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

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научный журнал

Том 27. № 3 / 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 «ЭйПиСиПаблишинг»
127550, г. Москва,
Дмитровское ш., д. 45, корп. 1, оф. 8
Тел.: +7 (499) 976-51-84, (985) 109-44-19

Подписано в печать 06.06.2025
Формат 60 84/8
Тираж 500 экз.

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

Главный научный редактор

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

Заместитель главного научного редактора:

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

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

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

Члены редакционного совета:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

AGRICULTURAL ENGINEERING (MOSCOW)

Scientific Journal Vol. 27(3)/2025

Founder and Publisher:
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy

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

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

Founded in 2003

Publication Frequency:
Bimonthly

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

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

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 06.06.2025
Format – 60 84/8
Circulation – 500 copies.

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

Science Editor-in-Chief

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

Deputy Science Editor-In-Chief:

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

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

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

Members of the Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

International members of the Editorial Board:

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

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

Snezhan 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, quanghoangl510@gmail.com

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

Н.В. Алдошин, А.С. Васильев, А.В. Кудрявцев, В.В. Голубев, Е.Н. Чумакова
Измельчитель вторичного плодово-ягодного сырья 4

В.В. Кирсанов
Направления развития искусственного интеллекта в биомашинных системах для животноводства 15

И.Ю. Игнаткин, М.Н. Ерохин, В.В. Кирсанов
Определение дальности распространения воздушной струи в струйной системе вентиляции животноводческих объектов ... 23

Ю.Г. Иванов, Д.А. Понизовкин, С.А. Андреев
Алгоритм управления скоростью воздушного потока при локальном обдуве коров в условиях промышленного животноводства 33

Н.А. Круглых
Разработка новой камеры разрежения для пневматического сепаратора семян 40

А.В. Чжан, Н.М. Ничкова, А.М. Воротынов, Н.А. Дрокин, М.А. Янова
Обогащение зерна пшеницы негемовым железом посредством ультразвуковой кавитации 47

В.А. Бызов, А.А. Манохина, В.И. Старовойтов, О.А. Старовойтова, Н.В. Воронов
Эффективность технологии возделывания топинамбура с использованием влагоудерживающих суперабсорбирующих полимеров 54

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

Н.К. Толочко, П.В. Авраменко, В.Б. Кравцов, П.В. Голиницкий
Теоретическое обоснование использования металлических многослойных структур при изготовлении и ремонте сельскохозяйственной техники 64

С.М. Гайдар, А.М. Пикина, А.С. Барчукова
Улучшение трибологических характеристик твердых смазок модификацией фторсодержащими ПАВ 74

П.В. Голиницкий, У.Ю. Антонова, Э.И. Черкасова, А.Н. Самордин, Д.А. Пупкова
Оптимизация процесса входного контроля распределительных валов при помощи имитационного моделирования 81

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

А.В. Виноградов, А.А. Лансберг
Физическое моделирование разных видов двухфазных коротких замыканий в сельской электрической сети 0,4 кВ 90

CONTENTS

FARM MACHINERY AND TECHNOLOGIES

N.V. Aldoshin, A.S. Vasiliev, A.V. Kudryavtsev, V.V. Golubev, E.N. Chumakova
Shredder for secondary fruit and berry raw materials 4

V.V. Kirsanov
Ways of developing artificial intelligence in biomachine systems for animal husbandry 15

I.Yu. Ignatkin, M.N. Erokhin, V.V. Kirsanov
Determination of an air jet propagation range in the jet ventilation system of livestock facilities 23

Yu.G. Ivanov, D.A. Ponizovkin, S.A. Andreev
Algorithm for controlling the local airflow rate when blowing on cows in industrial livestock farming 33

N.A. Kruglykh
Development of a new vacuum chamber for a pneumatic seed separator 40

A.V. Chzhan, N.M. Nichkova, A.M. Vorotynov, N.A. Drokin, M.A. Yanova
Enrichment of wheat grain with non-heme iron by ultrasonic cavitation 47

V.A. Byzov, A.A. Manokhina, V.I. Starovoitov, O.A. Starovoitova, N.V. Voronov
Effectiveness of Jerusalem artichoke cultivation technology using moisture-retaining superabsorbent polymers 54

TECHNICAL SERVICE IN AGRICULTURE

N.K. Tolochko, P.V. Auramenka, V.B. Kravtsov, P.V. Golinitskiy
Theoretical grounds for the use of metal multilayer structures in the manufacturing and repair of agricultural machinery 64

S.M. Gaidar, A.M., Pikina, A.S. Barchukova
Improving tribological characteristics of solid lubricants by modification with fluorinated surfactants 74

P.V. Golinitskiy, U.Yu. Antonova, E.I. Cherkasova, A.N. Samordin, D.A. Pupkova
Optimization of the incoming inspection of camshafts using simulation modeling 81

POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

A.V. Vinogradov, A.A. Lansberg
Physical simulation of different types of two-phase short circuits in a rural 0.4 kV power supply network 90

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 621.927
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-4-14

Измельчитель вторичного плодово-ягодного сырья

Н.В. Алдошин[1]✉***, А.С. Васильев***[2]***, А.В. Кудрявцев***[3]***, В.В. Голубев***[4]***, Е.Н. Чумакова***[5]

[1] Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия

[2, 3, 4, 5] Тверская государственная сельскохозяйственная академия; г. Тверь, Россия

[1] naldoshin@yandex.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-0446-1096

[2] vasilevtgsha@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-0936-2011

[3] akud@tvgsha.ru; https://orcid.org/0000-0001-8341-0467

[4] slavasddg@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-6421-6658

[5] elena.chumakova.ne@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-4664-8887

Аннотация. Вторичное плодово-ягодное и овощное сырье (выжимки) целесообразно перерабатывать с целью максимального извлечения из него биологически ценных витаминов, микроэлементов, пищевых волокон и незаменимых аминокислот. Сухие выжимки измельчают на том же оборудовании, что и зерно. Основными недостатками существующих измельчителей являются громоздкость, энергозатратность и высокая трудоемкость обслуживания. Необходимость создания новых измельчающих машин определяется различными характеристиками перерабатываемых объектов и разнообразными технологическими требованиями к исходному и готовому продуктам. С целью разработки перспективной конструкции устройства, измельчающего вторичное плодово-ягодное сырье, представленного сухими выжимками, авторы провели патентный поиск и анализ методов измельчения. В результате теоретических исследований разработали измельчитель, содержащий камеру измельчения цилиндрической формы, сообщающуюся в верхней ее части с загрузочным бункером и разгрузочной полостью готового продукта в нижней части. При испытании разработанного устройства измельчали сухие выжимки ягод брусники, клюквы, черники, смородины черной, жимолости и облепихи влажностью 10% и получили порошки дисперсностью не более 1 мм. Оценку крупности помола проводили на рассеве РЛ-4. Экспериментально установили высокую эффективность разработанного устройства. Степень измельчения вторичного плодово-ягодного сырья составила 98,3…98,8%. Расчетное значение фактически затрачиваемой энергии на измельчение ягодных выжимок влажностью 10% до фракции менее 1 мм составило 4,40 кВт·ч/т. Следующим этапом исследований является модернизация измельчителя с целью оптимизации энергетических показателей, затрачиваемых при измельчении вторичных растительных материалов разной влажности и химического состава, обладающих различными физико-механическими характеристиками (мякоть, семена, косточки и пр.).

Ключевые слова: сухие выжимки; измельчение; измельчитель; степень измельчения; дисперсность; вторичное плодово-ягодное сырье; порошки

Для цитирования: Алдошин Н.В., Васильев А.С., Кудрявцев А.В., Голубев В.В., Чумакова Е.Н. Измельчитель вторичного плодово-ягодного сырья // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 3. С. 4-14. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-4-14

© Алдошин Н.В., Васильев А.С., Кудрявцев А.В., Голубев В.В., Чумакова Е.Н., 2025

ORIGINAL ARTICLE

Shredder for secondary fruit and berry raw materials

N.V. Aldoshin[1]✉, *A.S. Vasiliev*[2], *A.V. Kudryavtsev*[3], *V.V. Golubev*[4], *E.N. Chumakova*[5]

[1] Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia

[2,3,4,5] Tver State Agricultural Academy; Tver, Russia

[1] naldoshin@yandex.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-0446-1096

[2] vasilevtgsha@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-0936-2011

[3] akud@tvgsha.ru; https://orcid.org/0000-0001-8341-0467

[4] slavasddg@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-6421-6658

[5] elena.chumakova.ne@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-4664-8887

Abstract. It is feasible to process secondary fruit, berry, and vegetable raw materials (squeezes) to maximize the extraction of biologically valuable vitamins, trace elements, dietary fiber and essential amino acids. To shred dry squeezes, use can be made of the same equipment that is suitable for grain milling. The main disadvantages of the existing shedders include their bulkiness, energy consumption and high labor intensity of maintenance. The need to design advanced shredders is due to different characteristics of processed objects and various technological requirements to the initial and finished products. To develop a promising design of a unit for shredding secondary fruit and berry raw materials in the form of dry squeezes, the authors conducted a patent search and analyzed the methods of shredding. Having completed theoretical research, they developed a shredder containing a cylindrical shredding chamber communicating in its upper part with a loading hopper and a discharge cavity of the finished product in its lower part. When testing the developed unit, dry squeezes of cranberries, cranberries, blueberries, black currants, honeysuckle, and sea buckthorn berries with a moisture content of 10% were shredded to obtain powders with a fineness of less than 1 mm. The fineness degree was evaluated on the RL-4 sieve. The experimental study has established high efficiency of the developed unit. The fineness degree of secondary fruit and berry raw materials amounted to 98.3 to 98.8%. The estimated amount of actually consumed energy for shredding berry squeezes with a moisture content of 10% to a fraction of less than 1 mm was 4.40 kWh/t. The next stage of research is the modernization of the shredder to optimize the energy consumption of shredding secondary plant materials of different moisture content and chemical composition with different physical and mechanical characteristics (pulp, seeds, pits, etc.).

Keywords: dry squeezes; shredding; shredder; fineness degree; fineness; secondary fruit and berry raw materials; powders

For citation: Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Kudryavtsev A.V., Golubev V.V., Chumakova E.N. Shredder for secondary fruit and berry raw materials. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2025;27(3):4-14 (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-4-14

Введение

Проблема качественного измельчения различных материалов стоит перед многими отраслями современного высокотехнологичного производства [1]. Различные материалы отличаются реологическими, физико-химическими и физико-механическими характеристиками, не позволяющими создать унифицированную конструкцию измельчающего механизма [2]. В агропромышленном комплексе измельчению подвергаются семена, растения, плоды и пр. Теоретические основы измельчения сельскохозяйственных материалов под воздействием рабочих органов машин были заложены академиком В.П. Горячкиным[1] и нашли свое дальнейшее отражение в работах многих отечественных и зарубежных ученых[2] [3-5]. В пищевой и химической промышленности под измельчением принято понимать процесс механического разделения объекта воздействия на части и увеличения степени его дисперсности и поверхности с целью активизации ценных биолого-функциональных характеристик материала [6]. В настоящее время процесс измельчения реализуется на устройствах различного типа (молотковых, валковых, конусных, шаровых и др.), в которых в зависимости от их назначения и принципа действия применяются такие виды нагрузок, как резание, раздавливание, удар, раскалывание, излом, истирание. Нагрузки воздействуют на измельчаемый матери-

[1] Горячкин В.П. Собрание сочинений: В 3 т. М.: Колос, 1965. Т. 3. 384 с.

[2] Ящерицын П.И., Ефремов В.Д. Основы резания материалов: Учебное пособие. Минск: БГАТУ, 2008. 644 с.

ал комплексно в рамках единого технологического цикла [7, 8]. Необходимость в различных видах оказываемых нагрузок, а также в разных по принципу действия конструкциях и размерах машин вызывается существующими вариациями свойств и размеров измельчаемых материалов, разнообразными технологическими требованиями к исходному и готовому продуктам [9-12]. Среди ассортимента измельчаемых материалов по набору остаточных биологически ценных характеристик (содержание витаминов, микроэлементов, пищевых волокон, незаменимых аминокислот и других веществ) выделяются вторичные растительные ресурсы переработки плодово-ягодного и овощного сырья, объемы которых, например, в консервной промышленности варьируются в среднем на уровне 21…22% от первоначальной массы объекта воздействия[3] [13]. На практике для измельчения вторичных растительных материалов часто используют то же оборудование (мельницы, мукомолки, дезинтеграторы и пр.), что и при переработке зерна в муку. Однако многие из данных машин являются громоздкими, энергозатратными, имеющими высокую трудоемкость обслуживания, что требует разработки новых конструкций эффективных измельчителей[4] [14].

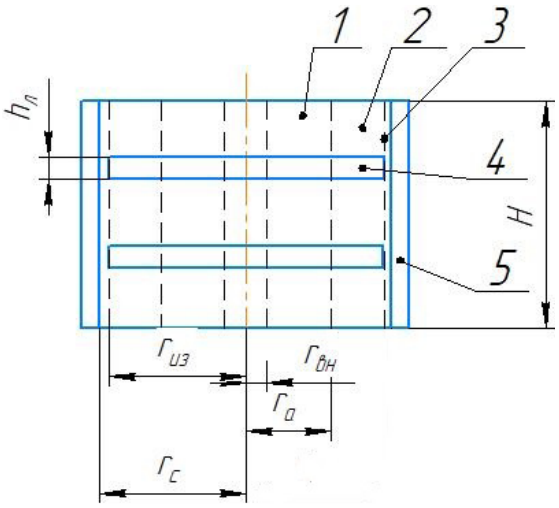


Рис. 1. Рабочие зоны взаимодействия ножей измельчителя и объекта измельчения:
1 – воздушно-вихревая зона;
2 – воздушно-продуктовая зона;
3 – воздушно-продуктовая зона в области между ножом и наружной обечайкой;
4 – лезвие рабочего органа; 5 – наружная обечайка

Fig. 1. Interaction zones of shredder blades with shredded objects:
1 – air-vortex zone; 2 – air-product zone;
3 – air-product zone in the area between the knife and the outer shell;
4 – blade of the working tool; 5 – outer shell

Цель исследований: теоретическое обоснование и разработка перспективной конструкции измельчающего устройства для вторичного плодово-ягодного сырья, представленного сухими выжимками.

Материалы и методы

Теоретические исследования выполняли на основании результатов патентного поиска, а также методов механико-математического моделирования процессов взаимодействия объекта переработки (плодово-ягодные выжимки) и функционально-конструктивных элементов измельчающего устройства [14]. Для теоретического обоснования измельчителя рассмотрим модель взаимодействия его ножей и сухих выжимок ягод (рис. 1). Рассматривая движение измельчаемого вещества, представим технологический процесс в виде системы, состоящей из воздушно-вихревой зоны *1* и воздушно-продуктового слоя 2, образованного двумя зонами. По данным предварительных теоретических исследований[5] [14], между рассматриваемыми зонами имеется некоторая поверхность радиусом r_a.

На основании анализа имеющихся научных работ для определения переменной приведенной окружной скорости в зоне 2 (воздушно-продуктовой) следует использовать выражение:

$$\overline{v}(\overline{r}) = \overline{r}\left(\psi_1\overline{r}^3 + \psi_2\overline{r}^2 + \psi_3\overline{r} + \psi_4\right); \quad 0 \le \overline{r} \le \overline{r}_{из}. \quad (1)$$

Для частного случая изменения значений приведенной окружной скорости $\overline{v}_1(\overline{r})$ от радиуса $\overline{r}$ запишем:

$$\overline{v}_1(\overline{r}) = \overline{r}\left(\psi_1\overline{r}^3 + \psi_2\overline{r}^2 + 1\right). \quad (2)$$

[3] Камилов Р.К. Обоснование методов и режимов сушки отходов и технология переработки плодов и овощей: Дис. … канд. техн. наук. Махачкала, 2003. 182 с. EDN: NMJNKR; Джабоева А.С. Использование продуктов переработки дикорастущего сырья в производстве хлебобулочных изделий: Монография. Нальчик: Изд-во М. и В. Котляровых, 2008. 129 с. EDN: QNHLLB.

[4] Сергеев Н.С., Николаев В.Н., Запевалов М.В., Сергеев Д.Н. Новое поколение измельчителей зерна и семян масличных культур для сельскохозяйственного производства: Монография. Челябинск: Южно-Уральский ГАУ, 2022. 196 с. EDN: LJZEDQ.

[5] Камилов Р.К. Обоснование методов и режимов сушки отходов и технология переработки плодов и овощей: Дис. … канд. техн. наук. Махачкала, 2003. 182 с. EDN: NMJNKR; Джабоева А.С. Использование продуктов переработки дикорастущего сырья в производстве хлебобулочных изделий: Монография. Нальчик: Изд-во М. и В. Котляровых, 2008. 129 с. EDN: QNHLLB; Сергеев Н.С., Николаев В.Н., Запевалов М.В., Сергеев Д.Н. Новое поколение измельчителей зерна и семян масличных культур для сельскохозяйственного производства: Монография. Челябинск: Южно-Уральский ГАУ, 2022. 196 с. EDN: LJZEDQ.

Параметр приведенного радиуса $\overline{r}$ можно определить, как и соотношение окружных скоростей:

$$\overline{r} = \frac{r}{r_a}; \quad \overline{\omega}_{(r)} = \frac{\omega_{(r)}}{\omega_0}, \tag{3}$$

где r – значение текущего радиуса внутренней поверхности, м; r_a – значение радиуса внутренней границы воздушно-продуктовой зоны, м; $\overline{\omega}(r)$ – показатель приведенной угловой скорости; $\omega_{(r)}$ – значение угловой скорости потока, с$^{-1}$; ω_0 – фактическое значение угловой скорости вала измельчающего устройства, с$^{-1}$.

На данном этапе сформулирована задача определения коэффициентов уравнения Ψ_1, Ψ_2, значения которых можно определить из предположения равенства значений приведенных радиусов по выражению:

$$\overline{r} = \overline{r}_c; \quad \frac{d\overline{\omega}_c}{d\overline{r}} = \frac{\overline{v}_c(\overline{r})}{\overline{r}_c}; \quad \overline{v}_c = \overline{r}_c(\psi_1\overline{r}_c^3 + \psi_2\overline{r}_c^2 + 1). \tag{4}$$

Интегрируя данное выражение по показателю приведенного радиуса, определим, что

$$\overline{\omega}_c = \int_1^{\overline{r}_c} \frac{\overline{v}_c(\overline{r})}{\overline{r}_c} d\overline{r}. \tag{5}$$

После интегрирования и преобразования выражения (5) угловую скорость можно определить как

$$\overline{\omega}_c = \frac{\psi_1}{4}(\overline{r}_c^4 - 1) + \frac{\psi_2}{3}(\overline{r}_c^3 - 1) + \overline{r}_c - 1. \tag{6}$$

Принимая во внимание, что показатель приведенной угловой скорости определяем также из соотношения $\overline{\omega}_c = \overline{v}_c / \overline{r}_c$, с учетом выражения (4) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \overline{v}_c = \overline{r}_c(\psi_1\overline{r}_c^3 + \psi_2\overline{r}_c^2 + 1) \\ \overline{v}_c = (\frac{\psi_1}{4}(\overline{r}_c^4 - 1) + \frac{\psi_2}{3}(\overline{r}_c^3 - 1) + \overline{r}_c - 1)\overline{r}_c. \end{cases} \tag{7}$$

Решение системы уравнений (7) позволит определить искомые значения коэффициентов уравнений Ψ_1 и Ψ_2:

$$\psi_1 = \frac{(\overline{v}_c - \overline{r}_c)(\overline{r}_c^4 - 4\overline{r}_c + 3) - 3\overline{r}_c^2(4\overline{v}_c\overline{r}_c^3 - \overline{v}_c\overline{r}_c^4 + \overline{v}_c - 3\overline{r}_c^5 + 4\overline{r}_c^4 + \overline{r}_c)}{\overline{r}_c^4(\overline{r}_c^4 - 4\overline{r}_c + 3)}; \tag{8}$$

$$\psi_2 = \frac{3(4\overline{v}_c\overline{r}_c^3 - \overline{v}_c\overline{r}_c^4 + v_c - 3\overline{r}_c^5 + 4r_c^4 + \overline{r}_c)}{\overline{r}_c^3(\overline{r}_c^4 - 4\overline{r}_c + 3)}. \tag{9}$$

Крутящий момент, создаваемый на лезвиях ножей (рабочих органов), определяется по значению усилий сопротивлению их перемещения в вертикальной плоскости (рис. 2), причем усилие сопротивления возникает вследствие различия значений скорости лопасти ножа относительно измельчаемого материала.

С учетом уравнения для определения значений скорости обтекания u_1 можем использовать известное равенство:

$$u(r) = \omega_0 r - v(r). \tag{10}$$

Значение крутящего момента на ножах измельчителя в зависимости от сил сопротивления P_1 вращению ротора в воздушно-вихревой зоне на отдельно взятом элементарном участке, расположенном на расстоянии dr, и горизонтального ножа толщиной $h_л$, запишется в виде:

$$dM_1 = P_1 r dr = \xi_{1л}\frac{\rho_в u_1^2(r)}{2} h_л r dr, \tag{11}$$

где $\xi_{1л}$ – значение коэффициента, характеризующего гидравлическое сопротивление вращению ножа в воздушно-вихревой зоне; $\rho_в$ – значение плотности воздуха, кг/м^3.

Принимая, что $v(r) = \omega(r) \cdot r$, $\omega(r) = v(r)/r$, с учетом уравнения (3) можно записать, что скорость воздушного потока в зависимости от удаленности измельчаемого материала определится уравнением:

$$U(r) = \omega_0 \cdot r_a \cdot (\overline{r} - \overline{v}_{(r)}). \tag{12}$$

Учитывая сравнительно невысокое взаимодействие смежных лезвий ножа, принимаем, что начало действия на измельчаемый материал – от приближенной к центру вращения точки, расположенной на расстоянии $r_{вн}$. Тогда крутящий момент на лезвиях ножей измельчителя в воздушно-вихревой зоне определится из формулы:

$$M_1 = z_л \xi_{1л} h_л \frac{\rho_в \omega_0^2 r_a^3}{2} \int_{\overline{r}_{вн}}^{1} [\overline{r} - \overline{v}(\overline{r})]^2 \overline{r} d\overline{r}, \tag{13}$$

где $Z_л$ – количество горизонтально расположенных ножей на валу измельчителя.

При устойчивом турбулентном движении можно принять, что значение $\xi_{1л}$ имеет постоянное значение.

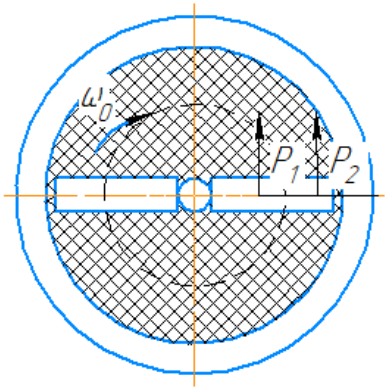


Рис. 2. Схема взаимодействия ножа измельчителя с воздушно-вихревой и воздушно-продуктовой зонами

Fig. 2. Interaction pattern of a shredder blade with the air-vortex and air-product zones

Следовательно, для упрощения расчетов примем значение толщины ножа постоянным: $h_л = const$.

Интегрируя выражение (13), после преобразований можно определить значение крутящего момента сопротивления среды перемещению ножей измельчителя применительно к воздушно-вихревой зоне по выражению:

$$M_1 = z_л \xi_{1л} h_л \frac{\rho_в \omega_0{}^2 r_a^3}{2} \times$$
$$\times \left(\frac{\psi_1{}^2 (1 - \overline{r}_{вн}^{10})}{10} + \frac{2\psi_1 \psi_2 (1 - \overline{r}_{вн}^{9})}{9} + \frac{\psi_2^2 (1 - \overline{r}_{вн}^{8})}{8} \right). \quad (14)$$

Крутящий момент на лезвиях измельчителя в воздушно-продуктовой зоне определится аналогичным образом, причем значения коэффициентов будут отличаться.

Крутящий момент на ножах измельчителя зависит от сил сопротивления перемещению P_2 ножа в воздушно-продуктовой зоне на элементарном участке расстоянием dr горизонтально установленных ножей толщиной $h_л$ из зависимости:

$$dM_2 = P_2 r dr = \xi_{2л} \frac{\rho_c u_2^2 (r)}{2} h_л r dr, \quad (15)$$

где $\xi_{2л}$ – значение коэффициента гидравлического сопротивления перемещению ножа в воздушно-продуктовой зоне; ρ_c – значение средней плотности в воздушно-продуктовой зоне, определяемое как

$$\rho_c = \rho_в + \frac{m_c}{V_c}, \quad (16)$$

где m_c – величина массы измельчаемого материала в воздушно-продуктовой зоне, кг; V_c – значение объема воздушно-продуктовой зоны, м^3.

Перейдя к безразмерным переменным (2), (3), (12), проинтегрируем выражение в пределах от границы воздушно-продуктовой зоны с безразмерной координатой приведенного радиуса, равного $\overline{r} = 1$, до конца ножей, имеющих длину, соответствующую безразмерной координате $\overline{r} = \overline{r}_л$:

$$M_2 = z_л \xi_{2л} h_л \frac{\rho_c \omega_0{}^2 r_a^3}{2} \int_1^{\overline{r}_л} [\overline{r} - \overline{v}(\overline{r})]^2 \overline{r} d\overline{r}. \quad (17)$$

После интегрирования уравнения (17) и соответствующих преобразований получим:

$$M_2 = z_л \xi_{2л} h_л \frac{\rho_c \omega_0{}^2 r_a^3}{2} \left(\frac{\psi_1{}^2 (1 - \overline{r}_{вн}^{8})}{8} + \right.$$
$$+ \frac{2\psi_1 \psi_2 (1 - \overline{r}_{вн}^{7})}{7} + \frac{\psi_2^2 (1 - \overline{r}_{вн}^{6})}{6} -$$
$$\left. - \frac{\psi_1 (1 - 5\overline{r}_{вн}^{6}) + 6\overline{r}_{вн}^{5} (1 + \psi_1)}{15} + \frac{2\overline{r}_{вн}^{2} (4\overline{r}_{вн} + 3) + 1}{12} \right). \quad (18)$$

Для определения крутящих моментов от возникающих на ножах сил следует учитывать значение сопротивления измельчаемого материала в воздушно-продуктовой зоне. Определение крутящих моментов от внутреннего сопротивления можно определить в такой последовательности. На начальном участке в диапазоне расстояний от $\overline{r} = 1$ до $\overline{r} = \overline{r}_л$

$$dM_{2c} = dF_{2сл} \cdot \tau_{сл}, \quad (19)$$

где $F_{2сл}$ – площадь поверхности соприкосновения слоев, м^2; $\tau_{сл}$ – касательные напряжения на поверхности соприкосновения слоев, Н/м^2.

$$dF_{2сл} = (2\pi H_r - Z_л \cdot F_л) \cdot dr, \quad (20)$$

где $F_л$ – значение площади поперечного сечения ножа, м^2.

$$\tau_{сл} = \xi_{сл} \cdot \rho_c \frac{\nu^2}{2}, \quad (21)$$

где $\xi_{сл}$ – значение коэффициента гидравлического сопротивления взаимодействия от внутренних сил.

Из уравнений (19), (20), (21) получим зависимость для определения крутящего момента:

$$dM_{2c} = \xi_{сл} \cdot \rho_c \frac{\nu_{(r)}{}^2}{2} (2\pi H_r - z_л \cdot F_л) \cdot dr. \quad (22)$$

С учетом перехода к значениям приведенных параметров, принимая во внимание зависимость (3), можно записать:

$$dM_{2c} = \xi_{сл} \cdot \rho_c \frac{\nu_{(r)}{}^2 \cdot W_0{}^2 \cdot r_a{}^2}{2} (2\pi H_{\overline{r}} \cdot r_a - z_л \cdot F_л) \cdot d\overline{r}. \quad (23)$$

После преобразования с учетом выражения (2) получим зависимость:

$$dM_{2c} = \xi_{сл} \cdot \rho_c \cdot W_0{}^2 \cdot r_a{}^2 \left(\pi \cdot H \cdot r_a \left(\psi_1{}^2 \cdot r^8 + 2\psi_1 \cdot \psi_2 \cdot \overline{r}^7 + \right. \right.$$
$$\left. \left. + \psi_2 \cdot \overline{r}^6 + 2\psi_1 \overline{r}^5 + 2\psi_1 \overline{r}^4 + 2\psi_1 \overline{r}^3 + \overline{r} \right) \right) \cdot d\overline{r}. \quad (24)$$

Проинтегрируем полученную зависимость на участке от $\overline{r} = 1$ до $\overline{r} = \overline{r}_ё$. Получим:

$$M_{2c} = \xi_{сл} \cdot \rho_c \cdot W_0{}^2 \cdot r_a{}^2 \cdot \left(\pi \cdot H r_a \cdot \left(\frac{\psi_1{}^2 \cdot (\overline{r}_л^9 - 1)}{9} + \right. \right.$$
$$+ \frac{\psi_1 \cdot \psi_2 (\overline{r}_л^8 - 1)}{4} + \frac{\psi_2 (\overline{r}_л^7 - 1)}{7} + \frac{\psi_3 (\overline{r}_л^6 - 1)}{3} +$$
$$\left. + \frac{2\psi_2 (\overline{r}_л^5 - 1)}{5} + \frac{\overline{r}_л^3 - 1}{3} \right) - \frac{z_л \cdot F_л}{2} \cdot \left(\frac{\psi_1{}^2 (\overline{r}_л^8 - 1)}{8} + \right.$$
$$+ \frac{2\psi_1 \cdot \psi_2 (\overline{r}_л^8 - 1)}{8} + \frac{2\psi_1 \cdot \psi_2 (\overline{r}_л^7 - 1)}{7} + \frac{\psi_2 (\overline{r}_л^6 - 1)}{6} +$$
$$\left. \left. + \frac{2\psi_1 (\overline{r}_л^5 - 1)}{5} + \frac{\psi_2 (\overline{r}_л^4 - 1)}{2} + \frac{\overline{r}_л^2 - 1}{2} \right) \right). \quad (25)$$

Значение крутящего момента от сил гидравлического сопротивления на границах воздушно-вихревой и воздушно-продуктовой зон измельчаемого слоя,

то есть при значении приведенного радиуса $\overline{r}=1$, определим по выражению:

$$M_a = 2\pi H r_a^2 \tau_a, \quad (26)$$

где H – рабочая высота рабочей зоны измельчаемого материала в зависимости от материала и степени загрузки, м; τ_a – касательные напряжения на участках между воздушно-вихревой и воздушно-продуктовой зонами, Н/м^2.

Касательные напряжения при вращательном движении определяются зависимостью:

$$\tau = \mu\left(-r\frac{d\omega}{dr}\right), \quad (27)$$

где μ – динамическая вязкость воздуха, Па·с.

Подставляя в выражение (27) зависимость (2), получим, что при $\overline{r}=1$.

$$\tau_a = -\mu\omega_0(3\psi_1 + 2\psi_2). \quad (28)$$

Окончательное значение крутящего момента на границе воздушно-вихревой зоны и воздушно-продуктовой зоны определится выражением:

$$M_a = -2\pi\mu\omega_0 H r_a^2(3\psi_1 + 2\psi_2). \quad (29)$$

На участке 3 (рис. 1) будет действовать только момент внутреннего сопротивления воздушно-продуктового слоя – соответственно

$$dM_{3сл} = dF_{3сл}\cdot\tau_{сл}; \quad (30)$$

$$dF_{3сл} = 2\pi H\cdot r\cdot dr. \quad (31)$$

Из зависимостей (21), (30) и (31) с учетом уравнения (3) запишем:

$$dM_{3сл} = \xi_{сл}\cdot\rho_c\cdot\overline{v}^2(r)\cdot{\omega_0}^2\cdot r_a\cdot\pi\cdot H\cdot\overline{r}\cdot d\overline{r}, \quad (32)$$

а выполнив преобразования с учетом уравнения (2), получим:

$$dM_{3сл} = \pi\xi_{сл}\cdot\rho_c\cdot H\cdot\overline{r}^3(\psi_1\overline{r}^3 + \psi_2\overline{r}^2 + 1)^2\cdot{\omega_0}^2\cdot{r_a}^3\cdot d\overline{r}$$

$$dM_{3сл} = \pi\xi_{сл}\cdot\rho_c\cdot H\cdot{\omega_0}^2\cdot{r_a}^3\left(\psi_1\overline{r}^9 + \right.$$

$$\left. + 2\psi_1\psi_2\overline{r}^8 + \psi_2\overline{r}^7 + 2\psi_1\overline{r}^6 + 2\psi_2\overline{r}^5 + \overline{r}^3\right). \quad (33)$$

Интегрируя уравнение на исследуемом участке $\overline{r}=\overline{r}_л$ до $\overline{r}=\overline{r}_c$, определим момент крутящий:

$$dM_{3сл} = \pi\xi_{сл}\cdot\rho_c\cdot H\cdot{\omega_0}^2\cdot{r_a}^3\left(\frac{\psi_1(\overline{r}_c^{10}-\overline{r}_л^{10})}{10} + \right.$$

$$+\frac{2\psi_1\psi_2(\overline{r}_c^9-\overline{r}_л^9)}{9} + \frac{\psi_2(\overline{r}_c^8-\overline{r}_л^8)}{8} +$$

$$\left. +\frac{2\psi_1(\overline{r}_c^7-\overline{r}_л^7)}{7} + \frac{\psi_2(\overline{r}_c^6-\overline{r}_л^6)}{6} + \frac{r_c^4-r_л^4}{4}\right). \quad (34)$$

Тогда крутящий момент от сил сопротивления боковой стенки определен зависимостью:

$$M_c = 2\pi H r_{ct}^2\tau_c, \quad (35)$$

где r_{ct} – значение радиуса рабочего объема измельчителя, м.

Касательные напряжения на боковой поверхности внутренней части корпуса измельчителя определены выражением:

$$\tau_c = \xi_c\rho_c\frac{v_c^2}{2}, \quad (36)$$

где ξ_c – значение коэффициента гидравлического сопротивления корпуса измельчителя от вращения материала в воздушно-продуктовой зоне.

Значение приведенной окружной скорости измельчаемого материала у внутренней стенки можно определить из выражения (34), с учетом (2), (3), (22), как

$$\overline{v}_c(\overline{r}) = \frac{1}{\overline{r}_c\omega_0 r_a^2}\sqrt{\frac{M_c}{\pi H\xi_c\rho_c}}. \quad (37)$$

Применительно к нашему случаю крутящий момент определится как

$$M_c = P_{из}r_{из}, \quad (38)$$

где $P_{из}$ – сила, возникающая при закручивании подвижной насадки, в результате перемещения измельчаемого материала вдоль боковой стенки, определяемая на удаленности $r_{из}$ от оси ротора измельчающего аппарата. Тогда

$$\overline{v}_c(\overline{r}) = \frac{1}{\overline{r}_c\omega_0}\sqrt{\frac{P_{из}\overline{r}_{из}}{\pi H\xi_c\rho_c r_a^3}}. \quad (39)$$

На основании экспериментальных данных разработанного типа измельчителя наиболее эффективно осуществляется работа при его заполнении измельчаемым материалом на 1/3, а в общем случае – не более чем на 1/k часть. Тогда объем материала в воздушно-продуктовой зоне –

$$V_{пр} = \frac{V_в}{2},$$

а в общем случае –

$$V_{пр} = \frac{V_в}{k-1}, \quad (40)$$

где k – степень заполнения измельчаемой массы объема рабочей зоны.

Объем слоя в воздушно-вихревой зоне определится как

$$V_в = \pi r_a^2 H. \quad (41)$$

Объем слоя в воздушно-продуктовой зоне –

$$V_{пр} = \pi(r_c^2 - r_a^2)H. \quad (42)$$

Из выражений (29) и (30) можно определить $r_a = r_c\sqrt{1{,}5}$, а в общем виде –

$$r_a = r_c\sqrt{\frac{k-1}{k}}. \quad (43)$$

При определении особенностей функционирования измельчающего устройства руководствовались требованиями ГОСТ Р ИСО 11448-2002[6].

Результаты и их обсуждение

На основании теоретических исследований разработали лабораторный измельчитель для преобразования фруктово-ягодного жмыха в порошки [14]. Измельчитель содержит камеру измельчения I цилиндрической формы, сообщающуюся в верхней части с загрузочным бункером II и разгрузочной полостью готового продукта III в нижней ее части (рис. 3).

Внутри цилиндрического корпуса *1* камеры измельчения I по оси симметрии установлен вертикальный вал *2*, соединенный с приводом *3*. На вертикальном валу *2* соосно установлены два одинаковых ножа *4*, изготовленных из углеродистой конструкционной стали повышенной твердости с углом заточки

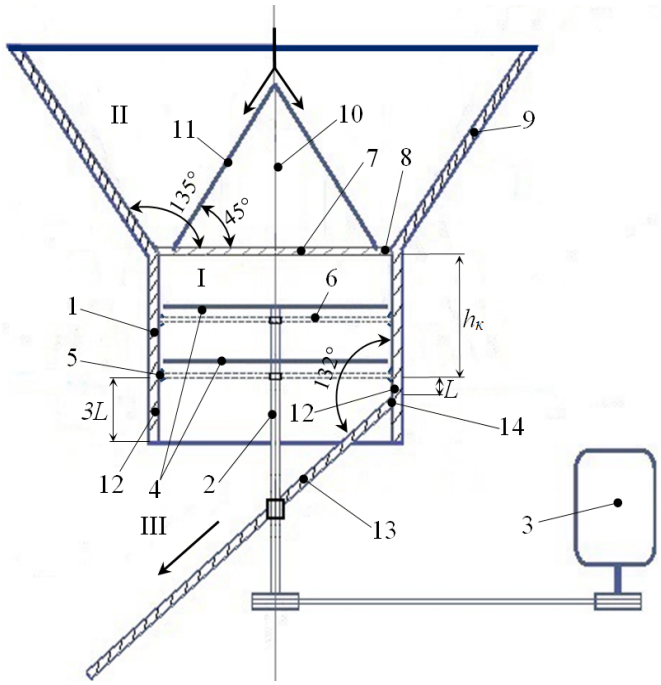


Рис. 3. Схема измельчителя:
1 – корпус камеры измельчения; 2 – вертикальный вал; 3 – привод; 4 – ножи; 5, 14 – пазы; 6 – сита; 7 – основание загрузочного бункера; 8 – загрузочное окно; 9 – загрузочный бункер; 10, 11 – конус и его образующая; 12 – внутренняя поверхность камеры измельчения; 13 – дека

Fig. 3. Design diagram of the shredder:
1 – shredding chamber body; 2 – vertical shaft; 3 – drive; 4 – knives; 5, 14 – grooves; 6 – sieves; 7 – loading hopper base; 8 – loading hole; 9 – loading hopper; 10, 11 – cone and its generatrix; 12 – inner surface of the shredding chamber; 13 – deck

[6]ГОСТ Р ИСО 11448-2002. Измельчители и дробилки передвижные с автономным приводом. Требования безопасности и методы испытаний. М.: Госстандарт России, 2002. 15 с.

рабочей грани 40°. Под каждым ножом *4* в плоскости, параллельной плоскости реза ножа 4, в пазу *5* цилиндрического корпуса *1* установлен с возможностью его съема классификатор в виде сменного сита *6* с уменьшающимся размером ячеек по направлению к разгрузочной полости готового продукта III.

Загрузочный бункер II выполнен в виде полого усеченного конуса, меньшим основанием *7* обращенного к камере измельчения I и сообщающегося с ней посредством одинаковых загрузочных окон *8*, равномерно расположенных по периферии в основании *7* загрузочного бункера. Стенки *9* загрузочного бункера выполнены под углом 135° к его основанию *7*. В центре основания *7* загрузочного бункера жестко установлен полый конус *10*, с вершиной, обращенной в сторону подачи исходного материала. Образующая *11* конуса *10* составляет с его основанием угол 45°, который, по данным предварительных рекогносцировочных исследований, является углом естественного откоса для высушенного плодово-ягодного жмыха.

Разгрузочная полость готового продукта III образована внутренней поверхностью стенки *12* цилиндрического корпуса 1 под нижним сменным ситом *4* и поверхностью деки *13*, выполненной в виде плоской металлической пластины с бортиками на боковой ее поверхности и повторяющей форму паза *14* в верхней ее части. Дека *13* верхней своей частью жестко установлена в пазу *14*, выполненном на внутренней стенке цилиндрического корпуса *1* под углом 132° к его образующей, что соответствует углу естественного откоса порошка, полученного измельчением сухих ягодных выжимок, по металлической поверхности, равного 48°. Кроме того, паз *14* выполнен на внутренней стенке цилиндрического корпуса *1* на расстоянии L от нижнего сменного сита *6* при высоте цилиндрического корпуса $H = h_к + 3L$, где $h_к$ – высота цилиндрического корпуса *1* до нижнего сменного сита *6*. Данная зависимость получена экспериментальным путем. Выступающая над декой *13* стенка цилиндрического корпуса высотой 3L служит отражателем, обеспечивает направленную и равномерную загрузку деки *13* готовым ягодным порошком и препятствует забросу порошка непосредственно в камеру измельчения.

Измельчитель функционирует следующим образом. Чтобы получить готовый продукт с заданным размером частиц порошка, под каждым ножом *4* в пазу *5* цилиндрического корпуса *1* устанавливают съемное сито *6* с заданным размером ячеек. Включают привод *3*. Соединенный с приводом *3* вертикальный вал *2* с установленными жестко и соосно ножами *4* приводится во вращательное движение.

В загрузочный бункер I загружают предварительно просушенный сыпучий жмых, который конусом *10* распределяется на два потока. Благодаря выполнению стенок *9* загрузочного бункера под углом 135°, а стенок *11* – конуса *10,* к его основанию *7* под углом 45° (равному углу естественного откоса сухих фруктово-ягодных выжимок по металлической поверхности) жмых перемещается к загрузочным окнам *8* загрузочного бункера *9* беспрепятственно, без налипания на стенки, непрерывно направленно и равномерно. Через равномерно выполненные в основании *7* загрузочные окна *8* исходный материал попадает в камеру измельчения I, где измельчается режущей кромкой первого ножа *4*. Измельченные первым ножом *4* выжимки попадают на установленное в пазу *5* цилиндрического корпуса *1* сменное сито *6* с заданным размером ячеек. Просеянные измельченные выжимки далее попадают в плоскость следующего соосно установленного с предыдущим ножом на валу *2* ножа *4*, измельчаются режущей кромкой второго ножа *4* и направляются на установленное под ним сменное сито *6* с более мелкими ячейками заданного размера, просеиваются и в виде порошка направляются в разгрузочную полость готового продукта III. В процессе работы измельчителя порошок, попадая на поверхность деки *13*, установленной под оптимальным углом 48°, обеспечивающим эффективную выгрузку и наименьшее трение порошка о металлическую поверхность, совершает контролируемое перемещение. Готовый продукт загружается в тару.

Разработанный измельчитель лабораторно реализован и испытан на базе Тверской ГСХА. В рамках экспериментального исследования поставлена задача получения ягодных порошков из сухих выжимок с заданным фракционным составом не более 1 мм. Для оценки функционирования заявленного измельчителя взяли образцы предварительно высушенных в сушильном шкафу до влажности 10% выжимок ягод брусники, клюквы, черники, смородины черной, жимолости и облепихи. В лабораторном измельчителе использовали сита с заданными размерами ячеек: верхнее – 3 мм, нижнее – 1 мм. После помола выжимок провели оценку крупности помола на рассеве РЛ-4 в соответствии с требованиями ГОСТ[7]. Результаты ситового анализа измельченного материала при однократном пропуске представлены на рисунке 4.

Установлено, что количество продукта с размером частиц менее 1 мм колебалось по размалываемым материалам от 98,3 до 98,8%, что является удовлетворительным показателем в системе производства мукомольных продуктов. Так, выход наиболее близкой по параметрам обойной сортовой хлебопекарной муки[8] из зерна составляет порядка 95%. Степень измельчения продукта может корректироваться посредством замены ситового классификатора и изменения режима функционирования устройства.

При работе измельчающего устройства, как правило, на полезную работу расходуется только часть затрачиваемой энергии. Согласно существующим данным [3, 7] величина фракций при измельчении напрямую зависит от создаваемой мощности. При этом значение непосредственно затрачиваемой на процесс измельчения мощности может быть определено путем составления энергетического баланса[9] [15].

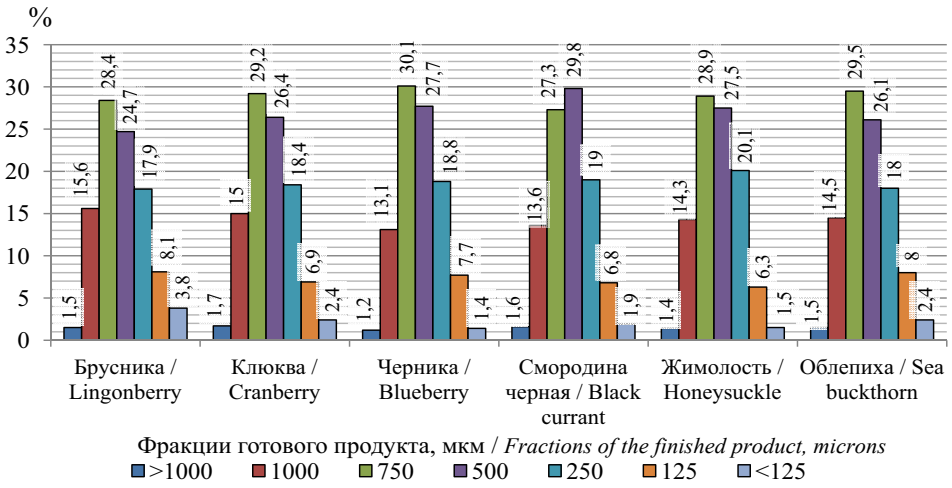


Рис. 4. Эффективность функционирования измельчающего устройства

Fig. 4. Performance efficiency of the shredder

[7] ГОСТ 27560-87. Мука и отруби. Метод определения крупности. М.: Стандартинформ, 2007. 4 с.

[8] ГОСТ 26574-2017. Мука пшеничная хлебопекарная. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2018. 26 с.

[9] Сергеев Н.С., Николаев В.Н., Запевалов М.В., Сергеев Д.Н. Новое поколение измельчителей зерна и семян масличных культур для сельскохозяйственного производства: Монография. Челябинск: Южно-Уральский ГАУ, 2022. 196 с. EDN: LJZEDQ.

Уравнение энергетического баланса можно представить в виде:

$$N_2 + N_a = N_c + N_{из} + N_{2сл} + N_{3сл}, \quad (44)$$

где N_2 и N_a – мощность, создаваемая на роторе непосредственно в воздушно-продуктовой и воздушно-вихревой зонах соответственно, Вт; N_c – мощность, развиваемая воздушно-продуктовой зоной вследствие трения о стенку рабочей камеры измельчающего устройства, Вт; $N_{из}$ – мощность, затрачиваемая на выполнение технологического процесса измельчения, Вт; $N_{2сл}$ – мощность, расходуемая на перемешивание материала в воздушно-продуктовой зоне на участке 2, Вт; $N_{3сл}$ – мощность, расходуемая на перемешивание материала в воздушно-продуктовой зоне на участке 3, Вт.

Мощность, затрачиваемая на выполнение технологического процесса измельчения, в рабочей камере измельчителя определяется из выражения:

$$N_i = M_i \cdot \omega_0. \quad (45)$$

Значение мощности, передаваемой измельчителем непосредственно материалу в воздушно-продуктовой зоне, –

$$N_2 = z_л \xi_{2л} h_л \frac{\rho_c \omega_0^3 r_a^3}{2}\left(\frac{\psi_1^2\left(1-\overline{r}_{вн}^8\right)}{8}+\frac{2\psi_1\psi_2\left(1-\overline{r}_{вн}^7\right)}{7}+\right.$$
$$\left.+\frac{\psi_2^2\left(1-\overline{r}_{вн}^6\right)}{6}-\frac{\psi_1\left(1-5\overline{r}_{вн}^6\right)+6\overline{r}_{вн}^5(1+\psi_1)}{15}+\frac{2\overline{r}_{вн}^2(4\overline{r}_{вн}+3)+1}{12}\right), \quad (46)$$

откуда значение мощности, расходуемой на смешивание материала в воздушно-продуктовой зоне на участке 2, определится зависимостью:

$$N_{2сл} = \xi_{сл} \cdot \rho_c \cdot \omega_0{}^3 \cdot r_a^2\left(\pi H r_a \cdot\left(\frac{\psi_1^2 \cdot\left(\overline{r}_л^9-1\right)}{9}+\right.\right.$$
$$+\frac{\psi_1 \cdot \psi_2 \cdot\left(\overline{r}_л^8-1\right)}{4}+\frac{\psi_2 \cdot\left(\overline{r}_л^7-1\right)}{7}+\frac{\psi_1 \cdot\left(\overline{r}_л^6-1\right)}{3}+$$
$$+\frac{2\psi_2 \cdot\left(\overline{r}_л^5-1\right)}{5}+\left.\frac{\overline{r}_3^3-1}{3}\right)-\frac{z_л-F_л}{2}\cdot\left(\frac{\psi_1^2 \cdot\left(\overline{r}_л^6-1\right)}{8}+\right.$$
$$+\frac{2\psi_1\psi_2 \cdot\left(\overline{r}_л^7-1\right)}{7}+\frac{\psi_2 \cdot\left(\overline{r}_л^6-1\right)}{6}+\frac{2\psi_1 \cdot\left(\overline{r}_л^5-1\right)}{5}+$$
$$\left.\left.+\frac{\psi_2 \cdot\left(\overline{r}_л^4-1\right)}{2}+\frac{\overline{r}_л^2-1}{2}\right)\right). \quad (47)$$

Значение мощности, расходуемой на смешивание материала, распределенного в воздушно-продуктовой зоне на участке 3, –

$$N_{3сл} = \xi_{сл} \cdot \rho_c \cdot H \cdot \omega_0{}^3 \cdot r_a{}^2\left(\frac{\psi_1 \cdot\left(\left(\overline{r}_c^{10}-\overline{r}_л^{10}\right)\right)}{10}+\right.$$
$$+\frac{2\psi_1 \cdot \psi_2 \cdot\left(\overline{r}_c^9-\overline{r}_л^9\right)}{9}+\frac{\psi_2 \cdot\left(\overline{r}_c^8-\overline{r}_л^8\right)}{8}+$$
$$\left.+\frac{2\psi_1 \cdot \psi_2 \cdot\left(\overline{r}_c^7-\overline{r}_л^7\right)}{7}\cdot\frac{\psi_2 \cdot\left(\overline{r}_c^6-\overline{r}_л^6\right)}{3}+\frac{\overline{r}_c^4-\overline{r}_л^4}{4}\right). \quad (48)$$

Мощность N_a определяется из уравнения (28):

$$N_a = -2\pi\mu\omega_0^2 H r_a^2 (3\psi_1 + 2\psi_2). \quad (49)$$

Значение мощности сил трения о стенку рабочего объема камеры измельчения N_c можно определить зависимостью:

$$N_c = M_c \frac{v_c}{r_c}. \quad (50)$$

Итоговое значение мощности сил трения о стенку рабочего объема измельчающей камеры можно записать в виде выражения:

$$N_c = 2\tau_c \sqrt{\frac{\pi H P_{из} r_{из}}{\xi_c \rho_c}}. \quad (51)$$

Зависимость мощности, затрачиваемой на измельчение, можно определить из уравнения (44):

$$N_{из} = N_2 - N_c - N_{2сл} - N_{3сл} + N_a. \quad (52)$$

На основании выполненных расчетов значение фактически затрачиваемой энергии на измельчение ягодных выжимок влажностью 10% до фракции менее 1 мм составило 4,40 кВт·ч/т.

