достаточно 6 уравнений. Можно убедиться, что уравнения Кирхгофа по току и первые два уравнения Кирхгофа по напряжению выполняются автоматически. Следующие четыре уравнения Кирхгофа по напряжению сводятся с учетом равенств (5)-(10) к одному уравнению, которое вместе с последним уравнением Кирхгофа запишется следующим образом:

$$\begin{cases} R_1 I_1 + R_4 (I_1 - I_2) - R_2 I_2 - R_3 2I_2 = 0 * \\ R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_3 2I_2 = U ** \end{cases} \quad (11)$$

* – контуры 1, 2, 6, 5; 2, 6, 7, 3; 3, 7, 8, 4; 1, 5, 8, 4;

** – контуры между узлами 1, 7 с источником тока.

Оставшиеся 12 уравнений (3) с учетом равенств (5)...(10) приводятся к следующим независимым 4 уравнениям:

$$\begin{cases} R_1 I_1^2 = Qa, \text{ ребра } 1, 2; 1, 4; 6, 7; 7, 8 \\ R_2 I_2^2 = Qa, \text{ ребра } 2, 3; 3, 4; 5, 6; 5, 8 \\ R_3 4I_2^2 = Qb, \text{ ребра } 1, 5; 3, 7 \\ R_4 (I_1 - I_2)^2 = Qb, \text{ ребра } 1, 5; 3, 7. \end{cases} \quad (12)$$

Итак, исходная система уравнений (1), (2) и (3) с 25 неизвестными свелась к системе уравнений (11), (12) с шестью неизвестными. Уравнения (11) после подстановки в них выражений сопротивлений, найденных из уравнений (12), приводятся к виду:

$$\begin{cases} a / I_1 + b / (I_1 - I_2) - a / I_2 - b / (2I_2) = 0 \\ a / I_1 + a / I_2 + b / (2I_2) = U / Q. \end{cases}$$

Первое уравнение последней системы после умножения обеих частей на I_1 представляет собой квадратичное уравнение относительно неизвестной (I_1 / I_2) и при условии $I_1 > I_2$ имеет единственный корень. Неизвестные I_1, I_2 после этого однозначно определяются из второго уравнения этой системы как

$$I_1 = (a + ac + bc / 2) Q / U;$$

$$I_2 = (a / c + a + b / 2) Q / U$$

или с учетом (4):

$$I_1 = i_1 W / U; I_2 = i_2 W / U, \quad (13)$$

где

$$c = \left(4 + \frac{3b}{a} + \sqrt{\left(4 + \frac{3b}{a} \right)^2 - 8 \left(2 + \frac{b}{a} \right)} \right) / (4 + 2b / a);$$

$$i_1 = [1 + c + (b / a) c / 2] / (8 + 4b / a);$$

$$i_2 = [1 / c + 1 + (b / a) / 2] / (8 + 4b / a).$$

После нахождения токов найдем сопротивления из уравнений (12), заменив переменные Q и I_1, I_2 их выражениями в равенствах (4), (13). Запишем формулы для сопротивлений в следующем виде:

$$\begin{cases} R_1 = (U^2 / W) / \{ [8 + 4(b / a)] i_1^2 \} \\ R_2 = (U^2 / W) / \{ [8 + 4(b / a)] i_2^2 \} \\ R_3 = (U^2 / W) / \{ [8 / (b / a) + 4] 4i_2^2 \} \\ R_4 = (U^2 / W) / \{ [8 / (b / a) + 4] (i_1 - i_2)^2 \}. \end{cases} \quad (14)$$

При неизменном напряжении источника тока мощность тока и сопротивления нагревательных элементов связаны обратно пропорциональной

зависимостью. При неизменной емкости источника тока связь между максимальной продолжительностью работы нагревателя и мощностью тока также обратно пропорциональна и записывается так:

$$t = eU / W.$$

Таким образом, чем меньше сопротивления элементов нагревателя, тем больше мощность нагревателя и меньше продолжительность нагрева при неизменной емкости.

В результате анализа формул (13) и (14) становится очевидным, что при рассмотрении куба вместо параллелепипеда (при $b = a$) $R_1 = R_3$; $R_2 = R_4$; $I_1 = 2 I_2$. Алгоритм расчета тока и сопротивлений нагревательных элементов представим в такой последовательности:

- 1) задание исходных данных: b/a , U , W ;
- 2) расчет безразмерных токов i_1 , i_2 и токов I_1 , I_2 по формулам (13);
- 3) расчет токов в нагревательных элементах I_{12} , I_{14} , I_{67} , I_{78} по формулам (6), I_{23} , I_{34} , I_{56} , I_{58} по формулам (7), I_{15} , I_{37} по формулам (8), I_{26} , I_{48} по формуле (10);
- 4) расчет тока I в цепи источника по формуле (9);
- 5) расчет сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 , R_4 по формулам (14);
- 6) расчет сопротивлений нагревательных элементов R_{12} , R_{14} , R_{67} , R_{78} , R_{23} , R_{34} , R_{56} , R_{58} , R_{15} , R_{37} , R_{26} , R_{48} по формулам (5).

Анализ уравнений (14) показывает, что сопротивления элементов нагревателя, обеспечивающие одинаковое тепловыделение во всех элементах на единицу длины, связаны только с тремя независимыми параметрами: отношением длин ребер параллелепипеда, напряжением источника тока и мощностью источника тока. Отношение длин ребер и напряжение источника тока являются неизменяемыми параметрами. Поскольку связь между сопротивлениями и мощностью является обратно пропорциональной, мощность источника тока можно увеличивать или уменьшать во время работы объемной решетки за счет изменения сопротивлений. При этом уменьшение или увеличение всех четырех сопротивлений должны производиться таким образом, чтобы эти изменения оказались пропорциональными относительно исходных значений с одинаковыми для всех коэффициентом пропорциональности. Исходные значения сопротивлений перед их изменением следует определять по формулам (12) при заданном значении мощности (рис. 1).

На рисунке 2 в качестве примера представлены зависимости сопротивлений электронагревателя (a) и токов (b) от отношения (b/a) при напряжении и мощности источника тока 12 В и 600 Вт⁷ соответственно.

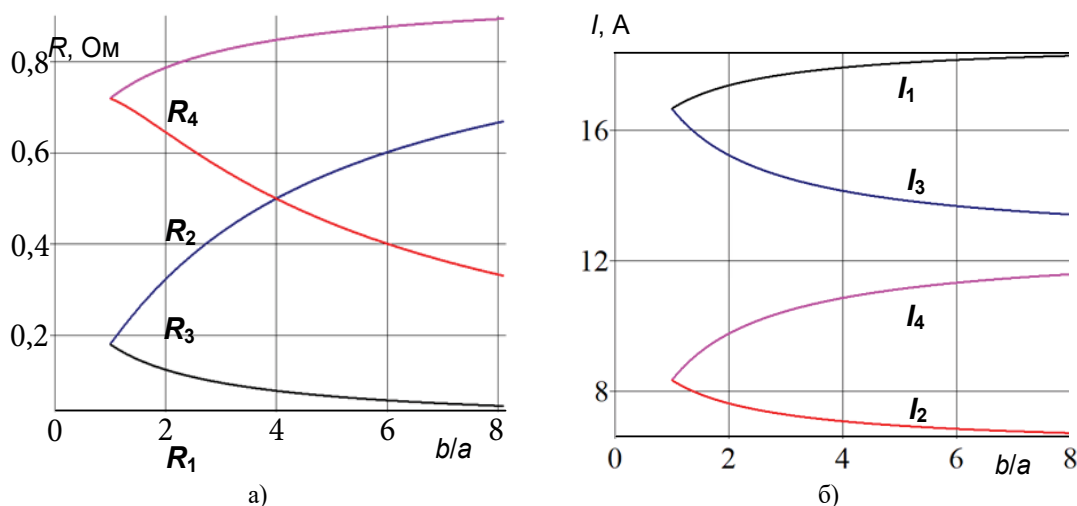


Рис. 2. Зависимости сопротивлений элементов нагревателя (a) и токов (b) от соотношения сторон параллелепипеда, образуемого токопроводящими элементами электронагревателя
Fig. 2. Dependencies of the resistance values of the heating elements (a) and currents (b) on the aspect ratio of the parallelepiped formed by the current-conducting elements of the electric heater