Следующим этапом исследований является модернизация устройства с целью оптимизации энергетических показателей, затрачиваемых при измельчении вторичных растительных материалов разной влажности и химического состава, обладающих различными физико-механическими характеристиками (мякоть, семена, косточки и пр.).

Выводы

1. В конструкцию разработанного измельчителя вторичного плодово-ягодного сырья (выжимок) интегрированы принципы использования рабочих поверхностей углов естественного откоса сырья и готового продукта, а также двухступенчатое измельчение.

2. Разработанное устройство при измельчении сухих выжимок клюквы, брусники, черники, смородины, жимолости и облепихи обеспечивает степень измельчения 98,3…98,8% и дисперсность продукта менее 1 мм. Дисперсность может корректироваться посредством замены ситового классификатора и изменения режима функционирования устройства.

3. Расчетное значение фактической энергоемкости деформации ягодных выжимок влажностью не более 10%, измельчаемых до фракции менее 1 мм, составляет 4,40 кВт·ч/т.

4. Интеграция разработанного устройства в машинно-технологические схемы переработки вторичных и других растительных материалов будет способствовать повышению качества измельчения сырья и оптимизации энергоемкости выполняемого технологического процесса.

Список источников

1. Скоморохова А.И., Иванова Э.С., Алексенцев Д.С. Технологическая линия производства продуктов питания с применением аддитивных технологий // Пищевые системы. 2021. Т. 4, № 3S. С. 275-280. EDN: LFYGLD

2. Брагинец С.В., Бахчевников О.Н., Алферов А.С. Результаты экспериментальных исследований измельчения высушенных волокнистых растительных материалов // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 4. С. 591-608. https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.591-608

3. Смирнов Р.А., Оболенский Н.В., Свистунов А.И. Теоретическое обоснование конструкционного решения измельчителя корнеклубнеплодов // Кормопроизводство. 2018. № 5. С. 40-48. EDN: XOAMSL

4. Елисеев М.С., Елисеев И.И., Рыбалкин Д.А. Теоретическое обоснование параметров работы устройства для ориентированной подачи измельчаемого материала к рабочим органам молоткового измельчителя // Аграрный научный журнал. 2017. № 3. С. 47-50. EDN: YMREBB

5. Kazub V.T., Kosheleva M.K., Rudobashta S.P. Kinetics of grinding of vegetable raw materials during electric discharge extraction. ChemChemTech. 2021;64(6):76-82. https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216406.6385

6. Bas-Bellver C., Barrera C., Betoret N., Seguí L. Impact of disruption and drying conditions on physicochemical, functional and antioxidant properties of powdered ingredients obtained from brassica vegetable by-products. Foods. 2022;11(22):3663. https://doi.org/10.3390/foods11223663

7. Нечаев В.Н. Влияние некоторых параметров на рабочий процесс дробилок зерна // Вестник НГИЭИ. 2015. № 6 (49). С. 67-73. EDN: UBIORJ

8. Кривов Д.А. Механизмы разрушения растительного сырья в валковой дробилке с наборными пластинами в форме РК-профиля // Вестник КрасГАУ. 2024. № 6 (207). С. 198-205. https://doi.org/10.36718/1819-4036-2024-6-198-205

9. Jung H., Lee Y.J., Yoon W.B. Effect of moisture content on the grinding process and powder properties in food: a review. Processes. 2018;6(6):69. https://doi.org/10.3390/pr6060069

10. Данилин С.И., Родионов Ю.Ю., Родионов Ю.В., Чумиков Ю.А., Скоморохова А.И. Совершенствование технологии получения порошков из растительного сырья // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2020. № 4. С. 150-159. EDN: JITFII

11. Годунов О.А., Черных В.Я. Инновационная технология производства пищевых порошков из овощей, фруктов, ягод и грибов // Хлебопродукты. 2020. № 6. С. 48-53. EDN: WOWYXU

12. Резник Е.И., Карташов С.Г. Технология ускоренной переработки грубого растительного сырья и отходов // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 7. С. 8-13. EDN: WDJPYV

13. Зверев С.В., Алдошин Н.В., Васильев А.С., Глухова Е.В. Технология производства порошков из ягодного сырья // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2021. № 4 (32). С. 26-35. EDN: MCZTTQ

14. Измельчитель сухих ягодных выжимок: Патент RU226856 U1, МПК B02C18/00 / А.С. Васильев, Е.Н. Чумакова, В.В. Голубев, И.А. Кудласевич. Заяв. № 2024109634, 09.04.2024, опубл. 26.06.2024. Бюл. № 18. EDN: GSTKUF

15. Балданов М.Б., Сергеев Ю.А., Лабаров Д.Б., Гармаев Ц.И. Энергетическая оценка процесса измельчения кусковых материалов // Вестник ВСГУТУ. 2019. № 2 (73). С. 57-63. EDN: TEESLN

References

1. Skomorokhova A.I., Ivanova E.S., Aleksentsev D.S. Process line for food production using additive technology. *Food systems*. 2021;4(3S):275-280. (In Russ.) https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3S-275-280

2. Braginets S.V., Bakhchevnikov O.N., Alferov A.S. Experimental Data of Grinding Dried Fibrous Plant Materials. *Engineering Technologies and Systems*. 2021;31(4):591-608. (In Russ.) https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.591-608

3. Smirnov R.A., Obolenskiy N.V., Svistunov A.I. Theoretical evaluation of design of root and tuber chopper. *Kormoproizvodstvo*. 2018;5:40-48. (In Russ.)

4. Eliseev M.S., Eliseev I.I., Rybalkin D.A. The theoretical justification of parameters of operation for oriented feeding of mill material to the working parts of the hammer mill shredder. *The Agrarian Scientific Journal*. 2017;3:47-50. (In Russ.)

5. Kazub V.T., Kosheleva M.K., Rudobashta S.P. Kinetics of grinding of vegetable raw materials during electric discharge extraction. *ChemChemTech*. 2021;64(6):76-82. https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216406.6385

6. Bas-Bellver C., Barrera C., Betoret N., Seguí L. Impact of disruption and drying conditions on physicochemical, functional and antioxidant properties of powdered ingredients obtained from brassica vegetable by-products. *Foods*. 2022;11(22):3663. https://doi.org/10.3390/foods11223663

7. Nechaev V.N. The influence of some parameters on the workflow grain crushers. *Vestnik NGIEI*. 2015;6(49):67-73. (In Russ.)

8. Krivov D.A. Vegetable raw materials destruction mechanisms in a roller crusher with set plates in the form of an RT-profile. *Bulletin of KrasGAU*. 2024;6(207):198-205. (In Russ.) https://doi.org/10.36718/1819-4036-2024-6-198-205

9. Jung H., Lee Y.J., Yoon W.B. Effect of Moisture Content on the Grinding Process and Powder Properties in Food: A Review. *Processes*. 2018;6:69. https://doi.org/10.3390/pr6060069

10. Danilin S.I., Rodionov Yu.Yu., Rodionov Yu.V., Chumikov Yu.A., Skomorokhova A.I. Improving the technology of obtaining powders from plant raw materials. *Technologies of the Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex – Healthy Food Products*. 2020;4:150-159. (In Russ.)

11. Godunov O.A., Chernykh V.Ya. Innovative technology for the production of food powders from vegetables, fruits, berries, and mushrooms. *Khleboprodukty*. 2020;6:48-53. (In Russ.) https://doi.org/10.32462/0235-2508-2020-29-6-48-53

12. Reznik E.I., Kartashov S.G. Technology of accelerated processing of rough plant raw material and waste. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2016;7:8-13. (In Russ.)

13. Zverev S.V., Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Glukhova E.V. Production technology of powders from berry raw materials. *Innovations in Agricultural Complex*: *Problems and Perspectives*. 2021;4(32):26-35. (In Russ.)

14. Vasiliev A.S., Chumakova E.N., Golubev V.V., Kudlasevich I.A. Shredder of dry berry squeezes: Patent No 226856 U1 Russian Federation, IPK B02C18/00/2024. (In Russ.)

15. Baldanov M.B., Sergeev Yu.A., Labarov D.B., Garmaev Ts.I. Energy evaluation of the grinding process of lump materials. *ESSUTM Bulletin*. 2019;2(73):57-63. (In Russ.)

Информация об авторах

[1] **Алдошин Николай Васильевич,** д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник; naldoshin@yandex.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-0446-10964; SPIN-код: 6032-9021, AuthorID: 593777

[2] **Васильев Александр Сергеевич,** д-р с.-х. наук, доцент, заведующий кафедрой; vasilevtgsha@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-0936-2011; SPIN-код: 3817-7640, AuthorID: 655174

[3] **Кудрявцев Андрей Васильевич,** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; akud@tvgsha.ru; https://orcid.org/0000-0001-8341-0467; SPIN-код: 9205-2096, AuthorID: 699657

[4] **Голубев Вячеслав Викторович,** д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой; slavasddg@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-6421-6658; SPIN-код: 6542-7070, AuthorID: 658245

[5] **Чумакова Елена Николаевна,** канд. с.-х. наук, доцент, доцент кафедры; elena.chumakova.ne@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-4664-8887; SPIN-код: 8825-7631, AuthorID: 475435

[1] Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

[2, 3, 4, 5] Тверская государственная сельскохозяйственная академия; 170904, Российская Федерация, г. Тверь, пос. Сахарово, ул. Маршала Василевского, 7

Author Information

Nikolay V. Aldoshin [1], DSc (Eng), Professor, Chief Research Engineer; naldoshin@yandex.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-0446-10964

Aleksandr S. Vasiliev [2], DSc (Ag), Associate Professor, Head of the Department; vasilevtgsha@mail.ru

Andrey V. Kudryavtsev [3], CSc (Eng), Associate Professor; akud@tvgsha.ru

Vyacheslav V. Golubev [4], DSc (Eng), Professor, Head of the Department; slavasddg@mail.ru

Elena N. Chumakova [5], CSc (Ag), Associate Professor; elena.chumakova.ne@mail.ru

[1] Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 1st Institutskiy Proezd Str., 5; Moscow, Russia

[2,3,4,5] Tver State Agricultural Academy; Marshala Vasilevskogo Str, 7; Sakharovo, Tver, Russia

Вклад авторов

Н.В. Алдошин – руководство исследованиями, формальный анализ, создание черновика рукописи;
А.С. Васильев – концептуализация, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
А.В. Кудрявцев – методология, визуализация рукописи;
В.В. Голубев – методология, администрирование проекта;
Е.Н. Чумакова – формальный анализ, методология.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 21.10.2024, после рецензирования и доработки 13.03.2025; принята к публикации 14.03.2025

Author Contribution

N.V. Aldoshin – research supervision, formal analysis, writing – original draft;
A.S. Vasiliev – conceptualization, writing – review and editing of the manuscript;
A.V. Kudryavtsev – methodology, visualization;
V.V. Golubev – methodology, project administration;
E.N. Chumakova – formal analysis, methodology.

Conflict of interests

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

Received 21.10.2024; Revised 13.03.2025; Accepted 14.03.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 004.896:631.171:636
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-15-22

Направления развития искусственного интеллекта в биомашинных системах для животноводства

В.В. Кирсанов
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия
kirvv2014@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2549-4070

Аннотация. Управление сложными биомашинными системами в животноводстве возможно с помощью технологий искусственного интеллекта. Наличие у машин функции «искусственного сознания» для адаптивного взаимодействия с биологическими объектами (животными) позволит более точно учитывать их нейрокогнитивные способности, рефлексы, преднамеренность поведения, возникновение «машинобоязни» на начальном этапе приучения к технологии и др. Цель исследований – повышение качества управления сложными биотехническими системами в животноводстве на основе использования технологий искусственного интеллекта. Рассмотрена дискуссионная проблема необходимости наличия в будущем у машин сильного искусственного интеллекта. Предположили, что физические (рычаг, колесо, механизм, машина) и когнитивные (калькулятор, смартфон, компьютер и др.) «усилители» человеческого функционала вновь должны объединиться в новой умной машине в виде сильного интеллекта и универсальных физических возможностей (робот + сильный ИИ = искусственный человек). Рассмотрена принципиальная схема эволюционного развития физических (механизация, автоматизация и роботизация) и когнитивных (информатизация, алгоритмизация, цифровизация, искусственный интеллект) «усилителей» человека. Предложена структурно-функциональная схема управления животноводческой фермой как сложной биомашсистемой «Человек-машина-животное-продукция-окружающая среда» с использованием ИИ. Выделены три критериальные группы оценки качества функционирования данной биомашсистемы: 1) показатели качества управления технологическими процессами в локальных биомашсистемах доения, кормления и др.; 2) показатели геномной оценки, продуктивности и физиологического состояния животных; 3) экономические и экологические показатели качества управления фермой в целом. На основе алгебры логики получены соответствующие структурно-функциональные модели их построения.

Ключевые слова: животноводство; биомашсистема; искусственный интеллект; искусственное сознание; механизация; автоматизация; роботизация; структурно-функциональная схема управления; критериальная группа; показатели качества

Для цитирования: Кирсанов В.В. Направления развития искусственного интеллекта в биомашинных системах для животноводства // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 3. С. 15-22. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-15-22

ORIGINAL ARTICLE

Ways of developing artificial intelligence in biomachine systems for animal husbandry

V.V. Kirsanov
Federal Scientific Agroengineering Centre VIM; Moscow, Russia
kirvv2014@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2549-4070

Abstract. The control of complex biomachinery systems in livestock farming is possible with the help of artificial intelligence technologies. The ‘conscious artificial intelligence’ function for adaptive interaction with biological objects (animals) can take into account more accurately their neurocognitive abilities, reflexes, intentionality of behaviour, occurrence of ‘machine fear’ at the initial stage of accustoming to the technology and others. The research aim is to improve the quality of controlling complex biotechnical systems in livestock farming based on artificial intelligence technologies. The author considered the controversial problem of the need for strong artificial intelligence in future machines. An assumption was made that physical (lever, wheel, mechanism, and machine) and cognitive (calculator, smartphone, and computer, etc.) ‘boosters’ of human functionality should unite again in a new smart machine in the form of strong intelligence and universal physical capabilities (robot + strong AI = artificial human). The paper presents a principal diagram of evolutionary development of physical (mechanization, automation,

© Кирсанов В.В., 2025

and robotization) and cognitive (informatization, algorithmicization, digitalization, and artificial intelligence) 'boosters' of a human being. The author proposes a structural and functional chart of livestock farm management as a complex biomass system 'Man-Machine-Animal-Product-Environment' with the use of AI. Three criterion groups of quality assessment of this biosystem functioning have been identified: 1) quality indicators of technological process control in local biosystems of milking, feeding, etc.; 2) indicators of genomic evaluation, productivity and physiological state of animals; 3) economic and ecological indicators of farm management quality as a whole. Logic algebra helped obtain the corresponding structural and functional models of their construction.

Keywords: animal husbandry; biomachine system; artificial intelligence; artificial consciousness; mechanization; automation; robotization; structural-functional control chart; criterion group; quality indicators

For citation: Kirsanov V.V. Ways of developing artificial intelligence in biomachine systems for animal husbandry. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2025;27(3):15-22 (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-15-22

Введение

Управление сложными биомашинными системами в животноводстве предполагает использование систем искусственного интеллекта (ИИ) для лучшего взаимодействия и адаптации звеньев единой системы «Человек-машина-животное-продукция-окружающая среда» [1]. На сегодняшний день активно внедряются различные системы видеонаблюдения и аналитики, способные анализировать поведение биологических объектов, их биометрические характеристики и др. При этом для повышения качества обслуживания животных и получаемой от них продукции машина в определенной степени должна обладать искусственным «сознанием», включающим память – предысторию обслуживания животного с его результатами, идентификацию физиологических и биометрических параметров, намерений и других актов поведения. Отдельно машинными алгоритмами должны фиксироваться аномальные акты поведения и физиологического состояния животных с целью их недопущения или минимизации появления. При этом важно обеспечить биологическую защиту самих животных от «неправильных действий» машин, и наоборот: «машина» должна вовремя распознать «аномальные» акты поведения животного и предотвратить возникновение внештатных ситуаций.

Современная теория сознания, автором концепции которой является Джон Локк, формулирует сознание как акт восприятия, происходящего в собственном разуме человека [2]. По мнению Стюарта Сазерленда, определения термина «сознание» на данный момент не существует, поскольку данное явление неуловимо и невозможно отследить его эволюцию [3]. Философская наука выделяет 4 основных направления сознания: знания в целом, преднамеренность, интроспекция, основанный на ощущении опыт.

Таким образом, искусственное сознание машины должно взаимодействовать с животными с учетом их нейрокогнитивных способностей с целью создания в локальной биомашсистеме оптимальных условий для выполнения конкретных технологических процессов доения, кормления, обеспечения микроклимата и др. В настоящее время существует достаточно большое количество сенсоров, позволяющих оценить физиологические характеристики животных и их состояние: датчики идентификации, двигательной активности, половой охоты, пульсомеры, болюсы и др. [4] Совокупная информация от сенсоров, обработанная нейросетевыми алгоритмами, дает достаточно много сведений о животном, о его суточных биоритмах и др. В роботизированных системах самообслуживания животные «добровольно» удовлетворяют свои потребности в корме, воде и доении на основе выработанных рефлексов поведения, что в дальнейшем используется машинными алгоритмами для активизации данных процессов (подкормка животных концентратами в доильном роботе и вкусовыми улучшителями корма на кормовом столе, регулирование подачи воздуха к местам наибольшего скопления животных и др.).

Развитие локальных процессных биомашсистем может происходить по пути совершенствования систем контроля биомеханики и двигательной активности животных, повышения качества выполнения технологических процессов, технической готовности машин на основе дистанционного телекоммуникационного контроля и управления производством и др. На первом этапе необходимо провести факторную оценку контролируемых качественных и количественных показателей по каждой подсистеме: человеку-оператору доильных установок, животному как «самоходной биологической машине» и обслуживающим ее техническим средствам. Ранжирование должно проводиться по показателям назначения (производительность, продолжительность цикла обслуживания), экономного использования энергии (кВт · ч/т), конверсии корма, надежности и безопасности выполнения технологических процессов, обеспечения безопасности и комфорта содержания животных, получения экологически безопасной качественной продукции от животных и др. [5]. Телекоммуникационные средства связи могут обеспечить комплексный системный контроль биомашинной системы, включающей в себя

человека-оператора, животных – объектов обслуживания машин и исполнительных технических средств. При этом потоки животных, минимальные пути и траектории их перемещения к местам обслуживания (корму, воде, доильным залам, зооветпунктам и др.) не должны пересекаться.

Тактильные ощущения животных – такие, как дискомфорт подстилки, микроклимат, некачественный корм, слишком теплая или слишком холодная вода, нарушение вакуумного режима при доении и др., должны регулироваться централизованно или локально с местных постов обслуживания. Особое значение имеет контроль биологических циклов в реперных точках в периоды половой охоты, искусственного осеменения, приема родов, лечения заболеваний и др. Отдельные из них могут носить жизнеугрожающий характер и требуют особого контроля и внимания.

Таким образом, критериями оценки при создании и проектировании систем искусственного машинного интеллекта могут служить инстинктивные бессознательные и условно-рефлекторные акты поведения животных, выработанные технологиями и человеком, которые позволяют осуществлять прогнозирование поведения биологических объектов, приучать их к выполнению своих жизненных потребностей в определенные промежутки времени и в определенных местах, удобных человеку, машине или системе в целом. К таким моментам можно отнести приучение животных к актам дефекации в определенном месте, доению роботом, движению по заданной траектории с помощью управляемых технологических расколов, селекционных ворот, коридоров и др. [6].

Особое значение имеет первичный опыт, который сопровождается значительными стрессами у животных, формированием машинобоязни или страхов перед другими статусными животными в их половозрастной иерархии. Следовательно, технологии должны иметь адаптивные механизмы постепенного бесстрессового приучения, например, к доильному роботу: сначала присутствует человек, который подключает доильные стаканы, а затем это делает робот [7]. Коллаборация человека и машины (робота) поможет преодолеть негативные последствия стресса у животных. Очевидно, что развитие интеллектуальных систем управления машинами должно идти в направлении повышения степени очувствления их рабочих органов по отношению к биологическим объектам: вымени и соскам коровы, кожным покровам, конечностям и др.

Цель исследований: повышение качества управления сложными биотехническими системами в животноводстве на основе использования искусственного интеллекта.

Материалы и методы

Вопросам методологии развития искусственного интеллекта посвящены работы многих российских и зарубежных ученых. Эта проблема является всеобъемлющей и дискуссионной. Могут ли машины научиться думать и мыслить, как люди, иметь собственное искусственное сознание, которое может эволюционировать [8], или искусственный интеллект представляет собой более или менее сложные алгоритмы функционирования, заложенные человеком? Человеческое сознание может анализировать внешние ситуации, собственное состояние, замечать недостатки других и т.д. В машине, несмотря на обилие датчиков, отдельные подсистемы могут «не знать» о том, что происходит в других системах. Основатели современной информатики Алан Тьюринг и Джон фон Нейман считают, что машины в конечном счете смогут имитировать все возможности человеческого мозга включая сознание. Футурологи также предсказывают появление сознания у роботов через несколько десятилетий. Отсюда можно заключить, что сильный искусственный интеллект со временем должен будет обладать искусственным сознанием, хотя и сегодня «не думающий» слабый искусственный интеллект благодаря высокой скорости обработки данных может производить достаточно сложные вычисления и с успехом применяться в различных областях науки и техники.

Различные механизмы и машины можно считать усилителями физического функционала человека. Очевидно, что с помощью искусственного интеллекта повышаются его когнитивные возможности для управления сложным, насыщенным машинами технологическим пространством. В когнитивной деятельности человека так же, как и в физической, вначале необходимо заменить рутинный умственный труд слабым искусственным интеллектом. При этом мыслительный процесс остается за человеком, но постепенно он также будет осваиваться и роботами.

Таким образом, первоначально объединенные в человеке физические и когнитивные функции, разделившись в физических и когнитивных усилителях человеческих возможностей в процессе эволюции (колесо, рычаг, калькулятор, компьютер и др.), вновь должны объединиться в новой умной машине в виде сильного интеллекта и универсальных физических возможностей (робот + сильный ИИ = искусственный человек). Конечно, во всем нужно руководствоваться здравым смыслом, и не все технологии требуют на сегодняшний день применения сильного искусственного интеллекта. С распознаванием образов, сортировкой продукции, биометрией

животных, аномальными актами развития и поведения биологических объектов может вполне хорошо справляться обученный слабый искусственный интеллект. Возникает резонный вопрос о том, зачем тогда нужен сильный искусственный интеллект, если все равно решение по ключевым вопросам развития технологий и научной деятельности будет принимать человек, – только ради самого процесса познания работы человеческого мозга? Конечно, в построении вычислительной техники на основе нейроморфных технологий этот вопрос является принципиально важным и необходимым. А в производстве агропродукции достаточно ли только применения слабого искусственного интеллекта и нужно ли чрезмерно усложнять технологии, создавая «думающие» машины? Скорее всего это вопрос времени, экономики и дальнейшего эволюционного развития машинных технологий на основе рационального использования в них систем искусственного интеллекта.

При равенстве стоимости человеческого труда и роботов предпочтение будет отдаваться последним. Перед Россией стоит амбициозная задача войти в ТОП-25 развитых стран по использованию промышленных роботов. Вместе с тем, по мнению Илона Маска, избыточная роботизация и автоматизация на практике могут и не привести к ожидаемым результатам, поскольку значительно удорожает процесс производства [9].

Результаты и их обсуждение

Схема эволюционного развития физических и когнитивных «усилителей» человека представлена на рисунке 1.

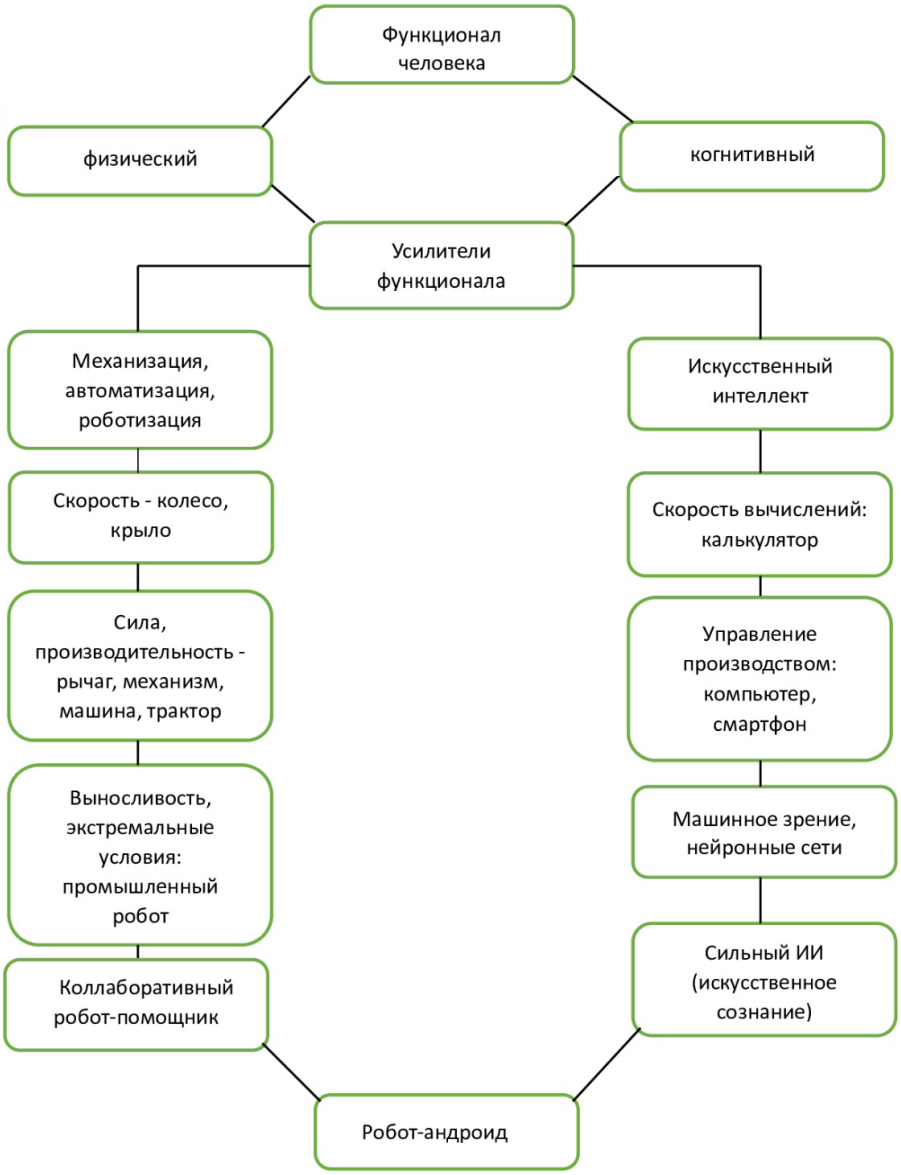


Рис. 1. Схема трансформации физических и когнитивных «усилителей» человеческого функционала

Fig. 1. Transformation diagram of physical and cognitive 'boosters' of human functionality

В процессе развития технического прогресса можно выделить два основных направления: первое – это механизация, автоматизация и роботизация как «усилители» физического функционала человека, благодаря которым возросли скорость, производительность и безопасность материального производства, а также возможность быстрого перемещения человека в пространстве и времени (автомобили, самолеты и др.); второе – информатизация, алгоритмизация, цифровизация и искусственный интеллект, ускоряющие и повышающие качество обработки информационных потоков. Эти два направления тесно взаимосвязаны, поскольку рост производительности труда повышает интенсивность обработки материальных потоков, а те в свою очередь способствуют росту информационных потоков, которые требуют обработки большого объема вычислений и применения соответствующих высокопроизводительных ЭВМ.

Таким образом, в процессе промышленной революции происходят своеобразное «отзеркаливание» физических и когнитивных возможностей человека в средствах механизации, автоматизации и информатизации и их постепенное слияние в человекоподобных роботах-андроидах (гуманоидах) (рис. 1).

Будет это направление тотальным или будет развиваться только в отдельных сферах обслуживания – покажет время. Но уже сейчас и в процессе материального производства (роботы-манипуляторы, беспилотники), и в сферах информационного обслуживания активно внедряются роботизированные технологии (автоответчики, запись к врачу, обслуживание в МФЦ), что позволяет сделать вывод о постепенном вытеснении рутинного человеческого труда машинным в различных сферах человеческой деятельности. В когнитивной сфере человек пытается познать самого себя, работу головного мозга и возможности создания нейроморфного компьютера, природоподобных технологий и др. [10].

В растениеводстве и животноводстве в ближайшей перспективе, очевидно, будет преобладать слабый ИИ в виде нейросетей, объединенных с различными биометрическими датчиками, идентифицирующими и контролирующими поведение и физиологическое состояние животных, растений и др. Преобладающим направлением развития ИИ будут алгоритмические программы, контролирующие и согласующие взаимодействие живых биологических объектов и обслуживающих их механизмов и машин. При проведении геномной оценки возможны ускорение селективного отбора животных и создание прогнозных моделей их продуктивных процессов (моделей лактации и др.).

Примерная структурная схема управления животноводческой фермой как сложной биомашсистемой «Ч-М-Ж-П-ОС» с использованием ИИ представлена на рисунке 2. Контроль работы операторов (Ч), машин (М) и оборудования, участвующих в выполнении технологических процессов доения, кормления, управления микроклиматом и др., осуществляется локальными цифровыми информационно-управляющими системами ЛИУС$_м$, которые взаимодействуют с информационно-управляющей системой ЛИУС$_ж$, осуществляющей оперативный контроль качества продукции (П), физиологического состояния животных (Ж), биометрии и бонитировочных характеристик, а также исследования генома животных для улучшения селекционно-племенной работы. Экономика и управление предприятием в целом, взаимодействие с поставщиками и переработчиками, контроль окружающей среды (ОС), подготовка побочной продукции животноводства осуществляются интеллектуальной информационно-управляющей системой фермы ИИУС$_ф$. Функционал ИИ и данных подсистем подробно описан и проанализирован в работе [11].

Для управления животными в будущем возможно создание животных-киборгов. Такому животному может быть задан соответствующий правильный (эталонный) алгоритм поведения, которого будут придерживаться другие животные. Как будет управляться такое животное-киборг – с помощью вживленных чипов или полностью быть механическим роботом – покажет будущее [12].

Очевидно, что качественное повышение уровня управления биомашсистемой животноводческой фермы возможно на основе применения искусственного интеллекта и методов многокритериальной оценки. В соответствии с управляющей структурой биомашсистемы фермы можно предложить следующие критериальные группы ее оценки: $К_{ЛИУСм}$, $К_{ЛИУСж}$, $К_{ИИУСф.}$.

Критериальная группа $К_{ЛИУСм}$ включает в себя показатели качества управления технологическими процессами в локальных биомашсистемах доения, кормления и др. При этом обеспечивается контроль качества работы операторов ($К_{оп}$) и контроль соответствующих групп машин по видам технологических процессов ($К_{мi}$), что можно записать в виде логических соотношений:

$$К_{ЛИУСм} = [\sum j_{оп} \in (j_{опi} \ldots j_{опn}) \forall \sum (К_{опi} \ldots К_{опn})] \wedge$$
$$\wedge [\sum j_{м} \in (j_{мi} \ldots j_{мn}) \forall \sum (К_{мi} \ldots К_{мn})], \quad (1)$$

где $\sum j_{оп}$, $\sum j_{м}$ – количество типажей операторов и групп машин (доение, кормление и др.) соответственно; ($j_{опi} \ldots j_{опn}$) – количество операторов j-типа (дояры, скотники и др.); ($К_{опi} \ldots К_{опn}$) – показатели качества работы операторов j-типа; $j_{мi} \ldots j_{мn}$ – количество машин j-типа (оборудование для микроклимата, доильные установки, кормораздатчики и др.); $К_{мi} \ldots К_{мn}$ – показатели качества работы машин j-типа (производительность, время цикла обслуживания, показатели

надежности, экономного использования энергии и др.); ∀, ∧ – логические операторы исключительной дизъюнкции и соединения.

Показатели критериальной группы $К_{ЛИУСж}$ учитывают продуктивность, физиологическое состояние и геномную оценку животных:

$$К_{ЛИУСж} = [\sum j_ж \in (j_{жi} \ldots j_{жn}) \forall \sum (К_{жi} \ldots К_{жn})] \wedge$$
$$\wedge [\sum j_п \in (j_{пi} \ldots j_{пn}) \forall \sum (К_{пi} \ldots К_{пn})] \wedge$$
$$\wedge [\sum j_{гж} \in (j_{гжi} \ldots j_{гжn}) \forall \sum (К_{гжi} \ldots К_{гжn}), \quad (2)$$

где $\sum j_ж$ – количество половозрастных групп животных; $j_{жi} \ldots j_{жn}$ – количество животных конкретной половозрастной группы; $К_{жi} \ldots К_{жn}$ – показатели физиологического состояния конкретной половозрастной группы; $\sum j_п$ – количество видов получаемой продукции животноводства; $j_{пi} \ldots j_{пn}$ – количество выпускаемой продукции данного вида; $К_{пi} \ldots К_{пn}$ – показатели качества продукции данного вида; $\sum j_{гж}$ – количество половозрастных групп животных, подлежащих геномной оценке; $j_{гжi} \ldots j_{гжn}$ – количество показателей, определяемых при геномной оценке различных половозрастных групп животных; $К_{гжi} \ldots К_{гжn}$ – качественные показатели геномной оценки различных половозрастных групп животных.

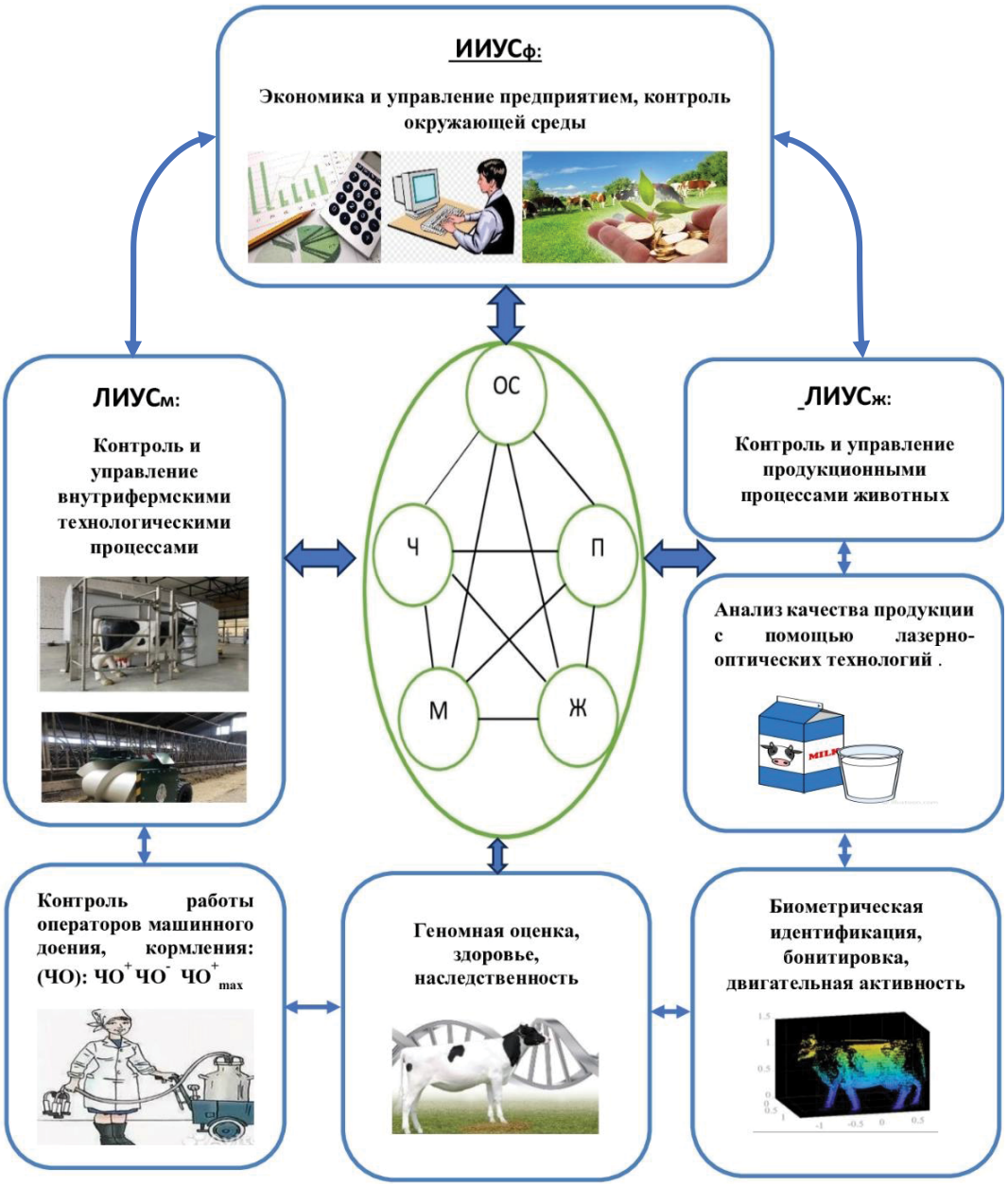


Рис. 2. Структурно-функциональная схема управления животноводческой фермой как сложной биомашсистемой «Ч-М-Ж-П-ОС» с использованием ИИ

Fig. 2. Structural-functional control chart of a livestock farm as a complex biomachine system 'Man-Machine-Animal-Product-Environment' with the use of AI

Показатели критериальной группы $К_{ИИУСф}$ включают в себя контроль качества управления фермой в целом (экономика, экология предприятия и окружающей среды, логистика основной и побочной продукции и др.):

$$К_{ИИУСф} = [\sum j_{пк} \in (j_{пкi} \ldots j_{пкn}) \forall \sum (Э_{пкi} \ldots Э_{пкn})] \wedge [\sum j_{пп} \in (j_{ппi} \ldots j_{ппn}) \forall \sum (Э_{ппi} \ldots Э_{ппn})] \wedge \wedge [\sum j_{эк} \in (j_{экi} \ldots j_{экn}) \forall \sum (К_{экi} \ldots К_{экn})], \quad (3)$$

где $\sum j_{пк}$ – количество видов выпускаемой конечной продукции животноводства; $j_{пкi} \ldots j_{пкn}$ – количество выпускаемой конечной продукции данного вида; $Э_{пкi} \ldots Э_{пкn}$ – экономические показатели выпускаемой конечной продукции данного вида (себестоимость, рентабельность, оптовая цена и др.); $\sum j_{пп}$ – количество видов выпускаемой побочной продукции животноводства; $j_{ппi} \ldots j_{ппn}$ – количество выпускаемой побочной продукции данного вида; $Э_{ппi} \ldots Э_{ппn}$ – экономические показатели выпускаемой конечной побочной продукции данного вида (себестоимость, рентабельность, оптовая цена и др.); $\sum j_{эк}$ – группа экологических показателей животноводческого предприятия; $j_{экi} \ldots j_{экn}$ – количество контролируемых экологических показателей определенного вида; $К_{экi} \ldots К_{экn}$ – экологические показатели функционирования животноводческого предприятия (выбросы парниковых газов, концентрация вредных веществ в почве и воде, потребная площадь для утилизации побочной продукции, наличие санитарно-защитных зон и др.).

Выводы

1. Рассмотрев схему эволюции физических и когнитивных «усилителей» человеческого функционала при создании антропоморфных роботов и основные направления использования слабого и сильного искусственного интеллекта в биомашинных системах для животноводства, предложили схему управления этими системами на основе использования искусственного интеллекта.

2. Представленная расширенная структурно-функциональная схема управления животноводческой фермой (сложной биомашсистемой «Человек-машина-животное-продукция-окружающая среда») включает в себя технологии искусственного интеллекта для обеспечения адаптивного управления материальными и информационными потоками и гармоничного взаимодействия машинных и биологических подсистем.

3. Для качественной и количественной оценки функционирования биомашсистемы животноводческой фермы предложили три критериальные группы показателей, учитывающих качество управления технологическими процессами в локальных биомашсистемах доения, кормление, геномную оценку, продуктивность и физиологическое состояние животных, экономические и экологические показатели качества управления фермой в целом.

4. К основным задачам, решаемым с помощью искусственного интеллекта, можно отнести контроль качества работы операторов, прогностические модели развития животных и их продукционных процессов (кривые лактации), логистические задачи управления входящими и исходящими материальными потоками (экономика предприятия), контроль и прогнозирование функциональной надежности техники и др.

Список источников

1. Черноиванов В.И., Судаков С.К., Толоконников Г.К. Биомашсистемы, функциональные системы и категорная теория систем // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2017. № 2 (26). С. 32-43. EDN: YTNKTT

2. Шевцов К.П. Мера души: сознание и память в концепции Джона Локка. Эпистемология и философия науки. 2012. Т. 34, № 4. С. 191-203. EDN: PJCURB

3. Балин В.Д. Сознание – научная категория или психическое явление? // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 12 «Психология. Социология. Педагогика». 2009. № 4. С. 94-99. EDN: MBWABD

4. Владимиров Ф.Е., Базаев С.О., Хакимов А.Р., Юрочка С.С. Оценка поведенческих реакций у крупного рогатого скота // Аграрная наука. 2024. № 1. С. 75-80. https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-378-1-75-80

5. Кирсанов В.В. Структурнофункциональные модели построения автоматизированных и роботизированных молочных ферм нового поколения // Сельскохозяйственные

References

1. Chernoivanov V.I., Sudakov S.K., Tolokonnikov G.K. Biomachine systems, functional systems and categorical theory of systems. *Vestnik Vserossiyskogo Nauchno-Issledovatelskogo Instituta Mekhanizatsii Zhivotnovodstva*. 2017;2(26):32-43. (In Russ.)

2. Shevtsov K.P. Measure of the soul: consciousness and memory in the concept of John Locke. *Epistemology &Philosophy of Science*. 2012;34(4):191-203. (In Russ.)

3 Balin V.D. Consciousness – scientific category or psychological phenomenon? *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta. Series 12. Psikhologiya. Sotsiologiya. Pedagogika.* 2009;4:94-99. (In Russ.)

4. Vladimirov F.E., Bazaev S.O., Khakimov A.R., Yurochka S.S. Evaluation of behavioral responses in cattle. *Agrarian science*. 2024;(1):75-80. (In Russ.) https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-378-1-75-80

5. Kirsanov V.V. Structural and functional models for building new generation automated and robotic dairy farms. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022;16(1):4-9. (In Russ.) https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-1-4-9

машины и технологии. 2022. Т. 16, № 1. С. 4-9. https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-1-4-9

6. Харламов А.В., Коваленко В.П. Особенности поведения мясных коров с телятами на естественных и улучшенных пастбищах // Животноводство и кормопроизводство. 2020. Т. 103, № 1. С. 103-113. https://doi.org/10.33284/2658-3135-103-1-103

7. Владимиров Ф.Е., Базаев С.О., Юрочка С.С., Хакимов А.Р. Технико-технологическая оценка доильных роботов различных производителей // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. Т. 71, № 2. С. 70-76. EDN: ZXMDGA

8. Дубровский Д.И. Задача создания общего искусственного интеллекта и проблема сознания // Философские науки. 2021. Т. 64, № 1. С. 13-44. https://doi.org/10.30727/0235-1188-2021-64-1-13-44

9. Банников С.А. Мировые тренды роботизации и перспективы ее развития в России // BENEFECIUM. 2023. № 2 (47). С. 6-12. https://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2023.2(47).6-12

10. Ковальчук М.В., Нарайкин О.С., Яцишина Е.Б. Природоподобные технологии: новые возможности и новые вызовы // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89, № 5. С. 455-465. https://doi.org/10.31857/S0869-5873895455-465

11. Кирсанов В.В., Кирсанов С.В. Структура и функционал искусственного интеллекта для управления биомашсистемой животноводческой фермы // Техника и технологии в животноводстве. 2023. № 2 (50). С. 32-39. EDN: QGUSOK

12. Черноиванов В.И., Алексеев А.Ю., Толоконников Г.К., Гуров О.Н. Агрокиборг как биомашсистема: философские аспекты // Философия науки. 2022. № 4 (95). С. 75-97. EDN: TXQXEH

6. Kharlamov A.V, Kovalenko V.P. Peculiarities of behavior and productivity of beef cows with calves on natural and improved pastures. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2020;103(1):103-113. (In Russ.) https://doi.org/10.33284/2658-3135-103-1-103

7. Vladimirov F.E., Bazaev S.O., Yurochka S.S., Khakimov A.R. Technical and technological assessment of milking robots from various manufacturers. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture.* 2024;71(2):70-76. (In Russ.)

8. Dubrovsky D.I. The task of the creation of artificial general intelligence and the problem of consciousness. *Russian Journal of Philosophical Sciences*. 2021;64(1):13-44. (In Russ.) https://doi.org/10.30727/0235-1188-2021-64-1-13-44

9. Bannikov S.A. Global robotization trends and prospects for its development in Russia. *Beneficium*. 2023;2(47):6-12. (In Russ.) https://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2023.2(47).6-12

10. Kovalchuk M.V., Naraikin O.S., Yatsishina E.B. Nature-like technologies: new opportunities and new challenges. *Vestnik Rossijskoj Akademii Nauk*. 2019;89(5):455-465. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S0869-5873895455-465

11. Kirsanov V.V., Kirsanov S.V. The artificial intelligence's structure and functionality for the biomachsystem managing on livestock farm. *Machinery and Technologies in Livestock.* 2023;2(50):32-39. (In Russ.)

12. Chernoivanov V.I., Alekseev A.Yu., Tolokonnikov G.K., Gurov O.N. Agrocyborg as a biomachine system: philosophical aspects. *The Philosophy of Science.* 2022;4(95):75-97. (In Russ.)

Информация об авторе

Кирсанов Владимир Вячеславович, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор; Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5; kirvv2014@mail.ru; SPIN-код: 3983-5253, AuthorID: 342616; https://orcid.org/0000-0003-2549-4070

Author Information

Vladimir V. Kirsanov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor; Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutsky Proezd Str., 5; kirvv2014@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2549-4070

Статья поступила 23.01.2025, после рецензирования и доработки 02.04.2025; принята к публикации 04.04.2025

Received 23.01.2025; Revised 02.04.2025; Accepted 04.04.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.171
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-23-32

Определение дальности распространения воздушной струи в струйной системе вентиляции животноводческих объектов

***И.Ю. Игнаткин*[1]✉, *М.Н. Ерохин*[2], *В.В. Кирсанов*[3]**

[1, 2] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

[3] Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия

[1] ignatkin@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0003-4867-1973

[2] n.erohin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-6573-0950

[3] kirvv2014@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2549-4070

Аннотация. Микроклимат оказывает существенное влияние на здоровье и производительность труда персонала и на продуктивность животных. Поддержание оптимального микроклимата обеспечивается кратностью вентиляции, способом подачи и распределения приточного воздуха. В промышленных предприятиях с объемными помещениями и большим воздухообменом наиболее распространена струйная вентиляция. Для данной системы характерна проблема равномерного распределения приточного воздуха. Исследования проведены с целью оптимизации системы микроклимата за счет регулирования угла наклона потока приточного воздуха. Для обеспечения требуемых параметров микроклимата во всей зоне обслуживания предложено изменить характеристики приточных струй, используя аэродинамический насадок на выпускном отверстии приточной системы. Выяснили, что угол наклона струи приточного воздуха определяется ее температурой. Провели математическое моделирование траекторий истечения различных по характеру и температуре струй приточного воздуха. Получили зависимость текущего значения угла наклона от температуры приточного воздуха для направляющего насадка с системой динамического регулирования и критерий определения оптимального значения угла наклона для статичных аэродинамических насадков. Для отопительного периода рассчитали оптимальные углы наклона направляющих аэродинамических насадков для трех различных регионов страны. Оценку адекватности работы аэродинамических насадков провели на лабораторной установке. Результаты экспериментальных исследований подтвердили возможность и эффективность регулирования вектора потока приточного воздуха. В дальнейшем результаты исследований будут использоваться при внедрении систем обеспечения микроклимата в свиноводстве.

Ключевые слова: вентиляция; аэродинамический насадок; микроклимат; струйная вентиляция; характеристики приточных струй; температура; угол наклона струи

Для цитирования: Игнаткин И.Ю., Ерохин М.Н., Кирсанов В.В. Определение дальности распространения воздушной струи в струйной системе вентиляции животноводческих объектов // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 3. С. 23-32. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-23-32

ORIGINAL ARTICLE

Determination of an air jet propagation range in the jet ventilation system of livestock facilities

***I.Yu. Ignatkin*[1]✉, *M.N. Erokhin*[2], *V.V. Kirsanov*[3]**

[1, 2] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

[3] Federal Scientific Agroengineering Center of VIM; Moscow, Russia

[1] ignatkin@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0003-4867-1973

[2] n.erohin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-6573-0950

[3] kirvv2014@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2549-4070

Abstract. Indoor climate has a significant impact on health and productivity of personnel and animal performance. An optimal indoor climate depends on the ventilation rate, and the method of air supply and distribution. In industrial enterprises with spacious rooms and large air exchange, jet ventilation is the most common method, which still features uniform distribution of the supply air. The study aimed to optimize the indoor climate system by adjusting

© Игнаткин И.Ю., Ерохин М.Н., Кирсанов В.В., 2025

the inclination angle of the supply airflow. To ensure the required indoor climate parameters in the entire service area, the authors proposed to change the characteristics of the supply jets, using an aerodynamic nozzle on the outlet of the supply system. It was found out that the inclination angle of the supply air jet is determined by its temperature. The authors carried out mathematical modeling of the flow trajectories of supply air jets that were different in configuration and temperature. They obtained the relationship between the current value of the inclination angle and the supply air temperature for a guide nozzle with the dynamic control system. The criterion for determining the optimal value of the inclination angle for static aerodynamic nozzles was also determined. For the heating period, they calculated the optimal inclination angles of the aerodynamic nozzle guides for three different regions of the country. The performance adequacy of the aerodynamic nozzles was evaluated on a laboratory installation. The results of experimental studies confirmed the possibility and efficiency of regulating the supply airflow vector. The research results will be applicable to further implementation of indoor climate control systems in pig breeding facilities.

Keywords: ventilation; aerodynamic nozzle; indoor climate; jet ventilation; characteristics of supply jets; temperature; inclination angle of the jet

For citation: Ignatkin I.Yu., Erokhin M.N., Kirsanov V.V. Determination of an air jet propagation range in the jet ventilation system of livestock facilities. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2025;27(3):23-32 (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-23-32

Введение

Микроклимат оказывает существенное влияние на здоровье и производительность труда персонала, на урожайность и продуктивность сельскохозяйственных растений и животных. Требования к микроклимату на рабочих местах указаны в СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» и в отраслевых нормах технологического проектирования.

Отклонение параметров микроклимата от оптимальных значений снижает продуктивность сельскохозяйственных животных на 5…30%, продолжительность периода жизни на 5…15%, приводит к падежу молодняка до 40% [1-4].

При снижении температуры в свинарнике на 3°С себестоимость продукции за счет энергетической составляющей уменьшится на 0,18…0,63% и в то же время увеличится за счет кормовой составляющей на 4,5…6,3% [2, 5].

В промышленных животноводческих комплексах наблюдается высокая плотность содержания животных. Для поддержания оптимального микроклимата необходимо обеспечить в заданных пределах температуру, влажность, скорость движения воздушного потока, что во многом определяется кратностью вентиляции, способом подачи и распределения приточного воздуха. Кроме средних показателей микроклимата, все большее внимание уделяется равномерности обеспечения показателей в рабочей зоне.

Существуют различные системы вентиляции. В промышленных предприятиях с объемными производственными помещениями и большим воздухообменом наиболее распространена струйная система вентиляции. Удельные затраты в расчете на 1 м^3/ч вентиляционного воздуха в таких системах меньше, чем в диффузионных или вытеснительных системах, и элементная база проще, однако проблема равномерного распределения приточного воздуха проявляется более остро[1, 2] [6-9].

В отопительный период приточный воздух является более холодным и имеет более высокую плотность, чем в помещении. Чем больше разница плотности, тем выше вертикальная составляющая вектора скорости потока, что приводит к стремительному снижению высоты и дальности распространения струи приточного воздуха. В большинстве систем микроклимата современных свинарников не предусмотрен предварительный подогрев приточного воздуха. В наиболее холодный период года приточный воздух, не успевая прогреться за счет теплообмена с воздухом помещения, попадает в зону обитания животных,-при этом дальние от притока участки испытывают дефицит свежего воздуха [10-13].

Для обеспечения требуемых параметров микроклимата во всей зоне обслуживания применяются различные технические решения. Можно увеличить количество приточных элементов системы, дробя обслуживаемую зону на части, устанавливать

[1] Гулевский В.А. Микроклимат стационарных объектов птицеводства: Температурно-влажностные параметры микроклимата птицеводческих помещений с вентиляцией вакуумного типа: Монография. Саарбрюккен: LAP LAMBERT, 2012. 120 с. EDN: VNDWV

[2] Гулевский В.А., Шацкий В.П. Нормализация микроклимата птицеводческих помещений путем обработки воздуха пластинчатыми теплообменниками: Монография. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2016. 238 с. EDN: WLXOIV

разгонные или потолочные вентиляторы [14-16] или изменить характеристики приточных струй (скорость, направление или характер истечения) с помощью аэродинамических насадков, располагаемых на выпускных отверстиях приточных систем.

Цель исследований: оптимизировать систему микроклимата за счет регулирования угла наклона потока приточного воздуха.

Материалы и методы

Провели анализ и математическое моделирование траекторий истечения различных по характеру и температуре струй приточного воздуха. Анализ истечения неизотермических струй показал, что охлажденные струи под действием силы тяжести опускаются вниз, и с ростом разности температур этот процесс ускоряется (рис. 1).

Помимо характера струи, на траекторию ее движения влияет соотношение гравитационных и инерционных сил, определяемое текущим критерием Архимеда:

$$Ar_x = \frac{g \cdot x \cdot \Delta t_x}{V_x^2 \cdot T_{\text{окр}}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{окр}}$ – абсолютная температура окружающей среды, К; x – расстояние до рассматриваемого сечения, м; V_x – осевая скорость в рассматриваемом сечении, м/с; $\Delta t_x = t_{вн} - t_{нар}$ – температурный напор в рассматриваемом сечении, °С; $t_{вн}$ – внутренняя температура, °С; $t_{нар}$ – наружная температура, °С; g – ускорение свободного падения, м/с^2.

Вертикальное отклонение оси неизотермической струи вычисляется по формуле:

$$y = x \cdot Ar_x \cdot k, \quad (2)$$

где k – эмпирический коэффициент, для осесимметричных струй равный 0,6.

Распределение скоростей и температур определяется по формуле Г. Рейхардта:

$$v = v_m \cdot e^{-0.5 \cdot \left(\frac{y}{C \cdot x}\right)^2}, \quad (3)$$

где v_m – осевая скорость, м/с; C – эмпирическая постоянная с вероятностным значением 0,082; x – расстояние до рассматриваемого сечения, м; y – вертикальное отклонение траектории, м.

Скорость снижения приточного воздуха определяется соотношением разности плотностей и квадрата осевой скорости (формула 1). При постоянстве начальной скорости потока и температуры в помещении переменной остается температура приточного воздуха.

Таким образом, при определении угла наклона струи приточного воздуха определяющим фактором является ее температура.

Результаты и их обсуждение

Расчетные осевые траектории движения охлажденных струй (закрученной, спрямленной и направленной системой параллельных жалюзи) приведены на рисунке 2. Например, при температурном напоре 10°С, диаметре выпускного отверстия 0,8 м и начальной скорости свободной закрученной струи 3,3 м/с максимальная дальность ее распространения составляет 12,6 м, и на излете осевая линия опускается на 4,9 м, а при –40°С – почти на 29 м, что в реальных условиях практически недостижимо.

Плотность воздуха изотермических струй равна плотности воздуха помещения. Такие потоки распространяются вдоль оси выпускного отверстия, и их дальность истечения максимальна. Охлажденные струи являются более плотными и под действием силы тяжести приобретают вертикальную составляющую перемещения. По мере снижения

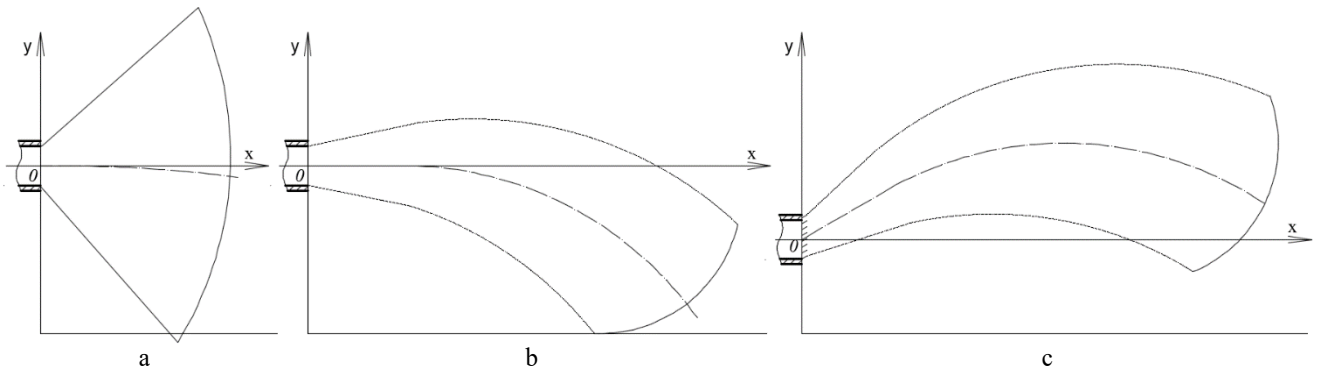


Рис. 1. Охлажденные струи:
a – закрученная; b – спрямленная с выходом из цилиндрического отверстия;
c – направленная, с выходом из насадка в – виде системы параллельных жалюзи

Fig. 1. Cooled jets:
a – swirled; b – straightened, with an outlet from a cylindrical hole;
c – directional, with an outlet from a nozzle in the form of a system of parallel shutters

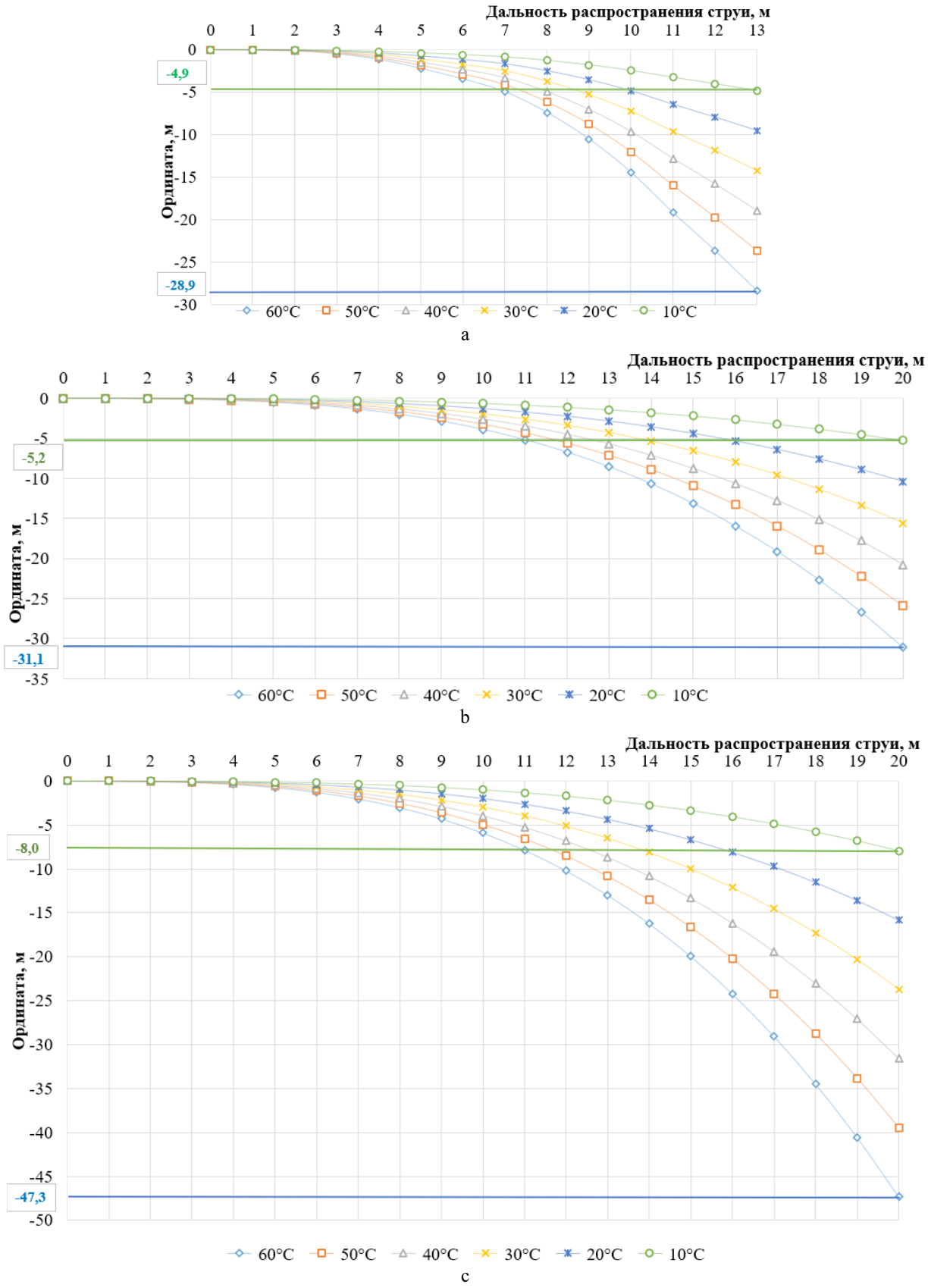


Рис. 2. Траектории истечения охлажденных свободных струй из различных насадков:
a – закрученная; b – спрямленная с выходом из цилиндрической трубы;
c – спрямленная и направленная системой параллельных жалюзи

Fig. 2. Trajectories of the outflow of cooled free jets from various nozzles:
a – swirled; b –straightened with an outlet from a cylindrical pipe;
c – straightened and directed by a system of parallel shutters

поток опускается в рабочую зону, и его дальнейшее распространение вдоль основного направления затрудняется при наличии препятствий: перегородок, мебели, оборудования. Следовательно, в качестве лимитирующего параметра, определяющего необходимость коррекции направления потока, нужно учитывать допускаемое вертикальное перемещение y_{min} (рис. 3). Увеличить дальность истечения охлажденных струй в условиях производства можно за счет направления потока вверх под углом к горизонту α.

В случае применения направляющих насадков важно определить методику выбора оптимального угла наклона. Очевидно, что дальность распространения струи с увеличением угла наклона будет равна проекции на горизонтальную ось. Устанавливать угол выше 45° не имеет смысла. Учитывая формулу 2 и данные рисунка 3, текущее значение угла коррекции потока α можно найти по формуле:

$$\alpha = arctg\left(\frac{x_{max} \cdot Ar_x \cdot k}{x_{max}}\right) = arctg\,(Ar_x \cdot k). \qquad (4)$$

В случае использования статичного направляющего насадка встает вопрос о критерии оптимизации угла наклона.

Очевидным решением представляется настройка системы на угол, соответствующий температуре с наибольшей длительностью стояния в течение отопительного периода.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 6 мая 2011 г. № 354 отопительный период начинается на следующий день после пятидневки со среднесуточной температурой наружного воздуха ниже 8°С. Для Москвы температурный диапазон отопительного периода составляет 38°С (СП 131.13330.2020 «Строительная климатология»). Оценивая температурный спектр в течение отопительного периода (рис. 4), видим, что наибольшая длительность стояния приходится на 0°С, то есть температуру фазовых превращений воды, и обусловлена большим значением теплоты льдообразования.

Настраивать систему подачи воздуха на углы, соответствующие 0°С, нельзя, так как важна не столько длительность, сколько энергия теплового воздействия на конкретный объект. Энергия конвективного теплообмена определяется по формуле:

$$Q = F \cdot \Delta t \cdot \alpha \cdot \tau, \qquad (5)$$

где F – площадь поверхности теплообмена, м^2; Δt – температурный напор, °С; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·°С); τ – продолжительность процесса, с.

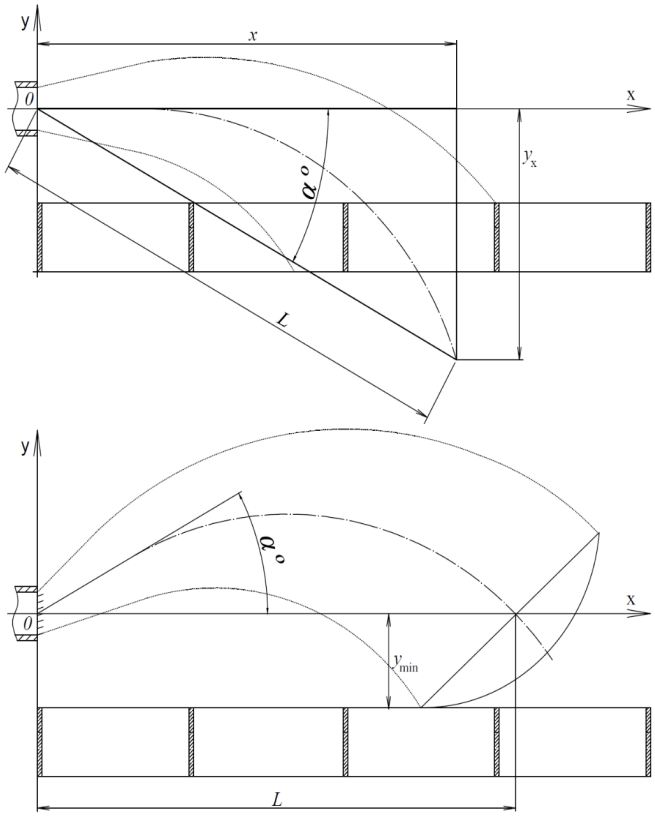


Рис. 3. Истечения охлажденных свободных струй

Fig. 3. Outflow of cooled free jets

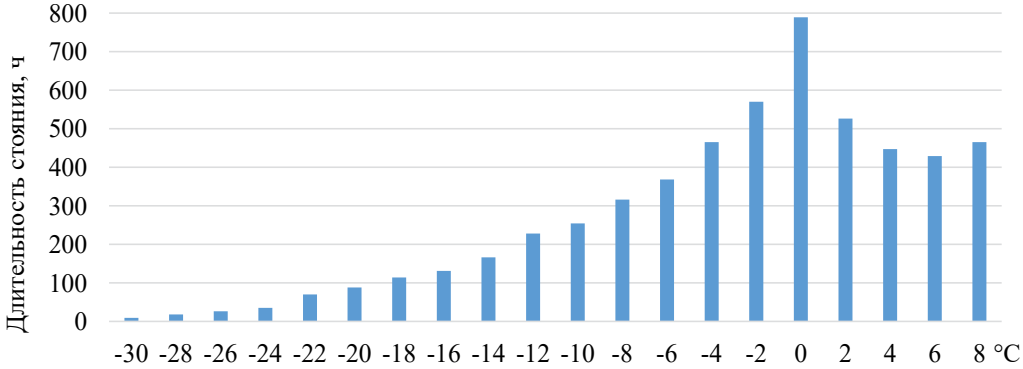


Рис. 4. Спектр температур отопительного периода Москвы

Fig. 4. Temperature range of the heating period in Moscow

При постоянной скорости движения воздуха для конкретного животного пкараметры F и α являются постоянными и энергия теплообмена определяется произведением $\Delta t \cdot \tau$ по аналогии с методикой расчета тепловой защиты зданий. Поэтому насадок подачи приточного воздуха с фиксированным углом наклона следует устанавливать таким образом, чтобы наклон потока обеспечивал максимальную дальность распространения воздушного потока температурой, соответствующей значению температурной координаты центра тяжести фигуры под кривой ($\Delta t \cdot \tau$) отопительного периода. При этом площадь нужно учитывать в рабочем интервале: от наиболее холодной температуры отопительного периода (t_{min}) до температуры начала/конца регулирования угла наклона (t_{α}), представленной на рисунке 5 и отмеченной красной чертой.

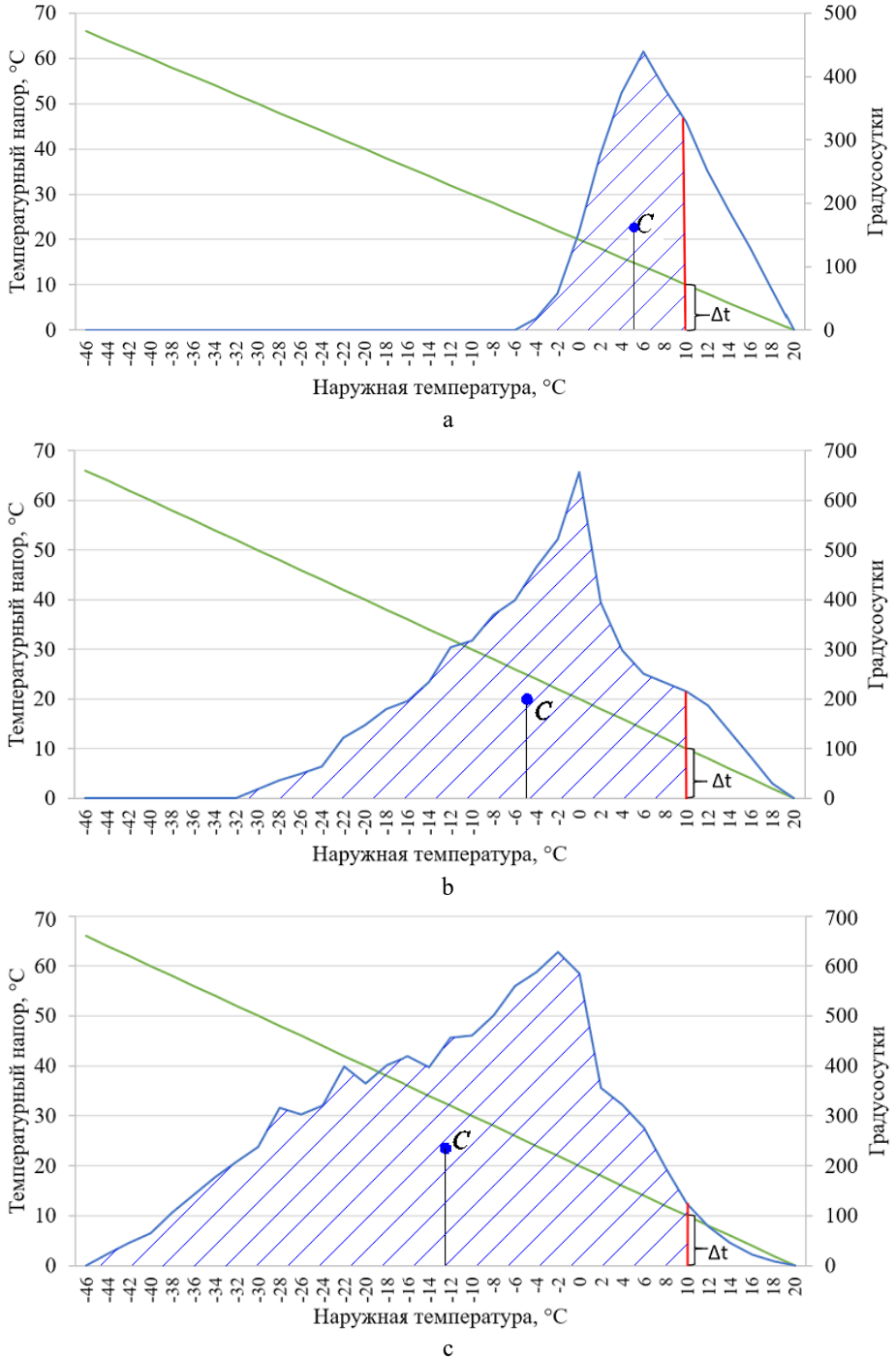


Рис. 5. График длительности стояния температур в различных регионах страны:
a) Сочи; b) Москва; c) Нарьян-Мар

Fig. 5. Temperature duration chart for:
a) Sochi; b) Moscow; c) Naryan-Mar

Температурную координату центра тяжести фигуры под кривой ($\Delta t \cdot \tau$) можно вычислить по формуле:

$$t_C = t_\alpha - \frac{\sum_{i=t_\alpha}^{t_{min}} |t_i \cdot \tau_i| \Delta t_i}{\sum_{i=t_\alpha}^{t_{min}} |t_i \cdot \tau_i|}, \quad (6)$$

где t_α – температура начала/конца регулирования направления потока; t_{min} наиболее холодная температура отопительного периода, °С; t_C – температурная координата центра тяжести фигуры под графиком $\sum_{i=t_\alpha}^{t_{min}} t_i \cdot \tau_i$, °С; t_i – i-я температура, °С; τ_i – длительность стояния i-й температуры в течение отопительного периода, сут.

Согласно графикам, приведенным на рисунке 5, для Сочи необходимо настраивать статичные направляющие системы на угол, соответствующий температуре 5,3°С, для Москвы – минус 5,5°С, а для Нарьян-Мара – минус 12,5°С. В качестве примера приведены значения оптимальных углов наклона направляющих насадков для Сочи, Москвы и Нарьян-Мара (рис. 6).

Оценку адекватности работы аэродинамических насадков удобно исследовать при фото- и видеофиксации потока воздуха, окрашенного паром смеси глицерина и пропиленгликоля. Нами изготовлена лабораторная установка, позволяющая регулировать скорость потока воздуха и устанавливать аэродинамические насадки на выпускном отверстии. На контрастном экране нанесена измерительная сетка с шагом 100 мм, что соответствует диаметру (калибру) выпускного отверстия. Результаты испытаний представлены на рисунке 7. Размеры на рисунке приведены в калибрах (известна разница температур Δt, поэтому значение скорости v не указано).

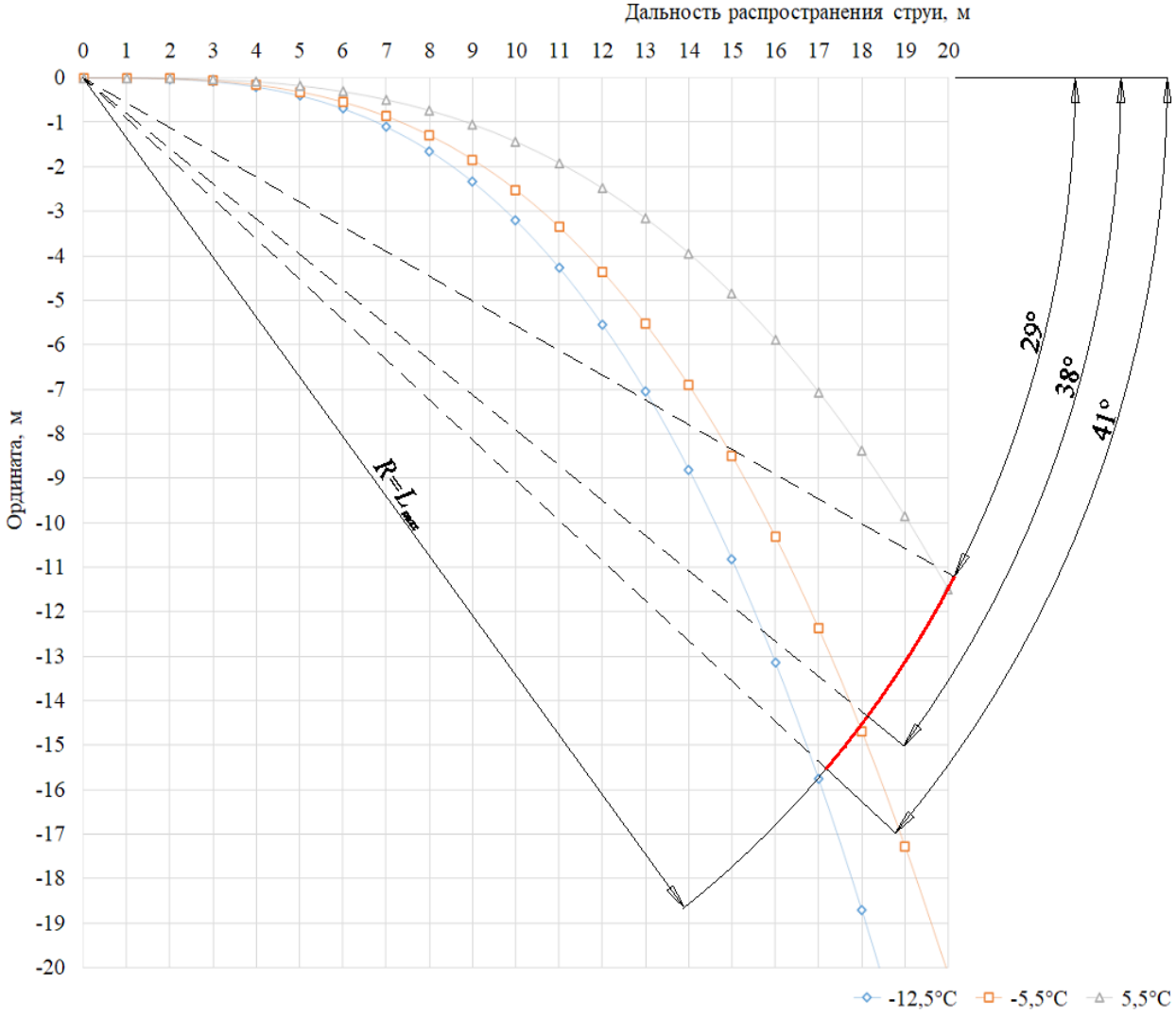


Рис. 6. Схема к обоснованию оптимальных углов наклона направляющих аэродинамических насадков для Сочи, Москвы и Нарьян-Мара

Fig. 6. Diagram for justifying the optimal inclination angles of the aerodynamic nozzle guides for Sochi, Moscow and Naryan-Mar

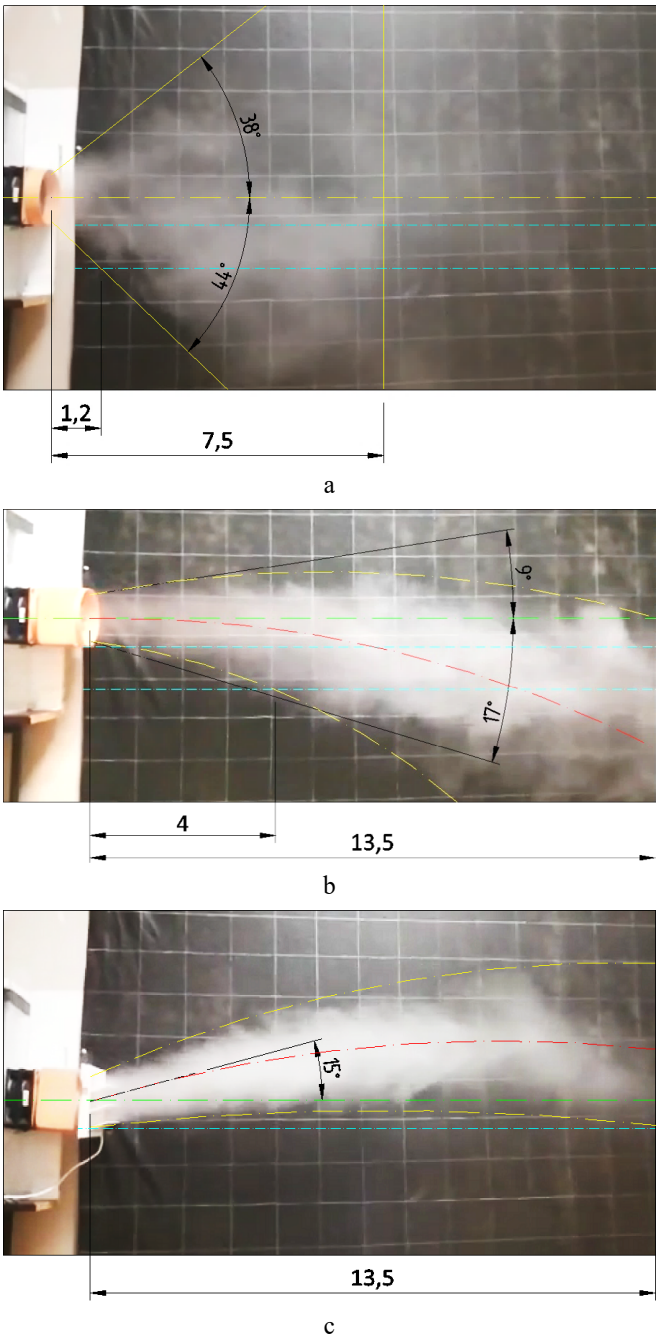


Рис. 7. Охлажденные воздушные струи (Δt = 10°С):
a – закрученная; b – спрямленная;
c – спрямленная направленная под углом 15° к горизонту

Fig. 7. Cooled air jets (Δt = 10°C):
a – swirled; b – straightened;
c – straightened directed at an angle of 15° to the horizon

Закрученная струя имеет почти прямой угол при вершине конуса (82°) и соответственно минимальную дальность распространения 7…7,5 калибров, далее струя гаснет, и имеет место только диффузионный воздухообмен. Нижняя граница струи опускается на один калибр, переместившись вдоль осевого направления на 1,2 калибра.

Спрямленная струя имеет угол при вершине конуса 25…26°, дальность распространения превышает 14 калибров, однако переместившись на 4 калибра вдоль горизонтальной оси, она опустилась на один калибр. В свою очередь, направленная под углом 15° к горизонту вверх, струя преодолела расстояние 13,5 калибра, достигнув исходной высоты; дальность распространения превышает 14 калибров.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что системы регулирования направления вектора потока воздуха могут эффективно управлять траекторией движения воздуха и обеспечить желаемую дальность истечения струи приточного воздуха.

Выводы

1. При проектировании и эксплуатации струйных систем вентиляции необходимо учитывать параметры истечения струй приточного воздуха.

2. Для регулирования дальности распространения неизотермических струй следует применять угловую коррекцию направления вектора потока согласно зависимости $\alpha = arctg(Ar_x \cdot k)$.

3. Устанавливать статичные направляющие аэродинамических насадков следует под углом наклона, соответствующим значению температурной координаты центра тяжести фигуры под кривой ($\Delta t \cdot \tau$) отопительного периода. При этом площадь нужно учитывать в рабочем интервале: от наиболее холодной температуры отопительного периода (t_{min}) до температуры начала/конца регулирования угла наклона (t_α). Например, для Сочи это значение составляет 5,3°С (угол 29°), для Москвы – минус 5,0°С (угол 38°), для Нарьян-Мара – минус 12,5°С (угол 41°).

4. Результаты экспериментальных исследований подтверждают возможность и эффективность регулирования вектора потока приточного воздуха.

Список источников

1. Ignatkin I.Yu., Kazantsev S.P., Shevkun N.A. et al. Developing and testing the air cooling system of a combined climate control unit used in pig farming. Agriculture. 2023;13(2):334. https://doi.org/10.3390/agriculture13020334

2. Ильин И.В., Игнаткин И.Ю., Курячий М.Г. Влияние параметров микроклимата на продуктивность свиней // Эффективное животноводство. 2011. № 5 (67). С. 30-31. EDN: OKRQPR

3. Тихомиров Д.А., Трунов С.С., Хименко А.В. Энергосберегающая система отопления с применением электрических

References

1. Ignatkin I.Yu., Kazantsev S.P., Shevkun N.A. et al. Developing and testing the air cooling system of a combined climate control unit used in pig farming. *Agriculture*. 2023;13(2):334. https://doi.org/10.3390/agriculture13020334

2. Ignatkin I.Yu., Kuryachiy M.G. Ventilation systems and effect climate parameters on the productivity of pigs. *Bulletin NGIEI*. 2012;10(17):16-34. (In Russ.)

3. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Khimenko A.V. Energy-saving heating system using electric heat accumulators and ceiling

тепловых аккумуляторов и потолочных вентиляторов // Техника и оборудование для села. 2022. № 2 (296). С. 34-38. EDN: LWUAFU

4. Самарин В.А., Самарин Г.Н. Теоретические основы энергосберегающей технологии формирования микроклимата в животноводческих помещениях // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2010. № 5. С. 36-38. EDN: MWLXFB

5. Tikhomirov D.A., Khimenko A.V., Kuzmichev A.V. et al. Local heating through the application of a thermoelectric heat pump for prenursery pigs. Agriculture. 2023;13(5):948. https://doi.org/10.3390/agriculture13050948

6. Самарин Г.Н. Влияние параметров микроклимата на продуктивность кур-несушек // Птица и птицепродукты. 2007. № 2. С. 37-38. EDN: NAZAYH

7. Petrakis T., Kavga A., Thomopoulos V., Argiriou A.A. Neural network model for greenhouse microclimate predictions. Emerging Agricultural Engineering Sciences, Technologies and Applications. Agriculture 2022;12(6):780. https://doi.org/10.3390/agriculture12060780

8. Cai J., Ding F., Hong Y., Hu R. An impact analysis of farmer field schools on hog productivity: Evidence from China. Agricultural Policy, Food Security, and Rural Development: Innovations and Perspectives. Agriculture. 2021;11(10):972. https://doi.org/10.3390/agriculture11100972

9. Шацкий В.П., Гулевский В.А., Спирина Н.Г. Применение теплообменников (рекуператоров) для нормализации микроклимата животноводческих помещений // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 9 (657). С. 64-68. EDN: QCHMIH

10. Кирсанов В.В., Игнаткин И.Ю. Струйная модель притока вентиляционного воздуха из теплоутилизационной установки // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2018. № 2 (84). С. 28-32. EDN: YWRDIO

11. Кирсанов В.В., Игнаткин И.Ю. Оценка характера распределения приточного воздуха в условиях струйных течений // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2018. № 3 (85). С. 35-41. EDN: USPOHJ

12. Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А., Трунов С.С. Тепловые завесы в системах микроклимата животноводческих ферм // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. № 1 (34). С. 14-20. EDN: MMDITR

13. Тихомиров Д.А. Вентиляционно-отопительная установка модульного типа // Сельский механизатор. 2012. № 9. С. 32-33. EDN: PDEEGH

14. Кузьмичев А.В., Тихомиров А.В., Хименко Д.А. Выбор потолочных вентиляторов в системе микроклимата животноводческих помещений // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2025. Т. 19, № 1. С. 69-76. https://doi.org/10.22314/2073-7599-2025-19-1-69-76

15. Тихомиров Д.А., Добровольский Ю.Н., Баклачян Р.А. Функциональная схема интеллектуальной системы управления микроклиматом в животноводческом помещении // Актуальные проблемы ветеринарной медицины, зоотехнии, биотехнологии и экспертизы сырья и продуктов животного происхождения: Сборник трудов 3-й научно-практической конференции, Москва, 28 июня 2024 г. М.: Издательство «Сельскохозяйственные технологии», 2024. С. 392-393. EDN: RGYWJR

fans. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;2:34-38. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-2-34-38 (In Russ.)

4. Samarin V.A. Theoretical foundations of energy-saving technology of indoor climate formation in livestock buildings. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2010;5:36-38. (In Russ.)

5. Tikhomirov D.A., Khimenko A.V., Kuzmichev A.V. et al. Local heating through the application of a thermoelectric heat pump for prenursery pigs. *Agriculture*. 2023;13(5):948. https://doi.org/10.3390/agriculture13050948

6. Samarin G.N. Effect of indoor climate parameters on the productivity of laying hens. *Poultry & Chicken products*. 2007;2:37-38. (In Russ.)

7. Petrakis T., Kavga A., Thomopoulos V., Argiriou A.A. Neural network model for greenhouse microclimate predictions. Emerging Agricultural Engineering Sciences, Technologies, and Applications. *Agriculture*. 2022;12(6):780. https://doi.org/10.3390/agriculture12060780

8. Cai J., Ding F., Hong Y., Hu R. An impact analysis of farmer field schools on hog productivity: Evidence from China. Agricultural Policy, Food Security, and Rural Development: Innovations and Perspectives. Agriculture. 2021;11(10):972. https://doi.org/10.3390/agriculture11100972

9. Shatsky V.P., Gulevsky V.A., Spirina N.G. Application of heat exchangers (recuperators) for the normalization of cattle shed microclimate *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2013;9:64-68. (In Russ.)

10. Kirsanov V.V., Ignatkin I.Yu. Jet model of ventilation air inflow from heat-recovery unit. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2018;2:28-32. (In Russ.)

11. Kirsanov V.V., Ignatkin I.Yu. Estimating the distribution pattern of the supply air in jet flow conditions. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2018;3:35-41. (In Russ.)

12. Kuz'michev A.V., Tikhomirov D.A., Trunov S.S. Heat air curtains in microclimate systems for livestock farms. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture.* 2019;1:14-20. (In Russ.)

13. Tihomirov D.A. The ventilation and heating system is modular. *Selskiy Mekhanizator.* 2012;9:32-33. (In Russ.)

14. Kuzmichev A.V., Tikhomirov D.A., Khimenko A.V. Selection of ceiling fans for the microclimate system of livestock facilities. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025;19(1):69-76. (In Russ.) https://doi.org/10.22314/2073-7599-2025-19-1-69-76

15. Tikhomirov D.A., Dobrovolskiy Yu.N., Baklachyan R.A. Functional scheme of the intelligent system of microclimate control in the livestock room. Topical problems of veterinary medicine, zootechny, biotechnology and evaluation of raw materials and products of animal origin: Proceedings of the 3rd Scientific and Practical Conference, Moscow, June 28, 2024. M.: LLC "Publishing House 'Selskokhozyaystvvennye Tekhnologii'", 2024. P. 392-393.

16. Tikhomirov D.A., Dobrovolskiy Yu.N., Baklachyan R.A. Application of ceiling fans in the system of providing indoor climate in livestock buildings. Topical problems of veterinary medicine, zootechny, biotechnology and evaluation of raw materials and products of animal origin: Proceedings of the 2nd Scientific and Practical Conference, Moscow, June 23, 2023. M.: Selskokhozyaystvvennye Tekhnologii, 2023. P. 360-361

16. Тихомиров Д.А., Добровольский Ю.Н., Баклачян Р.А. Применение потолочных вентиляторов в системе обеспечения микроклимата в животноводческих помещениях // Актуальные проблемы ветеринарной медицины, зоотехнии, биотехнологии и экспертизы сырья и продуктов животного происхождения: Сборник трудов 2-й научно-практической конференции, Москва, 23 июня 2023 г. М.: Издательство «Сельскохозяйственные технологии», 2023. С. 360-361. EDN: HYLINX

Информация об авторах

[1] **Игнаткин Иван Юрьевич,** д-р техн. наук, профессор; ignatkin@rgau-msha.ru; SPIN-код: 4391-8002, AuthorID: 769663; https://orcid.org/0000-0003-4867-1973
[2] **ЕрохинМихаил Никитьевич,** академик РАН, д-р техн. наук, профессор; n.erohin@rgau-msha.ru; SPIN-код: 3499-4405, AuthorID: 626708; https://orcid.org/0000-0001-6573-0950;
[3] **Кирсанов Владимир Вячеславович,** член-корреспондент РАН; д-р техн. наук, профессор, kirvv2014@mail.ru; SPIN-код: 3983-5253, AuthorID: 342616; https://orcid.org/0000-0003-2549-4070;
[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, 1-й Институтский проезд, 5

Author Information

Ivan Yu. Ignatkin [1], DSc (Eng), Professor; ignatkin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-4867-1973; Scopus Author ID: 57222543815; Researcher ID: AAC-1577-2022
Mikhail N. Erokhin [2], Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor; n.erohin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-6573-0950, Scopus Author ID: 572092705884
Vladimir V. Kirsanov [3], Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, DSc(Eng), Professor; kirvv2014@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2549-4070
[1,2] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49
[3] Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutsky Proezd Str., 5

Вклад авторов

И.Ю. Игнаткин – обоснование актуальности проблемы, формулирование основной концепции исследований, подготовка рукописи и ее графическое оформление;
М.Н. Ерохин – разработка методологии исследований;
В.В. Кирсанов – руководство исследованиями, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 12.03.2025; после рецензирования и доработки 25.04.2025; принята к публикации 28.04.2025

Author Contribution

I.Yu. Ignatkin – problem relevance statement, conceptualization, writing – original draft, visualization;
M.N. Erokhin – methodology;
V.V. Kirsanov – research supervision, writing – review and editing of the manuscript.

Conflict of interests

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

Received 12.03.2025; Revised 25.04.2025; Accepted 28.04.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.22:697.957:636.2
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-33-39

Алгоритм управления скоростью воздушного потока при локальном обдуве коров в условиях промышленного животноводства

Ю.Г. Иванов[1]✉***, Д.А. Понизовкин***[2]***, С.А. Андреев***[3]

[1, 3] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

[2] Московский государственный колледж электромеханики и информационных технологий; г. Москва, Россия

[1] iy.electro@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-4766-9532

[2] ponizovkind@yandex.ru

[3] energo-andreev@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-8608-9904

Аннотация. Температурный стресс отрицательно влияет на физиологическое состояние и показатели продуктивности коров. Анализ результатов экспериментальных исследований выявил зависимость частоты пульса коров от температуры и влажности окружающей среды. Локальный обдув животных способствует устойчивости показателей их физиологического состояния к воздействию повышенной температуры и влажности воздуха. Для реализации локального обдува животных необходимо разработать алгоритм управления скоростью воздушного потока. Разработке алгоритма предшествовали экспериментальные исследования зависимости частоты пульса коров от температуры и влажности окружающей среды при различной скорости воздушного потока. Эксперимент проводили на коровах черно-пестрой породы средним возрастом 3,5 года и массой 590 кг. Для математического описания анализируемой зависимости предложено использовать метод вложенных функций и линейную множественную регрессию. Приведены численные значения параметров математических моделей, полученных из условия минимума суммы среднеквадратических отклонений экспериментальных и теоретических значений частоты пульса для обоих методов. Определена наибольшая эффективность трехфакторной линейной модели, по результатам преобразования которой сформирован алгоритм управления скоростью потока воздуха. Практическое использование алгоритма заключается в подстановке в него требуемого значения частоты пульса животных, текущих значений температуры и относительной влажности воздуха с последующим расчетом скорости воздушного потока. Процессорная реализация полученного алгоритма при плавном управлении скоростью воздушного потока целесообразна посредством изменения частоты питающего напряжения асинхронного электродвигателя.

Ключевые слова: температурный стресс; частота пульса; температура воздуха; влажность воздуха; локальный обдув; скорость воздушного потока; алгоритм управления скоростью воздушного потока

Для цитирования: Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А., Андреев С.А. Алгоритм управления скоростью воздушного потока при локальном обдуве коров в условиях промышленного животноводства // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 3. С. 33-39. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-33-39

ORIGINAL ARTICLE

Algorithm for controlling the local airflow rate when blowing on cows in industrial livestock farming

Yu.G. Ivanov[1]✉***, D.A. Ponizovkin***[2]***, S.A. Andreev***[3]

[1, 3] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

[2] Moscow State College of Electromechanics and Information Technologies; Moscow, Russia

[1] iy.electro@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-4766-9532

[2] ponizovkind@yandex.ru

[3] energo-andreev@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-8608-9904

Abstract. Temperature stress affects cows' physiological condition and productivity indicators. The experimental studies revealed the relationship between cows' heart rate and the temperature and humidity of the environment. Local airflow contributes to the stability of animals' physiological state indicators against the effects of high temperature and humidity. The authors prove the necessity of controlling the airflow rate for blowing on animals when environmental parameters change. For this purpose, they propose to design an algorithm for controlling

© Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А., Андреев С.А., 2025

local airflow to treat animals. The algorithm was developed after experimental studies of the relationship between the cow heart rate and ambient temperature and humidity at different airflow rates. The experiment was conducted on black-motley cows with an average age of 3.5 years and a weight of 590 kg. To provide a mathematical description of the analyzed relationship it was proposed to use the method of nested functions and linear multiple regression. The article presents numerical values of the parameters of mathematical models obtained from the condition of minimum sum of standard deviations of experimental and theoretical values of the heart rate for both methods. The greatest efficiency of the three-factor linear model has been determined, and the algorithm of the airflow rate control has been made based on the results of its transformation. Practical use of the algorithm consists in substituting the required value of the animal heart rate, current values of temperature and relative humidity of air with the subsequent calculation of the airflow rate. The processor-based implementation of the obtained algorithm for smooth control of the airflow rate is possible by changing the supply voltage frequency of the asynchronous electric motor.

Keywords: temperature stress; heart rate; air temperature; air humidity; local blow-on; airflow rate; airflow rate control algorithm

For citation: Ivanov Yu.G., Ponizovkin D.A., Andreev S.A. Algorithm for controlling the local airflow rate when blowing on cows in industrial livestock farming. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2025;27(3):33-39 (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-33-39

Введение

В условиях промышленного животноводства ввиду несовершенства конструкций молочных ферм параметры микроклимата могут существенно отличаться от научно обоснованных значений [1, 2]. Особенно часто это наблюдается в летнее время, а также в животноводческих помещениях, эксплуатируемых в южных районах страны. Повышенная температура воздуха, сопровождающаяся высокой влажностью, вызывает у коров температурный стресс [3, 4]. Установлено, что превышение температуры окружающей среды нормированного значения только на один градус вызывает уменьшение суточного удоя на 1 л [5]. Не менее тяжело животными переносится превышение относительной влажности. Например, при увеличении влажности с 85 до 95% молочная производительность коров снижается на 12% [6]. Температурный стресс проявляется изменением частоты сердечных сокращений (частоты пульса) и частоты дыхания [7].

Для обеспечения устойчивости показателей физиологического состояния к воздействию повышенной температуры и влажности используется локальный обдув животных [8]. Локальный обдув реализуется вентиляторами небольшой производительности, изменяющими режим теплоотдачи телами животных (рис. 1).

В результате локального обдува происходит снижение или даже исключение последствий температурного стресса (рис. 2-4).

Для эффективного управления скоростью воздушного потока при локальном обдуве ранее предлагалось использовать комбинированный принцип формирования управляющего воздействия, при котором происходит одновременный контроль параметров физиологического состояния животных и текущих значений температуры и влажности окружающей среды [9, 10].

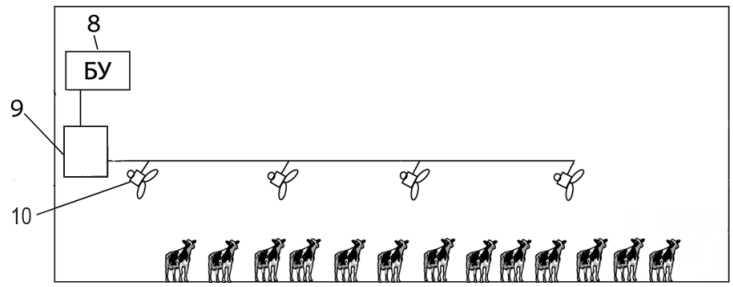


Рис. 1. Технологическая схема локального обдува животных:
1 – вентиляционный конек; 2 – управляемая заслонка; 3 – боковой проем; 4 – управляемые шторы; 5 – осевые вентиляторы; 6 – датчик температуры; 7 – датчик влажности; 8 – блок управления; 9 – регулятор скорости вентиляторов; 10 – электропривод вентилятора

Fig. 1. Visual pattern of local airflow for animals:
1 – ridge ventilation; 2 – controlled damper; 3 – side opening; 4 – controlled shutter; 5 – axial fans; 6 – temperature sensor; 7 – humidity sensor; 8 – control unit; 9 – fan speed controller; 10 – fan electric drive

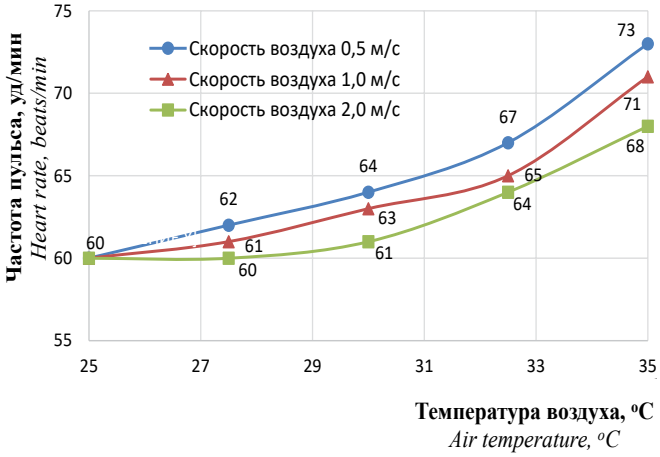


Рис. 2. Изменение частоты пульса при относительной влажности воздуха 50%

Fig. 2. Change in the heart rate at 50% relative humidity

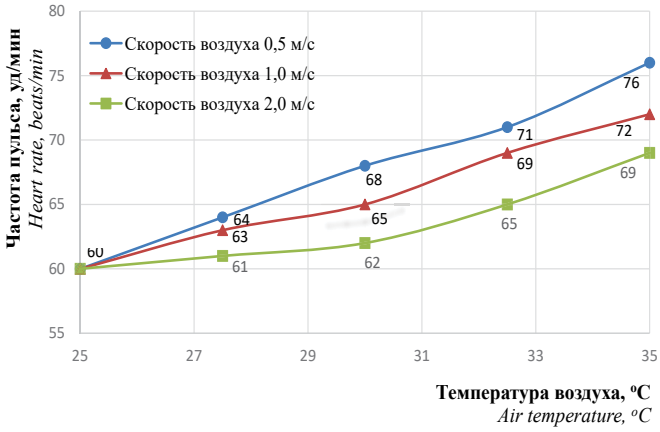


Рис. 3. Изменение частоты пульса при относительной влажности воздуха 62,5%

Fig. 3. Change in the heart rate at a relative humidity of 62.5%

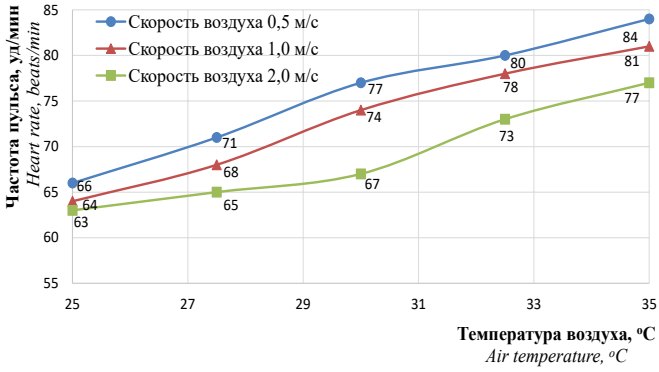


Рис. 4. Изменение частоты пульса при относительной влажности воздуха 75%

Fig. 4. Change in the heart rate at a relative humidity of 75%

Такой принцип управления позволяет осуществлять опережающий локальный обдув животных, не допуская возникновения условий даже для кратковременного температурного стресса.