⁷Кирилин А.Н. Дирижабли. М.: МАИ-Принт, 2013. 415 с

Выводы

1. На основе разработанной модели системы электрического нагрева газа в дирижабле установлена зависимость сопротивления токопроводящих элементов нагревателя, обеспечивающих одинаковое тепловыделение во всех ребрах параллелепипеда на единицу длины, от отношения максимальной и минимальной длин этих ребер.

Список источников

1. Редькин А.В., Ялоза Ю.А., Ковалев И.Е. Оценка надежности конвертируемого летательного аппарата с гибридной силовой установкой и многвинтовой несущей системой // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 5. С. 76-96. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2020-23-5-76-96>
2. Редькин А.В., Ковалев И.Е., Костюченков А.Н. Рациональный облик высотного дирижабля и его энергоустановки для длительного барражирования в северных и арктических районах нашей страны // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2021. № 10. С. 28-37. EDN: NFFUTO
3. Дирижабль: Патент RU2751924 C1, МКП B64B1/06 (2006.01), МКП B64B1/62 (2006.01), МКП H01135/40 (2006.01) / Д.В. Белов, С.А. Андреев; заявка № 2020136535 от 11.01.2021, опублик. 10.07.2021, бюл. № 20. EDN: XCESVN
4. Воздухоплавательный аппарат: Патент RU197257 U1, МПК B64B1/62 / С.А. Андреев, Д.В. Белов; заявка № 2020106046, заявл. 10.02.2020, опублик. 16.04.2020, бюл. № 11. EDN: FOXVEE
5. Способ нагрева холодного газа гелия для системы наддува бака и устройство для его реализации: Патент RU2788240 C1, МКП B64G1/40 (2006.01), МКП F02K9/42 (2006.01), F02K9/94 (2006.01) / В.И. Трушляков В.А. Урбанский; заявка № 2021138966 от 27.12.2021, опублик. 17.01.2023, бюл. № 2. EDN: DWKLG1
6. Maruf N.I., Morales-Espana G., Sijm J. et al. Classification, potential role, and modeling of power-to-heat and thermal energy storage in energy systems: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022;53(B):102553. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102553>
7. Торопов А.Л. Использование электрических котлов с иерархическим управлением нагрузкой для квартирного теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17, № 11. С. 1488-1498. EDN: AHDIYI
8. Вадова Л.Ю. Способы и средства повышения эффективности работы трансформаторного нагревателя // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2022, № 8. С. 51-55. EDN: BEZBFZ
9. Комолддинов С.С., Кодиров А.А. Разработка сложного алгоритма электрической цепи // Universum: технические науки. 2021. № 11-5. С. 71-75. EDN: HHOMEO
10. Бодня А.В., Ньорба Е.А. Решение задач повышенного уровня сложности на расчет параметров разветвленных электрических цепей // Калининградский вестник образования. 2022. № 4 С. 42-54. EDN: GQRZGV

2. Мощность источника тока и выделение теплоты целесообразно регулировать во время работы изменением сопротивлений. Увеличение или уменьшение мощности достигается за счет, соответственно, прямо пропорционального уменьшения или увеличения исходных четырех независимых сопротивлений, рассчитанных по исходным данным при заданной мощности, с одинаковым коэффициентом пропорциональности.

References

1. Redkin A.V., Yaloza Yu.A., Kovalev I.E. Reliability assessment of convertible aircraft with hybrid propulsion system and multirotor lifting system. *Civil Aviation High Technologies*. 2020;23(5):76-96. (In Russ.) <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2020-23-5-76-96>
2. Redkin A.V., Kovalev I.E., Kostyuchenkov A.N. Determination of rational concept of high-altitude airship and its power systems for long hovering in the northern and arctic regions of our country. *Polet*. 2021;10:28-37. (In Russ.)
3. Andreev S.A., Belov D.V. Airship: patent No. 2751924 Russian Federation, IPC B64B1/06 (2006.01), B64B1/62 (2006.01), H01135/40 (2006.01), 2021. (In Russ.)
4. Andreev S.A., Belov D.V. Airship: patent No. 197257 Russian Federation, IPC B64B1/62, 2020. (In Russ.)
5. Trushliakov V.I., Urbanskii V.A. Method for heating cold helium gas for a tank pressurization system and a device for its implementation: patent No. 2788240 Russian Federation, IPC B64G1/40 (2006.01), F02K9/42 (2006.01), F02K9/94 (2006.01), 2023. (In Russ.)
6. Maruf N.I., Morales-Espana G., Sijm J. et al. Classification, potential role, and modeling of power-to-heat and thermal energy storage in energy systems: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022;53(B):102553. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102553>
7. Toropov A.L. Using electric boilers with hierarchical load control systems to supply heat to apartments. *Vestnik MGSU*. 2022;17(11):1488-1498.
8. Vadova L.Yu. Methods and means of increasing the efficiency of the transformer heater. *Mezhdunarodniy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*. 2022;8:51-155. (In Russ.)
9. Komolddinov S.S., Kodirov A.A. Development of a complex electric circuit algorithm. *Universum: Tekhnicheskie nauki*. 2021;11-5:71-75. (In Russ.)
10. Bodnya A.V., Niorba E.A. Solving tasks of the increased level of complexity for calculating parameters of branched electrical circuits. *Kaliningradskiy vestnik obrazovaniya*. 2022;4:42-54. (In Russ.)

Информация об авторах

- ¹ **Белов Михаил Иванович**, д-р техн. наук, профессор;
belov@rgau-msha.ru; SPIN-код: 4508-0008;
<https://orcid.org/0000-0001-9907-8825>
- ² **Белов Дмитрий Владимирович**, ассистент;
dmitri.belov@rgau-msha.ru;
SPIN-код: 6722-9029; <https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>
- ³ **Андреев Сергей Андреевич**, д-р техн. наук, доцент;
energo-andreev@rgau-msha.ru; SPIN-код: 8453-6024;
<https://orcid.org/0000-0001-8608-9904>
- ⁴ **Кабдин Николай Егорович**, канд. техн. наук, доцент;
energo-nek@rgau-msha.ru; SPIN-код: 7104-5110;
<https://orcid.org/0000-0002-4104-4187>
- ⁵ **Селезнева Дарья Михайловна**, канд. техн. наук, доцент;
energo-dms@rgau-msha.ru; SPIN-код: 7127-0084
- ^{1, 2, 3, 4, 5} Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434,
Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

М.И. Белов – концептуализация, методология, руководство исследованием;
Д.В. Белов – ресурсы;
С.А. Андреев – формальный анализ, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
Н.Е. Кабдин – формальный анализ;
Д.М. Селезнева – администрирование данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 17.12.2024, после рецензирования и доработки 22.09.2025; принята к публикации 22.09.2025