Вместе с тем в ранее опубликованных статьях не отражается количественная сторона управления, в то время как его практическая реализация требует установления однозначной связи между скоростью воздушного потока, фактическими значениями температуры и влажности воздуха и заданными значениями параметров физиологического состояния животных [11, 12].

Цель исследований: разработать алгоритм управления скоростью воздушного потока на основе анализа экспериментальных данных зависимости частоты пульса животных от температуры и влажности воздуха, а также от скорости воздушного потока при локальном обдуве животных.

Материалы и методы

В качестве исходных материалов использовали результаты экспериментальных исследований зависимости частоты пульса коров от температуры и влажности окружающей среды при различной скорости воздушного потока (рис. 2-4). Эксперимент проводили на коровах черно-пестрой породы. Средний возраст животных – 3,5 года, средняя масса тела – 590 кг. При составлении математического описания исследуемой зависимости применяли методы определения параметров трехфакторных нелинейных полиномиальных моделей, метод узловой точки, метод вложенных функций, а также метод наименьших квадратов для линейной множественной регрессии.

Результаты и их обсуждение

При анализе экспериментальных данных частоту пульса животных рассматривали как функцию трех переменных: $Y = f(T;\varphi;V)$, где T – температура воздуха, °С; φ – относительная влажность воздуха, %; V – скорость воздушного потока при локальном обдуве животных, м/с; Y – частота пульса животных, количество ударов (сердечных сокращений) в 1 мин. При этом температуру и влажность воздуха рассматривали как величины, не зависящие от оператора или от результатов управления, а скорость воздуха – как величину, которая может быть установлена автоматически или вручную [13].

При составлении математического описания зависимости частоты пульса животных от температуры и влажности окружающей среды при различной скорости воздушного потока принималось во внимание требование к максимальной точности отражения им результатов эксперимента при достаточно простой форме для ручной и процессорной реализации.

Трехфакторные нелинейные полиномиальные модели вида

$$y = a_0 + a_1T + a_2V + a_3\varphi + a_4TV + \\ + a_5T\varphi + a_6V\varphi + a_7T^2 + a_8V^2 + a_9\varphi^2$$

оказались отвергнутыми вследствие их высокой чувствительности к варьированию параметров, малого объема экспериментального массива и неоднозначности выражения из них зависимости скорости воздушного потока от остальных факторов. Также было решено отказаться от использования нелинейных моделей, составленных методом узловой точки:

$$y = \frac{1}{y_0}\left(a_1T^2 + a_2T + a_3\right)\cdot\left(a_4V^2 + a_5V + a_6\right)\cdot\left(a_7\varphi^2 + a_8\varphi + a_9\right),$$

где y_0 – значение частоты пульса в узловой точке, поскольку такие формы математического описания обеспечивают достаточно точное воспроизведение экспериментальных данных в окрестности узловой точки, но по мере удаления от нее допускают резкое увеличение ошибки.

Более подробно остановились на методе вложенных функций. На первом этапе использования этого метода рассматривали однофакторную зависимость частоты пульса животных от температуры и определяли параметры соответствующих регрессий для трех значений скорости воздушного потока и трех значений влажности: $y = f_1(T, a.b)$:

$y = f_1(T, a.b)$ при $V = 0{,}5$ м/с и $\varphi = 50\%$;
$y = f_1(T, a.b)$ при $V = 1{,}0$ м/с и $\varphi = 50\%$;
$y = f_1(T, a.b)$ при $V = 2{,}0$ м/с и $\varphi = 50\%$;
$y = f_1(T, a.b)$ при $V = 0{,}5$ м/с и $\varphi = 62{,}5\%$;
$y = f_1(T, a.b)$ при $V = 1{,}0$ м/с и $\varphi = 62{,}5\%$;
$y = f_1(T, a.b)$ при $V = 2{,}0$ м/с и $\varphi = 62{,}5\%$;
$y = f_1(T, a.b)$ при $V = 0{,}5$ м/с и $\varphi = 75\%$;
$y = f_1(T, a.b)$ при $V = 1{,}0$ м/с и $\varphi = 75\%$;
$y = f_1(T, a.b)$ при $V = 2{,}0$ м/с и $\varphi = 75\%$.

На втором этапе рассматривали зависимости параметров a и b от скорости воздушного потока при фиксированной влажности воздуха:

$a = f_2(V, c, d)$ при $\varphi = 50\%$;
$a = f_2(V, c, d)$ при $\varphi = 62{,}5\%$;
$a = f_2(V, c, d)$ при $\varphi = 75\%$;
$b = f_2(V, i\ j)$ при $\varphi = 50\%$;
$b = f_2(V, i\ j)$ при $\varphi = 62{,}5\%$;
$b = f_2(V, i, j)$ при $\varphi = 75\%$.

На третьем этапе рассматривали зависимости параметров c, d, i, j от влажности воздуха:

$c = f_3(\varphi, k, l)$;
$d = f_3(\varphi, m, n)$;
$i = f_3(\varphi, p, q)$;
$j = f_3(\varphi, r, s)$.

Вид функций f_1, f_2 и f_3 выбирали из ряда двухпараметрических зависимостей (прямой, степенной, гиперболической, показательной, логарифмической и экспоненциальной) по минимуму величины средней ошибки аппроксимации[1]. Наилучшие результаты на всех этапах показали гиперболические функции. Таким образом, общий вид искомой зависимости имеет вид:

$$y = k + \frac{l}{\varphi} + \frac{m + \frac{n}{\varphi}}{V} + \frac{p + \frac{q}{\varphi} + \frac{r + \frac{s}{\varphi}}{V}}{T}. \qquad (1)$$

Домножив все члены выражения (1) на произведение φVT, получили:

$$y\varphi VT = k\varphi VT + lVT + \left(m + \frac{n}{\varphi}\right)\varphi T + \left(p + \frac{q}{\varphi} + \frac{r + \frac{s}{\varphi}}{V}\right)\varphi V$$

или

$$y\varphi VT = k\varphi VT + lVT + m\varphi T + nT + p\varphi V + qV + r\varphi + s \qquad (2)$$

Перенесем все члены, содержащие сомножитель V, в левую часть выражения (2):

$$y\varphi VT - k\varphi VT - lVT - p\varphi V - qV = m\varphi T + nT + r\varphi + s,$$

откуда $$V = \frac{(m\varphi + n)T + r\varphi + s}{(y\varphi - k\varphi - l)T - p\varphi - q}. \qquad (3)$$

Выражение (3) отражает зависимость скорости воздушного потока от температуры и влажности воздуха, а также от частоты пульса животных. Входящие в это выражение параметры $m, n.r, s, k, p, q$ достаточно просто находятся методом наименьших квадратов по соответствующим однофакторным массивам. Это выражение позволяет определить скорость воздушного потока для исключения температурного стресса животных, а методика вычисления входящих в него параметров может оказаться полезной при математическом описании других трехфакторных зависимостей. Вместе с тем нужно признать, что выражение (3) является весьма громоздким и на краях исследуемого диапазона допускает погрешность более чем на 30%.

Принимая во внимание указанные недостатки, для формировия алгоритма управления воздушным потоком предложили еще одно решение, сводящееся к поиску параметров множественной линейной регрессии вида $Y = a_0 + a_1T + a_2V + a_3\varphi$, анализу статистических характеристик этой регрессии и последующему ее преобразованию относительно переменной V.

[1] Кремер Н.Ш. Математическая статистика. М.: Юрайт, 2024. 259 с.; Ганичева А.В. Теория вероятностей. СПб.: Лань, 2017. 144 с.

[2] Пронина Л.А. Теория математической обработки измерений. Ч. 2. Метод наименьших квадратов. СПб.: Лань, 2023. 108 с.

Основываясь на экспериментальных данных (табл.), методом наименьших квадратов получили уравнение регрессии вида:

$$Y = 10,2667 + 1,3022T - 2,9619V + 0,344\varphi. \quad (4)$$

В уравнении (4) константа $a_0 = 10,2667$ определяет агрегированное влияние на частоту пульса не учтенных в модели факторов. Параметр a_1 свидетельствует об увеличении частоты пульса на величину 1,3022 с увеличением температуры на 1°С. Коэффициент a_2 иллюстрирует снижение частоты пульса на величину 2,9619 при увеличении скорости потока воздуха на 1 м/с. Коэффициент a_3 показывает, что с увеличенитносительной влажности воздуха на 1% происходит увеличение частоты пульса на 0,344 удара в минуту.

В результате анализа парных коэффициентов корреляции установлены сильная линейная связь[2] между температурой воздуха и частотой пульса и умеренные линейные связи между скоростью потока и влажностью воздуха по отношению к частоте. В то же время между температурой и скоростью воздуха, между температурой и влажностью воздуха, а также между скоростью воздуха и его влажностью линейная связь не обнаружена [14, 15].

Значения дисперсий $D(x)$, D_y и среднеквадратических отклонений $s(x)$, $s(y)$[3] при обозначении анализируемых факторов символом x с текущим номером i и количестве $n = 3$ представлены в таблице.

Для формирования алгоритма управления скоростью воздушного потока при обдуве животных для поддержания заданного значения частоты пульса при различных значениях температуры и влажности окружающей среды выражение (4) было преобразовано относительно V:

$$V = \frac{10,2667 + 1,3022T + 0,344\varphi - y}{2,9619}. \quad (5)$$

Практическое использование алгоритма (5) сводится к подстановке в него требуемого значения частоты пульса животных, а также текущих значений температуры и относительной влажности воздуха с последующим расчетом скорости воздушного потока. Практическая работа с алгоритмом показала, что он обеспечивает вполне удовлетворительные результаты на исследуемом диапазоне изменения T и V. Например, при требуемой частоте пульса 65 ударов в минуту, температуре воздуха 30°С и относительной влажности 62,5% скорость воздушного потока должна составлять 1,96 м/с.

Вместе с тем следует отметить, что использование полученного алгоритма может носить только интерполяционный характер, то есть допускает подстановку значений температуры и влажности воздуха в диапазонах от 25 до 35°С и от 50 до 75% соответственно. Однако это ограничение не сдерживает практического применения алгоритма, поскольку указанные диапазоны охватывают рабочие значения параметров микроклимата. При необходимости расширения диапазонов температуры и влажности эксперимент следует повторить при новых значениях исследуемых факторов и произвести обработку его результатов в описанной последовательности.

Для оперативного использования алгоритма расчет требуемой скорости воздушного потока должен осуществляться простейшим процессором, получающим текущую информацию от датчиков температуры и влажности. На сегодняшний день для привода вентиляторов в условиях промышленного животноводства в большинстве случаев используются асинхронные электродвигатели. Управление частотой вращения таких электродвигателей наиболее эффективно достигается изменением частоты питающего напряжения. Поскольку вентиляторный режим предполагает относительное постоянство нагрузки, то для достижения эффективной

Таблица

Дисперсии и среднеквадратические отклонения

Table

Variances and standard deviations

Для факторов *For factors*	$D(x) = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}{n} - \bar{x}^2$	$D(y) = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i^2}{n} - \bar{y}^2$	$s(x) = \sqrt{D(x)}$	$s(y) = \sqrt{D(y)}$
Y и *T*	12,500	41,257	3,536	6,423
Y и *V*	0,389	41,257	0,624	6,423
Y и φ	104,167	41,257	10,206	6,423
T и *V*	0,389	12,500	0,624	3,536
T и φ	104,167	12,500	10,206	3,536
V и φ	104,167	0,389	10,206	0,624

[3] Письменный Д.Т. Конспект лекций по высшей математике. Полный курс. 10-е изд. М.: АЙРИС-ПРЕСС, 2022. 608 с.

работы электродвигателя напряжение на статоре должно изменяться пропорционально частоте. Частотный способ управления позволяет осуществлять 20-кратное варьирование частотой вращения асинхронного электродвигателя, что делает его пригодным для управления скоростью воздушного потока, при котором частота вращения изменяется в 4 раза.

Сформированный алгоритм может быть также использован при управлении скоростью воздушного потока исключительно по возмущающим воздействиям. При этом контроль фактической частоты пульса животных не производится. Такой принцип управления является более простым при реализации, не требует применения датчиков физиологического состояния и не формирует ложных срабатываний, когда частота пульса будет зависеть от других факторов.

Выводы

1. Локальный обдув коров с управляемой скоростью воздушного потока является перспективным способом повышения устойчивости показателей физиологического состояния к повышенным температуре и влажности окружающей среды.

2. Для математического описания экспериментально установленной зависимости частоты пульса животных от температуры и влажности окружающей среды при различной скорости воздушного потока целесообразно использовать линейную множественную регрессию.

3. Практическое использование сформированного алгоритма заключается в подстановке в него требуемого значения частоты пульса животных, а также текущих значений температуры и относительной влажности воздуха с последующим расчетом скорости воздушного потока.

Список источников

1. Вторый В.Ф., Гордеев В.В., Вторый С.В., Ланцева Е.О. Влияние погодных условий на формирование температурно-влажностного режима в коровнике // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2016. № 3 (23). С. 67-72. EDN: WGWNFB

2. Тимошенко В., Музыка А., Москалёв А.Й., Шматко Н. Комфорт коров – залог высокой продуктивности // Животноводство России. 2014. № 8. С. 39-41. EDN: TAOSBH

3. Мартынова Е.Н., Ястребова Е.А. Формирование микроклимата животноводческих помещений под действием температуры наружного воздуха // Молочное и мясное скотоводство. 2012. № 4. С. 24-26. EDN: OZJAGP

4. Aggarwal A., Upadhyay R. Heat stress and animal productivity. New Delhi: Springer. India 2013. 200 p. https://doi.org/10.1007/978-81-322-0879-2

5. Assatbayeva G., Issabekova S., Uskenov R., Karymsakov T., Abdrakhmanov T. Influence of microclimate on ketosis, mastitis and diseases of cow reproductive organs. Journal of Animal Behaviour and Biometeorology. 2022;10(3):2230. https://doi.org/10.31893/jabb.22030

6. Polsky L., Keyserlingk A.G. Invited review: Effects of heat stress on dairy cattle welfare. Journal of Dairy Science. 2017;100(11):8645-8657. https://doi.org/10.3168/jds.2017-12651

7. Ruban S., Borshch O.O., Borshch O.V. et al. The impact of high temperatures on respiration rate, breathing condition and productivity of dairy cows in different production systems. Animal science papers and reports. 2020;38(1):61-72

8. Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А. Система принудительной вентиляции коровника // Сельский механизатор. 2015. № 8. С. 26-27. EDN: UIOZHF

9. Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А. Обоснование параметров принудительной вентиляции на молочной ферме для летнего периода времени // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2013. № 3 (11). С. 173-175. EDN: RCKAMD

10. Иванов Ю.Г., Борулько В.Г., Андреев С.А. Комбинированная система управления местной вентиляцией в животноводческом помещении // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 9-14. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-9-14

11. Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А., Мошонкин А.М., Жумагулов Ж.М. Анализ математических моделей контроля параметров, характеризующих состояние теплового стресса

References

1. Vtoroy V.F., Gordeyev V.V., Vtoroy S.V., Lantseva E.O. The weather conditions influence on the temperature-and-humidity conditions' formation in the cowshed. *Vestnik Vserossiyskogo Nauchno-Issledovatelskogo Instituta Mekhanizatsii Zhivotnovodstva*. 2016;3(23):67-72. (In Russ.)

2. Timoshenko V., Muzyka A., Moskalov A.I., Shmatko N. Cow comfort – assurance of high productivity. *Zhivotnovodstvo Rossii*. 2014;8:39-41. (In Russ.)

3. Martynova E.N., Yastrebova E.A. The formation of stock building microclimate at the influence of air temperature. *Journal of Dairy and Meat Cattle Breeding*. 2012;4:24-26. (In Russ.)

4. Aggarwal A., Upadhyay R. Heat stress and animal productivity. New Delhi: Springer. India 2013. 200 p. https://doi.org/10.1007/978-81-322-0879-2

5. Assatbayeva G., Issabekova S., Uskenov R., Karymsakov T., Abdrakhmanov T. Influence of microclimate on ketosis, mastitis and diseases of cow reproductive organs. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology.* 2022;10(3):2230. https://doi.org/10.31893/jabb.22030

6. Polsky L., Keyserlingk A.G. Invited review: Effects of heat stress on dairy cattle welfare. *Journal of Dairy Science*. 2017;100(11):8645-8657. https://doi.org/10.3168/jds.2017-12651

7. Ruban S., Borshch O.O., Borshch O.V. et al. The impact of high temperatures on respiration rate, breathing condition and productivity of dairy cows in different production systems. *Animal science papers and reports*. 2020;38(1):61-72

8. Ivanov Yu.G., Ponizovkin D.A. System of the cowshed compulsory ventilation. *Selskiy Mekhanizator*. 2015;(8):26-27. (In Russ.)

9. Ivanov Yu.G., Ponizovkin D.A. Justification of the parameters of forced ventilation on a dairy farm for the summer time. *Vestnik Vserossiyskogo Nauchno-Issledovatelskogo Instituta Mekhanizatsii Zhivotnovodstva*. 2013;3(11):173-175. (In Russ.)

10. Ivanov Yu.G., Borulko V.G., Andreev S.A. Combined local ventilation control system in a livestock house. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2022;24(6):9-14. (In Russ.) https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-9-14

11. Ivanov Yu.G., Ponizovkin D.A., Moshonkin A.M., Zhumagulov Zh.M. The analysis of parameters control of the animals thermal stress state characterizing's mathematical models on dairy farms. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2023;4(52):36-41. (In Russ.)

животных на молочных фермах // Техника и технологии в животноводстве. 2023. № 4 (52). С. 36-41. EDN: DUTWIL

12. Борулько В.Г., Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А., Шлычкова Н.А. Математическая модель влияния параметров микроклимата в коровнике на клинико-физиологические показатели животных // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 2 (42). С. 74-77. EDN: XPCKVX

13. Zentner E., Löffler B. Horizontallufter zur minderung von hitzestress im rinderstall. Bautagung Raumberg-Gumpenstein. 2017. P. 57-62.

14. Понизовкин Д.А., Борулько В.Г. Автоматизация систем управления микроклиматом животноводческих помещений // Аграрная наука. 2020. № 3 (3). С. 96-98. https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-336-3-96-98

15. Dette H., Melas V.B., Shpilev P.V. Optimal designs for trigonometric regression models. Journal of Statistical Planning and Inference. 2011;141(3):1343-1353. https://doi.org/10.1016/j.jspi.2010.10.010

12. Borulko V.G., Ivanov Yu.G., Ponizovkin D.A., Shlychkova N.A. Mathematical model of cowshed microclimate parameters influence on animals clinical-and-physiological parameters. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2021;2(42):74-77. (In Russ.)

13. Zentner E., Löffler B. Horizontallufter zur minderung von hitzestress im rinderstall. Bautagung Raumberg-Gumpenstein. 2017. P. 57-62.

14. Borulko V.G., Ponizovkin D.A. Automation of climate control systems in livestock buildings. *Agrarian science*. 2020;3(3):96-98. (In Russ.) https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-336-3-96-98

15. Dette H., Melas V.B., Shpilev P.V. Optimal designs for trigonometric regression models. *Journal of Statistical Planning and Inference.* 2011;141(3):1343-1353. https://doi.org/10.1016/j.jspi.2010.10.010

Информация об авторах

[1] **Иванов Юрий Григорьевич,** профессор, д-р техн. наук, профессор; iy.electro@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-4766-9532; SPIN-код: 2490-7588, AuthorID: 744496

[2] **Понизовкин Дмитрий Андреевич,** канд. техн. наук; ponizovkind@yandex.ru; SPIN-код: 3417-4508, AuthorID: 794911

[3] **Андреев Сергей Андреевич,** д-р техн. наук, доцент; energo-andreev@rgau-msha.ru; SPIN-код: 8453-6024, AuthorID: 701225

[1, 3] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

[2] Московский государственный колледж электромеханики и информационных технологий; 115446, г. Москва, ул. Академика Миллионщикова, 20

Author Information

Yuri G. Ivanov [1], DSc (Eng), Professor, Professor of the Department of Agricultural Mechanization; iy.electro@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-4766-9532

Dmitriy A. Ponizovkin [2], CSc (Eng); ponizovkind@yandex.ru

Sergey A. Andreev [3], DSc (Eng), Associate Professor; energo-andreev@rgau-msha.ru

[1, 3] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49

[2] Moscow State College of Electromechanics and Information Technologies; 115446, Russian Federation, Moscow, Akademika Millionshchikova Str., 20

Вклад авторов

Ю.Г. Иванов – формулирование концепции экспериментальных исследований, разработка методики исследований и осуществление руководства научным проектом;

Д.А. Понизовкин – обзор литературы, проведение исследований, визуализация, статистическая обработка результатов экспериментов;

С.А. Андреев – математическое моделирование исследуемых зависимостей, создание черновика рукописи и его редактирование

Конфликт интересов

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

Статья поступила 09.01.2025, после рецензирования и доработки 19.04.2025; принята к публикации 21.04.2025

Author Contribution

Yu.G. Ivanov – conceptualization, research methodology, research supervision;

D.A. Ponizovkin – literature review, investigation, visualization, data curation;

S.A. Andreev – formal analysis, writing – original draft, manuscript review and editing.

Conflict of interests

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

Received 09.01.2025; Revised 19.04.2025; Accepted 21.04.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.362.36:635.62
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-40-46

Разработка новой камеры разрежения для пневматического сепаратора семян

Н.А. Круглых
Луганский государственный аграрный университет – ФГБОУ ВО ЛГАУ имени К.Е. Ворошилова; г. Луганск, Россия
nikakom-1@mail.ru; https://orcid.org/0009-0005-6743-8300

Аннотация. Повышая качество посевного материала путем отбора лучших семян для посева, можно добиться повышения валовых сборов урожая. На кафедре сельскохозяйственных машин ЛГАУ был разработан и собран экспериментальный образец пневматического сепаратора семян овощных и бахчевых культур, достоинством которого является повышение качества сепарации плоских семян за счет ориентирования их на цилиндрической опорной поверхности. С целью повышения качества работы нового сепаратора авторы разработали новую камеру разрежения, позволяющую повысить равномерность разрежения по всей рабочей поверхности. Авторы провели моделирование воздушных потоков и распределения вакуумметрического давления в исходном и предложенном образце воздушных камер с помощью программы SolidWorks Flow Simulation. Аэродинамический расчет показал достоинства разработанной камеры. Разработанную модель камеры разрежения напечатали на 3D-принтере из пластика PETG. Для подтверждения результатов моделирования провели опыт по измерению перепадов давления в новой и исходной воздушных камерах. При помощи прибора Testo 510i в трехкратной повторности отслеживали перепады вакуумметрического давления с частотой измерений один раз в секунду при линейной скорости вращения поверхности сепаратора 0,5 см/с. Обработка экспериментальных данных учитывала усредненные показатели по пяти возможным траекториям движения семян по отношению к воздушной камере. По результатам эксперимента установлено, что разработанная камера обеспечивает более равномерное разрежение, среднее отклонение границ вакуумметрического давления уменьшилось с 11,70 до 7,56 Па. По результатам дисперсионного анализа общая точность опыта составила 0,53%. По результатам проведенных исследований разработанная камера разрежения будет интегрирована в конструкцию сепаратора.

Ключевые слова: сепаратор; семена; моделирование; воздушная камера; камера разрежения; аэродинамический расчет; равномерность разрежения

Для цитирования: Круглых Н.А. Разработка новой камеры разрежения для пневматического сепаратора семян // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 3. С. 40-46. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-40-46

ORIGINAL ARTICLE

Development of a new vacuum chamber for a pneumatic seed separator

N.A. Kruglykh
Lugansk State Agrarian University named after K.E. Voroshilov; Lugansk, Russia;
nikakom-1@mail.ru; https://orcid.org/0009-0005-6743-8300

Abstract. Improving the quality of seed material by selecting the best seeds for sowing, we can increase gross harvests. At the Department of Agricultural Machinery of Lugansk State Agrarian University, the author previously developed and assembled an experimental model of a pneumatic separator for seeds of vegetable and melon crops, the advantage of which is an increase in the quality of separation of flat seeds due to their positioning on a cylindrical support surface. In order to improve the quality of the new separator, a new vacuum chamber was developed, capable of increasing the uniformity of vacuum over the entire working surface. The authors performed a simulation of airflows and vacuum pressure distribution in the original and proposed sample of air chambers using SolidWorks Flow Simulation software. The aerodynamic calculation clearly demonstrated the advantages of the developed chamber. The developed model of the vacuum chamber was printed on a 3D printer from PETG plastic. In order to confirm the simulation results, an experiment was conducted to measure pressure drops in the new and original air chambers. Using the Testo 510i device,

© Круглых Н.А., 2025

the author monitored the differences in vacuum pressure with a measurement frequency of once per second at a linear rotation speed of 0.5 cm/s with three retakes of the experiment. While processing the experimental data, the author took into account the averaged indicators for five possible trajectories of the seed movement in relation to the air chamber. According to the experiment results, it was found that when using the developed vacuum chamber, the average deviation of the vacuum pressure boundaries decreased from 11.70 Pa to 7.56 Pa. The overall accuracy of the experiment was 0.53%. Based on the research results, the developed rarefaction chamber will be integrated into the separator design.

Keywords: separator; seeds; simulation; air chamber; rarefaction chamber; aerodynamic calculation; rarefaction uniformity

For citation: Kruglykh N.A. Development of a new vacuum chamber for a pneumatic seed separator. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2025;27(3):40-46 (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-40-46

Введение

По мнению специалистов, продовольственная независимость любой страны возможна только тогда, когда импорт продуктов питания в общем объеме составляет не более 20% [1]. В России в XXI в. наблюдается тенденция увеличения валовых сборов бахчевых культур [2]. Известно, что улучшение качества посевного материала путем отбора семян с наибольшей массой позволяет повысить урожайность плодов [3-5].

На кафедре сельскохозяйственных машин ЛГАУ был разработан новый пневматический сепаратор семян овощных и бахчевых культур [6, 7]. Его основными достоинствами являются равномерное воздействие на семена при сепарации и их ориентирование на рабочей цилиндрической поверхности [8]. Сепарация происходит за счет действия двух воздушных камер с разным разрежением, расположенных на разных участках наклонного барабана. Проходя через рабочую поверхность, присосавшиеся семена легкой и средней фракций распределяются по приемным лоткам, а тяжелая фракция проходит через барабан, не присосавшись (рис. 1). Одним из методов интенсификации данной технологии является выравнивание вакуумметрического давления в воздушных камерах.

Цель исследований: разработка и создание воздушных камер для сепаратора более рациональной формы и экспериментальное подтверждение теоретических исследований.

Материалы и методы

Схема нового пневматического сепаратора семян овощных и бахчевых культур представлена на рисунке 1.

При моделировании исходной и разработанной камер разрежения использовали программу для общего параметрического моделирования потока SolidWorks Flow Simulation. После введения начальных и граничных условий (табл. 1) провели моделирование воздушных потоков и моделирование распределения разрежения в воздушных камерах. Участки воздушной камеры с перепадами давлений определяли при помощи цветовой гаммы и индикатора атмосферного давления. Чем ниже атмосферное давление, тем выше на данном участке разрежение. Путем вытяжения стенок воздушной камеры в местах избыточного разрежения в исходной воздушной камере создали условия для более равномерного распределения разрежения в разработанной камере.

По результатам моделирования на 3D-принтере напечатали новые воздушные камеры разрежения из пластика PETG.

Для получения значений перепадов разрежения на рабочей поверхности к одному из отверстий присоединили трубку со смарт-зондом Testo 510i. Поверхность сепаратора вращалась с линейной скоростью 0,5 см/с (0,08 $с^{-1}$). Прибор фиксировал вакуумметрическое давление с частотой один раз в секунду на протяжении прохождения всей рабочей зоны воздушной камеры. Эксперимент проводили с трехкратной повторностью, данные автоматически сохранялись в формате Microsoft Excel для дальнейшей обработки. Для контроля линейной скорости вращения на поверхность наклеили мерную ленту с пометками 0,5 см и использовался метроном, настроенный на 60 bpm.

Результаты и их обсуждение

Результаты моделирования воздушных потоков и распределения разрежения в воздушных камерах представлены на рисунках 2-5. Геометрические параметры разработанной воздушной камеры представлены на рисунке 6.

Результаты моделирования процесса сепарации с учетом заданных начальных и граничных условий по двум камерам представлены в таблице 2. Аэродинамический расчет подтвердил достоинства разработанной формы камеры.

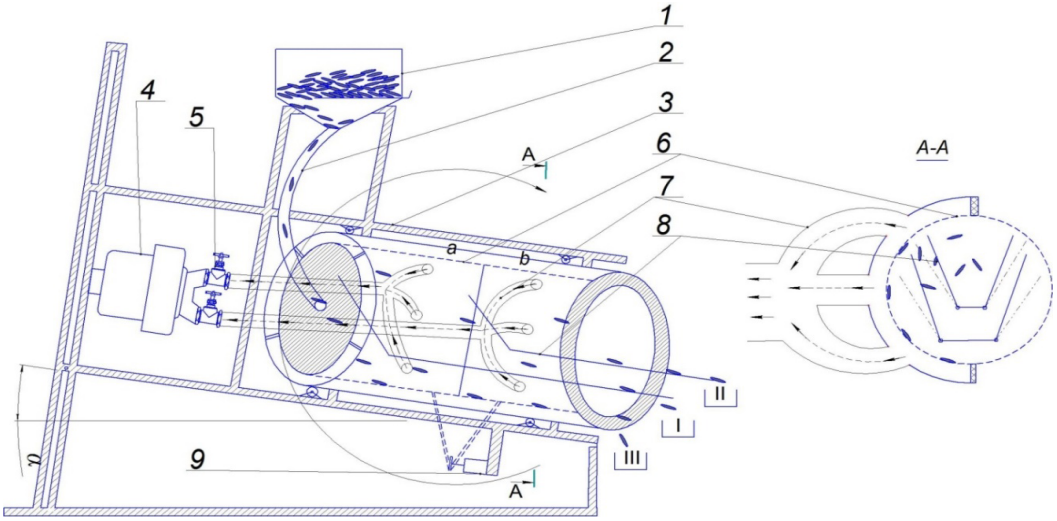


Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема нового пневматического сепаратора:
1 – бункер для семян; 2 – гофра для подачи семян; 3 – рама; 4 – вакуумный вентилятор; 5 – регулировочный вентиль; 6 – рабочая поверхность; 7 – воздушная гофра; 8 – приемный лоток; 9 – привод; a – зона первой воздушной камеры; b – зона второй воздушной камеры; I – фуражная фракция; II – товарная фракция; III – посевная фракция

Fig. 1. Design and technological scheme of the new pneumatic separator:
1 – seed hopper; 2 – corrugation for seed feeding; 3 – frame; 4 – vacuum fan; 5 – adjusting valve; 6 – working surface; 7 – air corrugation; 8 – receiving tray; 9 – drive; a – zone of the first air chamber; b – zone of the second air chamber; I – forage fraction; II – marketable fraction; III – sowing fraction

Таблица 1

Начальные условия для моделирования процесса

Table 1

Initial conditions for process modeling

Параметры / *Parameters*	**Значение** / *Value*
Термодинамические параметры / *Thermodynamic parameters*: **статическое давление, Па** / *static pressure, Pa* **температура, К** / *temperature, K*	 101325 293,20
Вектора скорости в направлениях X, Y, Z, м/с / *Velocity vectors in X, Y, Z directions, m/s*	0
Параметры турбулентности / *Turbulence parameters*: **интенсивность, %** / *intensity, %* **масштаб длины, м** / *length scale, m*	 2,00 8,050*e*-04
Поверхность барабана / *Drum surface*	**внутренняя** / *internal*
Система координат / *Coordinate system*	**глобальная** / *global*
Базовая ось / *Reference axis*	*X*
Тип пограничного слоя / *Boundary layer type*	**турбулентный** / *turbulent*

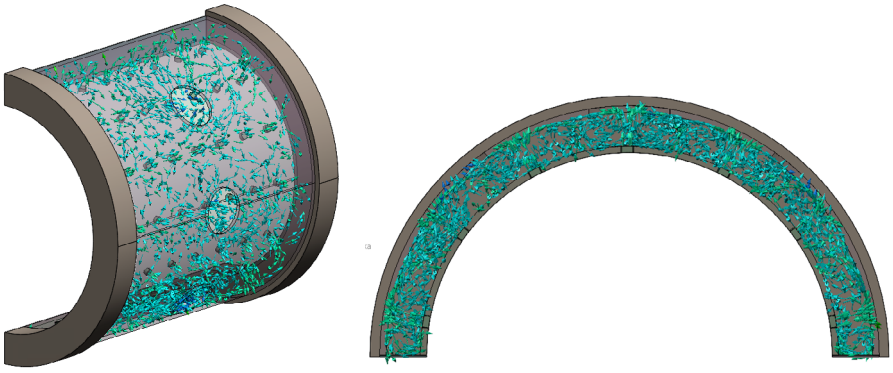


Рис. 2. Моделирование воздушного потока в исходной камере разрежения

Fig. 2. Modeling of air flow in the original rarefaction chamber

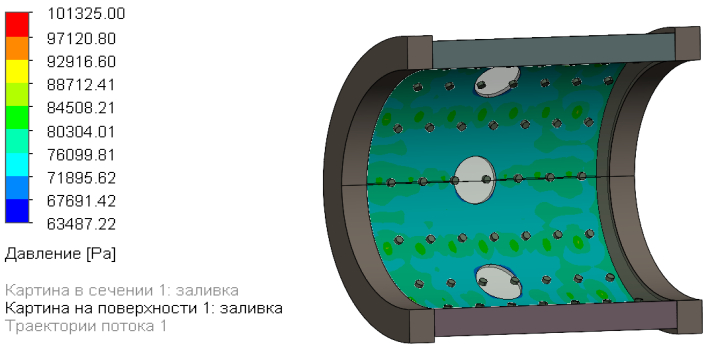


Рис. 3. Моделирование перепадов давления в исходной камере разрежения

Fig. 3. Modeling of a pressure drop in the original rarefaction chamber

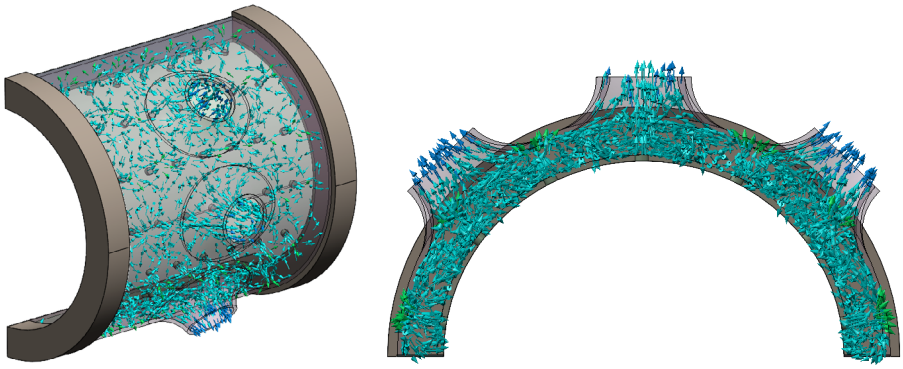


Рис. 4. Моделирование воздушного потока в разработанной камере разрежения

Fig. 4. Modeling of an air flow in the developed rarefaction chamber

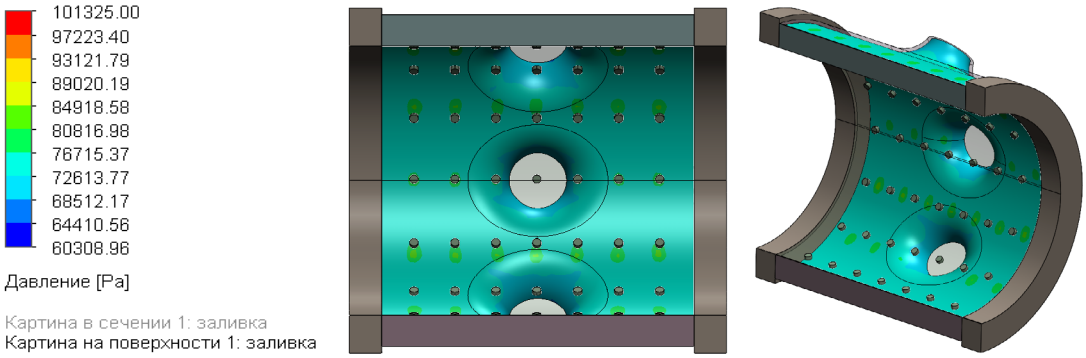


Рис. 5. Моделирование перепадов давления в разработанной камере разрежения

Fig. 5. Modeling of a pressure drop in the developed rarefaction chamber

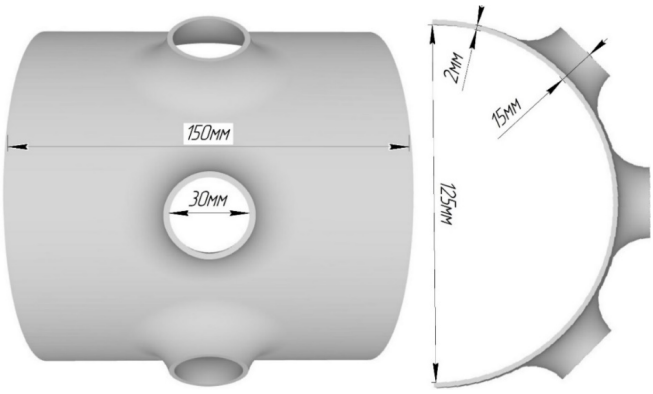


Рис. 6. Габаритная схема воздушной камеры

Fig. 6. Dimensional diagram of the air chamber

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

– наблюдается уменьшение разрежения в разработанной воздушной камере (за счет обтекаемой формы обеспечивается более равномерный поток на выходные патрубки);

– в разработанной камере создается значительно меньше воздушных завихрений, что положительно сказывается на равномерности разрежения;

– чем ближе отверстия цилиндра камеры расположены к выходным патрубкам, тем выше разрежение в исходной и разработанной камерах;

– разработанная камера разрежения более целесообразна к применению, поскольку выполняется

требование более равномерного распределения разрежения по всей камере.

Наиболее подходящим методом для получения обтекаемой формы корпуса камеры разрежения является метод аддитивных технологий [9]. Смоделированные камеры разрежения напечатали на 3D-принтере. Выбрали пластик типа PETG от производителя НИТ, который по своим характеристикам отвечает нашим требованиям по прочности и стойкости к температурам.

Для проверки результатов программного аэродинамического расчета провели опыт по измерению перепадов разрежения в обеих камерах разрежения при одинаковых условиях работы (рис. 7).

В результате замеров показателей разрежения с шагом 0,5 см получили по 36 точек замеров разрежения в воздушной камере по трем траекториям движения семени с трехкратной повторностью. По усредненным результатам замеров из трех повторений по трем траекториям в исходной и разработанной камерах разрежения по всем точкам измерений провели дисперсионный анализ, который позволил вычислить отклонения границ давления по каждой траектории движения. Провели также дисперсионный анализ трех повторений измерений по каждой точке согласно методике обработки экспериментов [10], что позволило определить точность опыта.

Таблица 2

Расчетные значения показателей исходной и разработанной камер разрежения

Table 2

Calculated values of indicators of the original and developed vacuum chamber

Показатель *Indicator*	**Исходная камера** *Original chamber*		**Разработанная камера** *Developed chamber*	
	Минимальное значение *Minimum value*	**Максимальное значение** *Maximum value*	**Минимальное значение** *Minimum value*	**Максимальное значение** *Maximum value*
Давление, Па / *Pressure, Pa*	63487,22	101325,00	60308,96	101325,00
Плотность (текучая среда), кг/м³ / *Density (fluid medium), kg/m³*	0,71	1,20	0,69	1,20
Скорость по оси, м/с / *Velocity X, Y, Z-axis, m/s*	0	230,424	0	237,239
X	–91,678	223,652	–103,279	237,224
Y	–217,079	216,390	–227,073	226,453
Z	–136,611	147,555	–138,096	155,217
Температура, К / *Temperature, K*	289,64	316,61	288,94	318,61
Температура (текучая среда), К / *Temperature (fluid), K*	289,64	316,61	288,94	318,61
Завихренность, 1/s / *Vorticity, 1/s*	67,36	244164,23	121,06	217622,12
Скорость по оси во вращающейся системе координат, м/с *Velocity in the rotating coordinate system X, Y, Z-axis, m/s*	0	230,424	0	237,239
X	–91,678	223,652	–103,279	237,224
Y	–217,079	216,390	–227,073	226,453
Z	–136,611	147,555	–138,096	155,217
Число Маха / *Mach number*	0	0,67	0	0,70
Касательное напряжение, Па / *Tangential stress, Pa*	0	66,49	0	155,23
Относительное давление, Па / *Relative pressure, Pa*	–37837,78	0	–41016,04	0
Индикатор неколлинеарности теплового потока *Heat flux non-collinearity indicator*	2,0008332*e*-06	1,0000000	4.6648228*e*-06	1,0000000
Индикатор теплового сопротивления / *Heat resistance indicator*	2,2146269*e*-08	1,0000000	1,4399799*e*-07	1,0000000
Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К) / *Heat transfer coefficient, W/(m² · K)*	0	0	0	0
Поверхностная плотность теплового потока, Вт/м² *Surface heat flux density, W/m²*	0	0	0	0
Поверхностная плотность теплового потока (конвекция), Вт/м² *Surface heat flux density (convection), W/m²*	2,918*e*+07	7.173*e*+07	–2,644*e*+07	7.232*e*+07
Акустическая мощность, Вт/м³ / *Acoustic power, W/m³*	0	650,909	0	7258,110
Уровень акустической мощности, дБ / *Acoustic power level, dB*	0	148,14	0	158,61

Рис. 7. Общий вид экспериментальной установки:
1, 2, 3 – траектории движения семени для измерений

Fig. 7. General view of the experimental installation:
1, 2, 3 – trajectories of seed movement for measurements

Получили зависимость вакуумметрического воздействия на семя по мере его углового перемещения по траектории вращения в исходной и разработанной камерах разрежения (рис. 8). Для этого 36 точек замеров в камерах разрежений в полуцилиндре были заменены на 180 градусов по оси *Y*.

По результатам эксперимента можно отметить, что при использовании разработанной камеры разрежения среднее отклонение границ вакуумметрического давления согласно дисперсионному анализу уменьшилось с 11,70 до 7,56 Па. Кривая на графике, отражающая результаты замеров исходной камеры разрежения, указывает на повышенное разрежение на трех участках полуцилиндра (примерно там, где происходит высасывание воздуха). Согласно графику в разработанной воздушной камере перепады давлений менее значительны, и небольшой избыток разрежения в нижней части полуцилиндра не оказывает негативного влияния на качество сепарации, так как отрыв семян при сепарации происходит выше. По результатам дисперсионного анализа общая точность опыта составила 0,53%.

После экспериментального подтверждения преимущества разработанной камеры разрежения перед исходной в конструкцию сепаратора будет установлена новая камера.

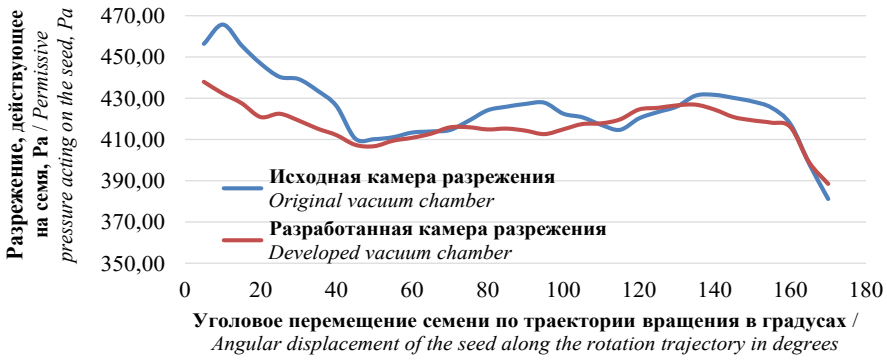


Рис. 8. Зависимость вакуумметрического воздействия на семя от его углового перемещения по траектории вращения

Fig. 8. Relationship between the vacuum-metric influence on the seed and its angular displacement along the rotation trajectory

Выводы

1. Теоретически, методом программного аэродинамического моделирования, определена эффективность исходной камеры разрежения, не имеющей разницы расстояния от стенки камеры до сепарирующей поверхности в зависимости от расстояния от пневмотрубопроводов, и разработанной камеры разрежения, учитывающей этот фактор. Установлено, что разработанная камера обеспечивает более равномерное разрежение за счет формы с вытянутыми участками, в которых в исходной камере наблюдалось избыточное давление.

2. Экспериментально подтверждено достоинство разработанной формы воздушной камеры. При переходе на разработанную камеру отклонение границ вакуумметрического давления уменьшилось с 11,70 до 7,56 Па. Общая точность опыта составила 0,53%.

3. Разработанная воздушная камера с более равномерным распределением разрежения позволит повысить качество разделения семян, поскольку участки камеры с перепадами давления могут привести к присасыванию и попаданию в лотки тяжелых кондиционных семян либо, наоборот, к раннему отрыву от поверхности недоразвитого семени в случае участка с недостаточным разрежением. Поэтому по результатам проведенных исследований, разработанная воздушная камера будет интегрирована в конструкцию сепаратора.

Список источников

1. Сёмин А.Н. К вопросу о понятиях «продовольственная независимость» и «продовольственная безопасность» // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2013. № 11. С. 1-4. EDN: RNLWUV

2. Ташкинов Е.В. Современное состояние бахчеводства в Российской Федерации // Молодежная наука-2024: технологии, инновации: Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященной Десятилетию науки и технологий в Российской Федерации, г. Пермь, 8-12 апреля 2024 г. Пермь: ИПЦ Прокрость, 2024. С. 173-178. EDN: ROGSOO

3. Вабищевич Ю.Е. Влияние качества посевного материала на продуктивность гречихи сорта Девятка // Молодежный вестник дальневосточной аграрной науки: Сборник студенческих научных трудов. Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2024. С. 5-9. EDN: ANXXJJ

4. Сунцов А.В., Огородников Л.П. Эффективность новой технологии подготовки семян // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 6. С. 36-38. EDN: NXACUL

5. Буенков А.Ю., Кудряшов С.П. Изменение количества и массы 1000 семян по годам, их влияние на урожайность семян сортов подсолнечника // Масличные культуры. 2023. № 3 (195). С. 12-18. https://doi.org/10.25230/2412-608X-2023-3-195-12-18

6. Сепаратор семян овощных и бахчевых культур: Патент RU2822527 C1, МПК B07B4/00 / Н.А. Круглых, А.А. Ильченко, С.Ф. Вольвак и др. № заявки 2024104114, заявл. 16.02.2024; Опубл. 08.07.2024. EDN: BCRSNC

7. Круглых Н.А., Ильченко А.А. Исследование разделения семян тыквы на новом пневматическом сепараторе // Вестник аграрной науки. 2023. № 3 (102). С. 71-77. EDN: MRUAKU

8. Ильченко А.А., Круглых Н.А., Гоженко Н.Ю. Перспективы разработок аэродинамических сепараторов для семян, имеющих плоскую форму поверхности // Профессия инженер: Сборник статей по материалам XI Всероссийской молодежной научно-практической конференции, г. Орел, 14 апреля 2023 г. / Под общ. ред. А.Л. Севостьянова. Орел: Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, 2023. С. 116-121. EDN: HQNHCZ

9. Осипов Д.В., Иванов П.Ю., Ковшин А.С., Пахомов В.В. Применение методов конечных элементов при изготовлении изделий с помощью аддитивных технологий // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 162-172. EDN: SIGRFP

10. Королев А.И., Медведев Д.Ю., Однодворцев А.Ю. Методика проведения однофакторного эксперимента в учебном процессе // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: Материалы Международной научно-практической конференции, г. Воронеж, 25 февраля 2021 г. / Под общ. ред. О.М. Костикова, А.В. Божко. Ч. II. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2021. С. 264-268. EDN: OMVZHY

Информация об авторе

Круглых Никита Александрович, аспирант,
Луганский государственный аграрный университет –
ФГБОУ ВО ЛГАУ имени К.Е. Ворошилова;
291008, Российская Федерация, г. Луганск,
р-н Артёмовский, тер. Лнау, д. 1;
nikakom-1@mail.ru; https://orcid.org/0009-0005-6743-8300;
SPIN-код: 8872-8094, AuthorID: 1230788

Статья поступила 10.01.2025, после рецензирования и доработки 03.04.2025; принята к публикации 04.04.2025

References

1. Semin A.N. On the problem of notions “food security” and “food safety”. *Economy of Agricultural and Processing Enterprises*. 2013;11:1-4. (In Russ.)

2. Tashkinov E.V. Current state of melon growing in the Russian Federation. Youth Science-2024: Technologies, Innovations: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of young scientists, postgraduates and students, dedicated to the Decade of Science and Technology in the Russian Federation, Perm, April 8-12, 2024 Perm: IPTs Prokrost, 2024. P. 173-178. (In Russ.)

3. Vabishchevich Yu.E. The influence of the seed quality on the productivity of buckwheat varieties Devyatka. *Youth Bulletin of Far Eastern Agrarian Science*: Collection of Student Scientific Papers. Blagoveshchensk: Far Eastern State Agrarian University. P. 3-9. (In Russ.)

4. Suntsov A.V., Ogorodnikov L.P. New technology training seeds. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2011;6:36-38. (In Russ.)