Author Information

- Mikhail I. Belov**¹, DSc (Eng), Professor; belov@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0001-9907-8825>;
Scopus Author ID: 57212563127; ResearcherID: T-5622-2018
- Dmitry V. Belov**², Assistant Professor;
dmitri.belov@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>
- Sergey A. Andreev**³, DSc (Eng), Associate Professor;
energo-andreev@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0001-8608-9904>;
Scopus Author ID: 57212200432;
Scopus Author ID: 57205072878
- Nikolay E. Kabdin**⁴, CSc (Eng), Associate Professor;
energo-nek@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-4104-4187>;
Scopus Author ID: 57224401953
- Darya M. Selezneva**⁵, CSc (Eng), Associate Professor;
energo-dms@rgau-msha.ru
- ^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev
Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow,
127434, Russian Federation

Author Contribution

M.I. Belov – conceptualization, methodology, research supervision;
D.V. Belov – resources;
S.A. Andreev – formal analysis, writing – original draft preparation, review and editing of the manuscript;
N.E. Kabdin – formal analysis;
D.M. Selezneva – data curation

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Received 17.12.2024; Revised 22.09.2025; Accepted 22.09.2025

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 378.1

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-90-99>

Лингвистические аспекты формирования профессионального самоопределения студентов аграрного вуза: от семантического анализа к речевым стратегиям профориентации

*И.В. Куламихина¹, Ж.Б. Есмурзаева², А.Ю. Алипичев³*¹ Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина; г. Омск, Россия² Омский государственный технический университет; г. Омск, Россия³ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ irakula@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3900-6365>² yesmurzaeva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0471-1921>³ alipichev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>

Аннотация. Актуальность исследований определяется необходимостью совершенствования лингвистического сопровождения профориентационной деятельности студентов в аграрных вузах с учетом реальных мотивационных установок. В условиях модернизации агропромышленного комплекса возрастает значимость не только технической подготовки кадров, но и точного понимания смысловых ориентиров, которыми руководствуются молодые люди при выборе профессии. Цель исследований – выявление и описание семантической модели профессионального самоопределения студентов агроинженерного направления подготовки через анализ мотивационных высказываний, с последующим использованием полученной модели в практике профориентации. В эмпирической части приведены результаты опроса относительно мотивации выбора профессии среди 97 студентов первого курса Омского государственного аграрного университета имени П.А. Столыпина. Семантический анализ речевых репрезентаций позволил выделить 10 ключевых семантических кластеров, объединенных в 3 смысловых блока: ценностно-смысловое ядро; блок рационально-прагматических смыслов; блок социально-контекстуальных смыслов выбора профессии. Они образуют семантическую модель, отражающую смысловую структуру профессионального выбора. Семантический подход позволил интерпретировать профессиональное самоопределение как речевое проявление личностных смыслов. Полученные результаты могут быть использованы для построения профориентационной коммуникации с абитуриентами на языке их ценностей, интересов и ожиданий.

Ключевые слова: агроинженерия; агроинженер; семантическая модель; мотивация выбора профессии; мотивы выбора профессии; профессиональное самоопределение; лингвистическое сопровождение

Для цитирования: Куламихина И.В., Есмурзаева Ж.Б., Алипичев А.Ю. Лингвистические аспекты формирования профессионального самоопределения студентов аграрного вуза: от семантического анализа к речевым стратегиям профориентации // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 5. С. 90-99. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-90-99>

ORIGINAL ARTICLE

Linguistic aspects of building professional self-determination of agrarian university students: from semantic analysis to verbal strategies of career guidance

I.V. Kulamikhina¹, Zh.B. Esmurzaeva², A.Yu. Alipichev³✉

¹ P.A. Stolypin Omsk State Agrarian University; Omsk, Russia

² Omsk State Technical University; Omsk, Russia

³ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

¹ irakula@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3900-6365>

² yesmurzaeva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0471-1921>

³ alipichev@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>

Abstract. The relevance of this research stems from the need to enhance linguistic support for career guidance activities in agricultural universities, taking into account the actual motivational attitudes of students. In the context of the modernization of the agro-industrial complex, the importance of not only technical training but also a clear understanding of the underlying meaning-making processes that guide young people in their career choices is increasing. The aim of the study is to identify and describe a semantic model of professional self-determination among agroengineering students through the analysis of their motivational statements, with the intention of applying this model in career guidance practices. The empirical part of the study employed an adapted open-response test of principal career-motivating factors, conducted among students of P.A. Stolypin Omsk State Agrarian University. Semantic analysis of the students' verbal representations revealed ten key semantic clusters, which were grouped into three meaningful blocks: a value-semantic core, a block of rational-pragmatic meanings, and a block of socio-contextual meanings associated with career choice. These clusters form a semantic model that reflects the meaning structure of professional choice. The semantic approach allowed professional self-determination to be interpreted as a verbal manifestation of personal meanings. The results obtained may be used to develop career guidance strategies that speak the language of prospective students' values, interests, and expectations.

Keywords: agricultural engineering; semantic model; career awareness; professional self-determination; career guidance; agrarian education; linguistic support

For citation: Kulamikhina I.V., Esmurzaeva Zh.B., Alipichev A.Yu. Linguistic aspects of building professional self-determination of agrarian university students: from semantic analysis to verbal strategies of career guidance. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(5):90-99 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-90-99>

Введение

В современных условиях агроинженерия играет ключевую роль в обеспечении продовольственной безопасности, повышении эффективности сельскохозяйственного производства и внедрении инновационных технологий. Развитие отрасли напрямую зависит от уровня подготовки специалистов и их профессиональной мотивированности. Для совершенствования системы профессиональной ориентации важное значение имеет понимание студентами мотивационно-смысловых оснований выбора профессии.

Анализ зарубежных источников показывает, что мотивация профессионального выбора среди молодежи носит комплексный характер и определяется «...как внутренними мотивами (личностные характеристики, ценности, интересы, потребности), так и внешними факторами (социальные, экономические, культурные условия,

влияние окружающей среды)» [1]. Значительную роль в выборе профессии играют ожидание высокого дохода после завершения профессионального образования [2] и материальное вознаграждение [3], а также статусные ориентиры [4], карьерные перспективы [1, 5] и значимость социальной позиции специалиста в профессиональном сообществе.

Зарубежными исследователями рассматривается роль семьи и образовательной среды в выборе профессии [1, 3, 6]. Установлено, что мотивы личной заинтересованности в профессии играют большую роль, чем факторы карьерного роста и профессиональных достижений, поскольку последние «...отражают долгосрочные аспекты и являются малозначимыми для обучающихся» [3]. Прочие мотивы выбора профессии включают в себя также возможность самореализации в профессии [4] и понимание своих личностных качеств [7]. Отмечается также снижение

интереса молодежи к сельскохозяйственным профессиям, обусловленное невысоким их престижем вследствие низкого уровня оплаты труда и влияния общественного мнения [8].

Несмотря на ряд публикаций, проблематика мотивации выбора профессии «Агроинженер» остается недостаточно изученной, особенно в плане учета регионально-экономических условий.

Существенный вклад в теоретическое осмысление проблемы мотивации профессионального выбора и самоопределения внесли представители отечественной психологической науки^{1, 2, 3}. Так, Е.А. Климов рассматривает профессиональное самоопределение как процесс формирования отношения личности к труду, включающий в себя осознание интересов и склонностей, оценку требований профессии, принятие решения и реализацию профессионального выбора¹. Особое внимание Е.А. Климов уделяет типологии профессий, среди которых агроинженерия занимает особое положение на стыке типов «Человек-техника» и «Человек-природа». Н.С. Пряжников акцентирует внимание на рефлексивной и субъектной позиции личности в контексте профессионального самоопределения. Он подчеркивает, что профессиональное самоопределение – это «рефлексивный процесс осмысления своего места в мире труда, встраивания профессии в личную стратегию развития»². В концепции В.Ф. Петренко мотивация выбора профессии рассматривается с позиции психосемантического подхода как внутренняя смысловая структура, отражающая отношение личности к миру, профессии и к себе. Профессиональное самоопределение связано с порождением значимых для личности смыслов. Такие семантические категории, как «интерес», «успех», «самореализация», «стабильность», «признание» и др. образуют смысловые основания, определяющие выбор³ [9]. Объединение этих подходов позволяет рассматривать самоопределение студентов как сложную систему, в которой личные интересы и склонности, влияние окружения, социоэкономические

факторы и внутренние мотивы профессионального выбора находятся во взаимодействии. Особую ценность приобретает психосемантический подход, который рассматривает профессиональное самоопределение через призму языкового выражения мотивационных смыслов. Анализ речевых высказываний позволяет выявить семантические категории, отражающие ключевые мотивы выбора профессии.

Цель исследований: разработка семантической модели профессионального самоопределения в области агроинженерии на основе анализа опроса студентов для лингвистического сопровождения профориентационной работы в аграрных вузах.

Материалы и методы

Востребованность профессии «Агроинженер» на современном рынке труда анализировали, исходя из открытых данных, опубликованных в центральных и региональных СМИ. Концепция В.Ф. Петренко о психосемантике стала основой для анализа профессионального самоопределения как процесса смыслообразования, в котором ключевую роль играют субъективные смысловые конструируемые.

Сбор языкового материала провели при помощи адаптированного теста открытых высказываний «Десять утверждений», разработанного авторами Классен и др. [10]. Респондентам предлагали 10 раз дать развернутый ответ на вопрос: «Я хочу быть агроинженером, потому что...». В семантический анализ было включено 813 высказываний. Из анализа исключали высказывания, носящие шуточный характер или не имеющие логического смысла для интерпретации. Речевые высказывания студентов подвергали ручному тематическому и семантическому кодированию двумя независимыми исследователями. На основе частотного распределения определили ключевые семантические кластеры, их структуру и связанные с ними смысловые конструируемые, отражающие основные мотивы профессионального выбора, объединенные затем в блоки. Лингвосемантический анализ речевых высказываний позволил выявить значимые языковые маркеры профессионального самоопределения студентов, которые легли в основу опросника для профориентационной работы.

Эмпирическая часть исследований была проведена на базе Омского государственного аграрного университета имени П.А. Столыпина. В исследованиях приняли участие 97 студентов 1 курса, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия».

¹ Климов Е.А. Психология профессионального самоопределения: Учебное пособие для студентов вузов. М.: Academia, 2004. 302 с. EDN: QXIENF.

² Пряжников Н.С. Профессиональное самоопределение: теория и практика: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Психология» и психологическим специальностям. М.: Академия, 2008. EDN: QXVVLH.

³ Петренко В.Ф. Основы психосемантики: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению и специальностям психологии. 2-е изд., доп. СПб.: Питер, 2005. 480 с. EDN: QXMDQT.

Результаты и их обсуждение

Важнейшей характеристикой агроинженерной профессии является многофункциональность: специалисты занимаются разработкой, обслуживанием и модернизацией сельскохозяйственной техники, механизацией производственных процессов, а также внедрением инновационных технологических решений. Это делает их деятельность «междисциплинарной и требующей широкого спектра компетенций» [11].

Работа агроинженера требует от специалистов гибкости, умения «...оперативно адаптироваться к изменяющимся условиям и принимать нестандартные решения» [12]. Для успешной карьеры необходимы не только глубокие технические знания, но и «...управленческие компетенции, способность к инновационному мышлению, высокий уровень самоорганизации и готовность к постоянному обучению» [13].

Модернизация сельского хозяйства требует специалистов, способных внедрять современные технологии, включая робототехнику, дроны, системы точного земледелия и сенсорный мониторинг [11]. При этом в обществе сохраняются «...стереотипы о тяжелой, монотонной и малооплачиваемой работе в аграрном секторе» [14]. Таким образом, в аграрной сфере наблюдается нехватка квалифицированных инженерных кадров [12].

Профессия агроинженера особенно актуальна для Омской области. Ведущей отраслью региона является растениеводство, на которое в 2020 г. приходилось 56,8% общего объема сельскохозяйственной продукции⁴. Животноводство составляет 43,2% валовой продукции сельского хозяйства [15]. Решение проблем недостаточного использования пашни в регионе ввиду нехватки ресурсов, физического и морального износа техники, а также низкого уровня технического обеспечения возможно через модернизацию и роботизацию сельскохозяйственного производства. Таким образом, профессия агроинженера является востребованной и стратегически важной для региона.

Подготовка агроинженерных кадров для региона осуществляется в Омском государственном аграрном университете имени П.А. Столыпина. Подготовка ведется по направлению 35.03.06 – Агроинженерия (бакалавриат)

⁴О Стратегии социально-экономического развития Омской области до 2030 года: Постановление Правительства Омской области от 12 октября 2022 г. № 543-п, с изм. на 12 декабря 2024 г. URL: http://kodeks.karelia.ru/api/show/406260070?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 03.04.2025)

и 35.04.06 – Агроинженерия (магистратура). В 2024 г. набор абитуриентов на очную и заочную формы обучения составил 97 чел.

Для выявления ключевых мотивов выбора профессии студентам первого курса предложили тест открытого типа. Полученные данные подвергли семантическому анализу, в ходе которого высказывания сгруппировали по семантическим категориям и определили связанные с категориями смысловые конструкты. Результаты анализа с примерами высказываний и их частотностью по категориям представлены в таблице.

Проведенный семантический анализ высказываний студентов позволил выявить структуру профессионального самоопределения, отражающую субъективные смысловые ориентиры выбора профессии. Частотность речевых репрезентаций мотивационных смыслов указывает на их значимость и положение в иерархии семантической структуры профессионального самоопределения. Были выделены 10 ключевых семантических категорий, каждая из которых структурирована в виде семантического кластера – совокупности смысловых конструктов, формирующих индивидуальное представление студентов о профессии и собственной профессиональной роли.

Выделенные категории включили в кластеры, каждый из которых объединяет лексико-семантически близкие высказывания, формирующие устойчивые мотивационные смыслы.

Категория «Интерес к профессии» отражает эмоциональное отношение студентов к агроинженерной деятельности и является наиболее частотной (129 высказываний), что указывает на доминирование внутреннего устойчивого интереса к профессии в структуре мотивации.

Категория «Карьерные перспективы» (108 высказываний) связана с рациональной оценкой будущих возможностей: востребованность профессии на рынке труда, возможности профессионального и карьерного роста. Выраженные в высказываниях конструкты указывают на ориентацию студентов на гибкую профессиональную траекторию и широкую самореализацию.

Категория «Финансовая выгода» (105 высказываний) носит прагматический характер и включает в себя конструкты, связанные с представлениями о высокой зарплате и финансовой независимости как о показателях успеха.

Категория «Интерес к технике и технологиям» объединяет конструкты, связанные с технической увлеченностью и инженерным мышлением.