5. Buenkov A.Yu., Kudryashov S.P. Changing of seed amount and 1,000 seeds weight by years, their impact on seed yield of sunflower varieties. *Oil Crops.* 2023;3:12-18. https://doi.org/10.25230/2412-608X-2023-3-195-12-18

6. Kruglykh N.A., Ilchenko A.A., Volvak S.F. et al. Vegetable and melons seeds separator: patent RU2822527 C1, IPC B07B4/00, 2024. (In Russ.)

7. Kruglykh N.A., Ilchenko A.A. Study of the separation of pumpkin seeds on a new pneumatic separator. *Bulletin of Agrarian Science*. 2023;3:71-77. (In Russ.)

8. Ilchenko A.A., Kruglykh N.A., Gozhenko N.Yu. Prospects for the development of aerodynamic separators for seeds with a flat surface. Engineering Profession: Collection of articles based on the proceedings of the XI All-Russian Youth Scientific and Practical Conference, Orel, April 14, 2023. Edited by A.L. Sevostyanov. Orel: Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin, 2023. P. 116-121. (In Russ.)

9. Osipov D.V., Ivanov P.Yu., Kovshin A.S., Pakhomov V.V. Application of finite element methods in the manufacture of products using additive technologies. *Modern technologies. System analysis. Modeling.* 2022;4:162-172. (In Russ.)

10. Korolev A.I., Medvedev D.Yu., Odnodvortsev A.Yu. Methods of conducting a single-factor experiment in the educational process. Trends in the Development of Technical Means and Technologies in the Agro-Industrial Sector: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Voronezh, February 25, 2021. Edited by O.M. Kostikov, A.V. Bozhko. Part II. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 2021. P. 264-268. (In Russ.)

Author Information

Nikita A. Kruglykh, PhD student, Lugansk State
Agrarian University named after K.E. Voroshilov;
291008, Russian Federation, Lugansk,
Artemovsky district, LSAU area, Bld. 1;
nikakom-1@mail.ru; https://orcid.org/0009-0005-6743-8300

Received 10.01.2025; Revised 03.04.2025; Accepted 04.04.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.53.027.2:633.11
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-47-53

Обогащение зерна пшеницы негемовым железом посредством ультразвуковой кавитации

***А.В. Чжан*[1], *Н.М. Ничкова*[2]✉, *А.М. Воротынов*[3], *Н.А. Дрокин*[4], *М.А. Янова*[5]**

[1, 2, 5] Красноярский государственный аграрный университет; г. Красноярск, Россия

[2] Иркутский государственный университет путей сообщения. Красноярский институт железнодорожного транспорта; г. Красноярск, Россия

[3, 4] Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН; г. Красноярск, Россия

[1] avchz@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2978-1691

[2] nichkova_nm@mail.ru✉; https://orcid.org/0000-0003-1823-5687

[3] sasa@iph.krasn.ru

[4] drokin@iph.krasn.ru

[5] yanova.m@mail.ru

Аннотация. Зерна пшеницы являются ценным и наиболее потребляемым продуктом питания, поэтому их обогащение ионами железа позволит восполнить дефицит этого микроэлемента в организме человека. С целью обогащения зерен пшеницы негемовым железом (Fe^{3+}) провели их ультразвуковую обработку в растворе сульфата железа. Насыщение зерна железом проводили на ультразвуковой установке Vilitek VBS-6D при частоте 40 кГц. Зерна пшеницы погружали в ванну с раствором сульфата железа в пропорции 1:3. Продолжительность обработки варьировали от 10 до 30 мин с шагом 5 мин. Таким образом, получили 5 образцов. В качестве контроля выбрали образец с наименьшим временем ультразвуковой обработки. Качественную и количественную оценку результатов кавитационной обработки зерна проводили с помощью физических методов анализа – таких, как электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) и электрический импеданс. Спектры получили на спектрометре Bruker Elexsys E580 в X-диапазоне. Из анализа спектров ЭПР исследуемых образцов сделали вывод о том, что с увеличением времени ультразвуковой обработки наблюдается рост сигналов от кластеров, образованных ионами трехвалентного железа. Образованные в результате диссоциации раствора соли ионы Fe^{2+} окисляются до состояния Fe^{3+}. Для дополнительного анализа растворения ионов железа в зерне использовали метод импедансной спектроскопии в области частот от 1 Гц до 100 МГц. На основе приведенных данных выявили, что внедрение ионов железа приводит к наибольшему изменению действительной и мнимой составляющих электрического импеданса в области частот свыше 1000 Гц или в области β-дисперсии, что указывает на хорошую проходимость ионов железа в клетку из межклеточной области сквозь изолирующую их мембрану. В дальнейшем такие исследования позволят разработать экспресс-метод определения наличия ионов железа в зерновых.

Ключевые слова: зерно пшеницы; внедрение ионов железа; насыщение зерна железом; ультразвуковая кавитация; электрический импеданс; электронный магнитный резонанс

Для цитирования: Чжан А.В., Ничкова Н.М., Воротынов А.М., Дрокин Н.А., Янова М.А. Обогащение зерна пшеницы негемовым железом посредством ультразвуковой кавитации // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 3. С. 47-53. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-47-53

© Чжан А.В., Ничкова Н.М., Воротынов А.М., Дрокин Н.А., М.А. Янова, 2025

ORIGINAL ARTICLE

Enrichment of wheat grain with non-heme iron by ultrasonic cavitation

A.V. Chzhan[1], *N.M. Nichkova*[2]✉, *A.M. Vorotynov*[3], *N.A. Drokin*[4], *M.A. Yanova*[5]

[1,2,5] Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

[2] Irkutsk State Transport University. Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk, Russia

[3,4] Kirensky Institute of Physics, Russian Academy of Sciences, SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

[1] avchz@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2978-1691

[2] nichkova_nm@krsk.irgups.ru✉; https://orcid.org/0000-0003-1823-5687

[3] sasa@iph.krasn.ru

[4] drokin@iph.krasn.ru

[5] yanova.m@mail.ru

Abstract. Wheat grains are a valuable and most consumed food product, therefore, their enrichment with iron ions will make up for the deficiency of this trace element in the human body. In order to enrich wheat grains with non-heme iron (Fe^{3+}), they were ultrasonically treated in an iron sulfate solution. Grain was saturated with iron on a Vilitek VBS-6D ultrasonic unit at a frequency of 40 kHz. Wheat grains were immersed in a bath with an iron sulfate solution in a ratio of 1 to 3. The treatment duration varied from 10 to 30 minutes in 5-minute increments. Thus, five samples were obtained. The sample with the shortest ultrasonic treatment time was selected as a control. Qualitative and quantitative evaluation of the grain after its cavitation treatment involved physical analysis methods such as electron paramagnetic resonance (EPR) and electrical impedance. The spectra were obtained on a Bruker Elexsys E580 spectrometer in the X-band. To make further analysis of the dissolution of iron ions in grain, the authors used the method of impedance spectroscopy in the frequency range between 1 Hz and 100 MHz. Based on the data obtained, they found that the introduction of iron ions leads to the greatest change in the real and imaginary components of the electrical impedance in the frequency range above 1000 Hz or in the β-dispersion region. This fact indicates good permeability of iron ions into the cell from the intercellular region through their insulating membrane. Further research will make it possible to develop an express method for determining the presence of iron ions in cereals.

Keywords: wheat grain; introduction of iron ions; saturation of grain with iron; ultrasonic cavitation; electrical impedance; electron magnetic resonance

For citation: Chzhan A.V., Nichkova N.M., Vorotynov A.M., Drokin N.A., M.A. Yanova. Enrichment of wheat grain with non-heme iron by ultrasonic cavitation. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2025;27(3):47-53 (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-47-53

Введение

Железо является одним из незаменимых микроэлементов, необходимых для активной жизнедеятельности человека. Одной из причин дефицита железа в организме человека является недостаточное его поступление с продуктами питания. Как известно, растительная пища содержит негемовое железо (в форме Fe^{3+}), и его усвояемость приблизительно на 15% ниже гемового (Fe^{2+}).

На нейтральных и щелочных почвах особенно проявляется дефицит железа в растениях. Железо в почве содержится преимущественно в виде хелата Fe^{3+}, и растения не могут его усваивать при высоком уровне pH щелочных почв. 30% возделываемых почв во всем мире являются известковыми и содержат мало доступного железа, поскольку оно присутствует в нерастворимых окисленных формах. Сложность перехода ионов железа в растворимое состояние создает проблему их поглощения корнями растений [1]. В последнее время отмечается падение уровня железа в сельскохозяйственных продуктах, так как продукция, полученная с помощью интенсифицированных технологий повышения урожайности, накапливает в основном углеводы без увеличения металло-протеинов [2].

Наиболее экономически эффективным подходом для профилактики дефицита железа в организме является обогащение им пищевых продуктов [3]. Во всем мире проводятся испытания эффективности обогащения железом национальных продуктов питания. Так, в Социалистической Республике Вьетнам 6-месячные испытания показали, что обогащение рыбного соуса железом может значительно уменьшить анемию и дефицит железа [4]. В Китае был проведен ряд исследований по оценке эффективности, результативности и целесообразности обогащения соевого соуса железом [4]. У населения Южной Африки, испытывающего дефицит железа, обогащение железом порошка

карри привело к значительному повышению уровня гемоглобина в крови и уровня ферритина [4].

В России обогащение зерна пшеницы железом является одним из возможных путей восполнения дефицита этого микроэлемента. Для обогащения зерен пшеницы ионами железа путем механического стимулирования химических реакций, протекающих в водной среде с участием солей железа, перспективным является применение ультразвуковой кавитации (УЗК) [5]. Обусловлено это тем, что в жидкости под действием ультразвука образуются области разрежения и сжатия, в результате чего возникают пульсирующие и схлопывающиеся пузырьки воздуха[1]. При воздействии ультразвуковой кавитации на раствор значительно ускоряется скорость химических реакций диссоциации растворенных в воде солей. Под действием ультразвука в кавитационной полости обработанной воды происходит образование активированных атомарного водорода и гидроксильной группы, пироксида водорода, свободных электронов, ионов водорода и гидроксильных ионов, ионизированной воды [6]:

$$\begin{aligned} H_2O &\rightarrow H_2O^+ + \bar{e} \\ H_2O &\rightarrow H^* + OH^- + \bar{e} \\ H_2O &\rightarrow OH^* + H^- + \bar{e} \\ OH^* + OH^* &\rightarrow H_2O_2 \\ H^* + H^* &\rightarrow H_2. \end{aligned} \quad (1)$$

Цель исследований: обработать зерна пшеницы в растворе сульфата железа при разной продолжительности ультразвуковой кавитации, выявить наличие негемового железа в зернах.

Материалы и методы

Для обогащения зерен пшеницы железом использовали раствор сульфата железа. Диссоциация такой соли имеет вид:

$$FeSO_4 \rightarrow Fe^{2+} + SO_4^{2-}. \quad (2)$$

Согласно данным [7] под действием кислорода, а также гидроксильных групп может происходить окисление Fe^{2+} и образование трехвалентного железа:

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \leftrightarrow Fe^{3+} + HO^* + H_2O. \quad (3)$$

Ультразвуковая кавитация способствует переходу гемового железа (Fe^{2+}) в негемовое (Fe^{3+}), так как происходит обогащение воды кислородом за счет ее перемешивания, а также образования гидроксильных групп.

[1] Пирсол И.С. Кавитация. М.: Мир, 1975. 94 с.

Насыщение зерна железом проводили на ультразвуковой установке Vilitek VBS-6D, работающей по принципу ультразвуковой ванны. Результаты исследований, проведенных ранее, показали, что оптимальной для кавитационной обработки зерновых является частота от 20 до 42 кГц [5, 8, 9]. Для исследований выбрали частоту 40 кГц, так как скорость насыщения зерна микроэлементами на данной частоте быстрее, чем на более низких частотах, а на качество насыщения это не влияет. Мощность излучателя составляла 180 Вт.

Зерна пшеницы погружали в ванну с раствором сульфата железа в пропорции 1:3 и смешивали под действием ультразвуковой обработки. Рабочие растворы солей готовили на основе бидистиллированной воды с концентрацией (в пересчете на металлы) 65 мг/л. Эксперимент проводили при исходной температуре раствора 35°С, которая в процессе обработки не превышала 60°С (при t = 67,5°С происходит полная клейстеризация крахмальных цепей).

После ультразвукового воздействия жидкость сливали, а полученное сырье направляли на сушку до влажности зерна 15%. Исследуемая партия состояла из 5 образцов, различающихся временем обработки (табл.).

Для качественной и количественной оценки результатов кавитационной обработки зерна в водном растворе сульфата железа использовали физические методы анализа – такие, как электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) и электрический импеданс. Исследования проводили в Институте физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук.

Спектры электронного магнитного резонанса сняли на спектрометре Bruker Elexsys E580 в X-диапазоне (f = 9 ГГц) при комнатной температуре. Размолотые в ступе зерна пшеницы плотно укладывали в стеклянные ампулы диаметром 2 мм. При записи спектров использовали следующие параметры: мощность сверхвысокочастотного (СВЧ)

Таблица

Продолжительность ультразвуковой обработки семян

Table

Duration of US seed treatment

№ образца *No. of a sample*	**Продолжительность воздействия, мин** *Duration of treatment, min*
1	10
2	15
3	20
4	25
5	30

излучения – 0,63 мВт; амплитуда модуляции – 0,7 Гс; частота модуляции – 100 кГц; ширина развертки магнитного поля – 5 кГс; время развертки – 40 с.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 показаны спектры электронно-парамагнитного резонанса для исследуемых образцов, которые состоят преимущественно из трех линий, принадлежащих трехвалентному иону железа (цифры *1*, *2*, *3* на спектрах). Линия *1* при значении магнитного поля H = 1,5 kЭ обусловлена практически изолированными друг от друга ионами Fe^{3+}, находящимися в сильно искаженном окружении из лигандов (это могут быть ионы C, O, N, H_2O). Широкая линия *2* при значении 3 kЭ обусловлена кластерами из большого количества взаимодействующих ионов Fe^{3+}, находящимися в зернах.

Узкий сигнал *3* вызван свободными радикалами. Кроме того, в образце № 5 наблюдается сигнал от небольшого количества ионов Mn^{2+}, который помечен стрелками.

Наличие или отсутствие ионов Fe^{2+} по приведенным спектральным линиям определить затруднительно.

Представленные кривые поглощения несколько отличаются от наблюдавшихся ранее спектров электронного парамагнитного резонанса на зернах пшеницы, различающихся по своей устойчивости к засухоустойчивому стрессу [10]. Авторы указали наличие в исследуемых зернах ионов Fe, Mn и Cu, находящихся в поле лигандов, а также углеводных радикалов, обнаруживаемых главным образом во внутренних частях зерен. Образование кластеров из ионов Fe^{3+}, наблюдаемых в нашем случае, можно объяснить действием ультразвуковой кавитации.

Из полученных данных можно заключить, что с увеличением времени обработки наблюдается рост сигналов от кластеров, образованных ионами трехвалентного железа (линия *2*), в то время как интенсивность линий *1* и *3* существенно не меняется. Отсюда следует, что с увеличением времени ультразвуковой обработки в основном происходит рост концентрации ионов железа внутри зерна. Практически не меняющаяся концентрация ионов железа вне зерна, находящихся в поле лигандов и свободных радикалов, по всей видимости, связана с сушкой до указанной влажности. Рост интенсивности указанных линий свидетельствует о росте концентраций ионов трехвалентного железа с ростом времени обработки зерен в ультразвуковой ванне.

Для дополнительного анализа растворения ионов в зерне использовали метод импедансной спектроскопии. Этот метод по сравнению с ЭПР практически более предпочтителен, так как не требует дорогого оборудования [11].

Измерение электрических свойств зерен пшеницы проводили с помощью анализатора спектров Elins 1500J и Agilent E5061B в диапазоне частот от 1 Гц до 100 МГц [12].

В качестве контроля взяли образец с наименьшим временем ультразвуковой обработки (образец № 1). На рисунках 2 и 3 частотная зависимость этого образца соответствует верхним кривым.

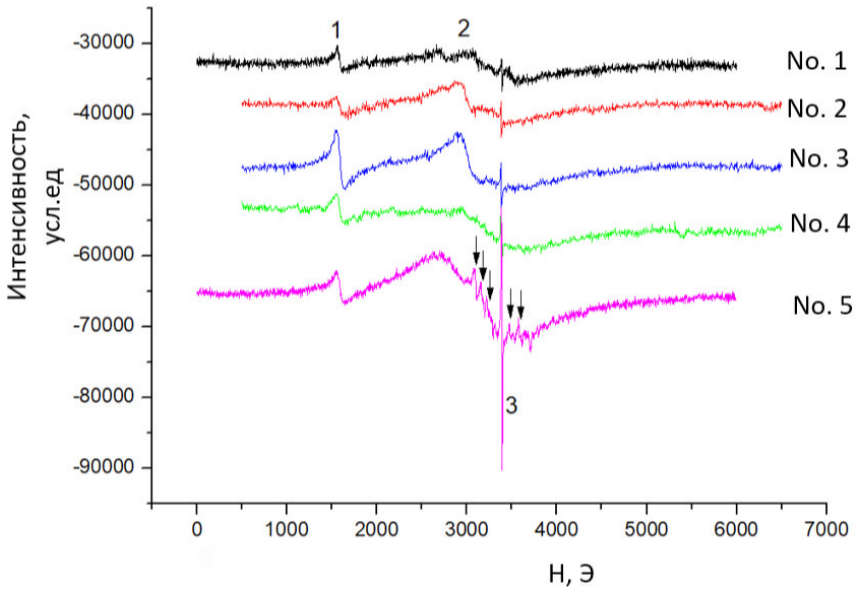


Рис. 1. Линии поглощения электронного парамагнитного резонанса зерен пшеницы в зависимости от напряженности магнитного поля в образцах с разным временем ультразвуковой обработки

Fig. 1. Electronic paramagnetic resonance absorption lines of wheat grains depending on the magnetic field strength in samples with different ultrasonic treatment duration

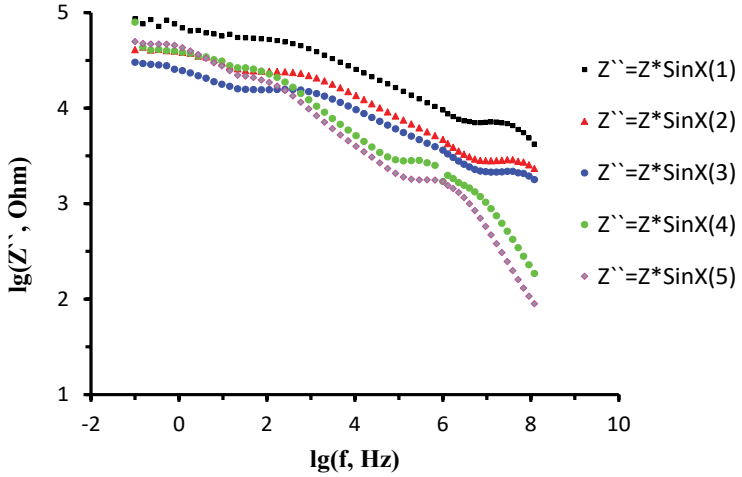


Рис. 2. Частотная зависимость мнимой части импеданса зерен пшеницы в образцах с разным временем ультразвуковой обработки

Fig. 2. Frequency dependency of the imaginary part of the impedance of wheat grains in samples with different ultrasonic treatment duration

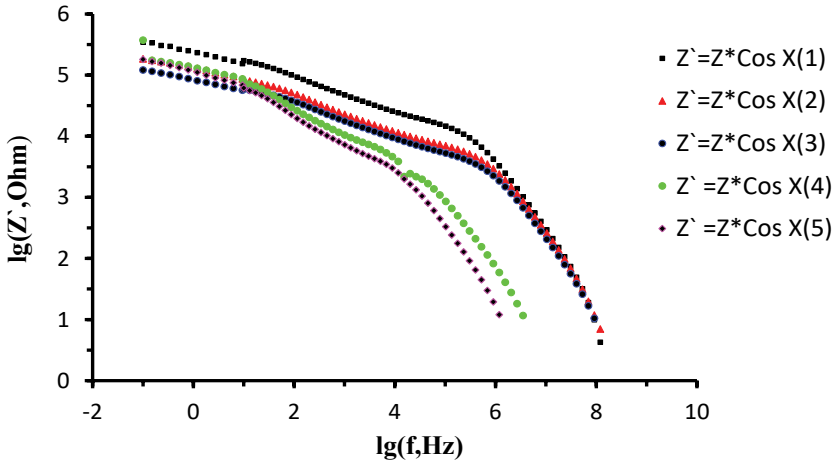


Рис. 3. Частотная зависимость действительной части импеданса зерен пшеницы в образцах с разным временем ультразвуковой обработки

Fig. 3. Frequency dependency of the real part of the impedance of wheat grains in samples with different ultrasonic treatment duration

Из рисунков 2 и 3 следует, что внедрение ионов железа приводит к уменьшению как действительной, так и мнимой частей электрического импеданса на частотах, превышающих 100 Гц.

На рисунке 4 показана зависимость относительной разницы между действительными частями импеданса Z_1' и Z_5' образцов № 1 и № 5 (максимально отличающихся по концентрации железа) от частоты электромагнитного поля. Как следует из рисунка 4, наибольшее отличие этой величины наблюдается в области частот свыше 1000 Гц или в области β-дисперсии [13]. Этот факт указывает на то, что ионы железа хорошо проходят сквозь мембрану, изолирующую клеточную часть структуры зерна от окружающего ее жидкого электролита.

Изменение относительной разницы между действительной частью импеданса Z_1'

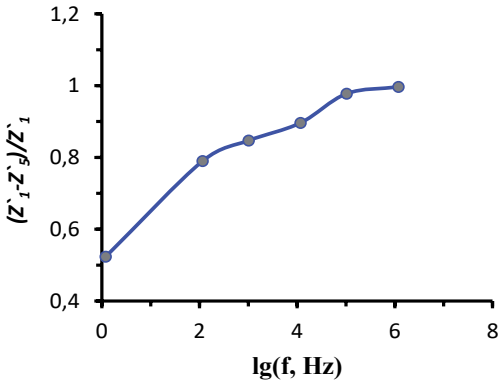


Рис. 4. Частотная зависимость относительного изменения разницы действительной части импеданса образцов 1 и 5

Fig. 4. Frequency dependency of the relative change in the difference in the real part of the impedance of samples No. 1 and 5

контрольного образца № 1 и действительной частью импеданса Z_i' остальных образцов (где i соответствует номеру образца 2, 3, 4, 5) показано на рисунке 5.

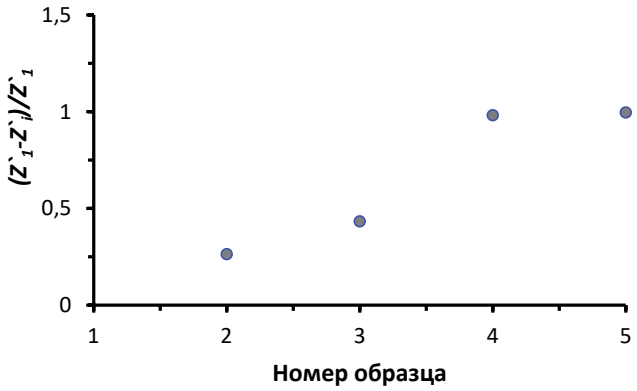


Рис. 5. Изменение действительной части импеданса образцов 2, 3, 4, 5 относительно контрольного образца 1

Fig. 5. Change in the real part of the impedance of samples No. 2, 3, 4, and 5 relative to control sample No. 1

Значения импедансов приведены для частоты 1 МГц. Рост указанной величины подтверждает увеличение концентрации ионов железа в зернах пшеницы с ростом длительности ультразвуковой обработки.

Выводы

1. Ультразвуковая обработка зерен пшеницы в водном растворе сульфата железа способствует обогащению зерен ионами Fe^{3+}, образуемыми в результате ультразвуковой кавитации.

2. С ростом длительности ультразвуковой обработки концентрация ионов железа внутри зерна увеличивается. Оптимальная продолжительность обработки составляет 25 мин.

3. Наибольшие отличия относительного изменения действительной и мнимой частей электрического импеданса образцов с разной степенью обработки наблюдали в области частот, превышающих 1000 Гц, или в области β-дисперсии, что указывает на хорошую проходимость ионов железа в клетку из межклеточной области сквозь изолирующую их мембрану.

Список источников

1. Rout G., Sahoo S. Role of iron in plant growth and metabolism. Reviews in Agricultural Science. 2015;3:1-24. https://doi.org/10.7831/ras.3.1

2. Мойсеенок А.Г., Мотылевич Ж.В., Черемисин А.С. и др. Эссенциальность и дефицит железа в питании: углубление известной проблемы нутрициологии // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2023. Т. 16, № 2(60). С. 31-39. EDN: UUKUAU

3. Hurrell R.F. Ensuring the efficacious iron fortification of foods: A tale of two barriers. Nutrients. 2022;14(8):1609. https://doi.org/10.3390/nu14081609

4. Allen L., de Benoist B., Dary O., Hurrell R. Guidelines on food fortification with micronutrients. World Health Organization and Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2006. 376 p. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43412/9241594012_eng.pdf

5. Способ обогащения крупяных продуктов микроэлементами: Патент № 2505078 C1 Российская Федерация, МПК A23L 1/10, A23L 1/304, A23K 1/00 / М.А. Янова, А.И. Гусев; заявл. 13.06.2012; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 3. EDN: BXZHZQ

6. Викулин П.Д., Викулина В.Б. Влияние ультразвука на изменение РН воды // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 4 (80). С. 3-8. EDN: GJJZRU

7. Муранов К.О. Реакция фентона in vivo и in vitro. Возможности и ограничения // Успехи биологической химии. 2024. Т. 64. С. 219-246. https://www.fbras.ru/wp-content/uploads/2024/02/7-Muranov.pdf

8. Способ обработки зерна при его подготовке к помолу: Патент RU2405629 C1, МПК B02B1/04, B02B1/08 / Ф.Я. Рудик, В.И. Русин, В.Г. Ребров, И.Ф. Савельев; заявка: 2009114059/13; заявл. 13.04.2009; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 34. EDN: YEJRDX

9. Галиев Б.Х., Ширнина Н.М., Байков А.С. и др. Влияние кавитационной обработки на химический состав, питательность и переваримость сухого вещества концентрированных кормов // Вестник мясного скотоводства. 2017. № 4 (100). С. 190-196. EDN: YLZXPC

References

1. Rout G., Sahoo S. Role of iron in plant growth and metabolism. *Reviews in Agricultural Science.* 2015;3:1-24. https://doi.org/10.7831/ras.3.1

2. Moiseenok A.G., Motylevich Zh.V., Cheremisin A.S., Moiseenok E.A., Katkovskaya I.N., Titko O.V., Azizbekyan S.G. Essentiality and iron deficiency in nutrition: deepening a well-known problem of nutrition. *Food Industry*: *Science and Technologies*. 2023;16(60):31-39. (In Russ.)

3. Hurrell R.F. Ensuring the efficacious iron fortification of foods: A tale of two barriers. *Nutrients*. 2022;14:1609. https://doi.org/10.3390/nu14081609

4. Allen L., de Benoist B., Dary O., Hurrell R. Guidelines on food fortification with micronutrients. World health organization and food and agriculture organization of the united nations. 2006. 376 p. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43412/9241594012_eng.pdf

5. Yanova M.A., Gusev A.I. Method for cereal products enrichment with microelements. Patent No. 2505078 C1 Russian Federation, IPC A23L 1/10, A23L 1/304, A23K 1/00, 2012. (In Russ.)

6. Vikulin P.D, Vikulina V.B. Effect of ultrasound on PH change in water. *Water and Ecology.* 2019;4(80):3-8. (In Russ.) https://doi.org/10.23968/2305-3488.2019.24.4.3-8

7. Muranov K.O. Fenton Reaction in vivo and in vitro. Possibilities and limitations. *Uspekhi biologicheskoy khimii*. 2024;64:219-246. (In Russ.)

8. Rudik F.J., Rusin V.I., Rebrov V.G., Savel'ev I.F. Method of treatment grain for its preparation for grinding: Patent No. 2405629 C1 Russian Federation, IPC B02B1/04, B02B1/08, 2009. (In Russ.)

9. Galiev B.Kh., Shirnina N.M., Baykov A.S., Miroshnikov I.S., Korneichenko V.I., Sechin V.A. Effect of cavitation treatment on chemical composition, nutritional value and digestibility of dry matter in concentrated feeds. *Vestnik myasnogo skotovodstva*. 2017;4:190-196. (In Russ.)

10. Labanowska M., Filek M., Kurdziel M., Bednarska E., Dłubacz A., Hartikainen H. Electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy characterization of wheat

10. Labanowska M., Filek M., Kurdziel M. et al. Electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy characterization of wheat grains from plants of different water stress tolerance. Journal of Plant Physiology. 2012;169(13):1234-1242. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.04.020

11. Чжан А.В., Дрокин Н.А., Ничкова Н.М., Мороз Ж.М. Особенности спектральных характеристик электрического импеданса увлажненных зерен пшеницы // Успехи современного естествознания. 2022. № 5. С. 34-38. https://doi.org/10.17513/use.37821

12. Чжан А.В., Дрокин Н.А., Ничкова Н.М., Мороз Ж.М. Метод импедансной спектроскопии для тестирования увлажненных зерен пшеницы // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2022. № 2 (63). С. 59-68. https://doi.org/10.31677/2072-6724-2022-63-2-59-68

13. Pliquett U. Bioimpedance: A review for food processing. Food Engineering Reviews. 2010;2:74-94. https://doi.org/10.1007/s12393-010-9019-z

10. Labanowska M., Filek M., Kurdziel M. et al. Electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy characterization of wheat grains from plants of different water stress tolerance. *Journal of Plant Physiology*. 2012;169(13):1234-1242. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.04.020

11. Chzhan A.V., Drokin N.A., Nichkova N.M., Moroz Zh.M. Features of the spectral characteristics of the electrical impendance of wetted wheat grains. *Advances in Current Natural Sciences.* 2022;5:34-38. (In Russ.) https://doi.org/10.17513/use.37821

12. Zhan A.V., Drokin N.A., Nichkova N.M., Moroz Zh.M. Impedance spectroscopy method for testing moistened wheat crops. *Bulletin of NSAU* (*Novosibirsk State Agrarian University*). 2022;(2):59-68. (In Russ.) https://doi.org/10.31677/2072-6724-2022-63-2-59-68

13. Pliquett U. Bioimpedance: A review for food processing. *Food Engineering Reviews*. 2010;2:74-94. https://doi.org/10.1007/s12393-010-9019-z

Информация об авторах

[1] **Чжан Анатолий Владимирович,** д-р физ.-мат. наук, профессор; avchz@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2978-1691; SPIN-код: 1428-7095, AuthorID: 623731

[2] **Ничкова Надежда Михайловна,** старший преподаватель, аспирант; nichkova_nm@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-1823-5687; SPIN-код: 5935-7919, AuthorID: 738915

[3] **Воротынов Александр Михайлович,** канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; sasa@iph.krasn.ru; SPIN-код: 2798-6062, AuthorID: 39560

[4] **Дрокин Николай Александрович,** д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; drokin@iph.krasn.ru; AuthorID: 56664

[5] **Янова Марина Анатольевна,** д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой; yanova.m@mail.ru; SPIN-код: 8788-9580, AuthorID: 489578

[1, 2, 5] Красноярский государственный аграрный университет; 660049, Российская Федерация, г. Красноярск, пр-кт Мира, 90

[2] Иркутский государственный университет путей сообщения. Красноярский институт железнодорожного транспорта; 660028, Российская Федерация, г. Красноярск, ул. Новая Заря, 2а

[3, 4] Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН; 660036, Российская Федерация, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50

Author Information

A.V. Chzhan[1], DSc (Phys-Math), Professor; avchz@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2978-1691

N.M. Nichkova[2], Senior Lecturer, postgraduate student; nichkova_nm@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-1823-5687

N.A. Drokin[3], DSc (Phys-Math), Senior Research Associate; drokin@iph.krasn.ru

A.M. Vorotynov[4], CSc (Phys-Math), Senior Research Associate; sasa@iph.krasn.ru

M.A. Yanova[5], DSc (Eng), Professor, the head of the department; yanova.m@mail.ru

[1,2,5] Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk; 660049, Russian Federation, Krasnoyarsk, Mira Ave., 90

[2] Irkutsk State Transport University. Krasnoyarsk Institute of Railway Transport; 660028, Russian Federation, Krasnoyarsk, Novaya Zarya Str., 2a

[3,4] Kirensky Institute of Physics (KIPh), Russian Academy of Sciences, SB RAS; 660036, Russian Federation, Krasnoyarsk, Akademgorodok Str., 50

Вклад авторов

А.В. Чжан – концептуализация, руководство исследованием, описание результатов и формирование выводов исследования, создание окончательной версии (доработка) рукописи;
Н.М. Ничкова – обзор источников литературы, подготовка графических материалов, проведение исследований, создание черновика рукописи и ее редактирование;
А.М. Воротынов – методология, проведение исследований, программное обеспечение, верификация данных;
Н.А. Дрокин – методология, проведение исследований, программное обеспечение, верификация данных;
М.А. Янова – методология, проведение исследований.

Конфликт интересов

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

Статья поступила в редакцию 17.01.2025; поступила после рецензирования и доработки 05.05.2025; принята к публикации 06.05.2025

Author Contribution

A.V. Chzhan – conceptualization, research supervision, formulation of results and conclusions, writing – review and editing of the manuscript;
N.M. Nichkova – literature review, visualization, investigation, writing – original draft preparation;
A.M. Vorotynov – methodology, investigation, software, data verification;
N.A. Drokin – methodology, investigation, software, data verification;
M.A. Yanova – methodology, investigation.

Conflict of interests

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

Received 17.01.2025; Revised 05.05.2025; Accepted 06.05.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 635.24:631.17:577.11
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-54-63

Эффективность технологии возделывания топинамбура с использованием влагоудерживающих суперабсорбирующих полимеров

***В.А. Бызов*[1], *А.А. Манохина*[2]✉, *В.И. Старовойтов*[3], *О.А. Старовойтова*[4], *Н.В. Воронов*[5]**

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья – филиал ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха»; п. Красково, Россия

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

[3, 4] Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха; п. Красково, Россия

[5] Российский государственный гидрометеорологический университет; г. Санкт-Петербург, Россия

[1] byzov1966@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0003-1918-4455

[2] a.manokhina@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-9785-1164

[3] agronir1@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-9365-7631

[4] agronir2@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8293-6579

[5] 7777777@mail.ru

Аннотация. Топинамбур – влаголюбивая культура. При отсутствии возможности проведения поливных работ на полях с посадками топинамбура предлагаем применить усовершенствованную технологию его возделывания. Цель исследований – выявить влияние технологии выращивания топинамбура с использованием влагоудерживающих суперабсорбирующих полимеров (САП) «Аквасин-Агро» в сочетании с дозами минеральных удобрений на урожайность клубней топинамбура сорта Омский белый. Эксперимент проводили в ФГБНУ ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха в течение 2017…2019 гг. на дерново-слабоподзолистой супесчаной почве в соответствии с требованиями методики полевого опыта Б.А. Доспехова и методики проведения исследований по культуре топинамбура. Эксперимент включал в себя 4 фона локального внесения минеральных удобрений при посадке (от 0 до 562,5 кг/га) и 5 доз САП при междурядной механической обработке (от 0 до 200 кг/га). При контроле минеральные удобрения и САП не вносили. В результате исследований разработали технологию для супесчаной почвы, которая включает в себя следующие основные операции: осеннюю зяблевую вспашку; весной – дискование тяжелой бороной и нарезку гребней; посадку с одновременным локальным внесением минеральных удобрений в дозе 375…562,5 кг/га; три междурядных механизированных обработки посадок; при первом механизированном уходе – локальное внесение суперабсорбирующих полимеров (САП) Аквасин (Агро) в сухую погоду на глубину 4…6 см в дозе 150…200 кг/га; визуальный осмотр посадок на наличие болезней и вредителей с последующим устранением в случае их обнаружения; скашивание зеленой массы через 5 месяцев после посадки; через 2 недели после скашивания зеленой массы – уборку клубней. Выполнение предложенных элементов технологии позволяет получить урожайность клубней топинамбура более 38,7…39,9 т/га при контроле 18,9 т/га и условный чистый доход в размере 250,6…267,8 тыс. руб/га. Необходимо продолжить исследования в данном направлении с изучением влияния сочетания технологического воздействия САП и минеральных удобрений, в том числе при одновременном локальном внесении.

Ключевые слова: топинамбур; технология возделывания топинамбура; минеральные удобрения; влагоудерживающие суперабсорбирующие полимеры; Аквасин-Агро; урожайность клубней топинамбура; условный чистый доход

Для цитирования: Бызов В.А., Манохина А.А., Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Воронов Н.В. Эффективность технологии возделывания топинамбура с использованием влагоудерживающих суперабсорбирующих полимеров // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 3. С. 54-63. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-54-63

© Бызов В.А., Манохина А.А., Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Воронов Н.В., 2025

ORIGINAL ARTICLE

Effectiveness of Jerusalem artichoke cultivation technology using moisture-retaining superabsorbent polymers

***V.A. Byzov*[1], *A.A. Manokhina*[2]✉, *V.I. Starovoitov*[3], *O.A. Starovoitova*[4], *N.V. Voronov*[5]**

[1] VNIIK – Branch of Russian Potato Research Centre; Kraskovo, Moscow region, Russia

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

[3,4] Russian Potato Research Centre (RCPR); Kraskovo, Moscow region, Russia

[5] Russian State Hydrometeorological University; Saint-Petersburg, Russia

[1] byzov1966@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0003-1918-4455

[2] a.manokhina@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-9785-1164

[3] agronir1@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-9365-7631

[4] agronir2@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8293-6579

[5] 7777777@mail.ru

Abstract. Jerusalem artichoke is a hygrophilous (moisture–loving) crop. If irrigation works are impossible in fields with Jerusalem artichoke plantings, it is feasible to apply an improved technology of Jerusalem artichoke cultivation. The aim of the study was to identify the effect of Jerusalem artichoke cultivation technology using moisture–retaining superabsorbent polymers (SAP) "Aquasin-Agro" in combination with doses of mineral fertilizers on the yield of Jerusalem artichoke tubers of the Omsk White variety. The experiment was conducted at A.G. Lorch Potato Research Center in the period between 2017 and 2019. on sod-slightly podzolic sandy loam soil in accordance with the requirements of B.A. Dospekhov's field experience methodology and methods of conducting research on Jerusalem artichoke crops. The experiment included four backgrounds of local application of mineral fertilizers during planting (from 0 kg/ha to 562.5 kg/ha) and five doses of SAP during row-to-row mechanized treatment (from 0 to 200 kg/ha). No mineral fertilizers or SAP were applied during the control (0 kg/ha). As a result of the research, the authors have a technology for sandy loam soil. The technology includes the following basic operations: autumn winter plowing; spring disking with a heavy harrow and cutting ridges; planting with simultaneous local application of mineral fertilizers at a dose of 375 kg/ha to 562.5 kg/ha; three row–by–row mechanized plantings; during the first mechanized care, local application of superabsorbent polymers (SAP) Aquasin (Agro) in dry weather to a depth of 4-6 cm at a dose of 150-200 kg/ha; visual inspection of plantings for diseases and pests, followed by their elimination if found; mowing of the green mass five months after planting, and the harvesting of tubers two weeks after mowing of the green mass. The implementation of the proposed technology elements makes it possible to obtain a yield of Jerusalem artichoke tubers of more than 38.7 to 39.9 t/ha with a control of 18.9 t/ha and a conditional net income ranging between 250.6 and 267.8 thousand rubles/ha. It is necessary to carry out further research to study of the effects of a combination of technological effects of SAP and mineral fertilizers, including simultaneous local application.

Keywords: Jerusalem artichoke; mineral fertilizers; moisture-retaining superabsorbent polymers; Aquasin-Agro; Jerusalem artichoke tuber yield; conditional net income

For citation: Byzov V.A., Manokhina A.A., Starovoitov V.I., Starovoitova O.A., Voronov N.V. Effectiveness of Jerusalem artichoke cultivation technology using moisture-retaining superabsorbent polymers. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2025;27(3):54-63 (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-54-63

Введение

Топинамбур является эффективной энергобиологической культурой как для сельскохозяйственных животных, так и для людей [1, 2]. В средней полосе России этот овощ можно выкапывать с середины апреля – начале мая, когда другие овощи еще не выросли.

Изучением этой культуры занимаются во многих регионах РФ: в областях Якутии [3] и Карелии [4]), в предгорной зоне Республики Северная Осетия-Алания [5], в лесостепи Западной Сибири [6] и Свердловской области [7], в условиях выщелоченных черноземов лесостепи Среднего Поволжья [8] и др.

Топинамбур – влаголюбивая культура, поэтому необходимо обеспечить его посадки влагой. В условиях изменяющегося климата и отсутствия возможности проведения поливных работ на полях с посадками топинамбура возможно применение суперабсорбирующих полимеров (САП), широко используемых при выращивании культур в разных странах [9-12].

Цель исследований: выявить влияние технологии выращивания топинамбура с использованием влагоудерживающих суперабсорбирующих полимеров (САП) «Аквасин-Агро» в сочетании с дозами минеральных удобрений на урожайность клубней топинамбура сорта Омский белый.

Материалы и методы

Эксперимент проводили в ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха» в течение 2015-2025 гг. Для определения эффективности суперабсорбентов выбрали трехлетний период (2017-2019 гг.) с наибольшим контрастом по влагообеспеченности. Опыты проводили на дерново-слабоподзолистой супесчаной почве: с высокой обменной и гидролитической кислотностью (pH_{KCl} = 4,4…4,9; Нг = 3,3…4,8 мг-экв/100 г почвы); низкой суммой поглощенных оснований и степенью насыщенности ими (S = 1,5…3,9 мг-экв/100 г почвы; V = 31,0…46,8%); высоким содержанием подвижного фосфора (267…354 мг/кг почвы); низким содержанием обменного калия (95…136 мг/кг почвы) и низкой гумусированностью (1,6…1,9% гумуса). Опыт закладывали согласно схеме методом систематического размещения делянок в четырехкратной повторности [9].

Агрометеорологические условия вегетационных периодов оказались разными: 2017 г. – удовлетворительные для роста и развития топинамбура; 2018 г. – неудовлетворительные; 2019 г. – относительно удовлетворительные, так как в фазу начала клубнеобразования отмечена длительная (более 2 недель) засуха. Средняя температура воздуха за вегетационный период в 2017 г. составила 16,2 °С, в 2018 г. – 18,7 °С, в 2019 г. – 17,4 °С. За период вегетации 2017 г. выпало 378,4 мм осадков (145,3% от нормы); в 2018 г. – 205,9 мм (79,04% от нормы); в 2019 г. – 292,3 мм (112,2% от нормы). Сумма эффективных температур (выше 10 °С) составила 1833,4; 2318,03; 2126,18 °С соответственно. Гидротермический коэффициент по Селянинову (ГТК), определяемый делением суммы осадков за расчетный период на сумму эффективных (>10°С) температур, уменьшенную в 10 раз за этот же период, был равен: в 2017 г. – 2,10; в 2018 г. – 0,94; в 2019 г. – 1,49. Данные метеоусловий подтверждают увеличение неравномерности уровня выпадения осадков, учащение засушливых периодов, повышение средней температуры воздуха по сравнению с данными среднемноголетних сведений прошлого века. Это отрицательно влияет на производство сельскохозяйственных культур, в том числе топинамбура.

Технология возделывания топинамбура включала в себя осеннюю зяблевую вспашку (ПЛН-3-35+МТЗ-82); весной – дискование тяжелой бороной (БДТ-3+МТЗ-82) и нарезку гребней (КРН-4,2+МТЗ-82). В опыте локальное внесение минеральных удобрений в запланированных дозах выполняли агрегатом КРН-4,2+МТЗ-82.

Посадку топинамбура сорта Омский белый проводили картофелесажалкой с ручной подачей клубней СН 4 БК, агрегатируемой с тракторами класса 1,4 (МТЗ-80/82, МТЗ-100/102), согласно стандартной технологии рядковой посадки пророщенных и непроращенных клубней топинамбура с одновременным внесением минеральных удобрений на всех типах почв и зон возделывания картофеля. Ширина междурядий составляла 75 см, густота посадки – 40 тыс. шт/га, площадь делянки – 25 м^2. Междурядную обработку выполняли культиватором-окучником навесным КРН-4,2; можно применить также культиватор КОН-2,8. Скашивание зеленой массы осуществляли косилкой-измельчителем роторной КИР-1,5. Уборку клубней проводили с помощью картофелекопателя КТН-2В с последующим подбором вручную. Дозу суперабсорбирующих полимеров расчитывали по формуле:

$$Д = [10000 \cdot Н / (Ш \cdot Р)] \cdot 10 = Н / (Ш \cdot Р)]10^5, \quad (1)$$

где Д – доза суперабсорбирующих полимеров, кг/га; Н – рекомендуемая норма, г/куст; Ш – ширина междурядий, см; Р – расстояние между клубнями в ряду, см.

Факторы

Фактор А – Фон минеральных удобрений (при посадке): 0 кг/га ($N_0P_0K_0$), 187,5 кг/га ($N_{30}P_{30}K_{30}$), 375 кг/га ($N_{60}P_{60}K_{60}$), 562,5 кг/га ($N_{90}P_{90}K_{90}$);

Фактор Б – Дозы суперабсорбирующих полимеров (САП) при междурядной механической обработке посадок: 0, 50, 100, 150, 200 кг/га.

Контроль – без минеральных удобрений и без внесения САП.

В опыте использовали суперабсорбирующие полимеры (САП) Аквасин (Агро) – сшитый сополимер калиевой и аммонийной солей акриловой кислоты в виде сыпучих белых гранул, разработанный компанией ООО «ПКФ Сингер» при поддержке ПАО «Татнефтехиминвест-холдинг» [9].

Влагоудерживающие суперабсорбирующие полимеры (САП) «Аквасин-Агро» являются эффективным поглотителем влаги, в том числе из воздуха, поэтому поставляются потребителям в герметичной упаковке разного веса. Вскрывать упаковку нужно непосредственно перед внесением в почву. Желательно вносить САП в сухую погоду на глубину 4…6 см, иначе гранулы могут «всплыть из почвы» на поверхность и снизить эффективность водопоглощения.

Топинамбур при посадке имеет свой запас влаги в материнском клубне, при посадке нет необходимости его поливать. Накопление влаги в зоне корневой системы будет происходить за счет как полива, так и осадков. Водный абсорбент вносится культиватором локально вместе с минеральными удобрениями на уходе, хотя можно вносить локально и сажалками при посадке. В любом случае необходимо использовать подкормочные приспособления или бункеры для внесения удобрений с ворошилками.

Закладка опыта, учеты и наблюдения проведены в соответствии с требованиями методики полевого опыта Б.А. Доспехова и «Методики проведения исследований по культуре топинамбура» [13].

Результаты и их обсуждение

Агротехнологии растениеводства являются уязвимыми и сильно зависят от воздействия складывающихся погодных условий. В связи с этим необходимы пересмотр существующих технологий и введение новых адаптационных технологий, а также изменение и дополнение технологических процессов в существующие технологии. Поскольку опыт выполняли в течение более трех лет, то предварительно мы провели обобщенный анализ гидротермического коэффициэнта (ГТК) за период вегетации по годам (табл. 1). Оказалось, что условия выращивания в годы исследований были разными: от 0,89 (2018 г.) до 2,16 (2016 г.). Средняя урожайность по годам также колебалась: от 23,7 т/га (2022 г.) до 43,3 т/га (2016 г.). Задаваясь тремя уровнями групп климатических условий (благоприятные, неблагоприятные и промежуточные), мы выбрали наиболее представительный трехлетний период (2017-2019 гг.) с совершенно разными метеорологическими условиями в соответствии с методом, рекомендуемым сотрудниками РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева [14].

Важным фактором, обусловливающим урожайность, является влажность почвы, напрямую зависящая от метеоусловий. В проведенном нами опыте по влиянию САП на фоне минеральных удобрений на урожайность клубней топинамбура сорта Омский белый получены результаты, представленные в таблице 2. Усредненная урожайность клубней топинамбура по всем вариантам варьировалась по годам: 42,4 т/га (2017 г.); 24,0 т/га (2018 г.); 28,9 т/га (2019 г.).

На формирование урожая топинамбура значительно влияет внесение разных доз минеральных удобрений. Для разработки рекомендаций по настройке открытия окна тукосбрасывателем агрегата для высева минеральных удобрений (Фактор А) на получение более высокой урожайности клубней топинамбура мы провели испытания с четырьмя дозами удобрений По результатам опыта в контрольном варианте без внесения минеральных удобрений (0 кг/га) усредненная урожайность клубней сорта Омский белый составила 29,4 т/га в 2017 г., 18,4 т/га в 2018 г., 21,6 т/га в 2019 г., в то время как на фоне внесения удобрений в дозе 187,5 кг/га – 42,5; 23,6; 27,4 т/га соответственно; на фоне удобрений 375 кг/га – 47,2; 28,7 и 32,3 т/га; на фоне удобрений 562,5 кг/га – 49,4; 25,1 и 34,2 т/га (рис. 1). Отметим, что наибольшая усредненная урожайность клубней топинамбура наблюдалась на фонах 375 кг/га и 562,5 кг/га.

Известно, что применение САП может значительно повлиять на урожайность. Но поскольку они пока являются недешевыми, необходимо выявить наименьшую достаточную дозу для повышения эффективности выполнения технологии. Нами проведены испытания с пятью дозами САП на разных фонах минеральных удобрений. При этом мы разделили выполнение этих операций: минеральные удобрения вносили при посадке, а САП – при уходе за посадками. Применение технологического

Таблица 1

Гидротермический коэффициент и средняя урожайность клубней топинамбура в годы исследований

Table 1

Hydrothermal coefficient (HTC) and average yield of Jerusalem artichoke tubers in the years of research

Показатель *Indicator*	**Год** / *Year*									
	2015	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**
ГТК / *HTC*	1,46	2,16	2,06	0,89	1,49	2,10	1,10	0,95	1,22	1,20
Средняя урожайность, т/га / *Average yield, t/ha*	27,8	43,3	42,1	24,0	28,9	42,3	24,6	23,7	26,3	26,3
НСР$_{05}$, общ. / *LSD$_{05}$, total*	2,56	8,43	8,25	4,36	1,94	8,06	1,66	1,76	2,02	1,99

[1] Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). Изд. 5-е, доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

[2] Гаспарян И.Н., Левшин А.Г., Ивашова О.Н. и др. Лучшие практики применения технологий по адаптации отрасли растениеводства к изменениям климата: Монография / И.Н. Гаспарян, А.Г. Левшин, О.Н. Ивашова, А.В. Гончаров, Н.Ф. Денискина, Ш.В. Гаспарян. М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024. 196 с. EDN: TLTRVI.