Таблица

Результаты семантического анализа высказываний студентов о мотивации выбора профессии агроинженера

Table

Results of semantic analysis of students' responses regarding their motivation for choosing an agroengineering profession

Семантические кластеры	Содержание конструкта		Частота
	Смысловые конструкты	Примеры высказываний Мотивы выбора профессии	
1	2	3	4
1. Интерес к профессии	Эмоциональная вовлеченность будущих агроинженеров в профессию и ценностное отношение к профессиональной деятельности		129
Увлеченность профессией	Профессия как призвание	«Я могу работать по профессии, которая мне нравится»; «Эта работа позволит мне заниматься любимым делом».	102
Любовь к сельской местности	Сельская местность как психологическое благополучие	«Я люблю деревню»; «Я хочу работать на природе»; «Душа лежит к природе».	27
2. Карьерные перспективы	Представления будущих агроинженеров о карьерных перспективах		108
Востребованность профессии	Защита от безработицы; возможность профессионального роста	«Существует большая востребованность в данной профессии»; «Мне будет легко найти работу».	93
Карьерные траектории	Возможность менять профессиональные роли; широкий диапазон профессиональной самореализации	«Я могу преподавать»; «Есть возможность заниматься научной деятельностью»; «Можно попробовать себя в роли руководителя».	15
3. Финансовая выгода	Представления о материальных аспектах профессии агроинженера		105
Высокая зарплата	Доходная работа	«У меня будет хорошая заработная плата»; «В этой профессии высокая оплата труда»; «Это прибыльная работа».	69
Финансовая независимость	Возможность обеспечивать себя самостоятельно.	«Я хочу стать финансово независимым».	36
4. Интерес к технике	Эмоциональная вовлеченность будущих агроинженеров в техническую и технологическую составляющие профессии		95
Любовь к технике/сельхоз.технике	Эмоциональная привязанность; устойчивый интерес к работе с техникой	«Мне нравится работа с сельхозтехникой»; «Люблю работать с машинами»; «Мне нравится копаться в механизмах».	60
Работа с современными технологиями	Ценность инноваций в профессии	«Работа будет связана с передовыми технологиями»; «В этой работе присутствуют цифровые технологии».	35
5. Призвание	Восприятие профессии как предназначение, сформированное под влиянием раннего опыта, устойчивых личных ценностей и глубокой рефлексии		93
Детская мечта	Профессия как воплощение детской мечты	«Это моя мечта»; «Я мечтал с детства стать агроинженером»; «Я думал об этой профессии с детства».	24
Ранний опыт	Уверенность в своих способностях; профессия как семейная ценность	«Я с детства помогал папе с техникой»; «Я с детства увлекаюсь механизмами».	18
Осознанный выбор	Профессия как «судьба», а не случайный выбор	«Мой осознанный выбор»; «Мое призвание»; «Хочу в дальнейшем связать с этим свою жизнь»; «Мое будущее связано с этой профессией».	51
6. Самореализация в профессии	Стремление будущих агроинженеров к творческой реализации и профессиональному росту через профессиональную деятельность		72
Возможность изучать и создавать новое	Доступ к непрерывному обучению; участие в инновациях; творческая работа	«Люблю изучать все новое»; «Хочу совершенствовать свои знания»; «Смогу создавать передовые технологии для сельского хозяйства»; «Буду специалистом по разработке и внедрению новых систем».	72

Окончание табл.

1	2	3	4
7. Социальный статус	Представления будущих агроинженеров о восприятии профессии обществом и способах получения личного признания		66
Престиж профессии	Желание иметь высокий социальный статус; высокие личные амбиции	«Это престижная работа в настоящее время»; «Это одна из самых важных профессий».	36
Социальное признание	Желание преодолеть статус «маленького человека»; профессия как способ «вписаться» в социальную иерархию	«Будут считаться с моим мнением»; «Хочу быть важным для общества»; «Я хочу получить уважение и признание в обществе за свои достижения»; «Я хочу оставить след в истории».	30
8. Социальная значимость	Восприятие профессии агроинженера как социально полезной		60
Вклад в развитие страны	Профессия как служение обществу	«Это профессия приносит пользу для страны»; «Страна во мне нуждается»; «Хочу приносить людям пользу».	39
Польза для сельского хозяйства	Готовность участвовать в модернизации и повышении конкурентоспособности отрасли	«Надо поднимать сельское хозяйство с колен»; «Надо продвигать сельское хозяйство нашей страны»; «Можно сделать свой вклад в сельское хозяйство».	21
9. Влияние семьи и окружения	Воздействие ближайшего социального круга (семьи, друзей, значимых других) на профессиональный выбор		58
Семейные традиции	Профессия как семейная традиция	«Родители учились на мехфаке»; «Отец – агроинженер»; «Пошел по стопам деда».	38
Рекомендации знакомых	Идентификация с авторитетом, группой	«Мои друзья – агроинженеры»; «Эту профессию рекомендовали знакомые».	20
10. Образовательная среда	Восприятие аграрного вуза как образовательной среды, которая обеспечивает качественное образование		27
Качество обучения	Престижный вуз; ожидание получить качественное образование	«Лучшие преподаватели»; «Университет с трудолюбивыми преподавателями»; «Хороший факультет».	24
Доступность образования	Уверенность в поступлении	«На эту профессию несложно поступить».	5

Категории «Призвание» и «Самореализация» включают в себя смысловые конструкты, которые указывают на отношение к профессии как к призванию, сформированному под влиянием раннего опыта, устойчивых личных ценностей и глубокой рефлексии, демонстрируют стремление к профессиональному росту и творческой самореализации в профессии.

Категория «Социальный статус» демонстрирует представления о социальных преимуществах, которые может дать профессия: уважение, признание, престиж и потребность занять высокое место в социальной иерархии.

Категория «Социальная значимость» отражает ценностно-гражданский компонент мотивации. Конструкции передают альтруистический смысл и отражают восприятие профессии агроинженера как социально полезной деятельности, направленной на развитие страны и сельского хозяйства.

Категории «Влияние семьи и окружения» и «Образовательная среда» описывают внешние

факторы мотивации: роль семейной династической традиции и стремление к социальной идентичности в выборе профессии, а также отношение к вузу как к фактору профессионального самоопределения.

Анализ речевых высказываний студентов позволил выделить иерархически организованную структуру мотивационных смыслов, в которой каждый уровень отражает определенную степень глубины и устойчивости профессиональной мотивации.

I. Фундаментальный уровень – внутренне обусловленные, эмоционально окрашенные значимые мотивы: осознанный выбор, интерес, увлеченность и призвание. Они создают фундамент самоопределения и формируют устойчивую идентификацию с профессией.

II. Средний уровень – прагматические мотивы, связанные с карьерными возможностями, финансовыми стимулами, социальным статусом и образовательной доступностью. Эти смыслы придают

выбору профессии реалистичность и функциональность.

III. Внешний уровень – мотивационные смыслы, формируемые под влиянием внешней социальной среды: такие, как семья и ближайшее окружение, а также восприятие профессии как общественно значимой. Эти смыслы не всегда являются исходным мотивом выбора профессии, но играют важную роль: они придают уверенности в правильности выбора профессии.

Таким образом, семантическая структура профессионального самоопределения студентов представляет собой иерархически организованную систему связанных между собой мотивационных смыслов, которые воплощают внутренние интересы и ценности, включают в себя прагматические соображения и учитывают социально-контекстуальное влияние окружения.

На основе сделанных выводов была разработана семантическая модель профессионального самоопределения, отражающая структуру мотивационных смыслов, их иерархию и причинно-следственные связи.

Ценностно-смысловое ядро модели сформировано на основе интереса, эмоциональной вовлеченности и восприятия профессии как призвания. Оно включает в себя такие категории, как «Интерес к профессии» (129), «Интерес к технике» (95), «Призвание» (93) и «Самореализация в профессии» (72), и формирует устойчивую личную идентификацию с профессией.