Таблица 2

Урожайность клубней топинамбура сорта Омский белый в зависимости от применения (САП) на фоне минеральных удобрений, т/га

Table 2

Yield of Jerusalem artichoke tubers of the Omsk White variety depending on the SAP application on the background of mineral fertilizers, t/ha

Фон удобрений, кг/га / *Fertilizer background, kg/ha*	**Доза САП, кг/га /** *SAP dose, kg/ha*	**2017 г.**	**2018 г.**	**2019 г.**	**Среднее** *Average*	**± к контролю** *Average ± to control*	
						т/га	**%**
0	Контроль 0,0	23,9	15,2	17,5	18,9	0	0
	50,0	25,8	16,2	19,1	20,4	1,5	7,8
	100,0	26,9	17,9	22,2	22,3	3,4	18,2
	150,0	33,4	20,3	23,9	25,9	7,0	36,9
	200,0	37,2	22,5	25,4	28,4	9,5	50,1
Среднее по дозе удобрений / *Average for the fertilizer dose*		29,4	18,4	21,6	23,2	–	–
187,5	0,0	39,6	21,6	25,7	29,0	0	0
	50,0	42,1	23,1	26,8	30,7	11,8	62,3
	100,0	42,8	23,9	27,2	31,3	12,4	65,6
	150,0	43,8	24,5	28,0	32,1	13,2	69,8
	200,0	44,1	25,0	29,5	32,9	14,0	73,9
Среднее по дозе удобрений / *Average for the fertilizer dose*		42,5	23,6	27,4	31,2	–	–
375	0,0	45,2	25,9	29,8	33,6	0	0
	50,0	45,6	26,4	31,0	34,3	15,4	81,7
	100,0	47,1	28,9	32,5	36,2	17,3	91,4
	150,0	48,5	30,8	33,0	37,4	18,5	98,1
	200,0	49,6	31,4	35,2	38,7	19,8	104,9
Среднее по дозе удобрений / *Average for the fertilizer dose*		47,2	28,7	32,3	36,0	–	–
562,5	0,0	47,9	21,5	31,0	33,5	0	0
	50,0	48,6	23,6	32,9	35,0	16,1	85,4
	100,0	49,7	24,2	33,4	35,8	16,9	89,2
	150,0	49,8	26,4	34,8	37,0	18,1	95,8
	200,0	51,2	29,9	38,7	39,9	21,0	111,3
Среднее по дозе удобрений / *Average for the fertilizer dose*		49,4	25,1	34,2	36,2	–	–
Среднее за год / *Average for the year*		42,1	24,0	28,9	–	–	–
$НСР_{05}$, общее / LSD_{05}, *total*		8,25	4,36	5,35	–	–	–
$НСР_{05}$, удобрения / LSD_{05}, *fertilizer*		7,75	3,69	4,86	–	–	–
$НСР_{05}$, САП / LSD_{05}, *SAP*		1,94	1,84	1,74	–	–	–

приема с внесением разных доз САП также повлияло на увеличение урожайности клубней топинамбура сорта Омский белый. Усредненная урожайность клубней возросла с 28,7 т/га (без внесения САП) до 35,0 т/га при внесении суперабсорбентов в дозе 200,0 кг/га (рис. 2). Наибольшей урожайность топинамбура оказалась в варианте с внесением САП в дозе 150…200 кг/га на высоком фоне удобрений 375 и 562,5 кг/га. Так, в среднем за 2017-2019 гг. получена урожайность 37,0…39,9 т/га, что выше урожайности в контроле на 18,1…21,0 т/га (95,8…111,3%).

Полученные данные показывают, что при благоприятных метеорологических условиях клубни топинамбура более отзывчивы к увеличению доз минеральных удобрений, чем к увеличению дозы САП. Наибольшая средняя за 3 года урожайность клубней топинамбура (более 35,0 т/га) наблюдалась на фонах удобрений 375 кг/га с дозой САП 100…200 кг/га и 562,5 кг/га с дозой САП 50…200 кг/га.

Отметим, с увеличением дозы минеральных удобрений выявлены увеличение затрат и снижение себестоимости (табл. 3): в контроле (без удобрений)

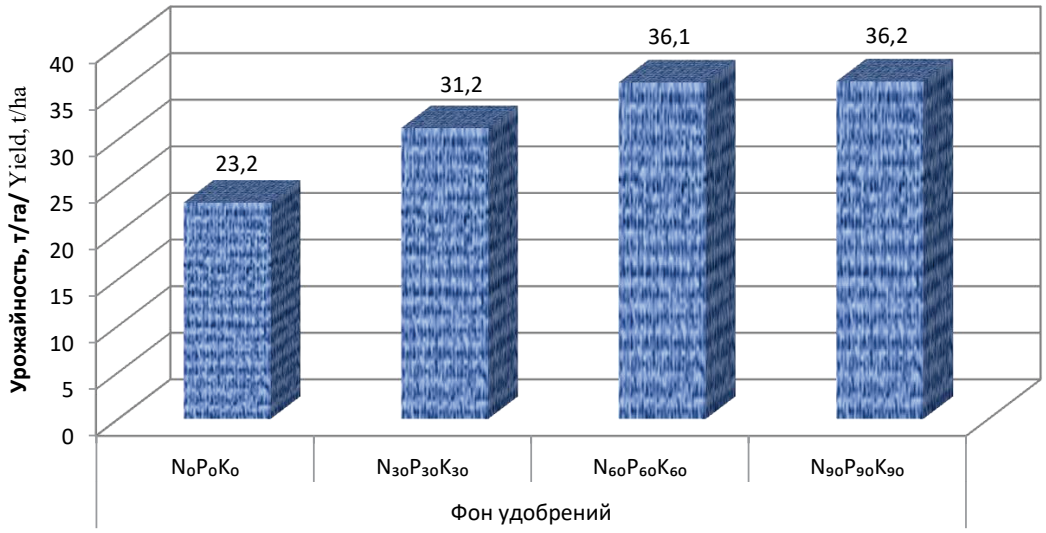


Рис. 1. Усредненная урожайность клубней топинамбура сорта Омский белый в зависимости от фона минеральных удобрений, т/га (2017-2019 гг.)

Fig. 1. Average yield of Jerusalem artichoke tubers of the Omsk White variety depending on the background of mineral fertilizers, t/ha (2017-2019)

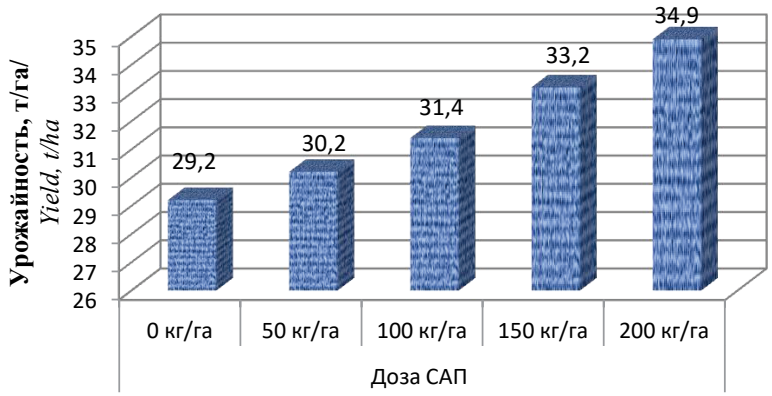


Рис. 2. Усредненная урожайность клубней топинамбура сорта Омский белый в зависимости от применяемой дозы САП, т/га (2017-2019 гг.)

Fig. 2. Average yield of Jerusalem artichoke tubers of the Omsk White variety depending on the applied dose of SAP, t/ha (2017-2019)

себестоимость составила 8,00 руб/кг; в вариантах с применением САП и без удобрений – 6,90…7,96 руб/кг; на фоне $N_{30}P_{30}K_{30}$-5,24…5,98 руб/кг; на фоне $N_{60}P_{60}K_{60}$-4,55…5,11 руб/кг; на фоне $N_{90}P_{90}K_{90}$-4,59…5,06 руб/кг.

Отметим, что наибольший условный чистый доход получен в вариантах с внесением минеральных удобрений в дозе 375 кг/га.

Несмотря на высокую стоимость суперабсорбирующих полимеров (224 тыс. руб/1,0 т), можно получить высокий условный чистый доход (УЧД). По мере увеличения дозы минеральных удобрений в вариантах без внесения суперабсорбирующих полимеров УЧД составил 150,7; 218,9 и 216,6 тыс. руб/га соответственно. В вариантах с внесением САП в количестве 50 кг/га УЧД составил 11,3; 165,0; 218,2 и 227,9 тыс. руб/га; при внесении САП в дозе 100 кг/га – 28,6; 162,8; 235,5 и 228,7 тыс. руб/га соответственно. В вариантах с внесением 150 кг/га УЧД составил 71,4; 163,6; 242,3 и 235,5 тыс. руб/га.

Наибольший усредненный условный доход (выручка минус затраты) в зависимости от фона удобрений 365,4 тыс. руб/га получен в вариантах с дозой 375 кг/га и 367,6 тыс. руб/га при внесении 562,5 кг/га (рис. 3).

Наилучшие сочетания фона минерального питания и доз САП по сравнению с вариантом без удобрений и без САП (контроль) представлены на рисунке 4.

Максимальный условный доход в размере 382,9 и 400,1 тыс. руб/га наблюдался в вариантах с внесением САП при междурядной обработке в дозе 200,0 кг/га на фоне удобрений 375 кг/га и 562,5 кг/га.

Таблица 3

Экономическая эффективность технологических воздействий (дозы удобрений и суперабсорбентов) при выращивании клубней топинамбура сорта Омский белый в Московской области (2017-2019 гг.)

Table 3

Economic efficiency of technological effects (doses of fertilizers and superabsorbents) in the cultivation of Jerusalem artichoke tubers of the Omsk White variety in the Moscow region (2017-2019)

Фон удобрений, кг/га *Fertilizer background, kg/ha*	**Доза САП, кг/га** *SAP dose, kg/ha*	**Общие затраты, тыс. руб/га** *Total costs, thousand rubles/ha*	**Себестоимость, тыс. руб/т** *Cost price, thousand rubles/t*	**Выручка, тыс. руб/га** *Revenue, thousand rubles/ha*	**Рентабельность, %** *Profitability, %*	**Условный доход, тыс. руб/га** *Conditional income, thousand rubles/ha*	**Условный чистый доход, тыс. руб/га** *Conditional net income, thousand rubles/ha*
Контроль (без удобрений) *Control (without fertilizers)*	0,0	151,2	8,00	283,5	187,5	132,3	0,0
Без удобрений *Without fertilizers*	50,0	162,4	7,96	306,0	188,4	143,6	11,3
	100,0	173,6	7,78	334,5	192,7	160,9	28,6
	150,0	184,8	7,14	388,5	210,2	203,7	71,4
	200,0	196,0	6,90	426,0	217,3	230,0	97,7
187,5	0,0	152,0	5,24	435,0	286,2	283,0	150,7
	50,0	163,2	5,32	460,5	282,2	297,3	165,0
	100,0	174,4	5,57	469,5	269,2	295,1	162,8
	150,0	185,6	5,78	481,5	259,4	295,9	163,6
	200,0	196,8	5,98	493,5	250,8	296,7	164,4
375	0,0	152,8	4,55	504,0	329,8	351,2	218,9
	50,0	164,0	4,78	514,5	313,7	350,5	218,2
	100,0	175,2	4,84	543,0	309,9	367,8	235,5
	150,0	186,4	4,98	561,0	301,0	374,6	242,3
	200,0	197,6	5,11	580,5	293,8	382,9	250,6
562,5	0,0	153,6	4,59	502,5	327,1	348,9	216,6
	50,0	164,8	4,71	525,0	318,6	360,2	227,9
	100,0	176,0	4,92	537,0	305,1	361,0	228,7
	150,0	187,2	5,06	555,0	296,5	367,8	235,5
	200,0	198,4	4,97	598,5	301,7	400,1	267,8
Среднее, за год *Average, for the year*		174,8	5,71	475,0	272,1	300,2	–
$НСР_{05}$, общ. / *LSD_{05}, total.*		15,86	1,15	87,00	46,78	81,55	–

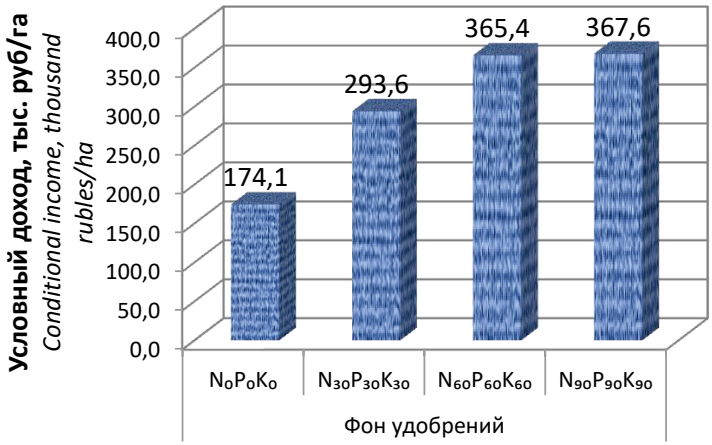


Рис. 3. Усредненный условный доход в зависимости от фона минеральных удобрений, т/га (2017-2019 гг.)

Fig. 3. Average conditional income depending on mineral fertilizer background, t/ha (2017-2019)

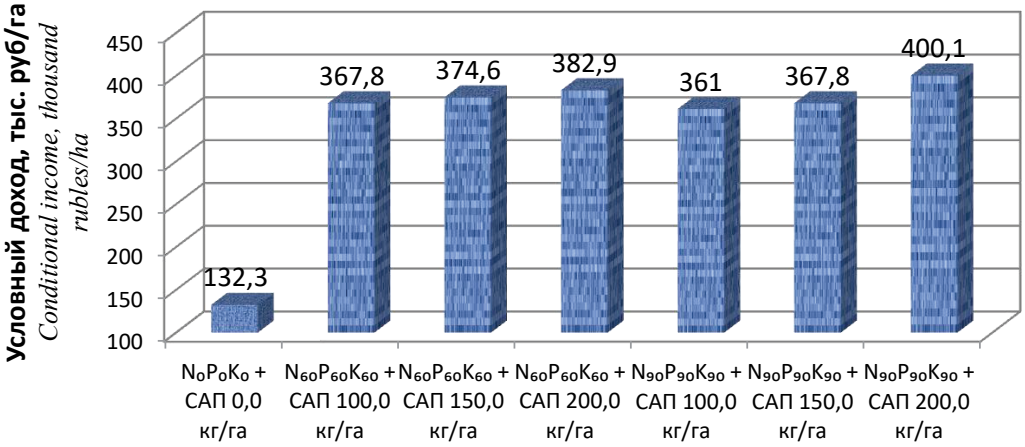


Рис. 4. Усредненный условный доход лучших вариантов по сравнению с контролем (2017-2019 гг.)

Fig. 4. Average conditional yield of the best variants compared to the control (2017-2019)

Выводы

1. В среднем за 2017-2019 гг. новая технология возделывания топинамбура с локальным внесением минеральных удобрений и САП позволила получить 36…40 т/га клубней по сравнению с контролем 23,3 т/га.

2. Технология для супесчаной почвы включает в себя следующие основные операции: осеннюю зяблевую вспашку; весной – дискование тяжелой бороной и нарезку гребней; посадку с одновременным локальным внесением минеральных удобрений в дозе 375 кг/га ($N_{60}P_{60}K_{60}$) или 562,5 кг/га ($N_{90}P_{90}K_{90}$); три междурядных механизированных обработки посадок; при первом механизированном уходе – локальное внесение суперабсорбирующих полимеров (САП) Аквасин (Агро) в сухую погоду на глубину 4…6 см в дозе 150…200 кг/га; визуальный осмотр посадок на наличие болезней и вредителей с последующим устранением в случае их обнаружения; скашивание зеленой массы через 5 месяцев после посадки; через 2 недели после скашивания зеленой массы – уборку клубней. Выполнение предложенных элементов технологии позволяет получить условный (выручка минус расходы) доход в размере 382,9…400,1 тыс. руб/га.

3. В связи с изменением климатических условий значительно увеличивается количество засушливых периодов, и влагосбережение становится актуальной задачей. Одним из эффективных технологических приемов является применение САП в сочетании с минеральными удобрениями. Необходимо продолжить исследования в данном направлении с изучением влияния сочетания технологического воздействия САП и минеральных удобрений, в том числе при одновременном локальном внесении.

Список источников

1. Коротков В.Д., Масловский С.А., Винокурова Е.В. Сравнительная оценка современных сортов топинамбура как сырья для производства инулина // Современные тенденции развития науки и мирового сообщества в эпоху цифровизации: Сборник материалов XX Международной научно-практической конференции (шифр – МКСТР), Москва, 2023. М.: ООО «Издательство АЛЕФ», 2023. С. 89-93. https://doi.org/110.34755/IROK.2023.74.84.018

2. Манохина А.А., Старовойтов В.И., Жевора С.В., Старовойтова О.А. Влияние молекулярной сушки на физико-химические параметры и антиоксидантную активность клубней топинамбура // Техника и оборудование для села. 2023. № 5. С. 27-31. EDN: SMURCQ

3. Каримов Ф.Х., Владимирова С.А. Выращивание топинамбура в условиях криолитозоны // Открывая Арктику для себя и других: Сборник научных статей научно-практической конференции ФГБОУ ВО «Арктический ГАТУ», Якутск, 2023. Якутск: Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 2023. С. 48-52. EDN: TZNYEL

4. Евстратова Л.П., Кондратюк Е.А. Экономическая и энергетическая эффективность многолетних агрофитоценозов с участием топинамбура в условиях Карелии // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2023. № 3. С. 28-31. https://doi.org/10.31857/2500-2082/2023/3/28-31

5. Бацазова Т.М. Влияние способов посадки топинамбура на урожайность и качество продукции в предгорной зоне РСО-Алания // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 97-8. С. 83-85. https://doi.org/10.18411/trnio-05-2023-451

6. Бузовский М.В., Христич В.В. Приемы возделывания топинамбура в лесостепи Западной Сибири // Каталог выпускных квалификационных работ ФГБОУ ВО Омский ГАУ. Серия «Агробиотехнология»: Сборник материалов по итогам научно-исследовательской деятельности, Омск, 2023. Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2023. С. 44-46. EDN: JZAWEL

7. Хасанова Э.Р., Шадрин В.А., Гринец Л.В. Прогноз, оценка целесообразности и экономическая оценка выращивания топинамбура на территории Свердловской области // Молодежь и наука. 2023. № 11. Порядковый номер 76. EDN: LKUOBR

8. Варламова Е.Н. Ресурсосберегающая технология возделывания топинамбура // Ресурсосберегающие технологии и технические средства для производства продукции растениеводства и животноводства: Сборник статей IX Международной научно-практической конференции, Пенза, 2024. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2024. С. 26-29. EDN: AVPNHP

9. Starovoitova O.A., Manokhina A.A., Pekhal'skij M.I. Effect of superabsorbing polymers on potato yield. IOP conference series: Earth and Environmental science. 2019;395:012058. https://doi.org/10.1088/1755-1315/395/1/012058

10. Satriani A., Catalano M., Scalcione E. The role of superabsorbent hydrogel in bean crop cultivation under deficit irrigation conditions: A case-study in Southern Italy. Agricultural Water Management. 2018;195:114-119. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.008

11. Suresh R., Prasher S.O., Patel R.M. et al. Super absorbent polymer and irrigation regime effects on growth and water use efficiency of container-grown cherry tomatoes. Transactions of the ASABE. 2018;61(2):523-531. https://doi.org/10.13031/trans.12285

12. Козлов И.Г., Петрова М.А., Бочарников И.И., Денискина Н.Ф. Устойчивое возделывание картофеля в условиях изменения климата // Плодородие. 2023. № 4 (133). С. 33-36. EDN: GMEFXC

References

1. Korotkov V.D., Maslovsky S.A., Vinokurova E.V. Comparative assessment of modern varieties of Jerusalem artichoke as raw materials for the production of inulin. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i mirovogo soobshchestva v epokhu tsifrovizatsii*: *Proceedings of XX International scientific and practical conference* (*MKSTR*) Moscow, OOO "Izvatelstvo ALEF", 2023. Pp. 89-93. (In Russ.) https://doi.org/110.34755/IROK.2023.74.84.018

2. Manokhina A.A., Starovoitov V.I., Zhevora S.V., Starovoitova O.A. Influence of molecular drying on physicochemical parameters and antioxidant activity of Jerusalem artichoke tubers. *Machinery and Equipment for Rural Area.* 2023;5:27-31. (In Russ.)

3. Karimov F.Kh., Vladimirova S.A. Cultivation of Jerusalem artichoke under cryolithozone conditions. *Otkryvaya Arktiku dlya sebya i drugikh*: Proceedings of the Scientific-practical conference of Arctic State Agrotechological University, Yakutsk, 2023. North-Eastern Federal University in Yakutsk. 2023. Pp. 48-52. (In Russ.)

4. Evstratova L.P., Kondratyuk E.A. Economic and energy efficiency of perennial agrophytocenoses with the Jerusalem artichoke participation in the Karelia conditions. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2023;3:28-31. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/2500-2082/2023/3/28-31

5. Batsazova T.M. Influence of Jerusalem artichoke planting methods on yield and product quality in the foothill zone of RNO-Alania. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2023;97-8:83-85. (In Russ.) https://doi.org/10.18411/trnio-05-2023-451

6. Buzovsky M.V., Khristich V.V. Techniques for cultivating Jerusalem artichoke in the forest-steppe of Western Siberia. Catalog of graduate qualification works of FSBEI HE Omsk SAU: "Agrobiotechnology" series: Collection of materials based on the results of research activities. Omsk, 2023. Omsk: Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin. 2023. Pp. 44-46. (In Russ.)

7. Khasanova E.R., Shadrin V.A., Grinets L.V. Forecast, assessment of feasibility and economic assessment of growing Jerusalem beautiful in the territory of the Sverdlovsk region. *Molodezh i nauka*. 2023;11:76. (In Russ.)

8. Varlamova E.N. Resource-saving technology of Jerusalem artichoke cultivation: *Proceedings of IX International scientific and practical conference*. Penza, 2024. Penza: Penza State Agrarian University. Pp. 26-29. (In Russ.)

9. Starovoitova O.A., Manokhina A.A., Pekhal'skij M.I. Effect of superabsorbing polymers on potato yield. IOP conference series: *Earth and Environmental science*. 2019;395:012058 https://doi.org/10.1088/1755-1315/395/1/012058

10. Satriani A., Catalano M., Scalcione E. The role of superabsorbent hydrogel in bean crop cultivation under deficit irrigation conditions: A case-study in Southern Italy. *Agricultural Water Management*. 2018;195:114-119. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.008

11. Suresh R., Prasher S.O., Patel R.M. et al. Super absorbent polymer and irrigation regime effects on growth and water use efficiency of container-grown cherry tomatoes. *Transactions of the ASABE*. 2018;61(2):523-531. https://doi.org/10.13031/trans.12285

12. Kozlov I.G., Petrova M.A., Bocharnikov I.I., Deniskina N.F. Sustainable potato cultivation in the context of climate change. *Plodorodie*. 2023;4;33-36. (In Russ.)

13. Starovoitov V.I., Starovoitova O.A., Manokhina A.A. Methodology of doing research on Jerusalem artichoke crops. *Vestnik of Moscow Goryachkin State Agroengineering University*. 2018;1:7-14. (In Russ.) https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-1-7-14

13. Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Манохина А.А. Методика проведения исследований по культуре топинамбура // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2018. № 1 (83). С. 7-14. https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-1-7-14

14. Gasparyan I.N., Levshin A.G., Ivashova O.N., Deniskina N.F., Gasparyan Sh.V. Features of the choice of potato (solanum tuberosum) varieties when growing two harvests in the temperate zone of Russia. Brazilian Journal of Biology. 2024;84:1-9. https://doi.org/10.1590/1519-6984.278272

14. Gasparyan I.N., Levshin A.G., Ivashova O.N., Deniskina N.F., Gasparyan Sh.V. Features of the choice of potato (solanum tuberosum) varieties when growing two harvests in the temperate zone of Russia. *Brazilian Journal of Biology*. 2024;84:1-9. https://doi.org/10.1590/1519-6984.278272

Информация об авторах

[1] **Бызов Василий Аркадьевич,** канд. с.-х. наук; byzov1966@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0003-1918-4455; SPIN-код: 5971-1449, AuthorID: 1053097

[2] **Манохина Александра Анатольевна,** д-р с.-х. наук, доцент; a.manokhina@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-9785-1164; SPIN-код: 5971-1449, AuthorID: 1053097

[3] **Старовойтов Виктор Иванович,** д-р техн. наук, профессор; agronir1@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-9365-7631; SPIN-код: 2929-1670, AuthorID: 442359

[4] **Старовойтова Оксана Анатольевна,** д-р с.-х. наук; agronir2@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8293-6579; SPIN-код: 2971-1484, AuthorID: 580052

[5] **Воронов Николай Вячеславович,** канд. техн. наук, доцент; 7777777@mail.ru; SPIN-код: 2036-6303, AuthorID: 843523

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья – филиал ФГБНУ ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха; 140051, Российская Федерация, Московская область, Люберецкий район, п. Красково, ул. Лорха, 23, литер В

[2] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

[3,4] Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха; 140051, Российская Федерация, Московская область, Люберецкий район, п. Красково, ул. Лорха, 23, литер В

[5] Российский государственный гидрометеорологический университет; 192007, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79

Author Information

Vasiliy A. Byzov [1], CSc (Ag); byzov1966@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0003-1918-4455

Aleksandra A. Manokhina [2], DSc (Ag); a.manokhina@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-9785-1164;

Viktor I. Starovoitov [3], DSc (Eng); agronir1@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-9365-7631

Oksana A. Starovoitova [4], DSc (Ag); agronir2@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8293-6579

Nikolay V. Voronov [5], CSc (Eng); 7777777@mail.ru

[1] VNIIK – Branch of Russian Potato Research Centre; 140051, Russian Federation Moscow region, Lyubertsy district, Kraskovo, Lorkha Str., 23, liter V

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

[3,4] Russian Potato Research Centre (RCPR); 140051, Russian Federation, Moscow region, Lyubertsy district, Kraskovo, Lorkha Str., 23, liter V

[5] Russian State Hydrometeorological University; 192007, Russian Federation, Saint-Petersburg, Voronezhskaya Str., 79

Вклад авторов

Бызов В.А. – проведение исследований, формальный анализ, создание черновика рукописи, формулирование общих выводов;
Старовойтов В.И. – научное руководство исследованиями, формулирование основных направлений исследований, цели и задач, формулирование общих выводов;
Старовойтова О.А. – методология проекта, проведение исследований, формальный анализ, формулирование общих выводов, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
Манохина А.А. – анализ источников литературы для постановки цели, создание черновика рукописи, формулирование общих выводов, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
Воронов Н.В. – проведение исследований, визуализация, формулирование общих выводов.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 04.09.2024, после рецензирования и доработки 29.04.2025; принята к публикации 30.04.2025

Author Contribution

V.A. Byzov – investigation, formal analysis, writing – original draft, general conclusions;
A.A. Manokhina – literature review, conceptualization, writing – original draft, review and editing of the manuscript; general conclusions;
V.I. Starovoitov – research supervision, conceptualization, general conclusions;
O.A. Starovoitova – methodology, investigation, formal analysis, general conclusions, writing – review and editing of the manuscript;
N.V. Voronov – investigation, visualization, general conclusions.

Conflict of interest

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

Received 04.09.2024; Revised 29.04.2025; Accepted 30.04.2025

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 621.77.04:669:631.3
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-64-73

Теоретическое обоснование использования металлических многослойных структур при изготовлении и ремонте сельскохозяйственной техники

***Н.К. Толочко*[1], *П.В. Авраменко*[2]✉, *В.Б. Кравцов*[3], *П.В. Голиницкий*[4]**

[1, 2, 3] Белорусский государственный аграрный технический университет; г. Минск, Беларусь

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

[1] n.tolochko1951@mail.ru

[2] minsk888@mail.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-8420-3977

[3] kravcovslava@tut.by

[4] gpv@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7303-1658

Аннотация. Усталостное разрушение – наиболее часто встречающийся вид отказов деталей сельскохозяйственной техники. При создании деталей сельскохозяйственной техники некоторые ученые предлагают использовать металлические многослойные структуры. С целью обоснования использования металлических многослойных структур, а также определения возможных путей повышения их усталостной прочности провели аналитический обзор научной литературы по вопросам усталостного разрушения многослойных металлических структур. Рассмотрели особенности реализации аддитивной технологии листового ламинирования на примере изготовления деталей сельскохозяйственной техники. Определили характер влияния толщины, количества и свойств слоев и межслойных границ на усталостную прочность металлических образцов с многослойной структурой, получаемых с помощью традиционных технологий сваркой взрывом или горячей пакетной прокаткой, и деталей с подобной многослойной структурой, получаемых с использованием аддитивной технологии листового ламинирования. Рассмотрели пример усталостного разрушения детали с механическим и клеевым соединением слоев. На основе результатов проведенного анализа предложили технические подходы к аддитивному изготовлению металлических деталей с многослойной структурой, обеспечивающие повышение их усталостной прочности. Дали рекомендации по выбору исходных металлических листов для вырезки листовых выкроек, по установлению толщины и общего количества выкроек, по формированию отверстий в выкройках, служащих для их соединения механическим крепежом, а также для уменьшения массы в рамках топологической оптимизации. Задачей дальнейших исследований прочностных свойств металлических многослойных структур является экспериментальное определение характера зависимости усталостного разрушения детали от количества составляющих ее слоев.

Ключевые слова: металлические многослойные структуры; количество слоев; толщина слоев; усталостная прочность; усталостное разрушение; усталостная трещина; аддитивная технология листового ламинирования

Для цитирования: Толочко Н.К., Авраменко П.В., Кравцов В.Б., Голиницкий П.В. Теоретическое обоснование использования металлических многослойных структур при изготовлении и ремонте сельскохозяйственной техники // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 3. С. 64-73. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-64-73

© Толочко Н.К., Авраменко П.В., Кравцов В.Б., Голиницкий П.В., 2025

ORIGINAL ARTICLE

Theoretical grounds for the use of metal multilayer structures in the manufacturing and repair of agricultural machinery

***N.K. Tolochko*[1], *P.V. Auramenka*[2]✉, *V.B. Kravtsov*[3], *P.V. Golinitskiy*[4]**

[1,2,3] Belarusian State Agrarian Technical University; Minsk, Belarus

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

[1] n.tolochko1951@mail.ru

[2] minsk888@mail.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-8420-3977

[3] kravcovslava@tut.by

[4] gpv@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7303-1658

Abstract. Fatigue failure is the most common type of failure of agricultural machinery parts. When designing parts of agricultural machinery, some scientists suggest using metal multilayer structures. In order to justify the use of metal multilayer structures, as well as to determine the possible ways to increase their fatigue strength, the authors conducted an analytical review of scientific literature on fatigue failure of metal multilayer structures. They considered some specific features of the implementation of the additive technology of sheet lamination using the case of manufacturing agricultural machinery parts. As a result, they have determined the influence of thickness, number and properties of layers and interlayer boundaries on the fatigue strength of metal samples with a multilayer structure, obtained using the conventional technologies by explosion welding or hot packet rolling, and parts with similar multilayer structure, obtained using the additive sheet lamination technology. The authors considered an example of fatigue failure of a part with mechanical and adhesive bonding of layers. Based on the analysis results, they proposed technical approaches to the additive manufacturing of metal parts with a multilayer structure, providing an increase in their fatigue resistance. They have offered recommendations on the selection of initial metal sheets for cutting out sheet patterns, on determining thickness and total number of the patterns, on making holes in the patterns serving to connect them with mechanical fasteners, as well as to reduce weight to ensure topological optimization. The task of further research of strength properties of metal multilayer structures is the experimental determination of the relationship type between the fatigue failure of a part and the number of its composition layers.

Keywords: metal multilayer structures; number of layers; layer thickness; fatigue strength; fatigue failure; fatigue crack; additive sheet lamination technology

For citation: Tolochko N.K., Auramenka P.V., Kravtsov V.B., Golinitskiy P.V. Theoretical grounds for the use of metal multilayer structures in the manufacturing and repair of agricultural machinery. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2025;27(3):64-73 (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-64-73

Введение

Надежность и качество сельскохозяйственной техники складываются из множества составляющих [1]. В процессе эксплуатации чаще всего наблюдаются постепенные отказы, которые теоретически и практически можно спрогнозировать. Особенно важна проектная оценка надежности, в том числе путем изменения параметров прочности, износостойкости, точности и др. [2]. Усталостное разрушение является одним из наиболее часто встречающихся видов отказов деталей сельскохозяйственной техники. Оно имеет место при воздействии на детали циклически изменяющихся во времени нагрузок, приводящих к зарождению усталостных трещин и их дальнейшего развития вплоть до окончательного разрушения деталей.

Для повышения усталостной прочности деталей применяются различные технические подходы к совершенствованию их конструкции. Поскольку большинство деталей сельскохозяйственной техники являются металлическими, то один из таких подходов, применяемых при их изготовлении, связан с целенаправленным созданием металлических многослойных структур.

В последние годы выполнен ряд экспериментальных исследований усталостной прочности металлических образцов с многослойной (слоистой) структурой (Т-М-структурой), создаваемой по традиционным технологиям путем соединения листов металлов между собой сваркой взрывом или горячей пакетной прокаткой [3-8]. Т-М-структуры обычно состоят из чередующихся слоев двух разнородных металлов (чаще всего сталей разных марок), то есть представляют собой слоистые композиты, но иногда они содержат слои одинакового состава. Металлические образцы с Т-М-структурой (Т-М-образцы)

обладают более высокой усталостной прочностью по сравнению с соответствующими металлическими образцами с обычной монолитной структурой и служат в качестве заготовок, из которых, используя различные способы металлообработки, изготавливают металлические детали.

При изготовлении деталей сельскохозяйственной техники все большее распространение находят различные виды аддитивных технологий, позволяющие создавать детали из металлов[1]. Среди них особое место занимает аддитивная технология листового ламинирования (Sheet Lamination, SL), согласно которой детали получают путем пакетирования специально приготовленных контурных выкроек из листовых металлов и их соединения между собой различными способами (в основном с помощью механического крепежа и клея) [9]. Получаемые с помощью SL-технологии металлические детали имеют многослойную (слоистую) структуру (SL-M-структуру), подобную металлическим T-M-образцам. Следует ожидать, что получаемые таким образом металлические детали (SL-M-детали) так же, как и экспериментальные металлические T-M-образцы, обладают повышенной усталостной прочностью. Поэтому в практическом отношении важно рассмотреть в сравнении факторы, обусловленные конструктивными особенностями металлических T-M-образцов и металлических SL-M-деталей и влияющие на усталостную прочность тех и других, чтобы определить возможные пути повышения усталостной прочности SL-M-деталей с учетом технологических особенностей их аддитивного изготовления.

Цель исследований: провести сравнительный анализ влияющих на усталостную прочность факторов, обусловленных конструктивными особенностями металлических T-M-образцов и SL-M-деталей, с целью возможного применения аддитивной технологии листового ламинирования при изготовлении деталей несущих систем и рабочих органов сельскохозяйственной техники, в том числе для снижения их металлоемкости.

Материалы и методы

На основе аналитического обзора научно-информационных источников (научных статей, материалов научных конференций, диссертаций), посвященных вопросам усталостной прочности экспериментальных металлических образцов с многослойной структурой, получаемых соединением листов металлов сваркой взрывом или горячей пакетной прокаткой, установили факторы, обусловленные конструктивными особенностями и оказывающие влияние на усталостную прочность экспериментальных образцов, и определили характер этого влияния. Рассмотрели влияние толщины, количества и свойств слоев и межслойных границ на усталостную прочность многослойных образцов и деталей, обладающих, подобно образцам, многослойной структурой, получаемой при изготовлении деталей с использованием аддитивной технологии листового ламинирования. При проведении обзорно-аналитических исследований использовали методы обобщения и систематизации научных данных. С учетом результатов проведенного анализа определили и обосновали технические подходы к аддитивному изготовлению металлических деталей с многослойной структурой, обеспечивающие повышение их усталостной прочности.

Результаты и их обсуждение

Для прямого создания деталей из металла разработан ряд аддитивных технологий, основанных на селективной термообработке металлического порошка или проволоки, осуществляемой лазерным (Selective Laser Melting, Laser Metal Deposition) или электронным лучом (Electron Beam Melting, Electron Beam Freeform Fabrication), а также плазмой (Ion Fusion Formation) или электродуговым разрядом (Gas metal arc welding). В связи с высокой стоимостью технологического оборудования (3D-принтеров), малыми размерами рабочей зоны построения, низкой производительностью, обусловленной присущим им последовательно-фрагментарным характером формирования наращиваемых слоев строительного материала, эти технологии не получили широкого распространения.

Принципиально отличается от них SL-технология, позволяющая создавать детали из металлических листов. В практическом отношении наиболее интересен один из вариантов этой технологии – CSB-SL-технология, которая реализуется по схеме «cut-stack-bond» (CSB) с такой последовательностью операций: контурный раскрой листового металла (лазером или фрезой), пакетирование листовых выкроек и их соединение между собой. Эта технология характеризуется: сравнительно малой стоимостью технологического оборудования – раскроечных станков; большими размерами рабочей зоны построения, которые определяются размерами раскройного стола и достигают 1-2 м и более; высокой производительностью, поскольку создаваемая деталь наращивается сразу же готовыми слоями – листовыми выкройками [9].

[1] Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.

В последние несколько лет в БГАТУ разрабатывается SL-технология и изготавливаются металлические SL-M-детали машин. Примером реализации SL-технологии является грядиль оборотного плуга с многослойной структурой, состоящий из листовых выкроек, вырезанных лазером из стальных листов и стянутых болтами в пакет [10].

Уменьшение массы сельхозтехники позволяет снизить расход топлива и повысить энергоэффективность эксплуатации. Для уменьшения массы грядиля проводили топологическую оптимизацию конструкции листовых выкроек, которая сводилась к созданию в них, наряду с отверстиями, служащими для установки болтов, дополнительных, более крупных сквозных отверстий. На рисунке 1 показаны внешний вид листовых выкроек с оптимизированной топологией и собранный из них SL-M-грядиль. Благодаря топологической оптимизации масса грядиля уменьшилась почти на 20% по сравнению с исходной. При изготовлении грядиля в заводских условиях с использованием SL-технологии производительность изготовления увеличилась в ~1,5 раза, а себестоимость изготовления уменьшилась в ~1,5 раза по сравнению с традиционным изготовлением. Полевые испытания показали работоспособность SL-M-грядиля.

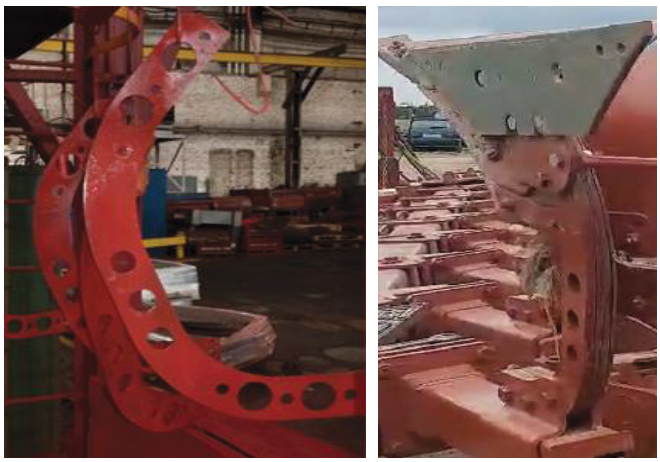
С помощью SL-технологии можно изготавливать и другие металлические детали машин – например, детали несущих систем (рамы, кузова, подвески), рабочих органов (для почвообрабатывающих, землеройных, измельчающих машин), крыльчаток (пропеллеров) и т.д. Многие детали такого рода, включая грядиль, при эксплуатации подвергаются циклическим нагрузкам, поэтому при их изготовлении следует принимать меры по обеспечению повышенной усталостной прочности.

Факторы усталостной прочности Т-М-образцов. Усталостная прочность металлических экспериментальных Т-М-образцов зависит от ряда факторов, обусловленных конструктивными особенностями образцов, которые в свою очередь связаны с особенностями их изготовления.

Для экспериментального исследования усталостной прочности Т-М-образцы подвергают усталостным (циклическим) испытаниям, осуществляемым по схеме растяжения [3, 4, 6] или по схеме изгиба [5, 7]. В первом случае повторяющаяся знакопеременная нагрузка действует вдоль, а во втором – перпендикулярно плоскости слоев испытуемых Т-М-образцов. Для проведения усталостных испытаний используют разные виды испытательных машин: Instron8801, УРМ-2000, Mikrotron, Schenk-Erlinger. Обычно Т-М-образцы содержат до 20 слоев с толщиной каждого слоя не более 1 мм, но иногда они состоят из сотен слоев толщиной в десятки микрон [7]. В большинстве Т-М-образцов все слои приблизительно одинаковы по толщине, за исключением отдельных случаев, когда сравнительно толстые слои (из стали) разделены тонкими прослойкам (из меди или алюминия). При проведении ряда испытаний как на растяжение, так и на изгиб, в Т-М-образцах делают надрезы (концентраторы напряжений), инициирующие образование трещин.

В ходе испытаний определяют количество циклов нагружения до зарождения усталостной трещины и до усталостного разрушения испытуемого образца, строят диаграммы усталостного разрушения (зависимости длины усталостной трещины от количества циклов нагружения/зависимости скорости роста усталостной трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений), а также проводят фрактографические исследования поверхности усталостных изломов, выполняют фото/видеосъемку усталостных трещин на разных стадиях развития.

Анализ результатов усталостных испытаний показывает, что Т-М-образцы, характеризующиеся наличием специально сформированной многослойной структуры, обладают более высокой усталостной прочностью, чем аналогичные образцы с обычной монолитной структурой. Это связано с тем, что в слоистых образцах границы раздела слоев являются эффективными барьерами на пути распространения усталостных трещин. Как следствие, для полного разрушения слоистого образца, то есть для прохождения трещины сквозь все его слои, требуются дополнительные затраты и энергии, и времени. Это обусловлено двумя основными причинами. Во-первых, трещина, пройдя сквозь очередной слой и оказавшись



а б

Рис. 1. Листовые выкройки SL-M-грядиля (а) и SL-M-грядиль в составе плуга (б)

Fig. 1. Sheet patterns of SL-M-plowbar (a) and SL-M-plowbar as part of a plough (b)

на межслойной границе, изменяет траекторию своего движения: она отклоняется от магистрального развития в направлении, перпендикулярном слоям, и кратковременно продвигается вдоль межслойной границы (при этом она также может разветвляться). Во-вторых, чтобы трещина могла продолжить магистральное развитие в новом слое (не содержащем надрезов или иных значительных концентраторов напряжений), необходим, соответственно, новый инкубационный период для ее зарождения в этом слое.

Таким образом, если в монолитном образце усталостная трещина распространяется практически прямолинейно и равномерно, то в слоистом образце она движется зигзагообразно, изменяя направление движения на межслойных границах, и с остановками, связанными с ее перезарождением в каждом новом слое.

Усталостная прочность Т-М-образцов, а также характер их усталостного разрушения зависят от количества, толщины, свойств слоев и межслойных границ.

Свойства слоев. Т-М-образцы могут различаться составом образующих их слоев. Так, в работе [5] исследовалась усталостная прочность нескольких типов слоистых композитов. Одни из них состояли из одинаковых по составу слоев («сталь 20 – сталь 20», «ВТ1-0 – ВТ1-0»), другие – из разных («сталь 20 – сталь 12Х18Н10Т», «сталь 12Х18Н10Т – сталь 5ХВ2С», «сталь 20 – сталь Н18К9М5Т», «титановый сплав ВТ23 – титановый сплав ВТ14», «Ti – Al», «Ni – Al». Соответственно разные по составу Т-М-образцы могут обладать различной усталостной прочностью. Например, слоистые композиты типа «сталь Н18К9М5Т – сталь 12Х18Н10Т» имеют более высокую циклическую трещиностойкость, чем композиты типа «сталь Н18К9М5Т – сталь 20»: скорость распространения усталостной трещины в первом случае в 2 раза меньше, чем во втором [3].

Кроме того, Т-М-образцы могут различаться структурой образующих их слоев, что также может отражаться на их усталостной прочности. Например, в слоистых композитах типа «сталь 09Г2С – сталь ЭП678» циклическая трещиностойкость повышается, если стальные слои имеют не мелкозернистую, а ультрамелкозернистую структуру (в определенной области значений коэффициента интенсивности напряжений) [6].

Свойства межслойных границ. Границы раздела слоев в Т-М-образцах могут иметь разные структурно-механические свойства в зависимости от способов формирования. Как следствие, они могут по-разному влиять на характер усталостного разрушения Т-М-образцов. Так, в слоистых композитах, полученных сваркой взрывом стальных слоев, границы раздела слоев характеризуются более высокой склонностью к разрушению, чем сами слои, поэтому магистральная усталостная трещина, пересекая эти границы, отклоняется от прежней прямолинейной траектории или разветвляется [3, 5]. Таким образом, межслойные границы, выполняя роль эффективных барьеров на пути распространяющихся трещин, способствуют повышению усталостной трещиностойкости Т-М-образцов.

При сравнении результатов усталостных испытаний Т-М-образцов типа «сталь 09Г2С – сталь ЭП678», полученных сваркой взрывом и горячей пакетной прокаткой, установлено, что снижение скорости роста усталостной трещины при переходе межслойной границы проявляется в большей степени в горячекатаных слоистых композитах, поскольку горячая прокатка обеспечивает меньшую прочность соединения слоев, чем сварка взрывом [6].

Особым видом межслойных границ в Т-М-образцах являются тонкие прослойки на основе меди или алюминия, обладающие сравнительно малой прочностью, выполненные между гораздо более прочными стальными слоями [4, 6]. Скорость усталостной трещины при переходе из стального слоя в алюминиевую или медную прослойку сразу же падает, трещина начинает двигаться вдоль прослойки. Дальнейшее распространение трещины в новом стальном слое становится возможным спустя некоторое время, то есть после определенного количества циклов нагружения, необходимых для зарождения трещины в этом слое.

Количество и толщина слоев. Поскольку в Т-М-образцах межслойные границы играют роль барьеров на пути распространяющихся трещин, то увеличение количества слоев n и соответствующее уменьшение их толщины h (для образцов с фиксированными размерами) приводят к повышению усталостной прочности [3, 6, 8]. Например, результаты усталостных испытаний Т-М-образцов типа «сталь 08Х18 – сталь 08Х18Н10», полученных горячей прокаткой, показывают, что при увеличении количества слоев со 100 до 1400 (при соответствующем уменьшении толщины отдельных слоев с 20 мкм до 3 мкм) циклическая долговечность увеличивается в 3,5 раза [8].

Отметим, что увеличение количества слоев n и, как следствие, уменьшение толщины h имеют определенные пределы. Так, на примере усталостных испытаний Т-М-образцов типа «металл – интерметаллид» с чередующимися слоями Ti-Al3Ti-Al-Al3Ti установлено, что при некоторой крайне малой толщине слоев (~10 мкм) могут изменяться условия развития усталостной трещины, вследствие чего эффект

расслоения не проявляется, а разрушение происходит так же, как и в монолитных образцах [6].

Факторы усталостной прочности SL-M-деталей. Усталостная прочность металлических SL-M-деталей также зависит от факторов, обусловленных конструктивными особенностями деталей.

SL-M-детали чаще всего изготавливают путем соединения между собой листовых выкроек из сталей, обладающих высокими прочностными свойствами и широко применяемыми в традиционном производстве деталей машин с монолитной структурой. Для соединения выкроек применяют механический крепеж или клей. При использовании механического крепежа между слоями остаются зазоры, ширина которых определяется шероховатостью поверхностей слоев. В такой SL-M-детали усталостная трещина после прохождения сквозь очередной слой не изменяет направление траектории и не двигается вдоль межслойной границы, вызывая расслоение, как это происходит при усталостном разрушении T-M-образцов со сварным или горячекатаным соединением слоев. Выйдя на границу раздела слоев, трещина прекращает свое дальнейшее развитие, а в новом слое спустя некоторое время зарождается новая трещина. Таким образом, магистральная усталостная трещина, последовательно проходящая через все слои, фактически представляет собой набор отдельных трещин, каждая из которых зарождается и распространяется в пределах очередного нового слоя. При этом место зарождения трещины в новом слое определяется местоположением на его поверхности концентраторов напряжения, способных инициировать это зарождение. Поскольку концентраторы напряжения могут распределяться на поверхности слоя случайным образом, то место зарождения трещины в новом слое может как совпадать, так и не совпадать с местом выхода трещины из предыдущего слоя. Соответственно траектория магистральной усталостной трещины, проходящей последовательно сквозь все слои, имеет вид прерывистой линии, отдельные отрезки которой смещены относительно друг друга.

Диаграмма усталостного разрушения (зависимости длины усталостной трещины L от количества циклов нагружения N) SL-M-детали с механическим соединением слоев и соответствующая ей траектория магистральной усталостной трещины схематично показаны на рисунке 2.

Для упрощения построений предполагалось, что все слои выполнены без надрезов и имеют одинаковую толщину h, а межслойные зазоры – одинаковую ширину b. Также предполагалось, что в каждом i-м слое трещина развивается в два этапа: на первом отмечается инкубационный период $N_{зi}$, необходимый для зарождения трещины в i-м слое, на втором – период роста трещины N_{pi}, в течение которого трещина полностью проходит сквозь i-й слой. Длительность каждого этапа для всех слоев одинакова, то есть $N_{зi}$ = const и N_{pi} = const (в действительности же, в силу неоднородности структуры слоев, случайного характера распределения в них структурных дефектов для каждого слоя значения $N_{зi}$ и N_{pi} могут существенно различаться). Кроме того, предполагалось, что трещина распространяется во всех слоях по прямой линии, перпендикулярной слоям.

Долговечность детали с монолитной структурой, полученной по традиционным технологиям и работающей в условиях циклического нагружения, включает в себя инкубационный период $N_з$ и период роста трещины N_p [11]:

$$N = N_з + N_p. \quad (1)$$

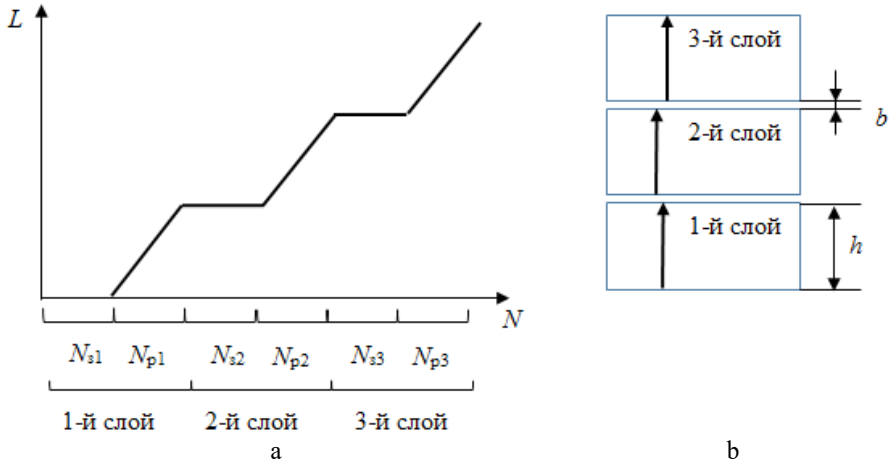


Рис. 2. Диаграмма усталостного разрушения SL-M-детали с механическим соединением слоев (a) и траектория магистральной усталостной трещины (b)

Fig. 2. Fatigue failure diagram (a) and trajectory of the main fatigue crack (b) (SL-M part with mechanical connection of layers)

Аналогично определяется долговечность единичного *i*-го слоя SL-M-детали, работающей в условиях циклического нагружения, с учетом различных значений $N_{зi}$, и $N_{рi}$:

$$N_i = N_{зi} + N_{рi}. \quad (2)$$

Соответственно долговечность SL-M-детали, состоящей из *n* механически соединенных слоев и работающей в условиях циклического нагружения, –

$$N_n = k\sum_{i=1}^{n}\left(N_{зi} + N_{рсi}\right), \quad (3)$$

где *k* – коэффициент, учитывающий снижение долговечности, вызванное наличием в слоях отверстий, служащих для установки элементов механического крепежа (болтов, штифтов, заклепок), обеспечивающих соединение слоев между собой ($k < 1$).