Следующим по значимости является блок рационально-прагматических смыслов выбора профессии, которые направлены на оценку профессии как средства достижения внешне значимых целей: материального благополучия, карьерного роста, социального статуса. Этот блок сформирован такими категориями, как «Карьерные перспективы» (108), «Финансовая выгода» (105), «Социальный статус» (66) и «Образовательная среда» (27).

Блок социально-контекстуальных смыслов выбора профессии отражает влияние семейных традиций, социального окружения и гражданской позиции на профессиональное самоопределение. Этот блок включает в себя категории «Социальная значимость профессии» (60) и «Влияние семьи и окружения» (58).

Профессиональное самоопределение студентов представляет собой комплексный процесс, формирующийся под влиянием личных интересов и ценностей, практической целесообразности и на основе социально-обусловленных смыслов. Мотивационная структура выстраивается от эмоционально значимых

внутренних ориентиров (интерес, призвание, самореализация) к прагматическим (востребованность профессии, финансовая выгода) и социально-гражданским. Мотивационные смыслы дополняют и усиливают друг друга. Так, устойчивый интерес к технике и технологиям, ранний опыт взаимодействия с машинами формируют эмоциональное отношение к агроинженерии как к «своей» профессии. Положительный семейный пример (преемственность поколений) усиливает привлекательность профессии и трансформирует внешний фактор в личностное убеждение. Представления о высокой оплате труда и карьерных перспективах формируют рациональную основу выбора. Таким образом, прагматические смыслы могут преобразовываться в смыслы самореализации.

Разработанная семантическая модель профессионального самоопределения отражает региональную специфику. В мотивационных высказываниях выражены ценности, характерные для сельскохозяйственного региона: семейные династии в аграрной сфере, любовь к сельской местности, патриотическое отношение к стране и сельскому хозяйству.

Таким образом, семантическая модель профессионального самоопределения – это динамическая иерархическая система взаимосвязанных смыслов, которые определяют выбор профессии. Основанная на анализе мотивационных высказываний студентов, модель отражает реальные отношения молодежи к профессии агроинженера.

Изучение мотивационных высказываний студентов позволяет не только выявить ключевые смыслы, лежащие в основе выбора профессии, но и понять, в каких языковых формах эти смыслы актуализируются в сознании студентов. Полученные результаты указывают на необходимость лингвистического сопровождения профориентационной работы, то есть целенаправленного подбора лексики, аргументации и речевых стратегий, отражающих реальные мотивационные установки молодежи. На основе выделенных семантических кластеров могут быть разработаны: информационные тексты, обращенные к конкретным мотивационным смыслам (призвание, карьерный рост, польза для страны); профориентационные беседы, использующие типичные речевые конструкции; мультимедийные материалы, построенные на привычных формулировках.

Для профориентационной работы Омского ГАУ был разработан опросник (рис.), предназначенный для изучения мотивации потенциальных абитуриентов, выбирающих инженерное направление

Инструкция

Пожалуйста, оцените степень своего согласия с каждым из следующих утверждений, используя шкалу от 1 до 5, где: 1 – совершенно не согласен; 2 – скорее не согласен; 3 – затрудняюсь ответить; 4 – скорее согласен; 5 – полностью согласен.

I. Интерес к профессии

1. Мне нравится работать с техникой и технологиями.
2. Эта профессия соответствует моим увлечениям.
3. Работа в этой сфере приносит мне удовольствие.
4. Я хочу связать свою жизнь с агропромышленным комплексом.
5. Я испытываю эмоциональную привязанность к этой профессии.

II. Призвание и самореализация

6. Я считаю, что нашел(ла) свое призвание в агроинженерии.
7. Мне важно чувствовать, что я на своем месте.
8. Эта профессия дает мне возможность реализовать себя.
9. Я хочу создавать новые технологии в сельском хозяйстве.
10. С детства интересуюсь техникой и механизмами.

III. Финансовая выгода

11. Эта профессия поможет мне обеспечить стабильный доход.
12. Высокая зарплата является важным фактором моего выбора.

13. Я хочу быть финансово независимым(ой).

14. Я рассматриваю профессию как способ материального роста.

15. Для меня важно, чтобы труд хорошо оплачивался.

IV. Карьерные перспективы

16. Я вижу перспективы карьерного роста в этой профессии.
17. Я смогу профессионально расти и развиваться.
18. Эта профессия даст мне широкие возможности выбора.
19. Считаю, что смогу занять руководящую должность.
20. Уверен(а), что легко найду работу после окончания вуза.

V. Социальный статус

21. Агроинженер – это престижная профессия.
22. Люди уважают специалистов этой сферы.
23. Мне важно, чтобы моя профессия ценилась в обществе.
24. Я хочу, чтобы со моим мнением считались.
25. Это профессия, которой можно гордиться.

VI. Общественная польза

26. Я хочу приносить пользу своему региону и стране.
27. Агроинженеры играют важную роль в развитии сельского хозяйства.

28. Я выбираю профессию, которая действительно нужна обществу.

29. Хочу участвовать в улучшении аграрной инфраструктуры.

30. Для меня важно чувствовать свою социальную значимость.

VII. Влияние семьи и окружения

31. На мой выбор повлияли родственники, работающие в этой сфере.

32. Я продолжаю профессиональные традиции своей семьи.

33. Мне рекомендовали эту профессию знакомые люди.

34. У меня есть положительный пример агроинженера в семье.

35. Я чувствую, что не подвожу ожидания близких.

VIII. Образовательная среда

36. Этот вуз дает сильную техническую подготовку.

37. Здесь работают преподаватели, которым я доверяю.

38. Университет создает хорошие условия для обучения.

39. Я уверен(а) в качестве образования, которое получу.

40. Мне было важно поступить именно в этот вуз.

Рис. Опросник «Мотивы выбора профессии агроинженера»

Fig. Questionnaire: "Motives for Choosing the Profession of Agricultural Engineer"

в аграрном вузе. Он содержит формулировки, отражающие типовые мотивационные смыслы, зафиксированные в речевых высказываниях студентов первого курса.

Разработанный опросник является примером профориентационной коммуникации, выстроенной на языке ценностей, интересов и ожиданий целевой аудитории. Лингвистическое сопровождение профориентации, основанное на выявленных мотивационных смыслах, помогает повысить привлекательность инженерных профессий в аграрной сфере, преодолеть негативные стереотипы и обеспечить осознанный профессиональный выбор.

Проведенные исследования имеют ряд ограничений. Выборка ограничена студентами одного аграрного вуза, что не позволяет распространять сделанные выводы на учебные заведения других регионов или другие отраслевые вузы. Высказывания студентов о выборе профессии могут отражать поверхностное осмысление профессионального самоопределения, характерное для начальных курсов.

Выводы

Полученные результаты позволили выявить семантическую структуру профессионального самоопределения студентов-агроинженеров как иерархически организованную систему взаимосвязанных мотивационных смыслов. На основе семантического анализа высказываний студентов выделены 10 ключевых семантических категорий. Центральное место в структуре занимают личностно значимые мотивы, что отражает ценностно осмысленное отношение студентов к профессиональному выбору. Прагматические мотивы формируют реалистичную основу самоопределения, а социально-контекстуальные факторы поддерживают и усиливают уже сделанный выбор.

Семантическая модель профессионального самоопределения демонстрирует, что мотивационные смыслы находятся в динамической взаимосвязи и могут трансформироваться: от внешних стимулов к внутренней мотивации. Выявленные речевые конструкции позволяют создавать профориентационные материалы, соотносимые с языком и ценностями целевой аудитории.

Таким образом, результаты исследований обладают практической значимостью и могут быть использованы для лингвистического сопровождения профориентационной работы в аграрных вузах.

Список источников

1. Pasha A., Siddiqui D.A. Factors influencing professional selection choices: evidence from Pakistan. *European Journal of Business and Management*. 2019;11(36):137-153. <https://doi.org/10.7176/EJBM/11-36-16>
2. Koksharov V.A., Agarkov G.A. Analysis of economic motivation individuals choose an educational path. *Economy of Region*. 2015;1(1):153-159. <https://doi.org/10.15826/recon.2015.1.014>
3. Bromley H., Kniveton B.H. The influences and motivations on which students base their choice of career. *Research in Education*. 2004;72(1):47-59. <https://doi.org/10.7227/RIE.72.4>
4. Haase H., Lautenschläger A. Career choice motivations of university students. *International Journal of Business Administration*. 2011;2(1):2-13. <https://doi.org/10.5430/IJBA.V2N1P2>
5. Humaira T., Rahim A., Rahman A., Zaki A. et al. Factors influencing students' attitudes to choose agriculture as a prospective career: the moderating role of career prospect. *International Journal of Modern Trends in Social Sciences*. 2019;2(10):13-21
6. Puad M., Yusof N. Razali F., Kang E. Career choice: parental guidance and learning experience influence in selecting agricultural programs. *International Journal of Academic Research in Business & Social Sciences*. 2023;13(12):4807-4813. <https://doi.org/10.6007/ijarbss/v13-i12/20334>
7. Wang X., Wang X., Ostrovskaya A.A. Socio-psychological factors of choosing a profession in a market economy // Экономика и предпринимательство. 2023. № 8 (157). С. 185-190. <https://doi.org/10.34925/eip.2023.157.8.029>
8. Prasetyaningrum D.I., Ruminar H., Irwandi P. The perception and interest of career choices in agriculture: case of agroecotechnology and agribusiness students. *Habitat*. 2022;33(2):186-200. <https://doi.org/10.21776/ub.habitat.2022.033.2.19>
9. Петренко В.Ф., Супрун А.П. Психосемантический подход к проблеме мотивации // Развитие личности. 2015. № 3. С. 158-177. EDN: VCLDJN
10. Klassen R.M., Al-Dhafri S., Hannok W., Betts Sh. Investigating pre-service teacher motivation across cultures using the Teachers' Ten Statements Test. *Teaching and Teacher Education*. 2010;27(3):579-588. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2010.10.012>
11. Ивашова В.А. Агроинженер как профессия в оценке экспертов и работодателей // Село России. 2018. № 1. С. 91-101 <https://doi.org/10.22162/2658-5987-2018-1-91-101>
12. Дебрин А.С., Семенов А.Ф. Оценка факторов и пути решения вопроса популяризации профессий агроинженера // Профессиональное самоопределение молодежи инновационного региона: проблемы и перспективы: Сборник статей по материалам Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Красноярск, 14-25 ноября 2022 г. Красноярск – Челябинск – Нижний Новгород – Москва: Красноярский государственный аграрный университет, 2023. Ч. 1. С. 125-129. EDN: YGITUM
13. Коваленок Т.П., Занфирова Л.В. Развитие профессионального мышления будущих агроинженеров // Проблемы продовольственной безопасности (EPFS2023): Материалы Международной научно-практической конференции: В 2 ч. Горки, 19-21 января 2023 г. Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2023. С. 163-169. EDN: SCTJWK
14. 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>

References

1. Pasha A., Siddiqui D.A. Factors influencing professional selection choices: evidence from Pakistan. *European Journal of Business and Management*. 2019;11(36):137-153. <https://doi.org/10.7176/EJBM>
2. Koksharov V.A., Agarkov G.A. Analysis of economic motivation when individuals choose an educational path. *Economy of Region*. 2015;1(1):245-252. <https://doi.org/10.17059/2015-1-21>
3. Bromley H., Kniveton B.H. The influences and motivations on which students base their choice of career. *Research in education*, 2004;72(1):47-59. <https://doi.org/10.7227/RIE.72.4>
4. Haase H., Lautenschläger A. Career choice motivations of university students. *International Journal of Business Administration*, 2011;2(1):2-13. <https://doi.org/10.5430/IJBA.V2N1P2>
5. Humaira T., Rahim A., Rahman A., Zaki A., Ramle M. Factors influencing students' attitudes to choose agriculture as a prospective career: the moderating role of career prospect. *International Journal of Modern Trends in Social Sciences*. 2019;2:13-21. <https://doi.org/10.35631/IJMTSS.210002>
6. Puad M., Yusof N. Razali F., Kang E. Career choice: parental guidance and learning experience influence in selecting agricultural programs. *International Journal Of Academic Research In Business & Social Sciences*. 2023;13(12):4807-13. <https://doi.org/10.6007/ijarbss/v13-i12/20334>
7. Wang X., Wang X., Ostrovskaya A.A. Социально-психологические факторы выбора профессии в условиях рыночной экономики // Экономика и предпринимательство. 2023. № 8 (157). С. 185-190. <https://doi.org/10.34925/eip.2023.157.8.029>
8. Prasetyaningrum D.I., Ruminar H., Irwandi P. The perception and interest of career choices in agriculture: case of agroecotechnology and agribusiness students. *Habitat*. 2022;33(2):186-200. <https://doi.org/10.21776/ub.habitat.2022.033.2.19>
9. Petrenko V.F., Suprun A.P. Psychosemantic approach to the problem of motivation. *Personality development*. 2015;3:158-177.
10. Klassen R., Al-Dhafri S., Hannok W., Betts Sh. Investigating pre-service teacher motivation across cultures using the Teachers' Ten Statements Test. *Teaching and Teacher Education*. 2010;27(3):579-588. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2010.10.012>
11. Ivashova V.A. Agricultural engineer as a profession in the assessment of experts and employers. *Village of Russia*. 2018;1:91-101 <https://doi.org/10.22162/2658-5987-2018-1-91-101> (In Russ.)
12. Debrin A.S., Semenov A.F. Assessment of factors and ways to solve the issue of popularizing the professions of an agricultural engineer. Professional self-determination of youth in an innovative region: problems and prospects: Collection of articles based on the materials of the All-Russian (national) scientific and practical conference, Krasnoyarsk, November 14-25, 2022. Volume Part 1. – Krasnoyarsk-Chelyabinsk-Nizhny Novgorod-Moscow: Krasnoyarsk State Agrarian University. 2023:125-129. (In Russ.)
13. Kovalenok T.P., Zanzhirova L.V. Development of professional thinking of future agricultural engineers. Problems of food security (EPFS2023): Proceedings of the International scientific and practical conference: In 2 parts, Gorki, January 19-21, 2023. Gorki: Belarusian State Agricultural Academy. 2023:163-169. EDN: SCTJWK. (In Russ.)
14. Kubrushko P.F., Shingareva M.V., Atapina Yu.A. Training of personnel for the agro-industrial complex in the system of continuous professional education. *Agricultural Engineering*. 2022;24(4):58-63. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-58-63>. (In Russ.)