Известно, что такие отверстия в слоях являются концентраторами напряжений, способными инициировать образование множественных усталостных трещин [12].

Длина усталостной трещины в каждом слое L_i является неодинаковой (даже если слои имеют одинаковую толщину, то в силу неоднородности их структуры трещина может проходить по произвольным ломаным линиям, имеющим разный наклон к слоям). Общая длина магистральной усталостной трещины, прошедшей через *n* слоев, –

$$L_n = \sum_{i=1}^{n} L_i. \quad (4)$$

Иной характер имеет усталостное разрушение SL-M-детали с клеевым соединением металлических слоев. Здесь важно учитывать соотношение прочности материала клеевых прослоек $\sigma_п$ и прочности сцепления металлических слоев с клеевыми прослойками $\sigma_{сп}$. Если $\sigma_п > \sigma_{сп}$, то наиболее вероятно когезионное разрушение, проявляющееся в разрыве материала клеевой прослойки, если $\sigma_п < \sigma_{сп}$, то адгезионное разрушение, проявляющееся в отрыве клеевой прослойки от металлического слоя. Поскольку в SL-M-детали с клеевым соединением металлических слоев значения $\sigma_п$ и $\sigma_{сп}$ могут быть неодинаковыми в разных местах прослойки, то на практике возможно проявление одновременно когезионного и адгезионного вариантов разрушения. Например, указанные варианты разрушения наблюдались при испытаниях на прочность многослойных изделий, изготовленных из алюминиевых пластин, соединенных эпоксидным клеем [13].

Усталостное разрушение SL-M-деталей с клеевым соединением металлических слоев по своему характеру подобно рассмотренному выше усталостному разрушению T-M-образцов, полученных путем соединения металлических слоев между собой сваркой взрывом или горячей пакетной прокаткой. В том и другом случаях усталостная трещина движется зигзагообразно, изменяя направление движения на межслойных границах, и с остановками, связанными с ее перезарождением в каждом новом металлическом слое. При этом в случае SL-M-деталей с клеевым соединением металлических слоев в качестве межслойных границ выступают тонкие клеевые прослойки.

Диаграмма усталостного разрушения SL-M-детали с клеевым соединением слоев и соответствующая ей траектория магистральный усталостной трещины показаны на рисунке 3. Здесь также предполагались одинаковая толщина всех слоев *h* и ширина прослоек *b*, кроме того, все слои выполнены без надрезов. Вместе с тем предполагалось, что в каждом слое трещина развивается в три этапа

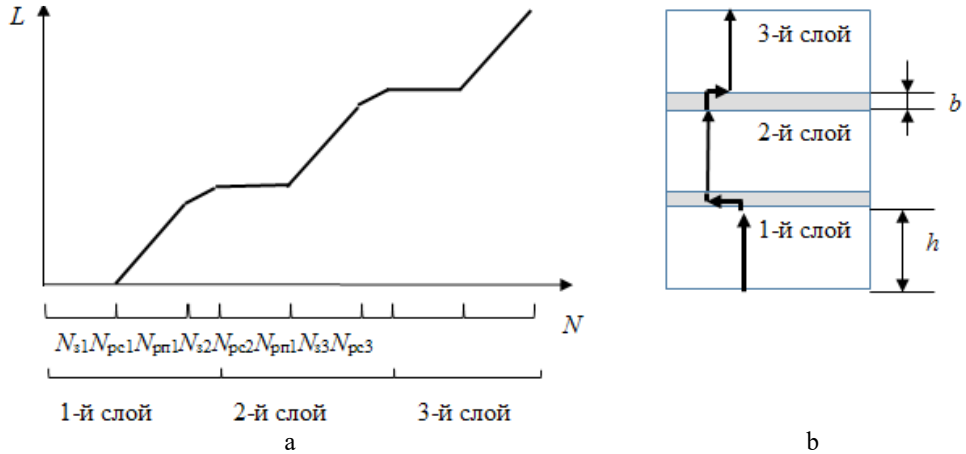


Рис. 3. Диаграмма усталостного разрушения SL-M-детали с клеевым соединением слоев (a) и траектория магистральной усталостной трещины (b)

Fig. 3. Fatigue failure diagram and main fatigue crack trajectory (SL-M part with adhesive bonding of layers)

включая инкубационный период $N_{зi}$, необходимый для зарождения трещины в *i*-м слое; период движения трещины сквозь *i*-й слой $N_{рсi}$; период движения трещины вдоль *i*-й прослойки $N_{рпi}$ (внутри самой прослойки или по границе прослойки и слоя).

Долговечность SL-M-детали, состоящей из *n* склеенных слоев и работающей в условиях циклического нагружения, –

$$N_n = k\left[\sum_{i=1}^{n}\left(N_{зi} + N_{рсi}\right) + \sum_{i=1}^{n-1} N_{рпi}\right]. \quad (5)$$

Общая длина магистральной усталостной трещины для SL-M-детали с клеевым соединением *n* слоев, в отличие от SL-M-детали с механическим соединением слоев, включает в себя не только длину трещин $L_{сi}$, прошедших через *n* слоев, как показано в формуле (4), но также длину трещин $L_{пi}$, прошедших через $(n - 1)$ прослоек:

$$L_n = \sum_{i=1}^{n} L_{сi} + \sum_{i=1}^{n-1} L_{пi}. \quad (6)$$

С помощью уравнений (3), (5) можно лишь приближенно описать кинетические закономерности процессов усталостного разрушения и, соответственно, дать оценку усталостной прочности SL-M-деталей, исходя из предположения того, что зависимость $N_n(n)$ является линейной. В действительности же, как показал анализ результатов исследований усталостной прочности металлических Т-М-образцов, характер этой зависимости до сих пор не установлен. В разных случаях она может иметь разный вид, в том числе нелинейный. Поэтому экспериментальное определение характера этой зависимости, то есть вида функции $N_n = f(n)$, является одной из первостепенных задач дальнейших исследований прочностных свойств металлических многослойных структур, в том числе SL-M-деталей, работающих в условиях циклического нагружения.

Пути повышения усталостной прочности SL-M-деталей. Особенности изготовления и связанные с ними особенности конструкции металлических Т-М-образцов и SL-M-деталей, влияющие на их усталостную прочность, представлены в таблице.

Как следует из таблицы, при изготовлении SL-M-деталей практически нельзя обеспечить повышение усталостной прочности непосредственно на стадии формирования многослойной структуры, как это делается при изготовлении Т-М-образцов за счет высокоэнергетической термомеханической обработки. Но этого можно достигнуть на стадии создания листовых выкроек для SL-M-деталей путем управления факторами усталостной прочности, обусловленными конструкцией деталей, для чего нужно руководствоваться представленными ниже положениями.

1. Выкройки следует вырезать из листовых сталей (или других металлов), обладающих в состоянии поставки достаточно высокой усталостной прочностью с учетом характера циклических нагрузок, которым подвергаются изготавливаемые SL-M-детали во время эксплуатации.

2. SL-M-детали следует собирать из листовых выкроек, имеющих как можно меньшую толщину, поскольку при заданной высоте детали *H* с уменьшением толщины выкроек *h* обратно пропорционально увеличивается общее количество выкроек *n*,

Таблица

Особенности изготовления и конструкции Т-М-образцов и SL-M-деталей, влияющие на их усталостную прочность

Table

Features of manufacturing and design of T-M-samples and SL-M-parts, affecting their fatigue strength

Т-М-образцы	SL-M-детали
При изготовлении Т-М-образцов исходные листы металла соединяют горячей прокаткой и сваркой взрывом или давлением, так что они сливаются воедино, образуя сплошную квазимонолитную металлическую структуру.	При изготовлении *SL*-М-деталей листовые выкройки металла соединяют механическим крепежом или клеем, так что они оказываются разделенными зазорами или клеевыми прослойками.
При изготовлении Т-М-образцов происходит измельчение зеренной структуры образующих их слоев металла за счет термомеханической обработки исходных листов металла.	При изготовлении *SL*-М-деталей в образующих их листовых выкройках металла сохраняется зеренная структура, присущая исходным коммерчески доступным листам металла.
Т-М-образцы имеют сравнительно малую толщину образующих их слоев, которая достигается в процессе изготовления за счет термомеханической обработки, и, соответственно, сравнительно большое количество слоев.	*SL*-М-детали имеют сравнительно большую толщину образующих их слоев, которая определяется толщиной исходных коммерчески доступных листов металла, и, соответственно, сравнительно малое количество слоев.
При изготовлении Т-М-образцов не предполагается создание отверстий в соединяемых слоях, которые могли бы играть роль концентраторов напряжений, способствующих усталостному разрушению.	При изготовлении *SL*-М-деталей в листовых выкройках создают отверстия для установки элементов механического крепежа либо для уменьшения массы в рамках топологической оптимизации, которые являются концентраторами напряжений, способствующими усталостному разрушению.

что, как показано выше, ведет к повышению усталостной прочности: $n = H/h$ [14]. Но вместе с тем следует учитывать, что с увеличением количества выкроек растет продолжительность и повышается себестоимость изготовления деталей. Кроме того, следует учитывать зависимость долговечности деталей, работающих в условиях циклического нагружения, от количества выкроек.

3. Отверстия в листовых выкройках SL-M-деталей, служащие для установки элементов механического крепежа, а также дополнительные отверстия, создаваемые в рамках топологической оптимизации и служащие для уменьшения массы, не следует располагать в области значительных циклических деформаций деталей при эксплуатации, чтобы не провоцировать зарождения усталостных трещин. Также по этой же причине дополнительные отверстия, в отличие от сквозных отверстий под крепеж, предпочтительно создавать так, чтобы они, будучи расположенными в разных выкройках, не совпадали друг с другом по местоположению при пакетировании выкроек.

Выводы

Металлические многослойные структуры обладают повышенной усталостной прочностью, поэтому на их основе является перспективным создавать детали машин, работающие в условиях значительных циклических воздействий. Для изготовления металлических деталей с многослойной структурой, характеризующихся сложной формой, прежде всего, в условиях единичного и мелкосерийного производства, особенно эффективное применение может найти аддитивная технология листового ламинирования. Данную технологию, дополненную применением топологической оптимизации, можно использовать при изготовлении деталей несущих систем и рабочих органов сельскохозяйственной техники с целью снижения их металлоемкости.

Список источников

1. Ерохин М.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Скороходов Д.М. Производство и ремонт отечественных машин для агропромышленного комплекса с позиции принципа 5М // Вестник машиностроения. 2023. № 8. С. 701-704. EDN: BUMPSG

2. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Темасова Г.Н., Вергазова Ю.Г., Голиницкий П.В. Расчет допуска посадки с зазором для повышения относительной износостойкости соединений // Трение и износ. 2023. Т. 44, № 3. С. 261-269. EDN: TFDITN

3. Приходько Е.А., Никулина А.А., Батаев И.А., Попелюх А.И., Батаев А.А., Ложкин В.С. Структура и усталостная трещиностойкость многослойного композита «сталь 20 – сталь 12Х18Н10Т», полученного сваркой взрывом // Деформация и разрушение материалов. 2013. № 3. С. 28-34. EDN: PZEPHN

4. Дидык Р.П., Козечко В.А. Многослойные конструкции повышенной трещиностойкости, сформированные сваркой взрывом // Автоматическая сварка. 2015. № 2. С. 54-57. EDN: THTTJL

5. Батаев И.А. Формирование структуры сваренных взрывом материалов: экспериментальные исследования и численное моделирование // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. Т. 77, № 4. С. 55-67. http://dx.doi.org/10.17212/1994-6309-2017-4-55-67

6. Пацелов А.М., Гладковский С.В., Лавриков Р.Д., Каманцев И.С. Трещиностойкость слоистых композитов с чередованием слоев Ti-Al3Ti-Al-Al3Ti в условиях статического и циклического нагружения // Деформация и разрушение материалов. 2014. № 12. С. 7-11. EDN: TBRGLF

7. Минаков А.А., Плохих А.И. О влиянии деформационных механизмов на увеличение циклической долговечности в многослойных стальных материалах // Проблемы механики современных машин: Материалы VII Международной научной конференции. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2018. Т. 1. С. 259-262. EDN: YQSEXZ

8. Минаков А.А. Титова А.С., Букеткин Б.В. Исследование поведения многослойных стальных материалов в условиях малоцикловой усталости при знакопеременном изгибе с сильным нагружением // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2019. № 29. С. 51-57. EDN: AIWWCZ

References

1. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.J., Vergazova Y.G., Skorokhodov D.M. Production and repair of domestic machines for agroindustrial complexes from the position of the 5M principle. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2023;8:701-704. (In Russ.) https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-8-701-704

2. Leonov O.A., Shkaruba N.J., Temasova G.N., Vergazova Yu.G., Golinitsky P.V. Calculation of the tolerance of the fit with a gap to increase the relative wear resistance of joints. *Friction and Wear*. 2023;44(3):261-269. (In Russ.) https://doi.org/10.32864/0202-4977-2023-44-3-261-269

3. Prikhodko E.A., Nikulina A.A., Bataev I.A., Popelyukh A.I., Bataev A.A., Lozhkin V.S. Structure and fatigue crack resistance of multilayer composite “Steel 20 – Steel 12X18H10T” obtained by explosion welding. *Deformation and Fracture of Metals*. 2013;3:28-34. (In Russ.)

4. Didyk R.P., Kozechko V.A. Multilayer structures of increased crack resistance formed by explosion welding. *Automatic Welding*. 2015;2:54-57. (In Russ.)

5. Bataev I.A. Structure of explosively welded materials: experimental study and numerical simulation. *Obrabotka metallov* (*tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty*) = *Metal Working and Material Science.* 2017;77(4):55-67. (In Russ.)

6. Patselov A.M., Lavrikov R.D., Gladkovskii S.V., Kamantsev I.S. Fracture toughness of Ti–Al3ti–Al–Al3ti laminate composites under static and cyclic loading conditions. *Russian Metallurgy* (*Metally*). 2015;2015(10):811-815. (In Russ.)

7. Minakov A.A., Plokhikh A.I. About the influence of deformation mechanisms on the increase of cyclic durability in multilayer steel materials. *Problems of mechanics of modern machines*: *Proceedings of the VII International Scientific Conference.* Ulan-Ude: Izd-vo VSGUTU. 2018;1:259-262. (In Russ.)

8. Minakov A.A., Titova A.S., Buketkin B.V. Investigation of multilayer steel materials behavior in low-cycle fatigue under alternating bending with strong loading. *New Materials and Technologies in Mechanical Engineering*. 2019;29:51-57. (In Russ.)

9. Tolochko N.K., Sokol O.V. Methodological aspects of the efficiency assessment of additive sheet lamination technology. *Machine Building Vestnik*. 2020;10:11-15. (In Russ.)

9. Толочко Н.К., Сокол О.В. Методологические аспекты оценки эффективности аддитивной технологии листового ламинирования // Вестник машиностроения. 2020. № 10. С. 11-15. EDN: SOIJSI

10. Толочко Н.К., Авраменко П.В., Кравцов В.Б., Левшуков А.П. Опыт сотрудничества БГАТУ и МЗШ в области производства сельхозтехники // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: Материалы Международной научно-практической конференции (Минск, 16-17 октября 2024 г.: В 2 ч. Ч. 2. Минск: БГАТУ, 2024. С. 26-27. EDN: NDKFRO

11. Клевцов Г.В., Мерсон Д.Л., Клевцова Н.А. и др. Кинетика и механизм усталостного разрушения образцов из сталей 40Х и 38Х2Н2МА // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2019. № 1 (47). С. 30-36. EDN: ADBIGV

12. Попелюх А.И., Попелюх П.А., Батаев А.А. Особенности зарождения и роста усталостных трещин в стали при многократном динамическом сжатии // Физика металлов и металловедение. 2016. Т. 117, № 3. С. 291. EDN: VRXUPX

13. Walczyk D.F., Dolar N.Y. Bonding Methods for Laminated Tooling. International Solid Freeform Fabrication Symposium. USA, 1997. Pp. 211-221. http://hdl.handle.net/2152/70344

14. Толочко Н.К., Сокол О.В. Аддитивные технологии: проблема ступенчатого рельефа поверхности // Агропанорама, 2019. № 2. С. 12-16. EDN: IZNMWY

10. Tolochko N.K., Avramenko P.V., Kravtsov V.B., Levshukov A.P. Experience of cooperation between BGATU and MHS in the field of agricultural machinery production. *Technical and personnel support of innovative technologies in agriculture*: mater. International scientific-practical conf. (Minsk, October 16-17, 2024). Minsk: BGATU, 2024;2:26-27. (In Russ.)

11. Klevtsov G.V., Merson D.L., Klevtsova N.A. et al. Kinetics and mechanism of fatigue failure of samples from 40X and 38X2H-2MA steels. *Vector of Science TSU*. 2019;1(47):30-36. (In Russ.)

12. Popelyukh A.I., Popelyukh P.A., Bataev A.A. Features of nucleation and growth of fatigue cracks in steel under repeated dynamic compression. *Physics of Metals and Metallurgy*. 2016;117(3):291. (In Russ.)

13. Walczyk D.F., Dolar N.Y. Bonding Methods for Laminated Tooling. *Proc. Solid Freeform Fabrication Symp.* Austin, Texas, USA, 1997:211-221.

14. Tolochko N.K., Sokol O.V. Additive technologies: the problem of stepped surface relief. *Agropanorama*. 2019;2:12-16. (In Russ.)

Информация об авторах

[1] **Толочко Николай Константинович,** д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры технологий и организации технического сервиса; n.tolochko1951@mail.ru; AuthorID: 251868

[2] **Авраменко Павел Викторович,** канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой стандартизации, метрологии и инженерной графики; minsk888@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8420-3977; SPIN-код: 7336-3717, AuthorID: 1102082

[3] **Кравцов Вячеслав Борисович,** старший преподаватель кафедры технологий и организации технического сервиса; kravcovslava@tut.by

[4] **Голиницкий Павел Вячеславович,** канд. техн. наук, доцент; gpv@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7303-1658; SPIN-код: 2323-0797, AuthorID: 784381

[1, 2, 3] Белорусский государственный аграрный технический университет; 220012, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 99

[4] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Author Information

Nikolay K. Tolochko[1], DSc (Phys-Math), Professor, Professor of the Department of Technical Service Technologies and Organization; n.tolochko1951@mail.ru

Pavel V. Auramenka[2], CSc (Eng), Associate Professor, Head of the Standardization, Metrology and Engineering Graphics Department; minsk888@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8420-3977

Vyacheslav B. Kravtsov[3], Senior Lecturer of the Department of Technical Service Technologies and Organization; kravcovslava@tut.by

Pavel V. Golinitskiy[4], CSc (Eng), Associate Professor; gpv@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7303-1658; Scopus Author ID: 57216809753; Researcher ID: AAD-6305-2022

[1,2,3] Belarusian State Agrarian Technical University; 220012, Republic of Belarus, Minsk, Nezavisimosti Ave., 99

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

Вклад авторов

Н.К. Толочко – формулирование основной концепции исследований и задач, разработка методологии исследований, создание окончательной версии (доработка) рукописи;
П.В. Авраменко – участие в анализе данных литературы и подготовке начального варианта текста;
В.Б. Кравцов – сбор, подготовка и первичный анализ данных литературы;
П.В. Голиницкий – участие в подготовке окончательной версии статьи.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 13.12.2024, после рецензирования и доработки 23.04.2025; принята к публикации 24.04.2025

Author Contribution

N.K. Tolochko – conceptualization, methodology, writing – review and editing of the manuscript;
P.V. Auramenka – visualization, description of results, conclusions;
V.B. Kravtsov – data verification; software;
P.V. Golinitskiy – writing – review and editing of the manuscript.

Conflict of interest

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

Received 13.12.2024; Revised 23.04.2025; Accepted 24.04.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 621.89.099.6:621.892.84
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-74-80

Улучшение трибологических характеристик твердых смазок модификацией фторсодержащими ПАВ

С.М. Гайдар[1], ***А.М. Пикина***[2]✉, ***А.С. Барчукова***[3]

[1, 2, 3] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

[1, 2, 3] Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство); г. Москва, Россия

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

[2] pikina@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0001-7116-3526

[3] barchukova@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7202-291X

Аннотация. Дефицит эффективных отечественных смазок с высокими эксплуатационными свойствами обусловлен необходимостью разработки технологии производства твердых смазок. В процессе волочения на стане применяют твердые смазочные материалы, которые препятствуют контакту трущихся поверхностей и локализации сдвиговых деформаций в слое смазки. Исследования проведены с целью разработки технологии производства конкурентоспособной смазки с высокими адгезионными свойствами, способной непрерывно разделять трущиеся поверхности, предотвращать образование задиров, рисок и обрывов проволоки. В качестве компонентов выбрали кальциевое мыло, модифицированный графит ГС-1 и гидроксид кальция. Графит модифицировали фторсодержащим ПАВ. Количество компонентов в составе смазки корректировали в зависимости от результатов трибологических исследований на машине трения ЧМТ-1. Изготовленную смазку для волочения сравнивали с итальянским прототипом Panlube. Смазку наносили на вращающийся ролик с помощью сконструированной рычажной системы. Синхронное измерение скорости изнашивания и момента сил трения проводили на модернизированной машине трения типа «Амслер МИ-1» согласно ГОСТ 23216-84. Результаты показали, что у полученной смазки на основе модифицированного графита трибологические характеристики выше, чем у зарубежного аналога: при одинаковых пятнах износа нагрузка сваривания для разработанного нами образца составила 700 кгс, а для зарубежного – 400 кгс. Промышленные испытания смазки на волочильном стане подтвердили ее соответствие требованиям технического задания, при скорости волочения более 5 м/с получили качественную продукцию при прогнозируемом снижении износа канала волока.

Ключевые слова: волочильный стан; твердые смазочные материалы; смазка; модифицированный графит; фторсодержащие ПАВ; трибологические характеристики

Для цитирования: Гайдар С.М., Пикина А.М., Барчукова А.С. Улучшение трибологических характеристик твердых смазок модификацией фторсодержащими ПАВ // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 3. С. 74-80. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-74-80

ORIGINAL ARTICLE

Improving tribological characteristics of solid lubricants by modification with fluorinated surfactants

S.M. Gaidar[1], ***A.M., Pikina***[2]✉, ***A.S. Barchukova***[3]

[1,2,3] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

[1,2,3] Kosygin Russian State University (Technology. Design. Art); Moscow, Russia

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

[2] pikina@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0001-7116-3526

[3] barchukova@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7202-291X

Abstract. The deficit of effective domestic lubricants with high performance properties urges the need to develop the technology of producing solid lubricants. The mill drawing technology requires solid lubricants to prevent the contact of rubbing surfaces and localization of shear deformations in the lubricant layer. The authors carried out research to develop a technology of producing competitive lubricant with high adhesive properties, capable of continuous separation of the rubbing surfaces, preventing the formation of scoring, ricks and wire breaks. Calcium soap, modified graphite GS-1 and calcium hydroxide were selected as lubricant components. Graphite was

© Гайдар С.М., Пикина А.М., Барчукова А.С., 2025

modified with a fluorine-containing surfactant. The quantity of components in the grease composition was adjusted depending on the results of tribological studies on the ChMT-1 friction machine. The produced grease for drawing was compared with the Italian prototype Panlube. The authors used a designed lever system to apply the grease to the rotating roller. A modernized friction machine of "Amsler MI-1 type was used for synchronous measurement of wear rate and moment of friction forces according to GOST 23216-84. The results showed that the obtained grease based on modified graphite has higher tribological characteristics than its foreign counterpart: at the same wear spots, the welding load for the tested sample amounted to 700 kgf, while for the foreign one – 400 kgf. Industrial tests of the lubricant on the drawing mill confirmed its compliance with the requirements of the technical specifications. At the drawing speed of more than 5 m/s, it was possible to obtain high quality products with the predictable wear reduction of the drawing die channel.

Keywords: drawing mill; solid lubricants; grease; modified graphite; fluorinated surfactants; tribological characteristics

For citation: Gaidar S.M., Pikina A.M., Barchukova A.S. Improving tribological characteristics of solid lubricants by modification with fluorinated surfactants. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2025;27(3):74-80 (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-74-80

Введение

Твердые смазочные материалы вводят между трущимися поверхностями с целью предупреждения их непосредственного контакта и локализации сдвиговых деформаций в слое смазки. Это приводит к снижению энергетических потерь в процессе трения, поскольку сопротивление сдвигу в этих условиях значительно ниже, чем в материале подложки. Твердые смазочные материалы применяют в технологическом процессе на волочильном стане. Фильеры, используемые для волочения проволоки, эксплуатируются при высоких нагрузках, в результате чего происходит их интенсивное изнашивание. Образование задиров и обрывов проволоки накладывает ограничение на скорость волочения [1, 2].

Наиболее распространенным твердым смазочным материалом является графит [3, 4]. Эффективность смазочного действия графита определяется его слоистой структурой, в которой связи между параллельными плоскостями базиса существенно слабее, чем между атомами в плоскостях базиса. Снижению трения способствует адсорбция молекул паров влаги и газов на базовых плоскостях, которая снижает энергию связи между плоскостями скольжения. При этом адгезия частиц графита к металлическим поверхностям превосходит адгезию между плоскостями скольжения, на которых адсорбировались молекулы паров воды или газа. Однако при повышении температуры до 100 °С и выше коэффициент трения графита увеличивается в 4-5 раз, и он теряет свои высокие триботехнические свойства[1]. Решить данную проблему позволяет модификация поверхности графита адсорбированными молекулами фторсодержащего ПАВ[2] [5, 6].

К смазкам для волочения, кроме трибологических характеристик, предъявляются такие требования, как низкая стоимость и отсутствие следов смазки на поверхности проволоки на финишной операции. Для этого в смазки для волочения добавляют кальциевые или натриевые мыла, то есть соли жирных кислот этих металлов [7]. А.А Труханович и А.А. Леднева, обращаясь к работе Л.А. Красильникова «Волочильщик проволоки» (1987), цитируют следующее высказывание: «Жирные кислоты, используемые при изготовлении смазок для волочения, должны иметь большую молекулярную массу, так как это повышает смазочные свойства» [8]. «Обычно содержание солей жирных кислот в смазках находится в пределах 70…85%. Смазки на основе солей жирных кислот выполняют функцию основного смазывающего компонента ввиду высокой их поверхностной активности к металлической поверхности, обусловленной наличием функциональной группы -C=O. Кроме того, для улучшения разделения поверхностей волоки и обрабатываемого металла в смазки добавляют наполнители: известь, различные соли, мел и другие вещества» [8].

Цель исследований: получить твердую смазку с высокими адгезионными свойствами, способную непрерывно разделять трущиеся поверхности и, как следствие, минимизировать износ канала волок, обеспечивающую стабильную скорость волочения не менее 5 м/с, предотвращающую образование задиров, рисок и обрывов проволоки, исключающую спекание, разложение или расслоение при эксплуатации; разработать технологию производства смазки для волочения.

Материалы и методы

На основе литературно-патентного анализа выбрали материалы, которые включили в состав рецептуры смазки для волочения: кальциевое мыло, модифицированный графит ГС-1, гидроксид кальция.

[1] Чичинадзе А.В., Берлинер Э.М., Браун Э.Д. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.

[2] Вильнав Жан-Жак. Клеевые соединения. М.: Техносфера, 2007. 384 с.

Для улучшения трибологических характеристик графита ГС-1 использовали фторсодержащие ПАВ (эпилам «Автокон-0,5» ТУ 2229-008-27991970-95). Количество эпилама, используемого для модификации графита ГС-1, определяли из уравнения:

$$\frac{(\rho_{ПЭ} - \rho_{П})}{п} \cdot 100\% \sim N \cdot S \cdot \delta \cdot \rho_{Э} \cdot 100\%,$$

где $\rho_{ПЭ}$ – плотность эпиламированного пористого материала (порошка), кг/м^3; $\rho_{П}$ – плотность пористого материала (порошка) до эпиламирования, кг/м^3; N – число пропиток эпиламом; S – удельная площадь поверхности пористого материала включая поры, м^2/кг; δ – толщина пленки эпилама после высыхания и термообработки, м; $\rho_{Э}$ – плотность эпилама, кг/м^3.

Способ получения негигроскопичного, пористого модифицированного графита включал в себя обработку его импрегнатом, высушивание и последующую термофиксацию [9, 10].

Далее, с целью улучшения трибологических свойств, изготовленную опытную партию оптимизировали по количеству модифицированного графита. Для решения этой задачи в рецептуру поэтапно добавляли модифицированный графит (начиная с 1,2%) и на машине трения ЧМТ-1, увеличивая нагрузку, определяли нагрузку сваривания.

Количество компонентов в составе смазки корректировали в зависимости от результатов трибологических исследований [11-13].

При изготовлении смазки использовали лабораторное оборудование: сушильный шкаф, пропиточный автоклав, весы, смеситель, шаровую мельницу, машину трения ЧМТ-1 и Амслер МИ-1, микроскоп оптический ADF1350.

Формирование зоны трения проводили в присутствии графита ГС-1, графита ГС-1 модифицированного, опытного образца и прототипа смазки для волочения Panlube. Изготовленную смазку для волочения сравнивали с итальянским прототипом Panlube.

С целью повышения точности, достоверности и уменьшения сроков проведения экспериментов использовали модернизированную машину трения типа «Амслер МИ-1», снабженную системами создания, поддержания и измерения температур, нормальных сил, линейных скоростей скольжения, моментов сил трения, скоростей изнашивания и т.д. [14]. Основные исследуемые параметры – трение и износ – регистрировались с помощью двухканального самописца уровня модели «2309» фирмы «Брюль и Кьер».

С целью достоверности получаемых экспериментальных результатов использовали схему трения «Колодка-ролик» (диск изготовлен из стали 40 ГОСТ 1050-88, колодка – из чугуна марки СЧ21 ГОСТ 1412-85) с постоянными величинами коэффициентов взаимного перекрытия ($К_{ВЗ}$) и площади соприкосновения независимо от износа.

Подготовку исследуемых материалов к испытаниям проводили в соответствии с технологической инструкцией «Приготовление и нанесение графитовых смазок».

Смазку наносили на вращающийся ролик с помощью специально сконструированной рычажной системы, имеющей самоустановку относительно цилиндрической поверхности ролика. Повышенная сложность данной конструкции обусловлена важностью соблюдения неизменности нагрузки и ее распределения (эпюры) на поверхности ролика в течение всей процедуры нанесения. Разработка высокоэффективного, простого и не требующего много времени метода нанесения материала – это отдельная проблема, которая должна решаться параллельно с экспериментальными исследованиями эффективности смазочных материалов с точки зрения трения и износа [15].

После нанесения на поверхность ролика исследуемого смазочного материала при вращении ролика и приложения нормальной силы контактирования колодки с рабочей поверхностью ролика в течение всего опыта осуществляли синхронное измерение скорости изнашивания и момента сил трения без разъединения зоны трения[3].

Экспериментальные исследования проводили в два этапа. На первом этапе на машине трения определили диаметр пятна износа для различных нагрузок и нагрузку сваривания для итальянского прототипа Panlube. Значение нагрузки сваривания смазки Panlube было критерием для оптимизации состава нашего опытного образца смазки. На втором этапе провели испытания на волочильном стане в условиях промышленного производства.

Результаты и их обсуждение

В результате анализа источников литературы для приготовления смазки выбрали сульфат натрия (ГОСТ 21458-75), стеарат кальция (ТУ 2432-005-10269039-05), графит смазочный (ГС-1 ГОСТ 8295-73) [5, 6].

Формирование испытательного контакта (зоны трения) на машине трения Амслер МИ-1 – длительный процесс, в течение которого скорость изнашивания колодки постоянно снижается, коэффициент сил трения в процессе приработки, как правило, тоже снижается, хотя бывают исключения.

[3] ГОСТ 23216-84 и методические указания «Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки служебных свойств смазывающих масел и присадок к ним с использованием роликовых испытательных установок».

После завершения приработки пары трения «Колодка-ролик» при увеличении штатной скорости скольжения модифицированного графита ГС-1 наблюдали снижение коэффициента трения (рис. 1).

Для графита ГС-1 коэффициент трения в течение 26 мин постоянно снижался и достиг значения 0,12, однако затем стал повышаться и достиг в течение 5 мин значения 0,17. Работа машины трения при этом характеризовалась исключительно мягким ходом и низким шумом.

Для модифицированного графита ГС-1 коэффициент трения в течение 48 мин постоянно возрастал и достиг значения 0,065. Работа машины трения, как и в случае с просто графитом ГС-1, характеризовалась исключительно мягким ходом и низким шумом.

Результаты испытаний зависимости диаметра пятна износа от нагрузки показали, что при содержании модифицированного графита в составе смазки до 3,6% нагрузка сваривания соответствует зарубежному аналогу и равна 400 кгс. Увеличение концентрации до 4,8% позволило получить результат, превышающий зарубежный аналог. Нагрузка сваривания составила 700 кгс.

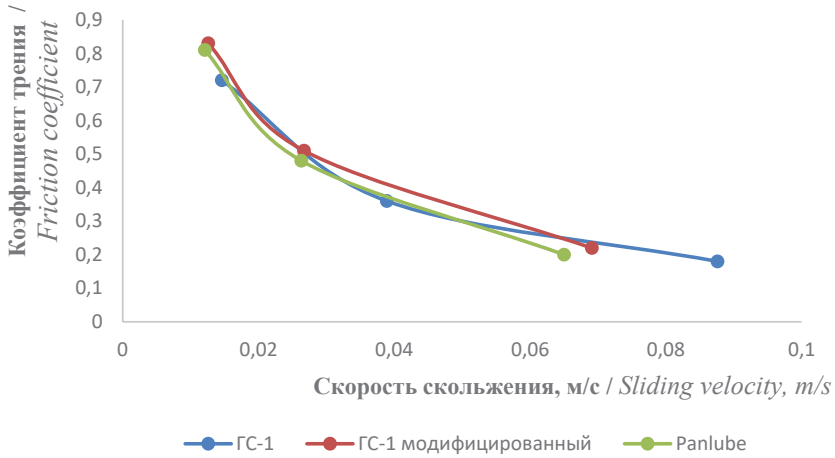


Рис. 1. Коэффициент трения после приработки графита ГС-1, модифицированного графита ГС-1 и прототипа смазки для волочения Panlube

Fig. 1. Coefficient of friction after running-in of graphite GS-1, modified graphite GS-1, and Panlube prototype lubricant used for drawing

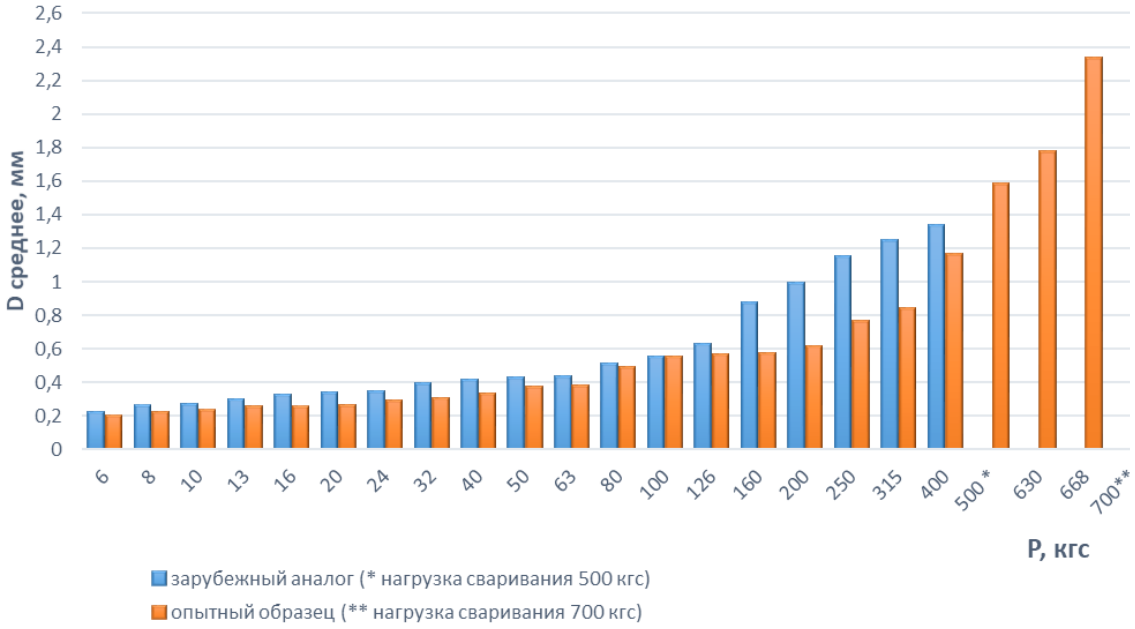


Рис. 2. Зависимость диаметра пятна износа (D) от нагрузки (P) зарубежного аналога и опытного образца смазки

Fig. 2. Relationship between the wear spot diameter (D) and the load (P) of the foreign counterpart and the prototype grease

Рис. 3. Перемешивание компонентов

Fig. 3. Mixing of components

а

б

Рис. 4. Термическая обработка состава смазки:
а – до обработки; б – после нее

Fig. 4. Thermal treatment of grease composition:
a – before: b – after

Рис. 5. Измельчение полученного состава

Fig. 5. Grinding of the obtained composition

Технология изготовления смазки включает в себя следующие операции:

1. Взвешивание компонентов смазочного состава и загрузка их в смеситель.

2. Перемешивание компонентов в течение 2 ч (рис. 3).

3. Термическая обработка состава смеси в течение 2 ч при температуре 175°С (рис. 4).

4. Измельчение полученного состава в шаровой мельнице (перемешивание в течение 2 ч) (рис. 5).

5. Фасовка.

Для подтверждения эксплуатационных параметров смазки провели промышленные испытания на волочильном стане (рис. 6).

В эксперименте применяли заготовку плакировальной проволоки диаметром 6,35 мм. Сердечник – стальная проволока марки 70 КК диаметром 5,5 мм производства ОАО «Северсталь МЕТИЗ», г. Череповец. Волочение проводили до диаметра 2,7 мм. На запуске скорость линии составила 2 м/с, смазка ложилась ровным слоем, сдиров и обрывов не наблюдали. На рабочей скорости 5 м/с наработано 10600 м проволоки диаметром 2,7 мм, сдиры и обрывы зафиксированы не были.

Рис. 6. Волочильный стан

Fig. 6. Drawing mill

Выводы

1. Трибологические испытания на машине трения ЧМТ-1 показали лучшие характеристики разработанной нами смазки для волочения, чем у зарубежного аналога: при почти одинаковых пятнах износа нагрузка сваривания для отечественного образца составила 700 кгс, а для зарубежного – 400 кгс.

2. Промышленные испытания смазки на волочильном стане подтвердили ее соответствие требованиям технического задания; при скорости волочения более 5 м/с получили качественную продукцию при прогнозируемом снижении износа канала волока.

Список источников

1. Кравченко И.Н., Карелина М.Ю., Зубрилина Е.М., Коломейченко А.А. Ресурсосберегающие технологии получения функциональных наноструктурированных покрытий высокоскоростными методами нанесения // Вестник Донского государственного технического университета. 2015. Т. 15, № 3 (82). С. 19-27. https://doi.org/10.12737/12590

2. Карелина М.Ю. Влияние фторорганических поверхностно-активных веществ на эксплуатационные характеристики ДВС // Технико-технологические проблемы сервиса. 2015. № 1 (31). С. 12-16. EDN: UNWQEJ

3. Янкилевич А.М. Сухие адаптивные смазочные материалы Modengy™ // Трубопроводная арматура и оборудование. 2022. № 1 (118). С. 8. EDN: HEASVE

4. Зеленина А.В., Гилета В.П., Самуль А.Г. Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование сплава ВТ3-1 с использованием смазки на основе графита // Интеллектуальный потенциал Сибири: Материалы 32-й Региональной научной студенческой конференции: В 5 ч. Новосибирск, 20-25 мая 2024 г. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2024. С. 149-151. EDN: LXOOTT

5. Карелина М.Ю., Гайдар С.М. Исследование эффективности триботехнических препаратов на основе наноматериалов // Грузовик. 2015. № 4. С. 17-29. EDN: TSZVBP

6. Гайдар С.М., Волков А.А., Карелина М.Ю. Адсорбция фтор-ПАВ и ее влияние на смазку трибосопряжений в условиях граничного и гидродинамического трения // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 118. С. 113-124. EDN: TODFDP

7. Топилина С.В. Разработка способа производства высокотемпературной пластичной смазки на основе сульфонат кальциевого загустителя // Сборник материалов XXIX Региональной конференции молодых ученых и исследователей Волгоградской области, Волгоград, 16 сентября 2024 г. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2024. С. 43-44. EDN: LHFLDO

8. Труханович А.А., Леднева А.А. Основные характеристики смазок для сухого волочения проволоки под металлокорд, их влияние на качество волочения // Литье и металлургия. 2008. № 2 (46). С. 72-74. EDN: TWQWZF

9. Эпиламированный графит и способ его получения: Патент RU2329946 C1, МПК C01B31/00, C08J 5/00, C08K 7/00 / С.М. Гайдар; заявка № 2006146311/15; заявл. 26.12.2006; Опубл. 27.07.2008. EDN: VOUYIB

10. Противоизносная и противозадирная добавка к пластичным смазкам: Патент на изобретение U2266315 C1, 20.12.2005 / Н.А. Рябинин, А.Н. Рябинин, С.М. Гайдар, М.Н. Ляшенко, Г.И. Паркова; заявка № 2004115714/04 от 25.05.2004 г. EDN: ZFUHOQ

11. Карелина М.Ю., Костюк И.В., Черепнина Т.Ю., Рогов В.Р. Некоторые особенности расчета долговечности узлов и деталей машин // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 3. С. 25-30. https://doi.org/10.22213/2413-1172-2020-3-25-30

12. Изотова А.И., Тимошенко В.М., Кирьянов Ю.И., Изотов С.А. Снижение износа щеток за счет применения твердой смазки на основе дисульфида молибдена // Наука – производство – технологии – экология: Сборник материалов: В 8 т. Т. 4. Киров, 11-15 сентября 2006 г. Киров: Вятский государственный университет, 2006. С. 232-234. EDN: RWLBQZ

13. Гайдар С.М., Лапсарь О.М., Пикина А.М., Ветрова С.М. Экспериментальное исследование влияния эпиламированого

References

1. Kravchenko I.N., KarelinaM.Yu., Zubrilina E.M., Kolomeychenko A.A. Resource-saving technologies of derivatization of functional nanostructured coatings by high-speed application methods. *Vestnik of Don State Technical University*. 2015;15(3):19-27. (In Russ.) https://doi.org/10.12737/12590

2. Karelina M.Y. Influence of fluoride-containing organic surfactants on the performance of the engine. *Techniko-tekhnologicheskie problemy servisa*. 2015;1:12-16. (In Russ.)

3. Yankilevich A.M. Dry adaptive lubricants Modengy™. *Truboprovodnaya armature i oborudovanie.* 2022;1(118):8. (In Russ.)

4. Zelenina A.V., Gileta V.P., Samul A.G. Ultrafine surface plastic deformation of the VT3-1 alloy using a graphite-based lubricant. *Intellektualniy potentsial Sibiri*: *The 32nd Regional Scientific Student Conference*: *Conference Proceedings*. In 5 parts, Novosibirsk, May 20-25, 2024. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2024. Pp. 149-151. (In Russ.)

5. Karelina M.Yu., Gaidar S.M. Research of efficiency of tribotechnical preparations on the basis of nanomaterials. *Gruzovik*. 2015;4:17-29. (In Russ.)

6. Gaidar S.M., Volkov A.A., Karelina M.Yu. Fluoro-surfactant adsorption and its effect on tribo-coupling lubrication under boundary and hydrodynamic friction conditions. *Trudy GOSNITI*. 2015;118:113-124. (In Russ.)

7. Topilina S.V. Development of a method for the production of high-temperature grease based on a calcium sulfonate thickener. *XXIX Regional Conference of Young Scientists and Researchers of the Volgograd region*: *Conference proceedings*, Volgograd, September 16, 2024. Volgograd: Volgograd State Technical University, 2024. Pp. 43-44. (In Russ.)

8. Trukhanovich A.A., Ledneva A.A. The main characteristics of lubricants for wire drawing for metal cord, their influence on drawing quality. *Foundry Production and Metallurgy*. 2008;2:72-74. (In Russ.)

9. Gaidar S.M. Epilamated graphite and method of its obtaining: Patent RU2329946 C1, IPC C01B31/00, C08J 5/00, C08K 7/00; application No. 2006146311/15, 2008. (In Russ.)

10. Ryabinin N.A., Ryabinin A.N., Gaidar S.M., Lyashenko M.N., Parkova G.I. Antiwear and antiscoring additive for plastic greases: Patent for invention U2266315 C1, application No. 2004115714/04, 2005. (In Russ.)

11. Karelina M.Yu., Kostyuk I.V., Cherepnina T.Yu., Rogov V.R. Some features of calculating durability of machine components and parts. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2020;23(3):25-30. (In Russ.) https://doi.org/10.22213/2413-1172-2020-3-25-30

12. Izotova A.I., Timoshenko V.M., Kiryanov Yu.I., Izotov S.A. Reducing the brush wear due to the use of solid lubricants based on molybdenum disulfide. *Nauka – Proizvodstvo – Tekhnologiya – Ekologiya*: Collection of materials: in 8 volumes, Kirov, September 11-15, 2006, Vol. 4. Kirov: Vyatka State University, 2006. Pp. 232-234. (In Russ.)

13. Gaidar S.M., Lapsar O.M., Pikina A.M., Vetrova S.M. Experimental study of effect of epilamed graphite on tribological characteristics of tribocoupling. *Tekhnologia Metallov*. 2024;12:22-25. (In Russ.)

14. Selkin V.P., Grigoriev F.A., Sterekhov O.S. The effect of the introduction of single-walled carbon nanotubes into a mineral- and vegetable-based lubricant on the friction coefficient of a steel-steel contact pair. *New Technologies. Science, Engineering, Pedagogics*: *Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference*, Moscow, February

графита на трибохарактеристики трибосопряжений // Технология металлов. 2024. № 12. С. 22-25. EDN: BMDAIB

14. Селькин В.П., Григорьев Ф.А., Стерехов О.С. Влияние введения одностенных углеродных нанотрубок в смазки на минеральной и растительной основе на коэффициент трения контактной пары сталь-сталь // Новые технологии. Наука, техника, педагогика = New Technologies. Science, Engineering, Pedagogics: Материалы Всероссийской научно-практической конференции = Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference, Москва, 19-26 февраля 2024 г. М.: Московский Политех, 2024. С. 263-267. EDN: JHBMUE

15. Узлов А.А., Гайдар С.М. Исследование влияния эпиламированного молибдена на трибохарактеристики трибосопряжений // Чтения академика В.Н. Болтинского: Сборник статей. Семинар. Москва, 22-23 января 2025 г. М.: ООО «Сам Полиграфист», 2025. Ч. 2. С. 335-338. EDN: OAQYHP

19-26, 2024. Moscow: Moscow Polytechnic Institute, 2024. Pp. 263-267. (In Russ.)

15. Uzlov A.A., Gaidar S.M. Investigation of the effect of epilamated molybdenum on tribocoupling characteristics. *Chteniya akademika V.N. Boltinskogo*: *Collection of papers*. Seminar (Moscow, January 22-23, 2025. Moscow: OOO "Sam Polygraphist", 2025. Pp. 335-338. (In Russ.)

Информация об авторах

[1] **Гайдар Сергей Михайлович,** д-р техн. наук, профессор; techmash@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-4290-2961; SPIN-код: 6714-3698, AuthorID: 574130

[2] **Пикина Анна Михайловна,** канд. техн. наук, доцент; pikina@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7116-3526; SPIN-код: 3187-8973, AuthorID: 1093671

[3] **Барчукова Алина Сергеевна,** аспирант; barchukova@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7202-291X; SPIN-код: 2129-7541, AuthorID: 1176021

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

[1, 2, 3] Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство); 119071, Российская Федерация, г. Москва, ул. Малая Калужская, 1

Author Information

Sergey M. Gaidar [1], DSc (Eng), Professor; techmash@rgau-msha.ru, https://orcid.org/0000-0003-4290-2961; ScopusAuthorID: 57191589797; ResearcherID: I-4723-2018

Anna M. Pikina [2], CSc (Eng), Associate Professor; pikina@rgau-msha.ru✉, https://orcid.org/0000-0001-7116-3526

Alina S. Barchukova [3], postgraduate student; barchukova@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7202-291X

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

[1,2,3] Kosygin Russian State University (Technology. Design. Art); 119071, Russian Federation Moscow, Malaya Kaluzhskaya Str., 1

Вклад авторов

С.М. Гайдар – научное руководство, формулирование основных направлений исследований, формулирование общих выводов;
А.М. Пикина – анализ литературы, обработка результатов исследований, подготовка рукописи;
А.С. Барчукова – анализ литературы, обработка результатов исследований, подготовка рукописи.

Статья поступила 19.09.2024, после рецензирования и доработки 28.04.2025; принята к публикации 29.04.2025

Author Contribution

S.M. Gaidar – research supervision, conceptualization, general conclusions;
A.M. Pikina – literature review, data curation, formal analysis, writing – original draft;
A.S. Barchukova – literature review, data curation, formal analysis, writing – original draft.