15. Барышникова О.Н., Антюфеева Т.В., Отто О.В. Природная обусловленность специализации сельского хозяйства южной части Западно-Сибирского экономического района // Региональная экономика и управление: Электронный научный журнал. 2019. № 2 (58). № ст. 5801. URL: <https://eee-region.ru/article/5801/> (дата обращения: 03.04.2025)

Информация об авторах

Куламихина Ирина Валентиновна, канд. пед. наук, доцент; доцент кафедры «Иностранные языки», Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина; 644008, Россия, г. Омск, ул. Институтская площадь, 1; irakula@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3900-6365>

Есмурзаева Жанбота Бауржановна, канд. филол. наук, доцент; доцент кафедры «Иностранные языки», Омский государственный технический университет; 644050, Россия, г. Омск, пр. Мира, 11; yesmurzaeva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0471-1921>

Алипичев Алексей Юрьевич, канд. пед. наук, доцент; доцент кафедры иностранных и русского языков, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; alipichev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>

Вклад авторов

И.В. Куламихина – сбор и обработка материалов, анализ полученных данных, описание результатов исследований;

Ж.Б. Есмурзаева – обработка материалов, формирование выводов;

А.Ю. Алипичев – концепция и дизайн исследований, ресурсы, администрирование проекта, создание и редактирование рукописи.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 09.04.2025, после рецензирования и доработки 10.09.2025; принята к публикации 12.09.2025

15. Baryshnikova O.N., Antyufeeva T.V., Otto O.V. Natural determinacy of agricultural specialization in the southern part of the West Siberian economic region. *Regional Economics and Management: Electronic Scientific Journal*. 2019;2(58):5801. URL: <https://eee-region.ru/article/5801/> (date of access: 03.04.2025). (In Russ.)

Author Information

Irina V. Kulamikhina, CSc (Ed), Associate Professor; Associate Professor of the Department of Foreign Languages; P.A. Stolypin Omsk State Agrarian University; Russian Federation, 644008, Omsk, Institutskaya Ploschad, 1; irakula@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3900-6365>

Zhanbota B. Esmurzaeva, CSc (Philology), Associate Professor; Associate Professor of the Department of Foreign Languages; Omsk State Technical University; Russian Federation, 644050, Omsk, Prospekt Mira Str., 11; yesmurzaeva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0471-1921>

Aleksei Yu. Alipichev, CSc (Ed), Associate Professor; Associate Professor of the Department of Russian and Foreign Languages; Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Russian Federation, 644008, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49; alipichev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>

Author Contribution

I.V. Kulamikhina – collection and processing of materials, analysis of the obtained data, description of the research results;

Zh.B. Esmurzaeva – processing of materials, formulation of research conclusions;

A.Yu. Alipichev – conceptualization and design of the study, resources, project administration, writing – manuscript review and editing

Conflict of interests

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

Received 09.04.2025; Revised 10.09.2025; Accepted 12.09.2025

К изданию принимается ранее не опубликованное автором (авторами) оригинальное произведение (научно-техническая или обзорно-аналитическая статья), соответствующее основным направлениям журнала объемом 3–4 тыс. слов и оформленное согласно ГОСТ Р 7.0.7-2021.

Структура статьи (образец)

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК:

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

Название статьи (max до 15 слов, включает ключевые слова!)

Инициалы, фамилия первого автора¹, инициалы, фамилия второго автора²

¹ Название организации первого автора (в именительном падеже без составных частей названий организаций); страна, город

² Название организации второго автора; страна, город

¹ e-mail первого автора; [https://orcid.org/..](https://orcid.org/)

² e-mail первого автора; [https://orcid.org/..](https://orcid.org/)

Аннотация – самостоятельный законченный материал. Вводная часть минимальна. Нужно коротко и емко отразить актуальность и цель исследований, условия и схемы экспериментов, привести полученные результаты (с обязательным аргументированием на основании цифрового материала), сформулировать выводы. Нельзя использовать аббревиатуры и сложные элементы форматирования (например, верхние и нижние индексы) (объем 200 слов, включает ключевые слова!).

Ключевые слова: 7-10 слов или словосочетаний для поисковых систем и классификации статей по темам.

Финансирование. Сведения о грантах, финансировании.

Для цитирования: ФИО авторов. Название статьи // *Агроинженерия*. Год. Том. №. С. . <https://doi.org/10.26897/2687-1149->

© ФИО авторов, год

ORIGINAL ARTICLE

Article title

Full name¹, Full name²

¹ Name of the organization; full address; e-mail

² Name of the organization; full address; e-mail

¹ e-mail; [https://orcid.org/..](https://orcid.org/)

² e-mail; [https://orcid.org/..](https://orcid.org/)

Abstract.

Keywords:

Acknowledgments:

For citation: Full name of the authors. Article title. *Agricultural Engineering (Moscow)*. year; volume (number): pages. <https://doi.org/10.26897/2687-1149->

Статья должна быть структурирована, обязательно содержать следующие разделы:

- Введение (актуальность);
- Цель исследований;
- Материалы и методы;
- Результаты и их обсуждение;
- Выводы.

Библиографический список должен быть составлен в соответствии с последовательностью ссылок в тексте.

Информация об авторах
Вклад авторов

Требования к оформлению статьи

1. **Шрифт** Times New Roman, размер – 14 пт, интервал – 1,5. Буквы латинского алфавита выделяются курсивом, греческого и русского алфавитов, индексы и показатели степени, математические символы $\lim$, $\lg$, const , $\sin$, $\cos$, tg , $\min$, $\max$ и др. приводятся в прямом начертании. Аббревиатуры должны быть пояснены. Диапазон любых значений указать в виде многоточия («...»: 13,25...13,50), кроме периода лет, где используется дефис («-»: 5-6).

2. **Рисунки** (иллюстрации, графики, диаграммы, схемы) должны иметь качество 300 dpi для растровых изображений (например, фотографий), их обрезка должна производиться до вставки в документ. Каждый график, диаграмма или схема вставляется в текст как объект MS Excel. Наименования осей, единицы измерения физических величин и прочие надписи должны быть выполнены на русском и английском языке.

Рисунки должны иметь сквозную нумерацию, название и ссылку в тексте: (рис. 1). Каждый рисунок должен иметь подрисуночную подпись, в которой даётся объяснение всех его элементов.

3. **Таблицы** должны иметь сквозную нумерацию и заголовки. К таблицам и рисункам необходим англоязычный перевод подрисуночных подписей и заголовков. Сокращать слова в таблице не допускается.

4. Для набора **формул** необходимо использовать программы Math Type (в приоритете) либо Equation. Недопустимо вставлять уравнения в текст в виде растровых либо векторных изображений. Простые математические выражения, не содержащие дробей, корней, сложных индексов и т.д. (цифры и буквы (русские, латинские, греческие; знаки, имеющиеся в таблице символов), размещаются в тексте без использования специальных программ. Формулы должны создаваться одним объектом, а не состоять из частей. Править стили отдельных букв (приводить их к прямому начертанию) в уравнении, набранном в разрешённых программах, неприемлемо.

Формулы и уравнения печатаются с новой строки и центрируются. Все обозначения в формулах должны быть объяснены с указанием единиц измерения в системе СИ. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи.

5. **Список источников** к статье необходимо составлять в порядке цитирования, библиографическое описание – согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008. Все ссылки должны быть оформлены единообразно: только с точкой, без тире между частями описания. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. В тексте статьи ссылки на источник цитирования приводятся в квадратных скобках, в конце предложения перед точкой и размещаются последовательно в тексте статьи по мере упоминания. Названия цитируемых журналов приводятся полностью, без сокращений. Необходимо также при наличии указывать DOI цитируемой статьи.

Перевод названия статьи, ФИО, аффилиации, аннотации, ключевых слов и списка литературы должен выполняться качественно (механический перевод недопустим!)

Автор несёт ответственность за содержание статьи.

Статьи присылать по адресу: agroeng@rgau-msha.ru