Received 19.09.2024; Revised 28.04.2025; Accepted 29.04.2025

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 621.824.33:658.562.3:303.094.7
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-81-89

Оптимизация процесса входного контроля распределительных валов при помощи имитационного моделирования

***П.В. Голиницкий*[1]✉, *У.Ю. Антонова*[2], *Э.И. Черкасова*[3], *А.Н. Самордин*[4], *Д.А. Пупкова*[5]**

[1, 2, 3, 4, 5] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

[1] gpv@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0001-7303-1658

[2] uantonova@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-0126-3550

[3] e.cherkasova@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-2495-2028

[4] metr@rgau-msha.ru

[5] bogolyubova@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-0273-2796

Аннотация. Согласно исследованиям до 35% распределительных валов выбраковываются при дефектации как не подлежащие ремонту, из них 50% – по причине износа кулачков (2/3) и опорных шеек (1/3). Остальные дефекты распределены относительно равномерно. Данная статистика собрана на основе обработки большого массива данных и может не соответствовать конкретному предприятию, поэтому создание однозначной модели не представляется возможным. Нотации позволяют графически отобразить процесс и провести его имитационное моделирование для выявления уязвимых мест. К одной из таких нотаций можно отнести BPMN. С целью повышения производительности процесса дефектации распределительных валов создали две модели в нотации BPMN: равномерное распределение по операциям вероятности обнаружения брака и неравномерное распределение вероятности в соответствии со статистикой. Имитационное моделирование процесса дефектации 100 распределительных валов двигателя ЯМЗ-236, построенного в нотации BPMN, проводилось в программе Business Studio. В реальном процессе контроль параметров 100 валов осуществлялся в условиях специализированного ремонтного предприятия АБ-Инжиниринг универсальными и специализированными средствами измерений. В результате сравнения реального процесса и его модели более близкие результаты получены при неравномерном распределении, что было учтено при оптимизации. Оптимизация процесса входного контроля производилась исходя из процента выбракованных изделий и продолжительности операции. Затрачиваемое время на процесс дефектации после оптимизации сократилось в 1,35 раза, расхождение между моделью и реальными данными процесса не превысило 5%, что говорит о правильном подходе к моделированию процессов, связанных с высокой степенью неопределенности.

Ключевые слова: вал; дефектация; процесс дефектации; контроль; оптимизация процесса входного контроля; имитационное моделирование; неравномерное распределение; равномерное распределение

Для цитирования: Голиницкий П.В., Антонова У.Ю., Черкасова Э.И., Самордин А.Н., Пупкова Д.А. Оптимизация процесса входного контроля распределительных валов при помощи имитационного моделирования // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 3. С. 81-89. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-81-89

ORIGINAL ARTICLE

Optimization of the incoming inspection of camshafts using simulation modeling

***P.V. Golinitskiy*[1]✉, *U.Yu. Antonova*[2], *E.I. Cherkasova*[3], *A.N. Samordin*[4], *D.A. Pupkova*[5]**

[1,2,3,4,5] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

[1] gpv@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0001-7303-1658

[2] uantonova@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-0126-3550

[3] e.cherkasova@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-2495-2028

[4] metr@rgau-msha.ru

[5] bogolyubova@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-0273-2796

Abstract. According to research, up to 35% of camshafts are rejected as unrepairable, of which 50% are due to wear of cams (2/3) and bearing journals (1/3). The remaining defects are distributed relatively evenly. These statistics are collected based on the processing of a large data set and may not correspond to a particular enterprise, so it is not possible to make a universal model. Notations can graphically represent the process and provide its simulation

© Голиницкий П.В., Антонова У.Ю., Черкасова Э.И., Самордин А.Н., Пупкова Д.А., 2025

modelling to identify vulnerabilities. A typical example of notations of BPMN. In order to increase the productivity of the camshaft fault inspection, the authors have made two models in the BPMN notation: uniform distribution of probability of defect detection by operations and non-uniform distribution of probability, according to statistics. Simulation modelling of the fault inspection of 100 camshafts of the YaMZ-236 engine built in the BPMN notation was carried out in the Business Studio software. In the real process, the parameters of 100 shafts were controlled in the conditions of the specialized repair enterprise AB-Engineering by universal and specialized measuring instruments. After comparing the real process and its model, closer results were obtained with non-uniform distribution, which was taken into account during the optimization. The input inspection procedure was optimized based on the percentage of rejected products and the operation duration. The time spent on fault inspection after optimization was reduced in 1.35 times, the discrepancy between the model and the real process data did not exceed 5%, which indicates a correct approach to modelling processes associated with a high degree of uncertainty.

Keywords: shaft; fault inspection; fault inspection procedure; inspection; input inspection optimization; simulation modelling; non-uniform distribution; uniform distribution

For citation: Golinitskiy P.V., Antonova U.Yu., Cherkasova E.I., Samordin A.N. Optimization of the incoming inspection of camshafts using simulation modeling. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2025;27(3):81-89 (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-81-89

Введение

Входной контроль при ремонте двигателя позволяет определить возможные дефекты и оценить результат [1]. Дефектация позволяет определить возможность дальнейшего использования или проведения восстановления изношенных деталей [2]. Особую роль при дефектации играет метрологическое обеспечение, позволяющие установить годность деталей [3, 4]. Дефектация является одним из ключевых процессов на производстве. В случае неправильного решения могут возрасти как процент бракованных изделий, так и затрачиваемое время, что приводит к росту экономических потерь. Для сокращения затрачиваемого времени необходимо проводить оптимизацию процесса. Имитационное моделирование позволяет до внедрения оптимизированного процесса оценить его эффективность.

Для предотвращения негативных последствий оптимизации можно использовать нотации, позволяющие графически отобразить процесс и провести его имитационное моделирование для выявления уязвимых мест [5, 6]. Поддерживать двухстороннюю связь с реальным процессом, собирать данные в автоматизированном режиме и быстро внедрять оптимизированный процесс позволяют программные продукты BPMN (Business Process Model and Notation) и EPC (Event-Driven Process Chain) [7, 8].

Нотация BPMN на текущий момент насчитывает 5 поколений, последняя версия 2.0.2 выпущена в 2014 г. В стандарте ISO/IEC19510 закреплена версия BPMN2.0.1. Помимо элементов, необходимых для описания процессов, BPMN содержит математическое ядро и автоматизированное описание в формате XPDL, позволяющие передавать модель в неизменном виде между различными видами программного обеспечения [9].

Отличительной особенностью BPMN является возможность расположения дорожек как вертикально, так и горизонтально. Важную роль при построении модели играет верификация, то есть соответствие описанного процесса реальному [10].

Проведение имитационного моделирования для машиностроительного производства не представляет больших трудностей, поскольку процессы зачастую стабильны, что позволяет с высокой точностью прогнозировать результат, но на ремонтном предприятии высока степень неопределенности, особенно при дефектации изношенных деталей.

Согласно исследованиям до 35% распределительных валов выбраковываются во время дефектации как не подлежащие ремонту, из них 50% – по причине износа кулачков (2/3) и опорных шеек (1/3) [11]. Остальные дефекты распределены относительно равномерно. Данная статистика собрана на основе обработки большого массива данных и может не соответствовать конкретному предприятию, поэтому создание однозначной модели не представляется возможным. Для решения данной проблемы воспользуемся нотацией BPMN.

Цель исследований: повышение производительности процесса дефектации распределительных валов с помощью имитационного моделирования.

Материалы и методы

Имитационное моделирование процесса дефектации распределительного вала двигателя ЯМЗ-236, построенного в нотации BPMN, проводилось в программе Business Studio согласно базовому процессу, представленному на рисунке 1.

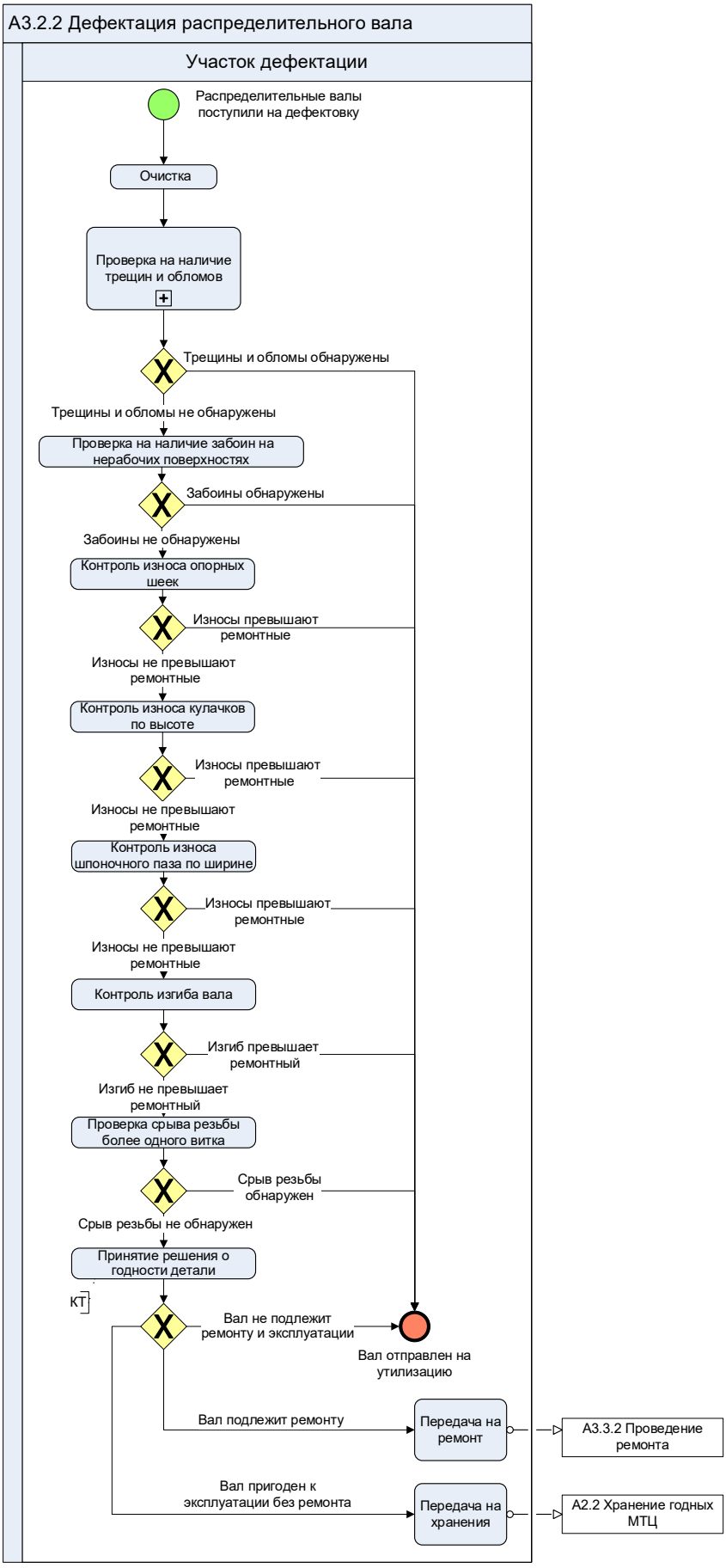


Рис. 1. Процесс дефектации распределительного вала двигателя ЯМЗ-236

Fig. 1. Fault inspection of the camshaft of the YaMZ-236 engine

Фактическое время проведения операций контроля при дефектации распределительного вала представлено в таблице 1.

Контроль параметров 100 валов осуществлялся в условиях специализированного ремонтного предприятия (АБ-Инжиниринг) универсальными и специализированными средствами измерений: микрометр Dasqua 4230-2005 для опорных шеек; штангенциркуль Dasqua 2000-2005 для кулачков; индикатор Dasqua 5260-3705 для контроля изгиба; калибр для шпоночного паза.

Результаты и их обсуждение

В нотации BPMN создали две модели, описывающие равномерное распределение по операциям вероятности обнаружения брака и неравномерное распределение вероятности в соответствии со статистикой.

Для получения более объективных результатов ввели следующие ограничения: количество проверенных валов равно целому числу; на проверку поступило 100 валов; суммарно отправлено на ремонт и в утилизацию 100 валов; процент брака стремится к 35%; вероятность обнаружения дефекта снижается по мере прохождения операций.

Результаты моделирования дефектации при равномерном и неравномерном распределении дефектов распределительных валов представлены в таблице 2.

В результате проведенного моделирования определили, что дефектация 100 валов осуществляется быстрее при равномерном распределении дефектов (рис. 2).

При неравномерном распределении получены результаты, более близкие к реальному процессу. Оптимизация процесса входного контроля производилась исходя из процента выбракованных изделий и продолжительности операции.

Оптимизированный процесс дефектации распределительного вала представлен на рисунке 3.

Время, затраченное на операции контроля при дефектации 100 валов в моделированном и реальном процессах, отражено на рисунке 4.

Результаты моделирования оптимизированного процесса при равномерном и неравномерном распределении дефектов распределительных валов приведены в таблице 3.

Процесс дефектации после оптимизации на основе процессной модели ускорился в 1,35 раза. Расхождение между моделью и реальными данными процесса не превысило 5%, что говорит о правильном подходе к моделированию процессов, связанных с высокой степенью неопределенности.

Таблица 1

Фактическое время проведения операций контроля при дефектации распределительного вала двигателя ЯМЗ-236

Table 1

Actual time of control operations during camshaft inspection

Вид контроля *Type of control*	**Время проведения, с** *Time spent on the operation, s*
Проверка на наличие трещин и обломов *Checking for cracks and breaks*	173
Проверка на наличие забоин на нерабочих поверхностях *Checking for nicks on non-working surfaces*	162
Контроль износа опорных шеек / *Checking the wear of bearing journals*	23
Контроль износа кулачков по высоте / *Control of cam wear by height*	9
Контроль износа шпоночного паза по ширине *Control of keyway wear across the width*	3
Контроль изгиба вала / *Shaft bending control*	36
Проверка срыва резьбы более одного витка *Checking for thread stripping of more than one turn*	3
Всего / *Total*	409

Таблица 2

Результаты моделирования дефектации распределительных валов двигателя ЯМЗ-236

Table 2

Results of fault inspection modeling in the camshafts of the YaMZ-236 engine

Вид контроля *Type of control*	**При равномерном распределении дефектов распределительных валов** *In case of uniform distribution of camshaft defects*			**При неравномерном распределении дефектов распределительных валов** *In case of non-uniform distribution of camshaft defects*		
	Количество проверенных валов *Number of shafts tested*	**Количество забракованных валов** *Number of rejected shafts*	**Затраченное время, с** *Time spent, s*	**Количество проверенных валов** *Number of shafts tested*	**Количество забракованных валов** *Number of rejected shafts*	**Затраченное время, с** *Time spent, s*
Проверка на наличие трещин и обломов *Checking for cracks and breaks*	100	8	17300	100	4	17300
Проверка на наличие забоин на нерабочих поверхностях *Checking for nicks on non-working surfaces*	92	6	14904	96	4	15552
Контроль износа опорных шеек *Checking the wear of bearing journals*	86	5	1978	92	6	2116
Контроль износа кулачков по высоте *Control of cam wear by height*	81	5	729	86	12	774
Контроль износа шпоночного паза по ширине *Control of keyway wear across the width*	76	4	228	74	4	222
Контроль изгиба вала *Shaft bending control*	72	4	2592	70	3	2520
Проверка срыва резьбы более одного витка *Checking for thread stripping of more than one turn*	67	3	201	67	2	201
Брак, % / *Faults, %*	35			35		
Время дефектации 100 валов, с *Fault inspection time for 100 shafts, s*	37932			38685		

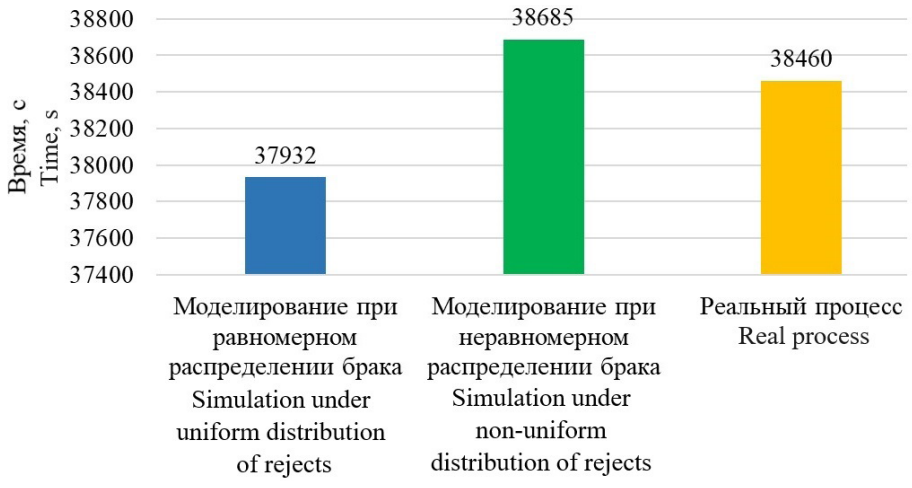


Рис. 2. Сравнение времени дефектации 100 валов

Fig. 2. Comparing fault inspection time of 100 shafts

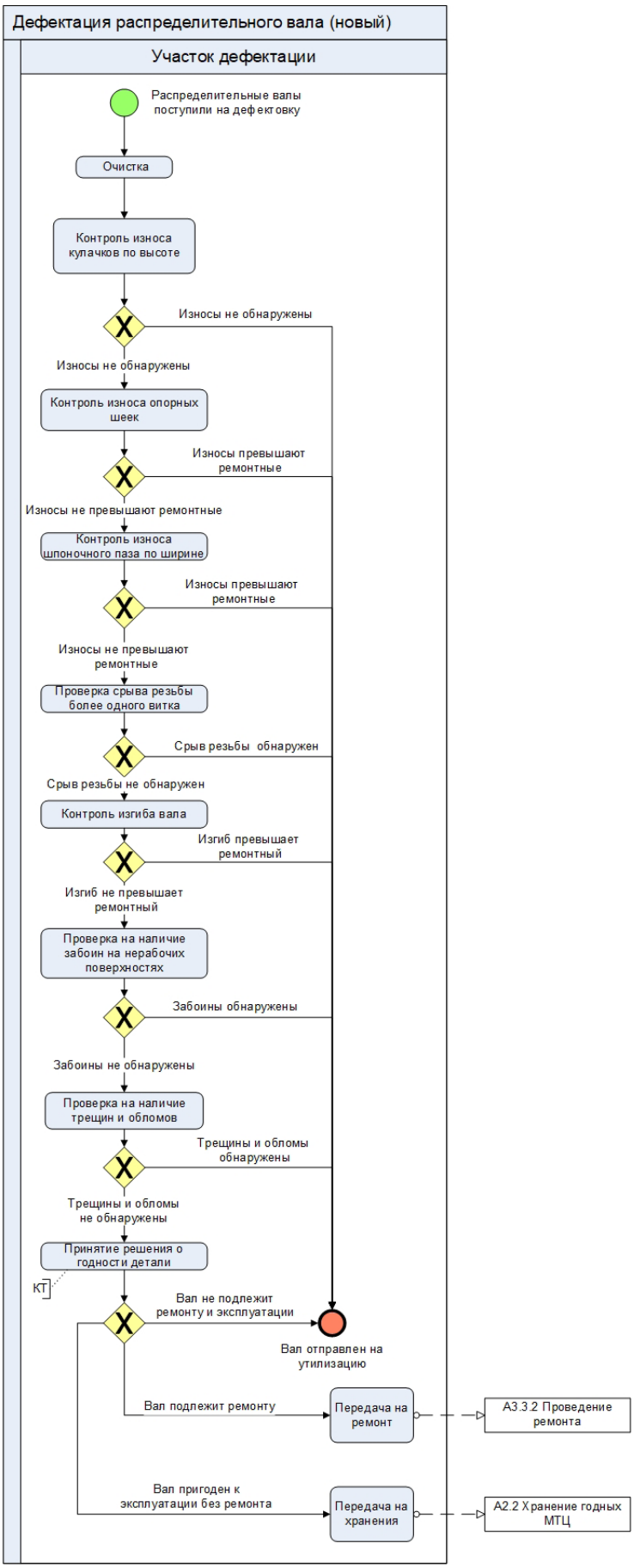


Рис. 3. Оптимизированный процесс дефектации распределительного вала двигателя ЯМЗ-236

Fig. 3. Optimized process of fault inspection of the camshaft of the YaMZ-236 engine

Таблица 3

Результаты моделирования оптимизированного процесса при равномерном и неравномерном распределении дефектов распределительных валов двигателя ЯМЗ-236

Table 3

Results of modeling the optimized process with uniform distribution of faults in the camshafts of the YaMZ-236 engine

Вид контроля *Type of control*	**При равномерном распределении дефектов распределительных валов** *With uniform distribution of camshaft defects*			**При неравномерном распределении дефектов распределительных валов** *In case of uneven distribution of camshaft defects*		
	Количество проверенных валов *Number of shafts tested*	**Количество забракованных валов** *Number of rejected shafts*	**Затраченное время, с** *Time spent, s*	**Количество проверенных валов** *Number of shafts tested*	**Количество забракованных валов** *Number of rejected shafts*	**Затраченное время, с** *Time spent, s*
Контроль износа кулачков по высоте *Control of cam wear by height*	100	8	900	100	12	900
Контроль износа опорных шеек *Checking the wear of bearing journals*	92	6	2116	88	7	2024
Контроль износа шпоночного паза по ширине *Control of keyway wear across the width*	86	5	258	81	6	243
Проверка срыва резьбы более одного витка *Checking for thread stripping of more than one turn*	81	5	243	75	3	225
Контроль изгиба вала *Shaft bending control*	76	4	2736	72	3	2592
Проверка на наличие забоин на нерабочих поверхностях *Checking for nicks on non-working surfaces*	72	4	11664	69	3	11178
Проверка на наличие трещин и обломов *Checking for cracks and breaks*	67	3	11591	66	1	11418
Брак, % / *Faults, %*	35			35		
Время дефектации 100 валов, с *Fault inspection time for 100 shafts, s*	29508			28580		

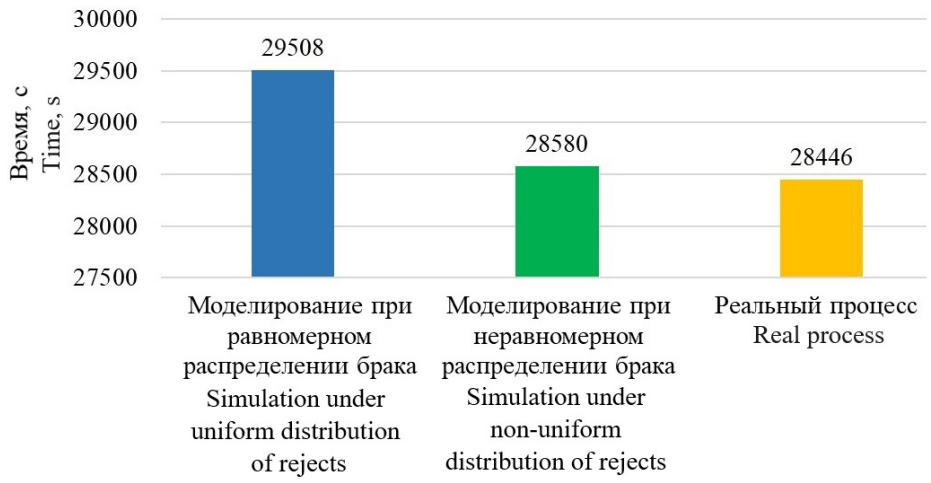


Рис. 4. Сравнение времени оптимизированного процесса дефектации

Fig. 4. Comparing the time requirements of optimized fault inspection

Выводы

Для процесса дефектации распределительного вала наиболее эффективным является неравномерное распределение на основе больших данных, которое позволило с погрешностью не более 5% провести оптимизацию процесса, сократив затрачиваемое время в 1,35 раза.

Список источников

1. Shkaruba N.Z., Leonov O.A. Permissible measurement error in monitoring the shape and position of surfaces. Russian Engineering Research. 2021;41(3):211-214. https://doi.org/10.3103/S1068798X21030175

2. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. Дефектация валов и шестерен с позиции обеспечения качества соединений при ремонте редукторов сельхозмашин // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 4. С. 48-52. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-48-52

3. Шкаруба Н.Ж., Леонов О.А. Обоснование допускаемой погрешности измерений при контроле отклонений формы и расположения поверхностей деталей // Вестник машиностроения. 2020. № 12. С. 42-45. EDN: WJHSVG

4. Leonov O.A., Shkaruba N.Z. Normalization of the indirect measurement errors of acceptance engine tests. Measurement Techniques. 2022;65:564-568. https://doi.org/10.1007/s11018-023-02121-z

5. Kheifetz M.L. Design of mechatronic engineering systems in digitalized traditional and additive manufacturing. Journal of Advanced Materials and Technologies. 2021;6(1):18-29. https://doi.org/10.17277/jamt.2021.01.pp.018-029

6. Шендрикова О.О., Елфимова И.Ф. Исследование процессов цифровизации промышленных предприятий // Организатор производства. 2019. Т. 27, № 1. С. 16-24. https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.88.65.002

7. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Гринченко Л.А., Пупкова Д.А. Создание цифровой модели процесса комплектации и сборки для ремонтного производства // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 2 (70). С. 458-466. EDN: YIHLXR

8. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Гринченко Л.А. Цифровая модель процесса комплектации и сборки при ремонте двигателей // Сельский механизатор. 2024. № 5. С. 39-40. EDN: CUUAJP

9. Голиницкий П.В., Антонова У.Ю., Гринченко Л.А., Видникевич С.Ю. Применение цифровых инструментов для совершенствования производственного процесса // Компетентность. 2023. № 5. С. 32-37. EDN: CHXXCZ

10. Бондарева Г.И., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. и др. Разработка алгоритма верификации запасных частей при ремонте машин // Сельский механизатор. 2022. № 10. С. 27-29. EDN: EFMNHY

11. Хасанов Р.Х. Прогнозирование ресурса составных частей автомобильных двигателей // Прогрессивные технологии в транспортных системах: Сборник докладов VII Российской научно-практической конференции, Оренбург, 1-2 декабря 2005 г. Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2005. С. 333-337. EDN: TMFNOV

References

1. Shkaruba N.Z., Leonov O.A. Permissible measurement error in monitoring the shape and position of surfaces. *Russian Engineering Research*. 2021;41(3):211-214. https://doi.org/10.3103/S1068798X21030175

2. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G. Fault inspection of shafts and gears while repairing farm machinery reduction mechanisms to assure the quality of connections. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2022;24(4):48-52. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-48-52

3. Shkaruba N.Z., Leonov O.A. Substantiation of the allowable measurement error when controlling deviations of the shape and location of the surfaces of parts. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2020;12:42-45. (In Russ.)

4. Leonov O.A., Shkaruba N.Z. Normalization of the indirect measurement errors of acceptance engine tests. *Measurement Techniques*. 2022;65:564-568. https://doi.org/10.1007/s11018-023-02121-z

5. Kheifetz M.L. Design of mechatronic engineering systems in digitalized traditional and additive manufacturing. *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2021;6(1):18-29. https://doi.org/10.17277/jamt.2021.01.pp.018-029

6. Shendrikova O.O., Elfimova I.F. The study of processes related to digitalization of industrial enterprises. *Organizator proizvodstva = Organizer of Production*. 2019;27(1):16-24. https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.88.65.002 (In Russ.)

7. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Grinchenko L.A., Pupkova D.A. Creating a digital process model packages and assembly for repair production. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex*: *Science and Higher Education*. 2023;2(70):458-466. (In Russ.)

8. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Grinchenko L.A. Digital model of the process of packaging and assembly during engine repair. *Selskiy mekhanizator*. 2024;5:39-40. (In Russ.)

9. Golinitskiy P.V., Antonova U.Yu., Grinchenko L.A., Vidnikevich S.Yu. Digital tools to improve the manufacturing process. *Competency* (*Russia*). 2023;5:32-37. (In Russ.)

10. Bondareva G.I., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Temasova G.N. Development of an algorithm for the verification of spare parts during the repair of machines. *Selskiy mekhanizator*. 2022;10:27-29. (In Russ.)

11. Khasanov R.Kh. Forecasting the service life of automobile engine components. *Progressive Technologies in Transport Systems*: *Proceedings of the VII Russian scientific and practical conference*, Orenburg, December 1-2, 2005. Orenburg: Orenburg State University, 2005. P. 333-337. (In Russ).

Информация об авторах

[1] **Голиницкий Павел Вячеславович,** канд. техн. наук, доцент; gpv@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0001-7303-1658; SPIN-код: 2323-0797, AuthorID: 784381

[2] **Антонова Ульяна Юрьевна,** канд. техн. наук, доцент; uantonova@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-0126-3550; SPIN-код: 5691-6381, AuthorID: 889756

[3] **Черкасова Эльмира Исламовна,** канд. с.-х. наук, доцент; e.cherkasova@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-2495-2028; SPIN-код: 5691-6381, AuthorID: 889756

[4] **Самордин Андрей Николаевич,** соискатель ученой степени кандидата наук; metr@rgau-msha.ru; SPIN-код: 4839-2231, AuthorID: 758456

[5] **Пупкова Дарья Александровна,** канд. техн. наук, bogolyubova@rgau-msha.ru; SPIN-код: 4290-2003; AuthorID: 1114336; https://orcid.org/0000-0002-0273-2796

[1, 2, 3, 4, 5] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Author Information

Pavel V. Golinitskiy [1✉], CSc (Eng), Associate Professor; gpv@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0001-7303-1658; Scopus Autor ID: 57216809753; Researcher ID: AAD-6305-2022

Uliana Yu. Antonova [2], CSc (Eng), Associate Professor; uantonova@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-0126-3550; Scopus Autor ID: 57216809631; Researcher ID: AAD-5690-2022

Elmira I. Cherkasova [3], CSc (Ag), Associate Professor; e.cherkasova@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-2495-2028; Scopus Autor ID: 57216812784; Researcher ID: AAD-5493-2022

Andrey N. Samordin [4], CSc degree seeker; metr@rgau-msha.ru

Daria A. Pupkova [5], CSc (Eng); bogolyubova@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-0273-2796

[1, 2, 3, 4, 5] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49

Вклад авторов

П.В. Голиницкий – методология, концептуализация;
У.Ю. Антонова – обзор литературы, визуализация, создание черновика рукописи;
Э.И. Черкасова – информационные ресурсы и аналитика, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование;
А.Н. Самордин – программное обеспечение;
Д.А. Пупкова – обзор литературы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 23.01.2025, после рецензирования и доработки 04.04.2025; принята к публикации 08.04.2025

Authors Contribution

P.V. Golinitskiy – methodology, conceptualization;
U.Yu. Antonova – literature review, visualization, writing – original draft;
E.I. Cherkasova – information resource and analytics, writing – manuscript review and editing;
A.N. Samordin – software;
D.A. Pupkova – literature review.

Conflict of interests

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

Received 23.01.2025; Revised 04.04.2025; Accepted 08.04.2025

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 621.315.1:621.3.064.1:001.57
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-90-99

Физическое моделирование разных видов двухфазных коротких замыканий в сельской электрической сети 0,4 кВ

А.В. Виноградов[1]✉, ***А.А. Лансберг***[2]
[1, 2] Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия
[1] winaleksandr@gmail.com✉; https://orcid.org/0000-0001-6141-984X
[2] lansbergaa@vk.com; https://orcid.org/0000-0002-2834-6092

Аннотация. Двухфазные и двухфазные на нулевой проводник короткие замыкания в сельских электрических сетях возникают при схлестывании неизолированных проводов или поавреждении изолированных проводов. Выявление параметров данных режимов на практике невозможно, поэтому их следует определять расчетным методом. Однако в нормативных документах и в источниках литературы не представлены зависимости, позволяющие идентифицировать данные режимы на всем протяжении линии электропередачи, в том числе в точке установки устройств секционирования. С целью определения электрических параметров, характерных для режимов двухфазного и двухфазного на нулевой проводник коротких замыканий в сельских электрических сетях 0,4 кВ, проведено исследование с помощью метода физического моделирования. Физическая модель сельской электрической сети содержала трансформатор ТТ-0,16-380/38 $Y/Y_н$-0. Соотношение междуфазного и фазного напряжений – 38/22 В. Использовали нихромовую проволоку из сплава Х20Н80 сечением 0,5 мм^2, сопротивлением 5,6 Ом/м. Сопротивление заземления нейтрали трансформатора приняли как 4 Ом, для двух повторных заземлений нулевого провода – 30 Ом. В результате выявлено, что при двухфазном коротком замыкании в сети 0,4 кВ токи в поврежденных фазах равны, а соотношение напряжений на неповрежденной и поврежденных фазах составило 1,3…1,9. При двухфазном коротком замыкании на нулевой проводник в одной из фаз значение тока равно алгебраической сумме тока нейтрали и тока, протекающего в другой фазе. При этом соотношение напряжений неповрежденной фазы к поврежденным фазам изменяется в зависимости от приближения к точке замыкания. Выявленные зависимости можно использовать для идентификации данных режимов микроконтроллерными блоками управления секционирующих устройств, что позволит диспетчеру сети получать информацию об их возникновении и сократить время на поиск и выявление причин повреждений.

Ключевые слова: электрическая сеть; сельские электрические сети; двухфазное короткое замыкание; моделирование; моделирование режимов; физическая модель сельской электрической сети; трансформатор

Для цитирования: Виноградов А.В., Лансберг А.А. Физическое моделирование разных видов двухфазных коротких замыканий в сельской электрической сети 0,4 кВ // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 3. С. 90-99. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-90-99

ORIGINAL ARTICLE

Physical simulation of different types of two-phase short circuits in a rural 0.4 kV power supply network

A.V. Vinogradov[1]✉, ***A.A. Lansberg***[2]
[1,2] Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia
[1] winaleksandr@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-6141-984X
[2] lansbergaa@vk.com; https://orcid.org/0000-0002-2834-6092

Abstract. Rural power supply networks feature two-phase and two-phase zero-conductor short-circuits in in case of crossed uninsulated wires or damaged insulated wires. It is practically impossible to detect the parameters

© Виноградов А.В., Лансберг А.А., 2025

of these modes, so they should be calculated. However, normative documents and literature sources do not provide dependencies to identify these modes along the entire length of the transmission line, including at the point of installation of sectionalizing devices. In order to determine the electrical parameters characteristic for the modes of two-phase and two-phase zero-conductor short circuits in rural 0.4 kV power supply networks, the authors used the method of physical simulation. The physical model of a rural power supply network contained a transformer TT-0.16-380/38 Y/Yn-0. The phase-to-phase voltage ratio was 38/22 V. The authors used a nichrome wire of the X20H80 alloy with a cross-section of 0.5 mm^2 and a resistance of 5.6 Ohm/m. The transformer neutral grounding resistance was taken as 4 Ohm, and that of 30 Ohm – for two repeated neutral wire grounding. As a result, it was found that in a two-phase short circuit in a 0.4 kV network, the currents in the damaged phases are equal, and the ratio of voltages on the undamaged and damaged phases was 1.3 to 1.9. In the case of a two-phase short circuit to the neutral conductor in one of the phases, the current value is equal to the algebraic sum of the neutral current and the current flowing in the other phase. At the same time, the voltage ratio of the undamaged phase to the damaged phases changes depending on the proximity to the fault point. The revealed dependencies can be used to identify these modes by microcontroller control units of sectionalizing devices, which will provide the network dispatcher with information about their occurrence and reduce the time for search and identification of the causes of damage.

Keywords: electric network; rural power supply networks; two-phase short circuit; simulation; mode simulation; physical model of a rural power supply network; transformer

For citation: Vinogradov A.V., Lansberg A.A. Physical simulation of different types of two-phase short circuits in a rural 0.4 kV power supply network. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2025;27(3):90-99 (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-90-99

Введение

Моделирование режимов работы электрических сетей 0,4 кВ позволяет правильно настраивать работу средств релейной защиты и автоматики. Внедрение в сельские электрические сети средств секционирования и резервирования (секционирующие пункты, мультиконтактные коммутационные системы[1]) позволяет защищать участки сети от аварийных режимов и информировать диспетчера сети о возникновении аварийных режимов на конкретном участке сети. Правильная работа данных устройств требует определения параметров режимов работы электрической сети по всей ее протяженности. Для эффективной защиты электрической сети микроконтроллерные блоки управления устройств секционирования должны правильно идентифицировать аварийные режимы, в том числе двухфазные, двухфазные на нулевой проводник короткие замыкания. Зависимости токов и напряжений в этих аварийных режимах можно определить методами математического, компьютерного и физического моделирования.

Моделирование как метод исследования применяется для изучения режимов электрических сетей 0,4 кВ [1], электробезопасности [2, 3], оценки эффективности устройств защиты электрических сетей [4], выбора значения тока аварийного режима для настройки уставок защитного коммутационного аппарата [5, 6].

С использованием методов моделирования выполняется оценка эффективности действующих защит электрических сетей 0,4 кВ [7], а также осуществляется разработка способов повышения электробезопасности их эксплуатации [8].

Одним из актуальных вопросов является моделирование режима устойчивого однофазного короткого замыкания на воздушных линиях электропередачи 0,4 кВ, которое можно выполнить разными методами и программными средствами [9-11]. Исследование данного режима осуществлялось также путем физического моделирования [12] и с использованием компьютерных моделей в программном комплексе MATLAB Simulink [13, 14]. Промышленные исследования данного режима в действующей электрической сети 0,4 кВ впервые были реализованы на полигоне ПАО «Россети Урал»-«Челябэнерго» [15]. В научных работах [16, 17] отмечена необходимость моделирования аварийного режима однофазного короткого замыкания для правильной настройки уставок защитных коммутационных аппаратов ввиду трудности его распознавания.

Действующий ГОСТ 28249-93 не предлагает методики расчета токов двухфазного короткого замыкания на нулевой проводник. Такие режимы чаще всего возможны при схлестывании проводов воздушных линий, выполненных неизолированными проводами, при выходе из строя изоляции изолированных

[1] Виноградов А.В. Принципы управления конфигурацией сельских электрических сетей и технические средства их реализации: Монография. Орёл: Изд-во «Картуш», 2022. 392 с. EDN: DOFZZD.

проводников по причине перегрузок, перетирания, механического повреждения и в других обстоятельствах. Для правильной их идентификации и осуществления защиты от них средствами секционирования важно понимать особенности указанных режимов, их отличия друг от друга и от других режимов.

При обзоре исследований не выявлены зависимости, характеризующие соотношение напряжений на неповрежденной и поврежденных фазах по длине линии в двух рассматриваемых режимах, а также соотношений токов в поврежденных фазах при двухфазном коротком замыкании на нулевой проводник. Знание таких соотношений позволит выполнять идентификацию двухфазного и двухфазного на нулевой проводник коротких замыканий устройствами секционирования электрических сетей 0,4 кВ. В рамках концепции секционирования сельских электрических сетей, обоснованной в работе[2], в июне 2023 г. в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» внедрено устройство сетевого секционирования электрических сетей 0,4 кВ типа МКС-2-3В (патент РФ № 2802722)». Устройство МКС-2-3В предназначено для повышения надежности электроснабжения и защищенности от удаленных однофазных коротких замыканий, значения которых могут быть сопоставимы и ниже рабочих токов сети или номинального тока защитного коммутационного аппарата. Это приводит к тому, что при фазном напряжении 220 В защитные коммутационные аппараты не срабатывают за требуемые 0,4 секунды (согласно п. 1.7.79 Правил устройства электроустановок (ПУЭ) при возникновении аварийного режима).

Разработанное устройство сетевого секционирования типа МКС-2-3В введено в эксплуатацию в январе 2024 г. (рис. 1).

Устройство МКС-2-3В содержит два низковольтных вакуумных контактора, управляемых микроконтроллерным блоком, который с использованием датчиков тока и напряжения обеспечивает мониторинг фазных напряжений, фазных токов и токов в нейтральных проводах в точке его установки. Данные электрические параметры в совокупности с положением вакуумных контакторов передаются в центр управления сетями с использованием SCADA-системы ОИК «СИСТЕЛ». Это позволяет диспетчеру электросетевой компании непрерывно получать данные о состоянии электрической сети и обеспечивать управление ее конфигурацией.

[2] Виноградов А.В. Принципы управления конфигурацией сельских электрических сетей и технические средства их реализации: Монография. Орёл: Изд-во «Картуш», 2022. 392 с. EDN: DOFZZD.

Для разработанного устройства типа МКС-2-3В были обоснованы уставки для защиты электрических сетей 0,4 кВ от удаленных однофазных коротких замыканий [18]. Расширение функционала устройства заключается в обеспечении возможности идентификации микроконтроллерным блоком устройства двухфазных коротких замыканий и двухфазных коротких замыканий на нулевой провод, определении и отключении участков сети, на которых выявлены данные режимы, и в уведомлении диспетчера о данных режимах, об участке их возникновения и их отключении. Это позволит сократить время поиска и выявления вида повреждений и, следовательно, сократить время устранения аварии и время перерывов в электроснабжении сельских потребителей. Важно исследовать характер соотношения токов и фазных напряжений при режимах двухфазного и двухфазного на нулевой проводник коротких замыканий посредством моделирования режимов на физической модели электрической сети.

Цель исследований: определить зависимости токов и напряжений, присущих режимам двухфазного и двухфазного на нулевой проводник коротких замыканий в сельских электрических сетях 0,4 кВ, для идентификации указанных режимов и защиты от них с помощью устройств секционирования, применив метод физического моделирования.

Рис. 1. Устройство секционирования линий электропередачи 0,4 кВ типа МКС-2-3В в ходе опытно-промышленной эксплуатации

Fig. 1. Sectionalizing device for 0.4 kV power transmission lines of the MKS-2-3V type during pilot operation

Материалы и методы

Для исследования аварийных режимов устойчивых двухфазного и двухфазного на нулевой проводник коротких замыканий использовалось физическое моделирование на разработанной модели электрической сети 10/0,4 кВ, принцип работы которой подробно изложен в работе [18]. Для физической модели, согласно теории подобия, обосновали коэффициенты подобия по току, напряжению, мощности, сопротивлению, исходя из опыта короткого замыкания используемого трансформатора малой мощности и промышленных трансформаторов типов ТМ-63, ТМ-100, ТМ-160, ТМ-250 [18]. В качестве модели трансформатора использовали трансформатор малой мощности ТТ-0,16-380/38 $Y/Y_н$-0. Соотношение междуфазного и фазного напряжений – 38/22 В. Для моделирования участков линий электропередачи 0,4 кВ на физической модели использовали нихромовую проволоку из сплава Х20Н80 сечением 0,5 мм^2, сопротивлением 5,6 Ом/м [18]. Пересчет значения полного сопротивления модели линии электропередачи на полное сопротивление провода (Z, Ом/км) действующей сельской электрической сети 0,4 кВ был реализован с использованием коэффициента подобия по сопротивлению [18].

В действующих электрических сетях 0,4 кВ заземление нейтральной точки трансформатора и повторные заземления нулевого провода воздушной линии 0,4 кВ должны выполняться с учетом требований пунктов 1.7.100-1.7.104 ПУЭ. В качестве сопротивления заземления нейтрали трансформатора приняли значение 4 Ом, а в качестве двух повторных заземлений нулевого провода – 30 Ом.

Используемая в исследованиях модель апробирована в ходе моделирования устойчивого однофазного короткого замыкания и показала высокую достоверность (отклонение – менее 8,5%) по отношению к ГОСТ 28249-93 [18]. Внешний вид модели представлен на рисунке 2.

Для исследования рассматриваемых режимов использовали часть электрической схемы модели, представленной на рисунке 3.

Представленная на рисунке 2 схема физической модели содержит: коммутационные аппараты QF1, QF2, модель силового трансформатора 10/0,4 кВ T1, клеммы K1-K13, участки ЛЭП L1-L11; автоматический выключатель для имитации аварийных режимов (QF6) и коммутации фаз физической модели, подключенных к его клеммам с целью безопасного выполнения эксперимента.

Для моделирования двухфазного и двухфазного на нулевой проводник замыканий использовали коммутационный аппарат QF6 с шунтированием фаз согласно данным рисунка 3. Двухфазное короткое замыкание имитировалось включением коммутационного аппарата QF6 с подключением к нему только проводов В и С. Для моделирования двухфазного короткого замыкания на нулевой проводник к третьей клемме коммутационного аппарата QF6 также подключался провод N. При моделировании обоих режимов нагрузка отсутствовала, при этом провод фазы А той же протяженности, что и провода поврежденных фаз В и С, находился в режиме холостого хода.

В ходе экспериментальных исследований по длине линии при каждом аварийном режиме измеряли

Рис. 2. Внешний вид физической модели сельской электрической сети 10/0,4 кВ [19]

Fig. 2. View of the physical model of the rural power supply network 10/0.4 kV [19]

фазные токи и напряжения в контрольных точках цифровым мультиметром Omix P99-MZ5-3-RS485 класса точности 0,5. Данный прибор фиксировал токи на выводе трансформатора, напряжение вдоль модели линии электропередачи измеряли мультиметром. На выводе нейтрали трансформатора установлен аналоговый амперметр класса точности 0,5. Ток в нейтрали в режиме двухфазного замыкания на нулевой проводник определен как разность токов поврежденных фаз с учетом показаний амперметра, установленного в нейтральном проводе. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Результаты измеренных на модели электрических параметров соотнесем с теми же параметрами промышленной электрической сети. Наиболее часто протяженность сельских электрических сетей 0,4 кВ до наиболее удаленной точки составляет не более 985 м. При этом используются неизолированный провод А-35 и трансформатор типа ТМ-250/10/0,4 кВ $Y/Y_н$. Указанные параметры

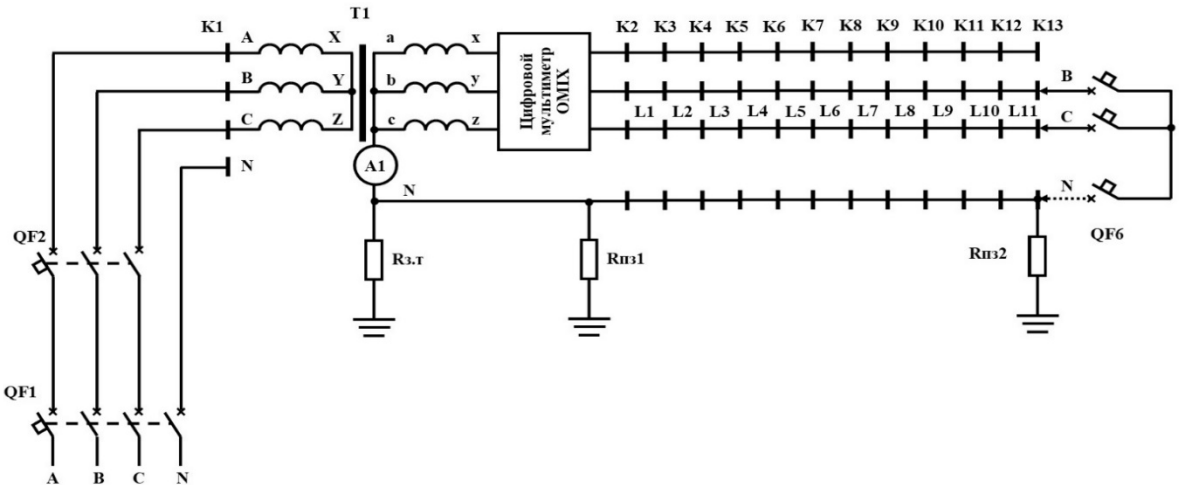


Рис. 3. Схема измерения электрических параметров аварийных режимов физической модели электрической сети 10/0,4 кВ

Fig. 3. Measurement diagram for the electrical parameters of emergency modes of a physical model of a 10/0.4 kV power supply network

Таблица 1

Электрические параметры модели в аварийных режимах

Table 1

Electrical parameters of the model in emergency modes

Точка КЗ на модели *Short-circuit point on the model*	**Ток 2-фазного КЗ на нулевой проводник, Iк2-0, А** *Two-phase fault current on the zero conductor, Ik2-0, A*			**Ток 2-фазного КЗ, Iк2, А** *Current of two-phase short-circuit, Ik2, A*		**Полная мощность 2-фазного КЗ на нулевой проводник, Sk2-0, ВА** *Total power of a two-phase fault on the zero conductor, Sk2-0, VA*	**Полная мощность 2-фазного КЗ, Sk2, ВА** *Total power of a two-phase short-circuit, Sk2, VA*	**Сопротивление до точки КЗ на модели, Z, Ом** *Resistance to the short-circuit point on the model, Z, Ohm*
	I(*B*)	*I*(*C*)	*I*(*N*)	*I*(*B*)	*I*(*C*)			
К2	**Опыт не проводили, чтобы не допустить выхода из строя трансформатора** *The experiment was not performed to avoid transformer failures*							0
К3								3,6
К4								5,0
К5								6,4
К6	2,270	2,186	0,084	2,336	2,336	88	100	7,8
К7	1,959	1,886	0,074	2,015	2,015	77	87	9,2
К8	1,740	1,669	0,072	1,776	1,776	69	76	10,6
К9	1,556	1,486	0,07	1,596	1,596	64	69	12,0
К10	1,343	1,277	0,066	1,447	1,447	53	63	13,4
К11	1,230	1,170	0,06	1,315	1,315	49	57	14,8
К12	1,143	1,086	0,057	1,208	1,208	45	57	16,2
К13	0,899	0,843	0,056	0,996	0,996	36	57	19,8

наиболее часто применяются в электрических сетях 0,4 кВ, к которым подключены коммунально-бытовые сельскохозяйственные потребители [20, 21].

Коэффициенты подобия для физической модели и выбранного прототипа сельской электрической сети представлены в таблице 2 [18]. Под коэффициентами подобия для стороны низкого напряжения (НН) и стороны высокого напряжения (ВН) понимаются две группы коэффициентов, позволяющих пересчитывать электрические параметры на разных сторонах физической модели напряжением 380/38 В на промышленные параметры сельской электрической сети 10/0,4 кВ.

Электрические параметры прототипа действующей электрической сети 0,4 кВ определяли по формулам, изложенным нами ранее [18].

С учетом коэффициентов подобия для стороны низкого напряжения (табл. 2) и принятого в качестве прототипа оборудования с использованием формулы (2) определили, что полное сопротивление нихромовой проволоки со значением 19,8 Ом соответствует 1023 м протяженности линии электропередачи 0,4 кВ, выполненной неизолированным проводом А-35. Для моделирования сопротивления 4 Ом, через которое осуществляется заземление трансформатора, также использовали нихромовую проволоку сопротивлением 85,7 Ом. Для моделирования двух повторных заземлений нулевого провода использовали нихромовую проволоку с сопротивлением 643,2 Ом.

Токи и мощность аварийного режима в действующей электрической сети 0,4 кВ определяли также с использованием формул [18].

Результаты и их обсуждение

Полученные в ходе моделирования результаты сравнивали с результатами, полученными при расчетах с применением методики, изложенной в ГОСТ 28249-93. На рисунке 4 показаны графики зависимости тока короткого замыкания, полученные методами физического моделирования и ГОСТ 28249-93.

С учетом результатов, представленных на рисунке 3, разница результатов не превышает 1,5%.

В таблице 3 представлены значения токов в режимах двухфазного и двухфазного на нулевой проводник коротких замыканий, полученных физическим моделированием.

Таблица 2

Коэффициенты подобия для трансформатора ТМ-250 Y/$Y_н$ 10/0,4 кВ и провода А-35

Table 2

Similarity coefficients for transformer ONAN-250 Y/Yn 10/0.4 kV and wire A-35

Сторона физической модели *Physical model side*	**Коэффициент подобия** / *Similarity coefficient*			
	по напряжению, M_u, О.Е. *for voltage, Mu, relative units*	**по сопротивлению, M_z, О.Е.** *for resistance, Mz, relative units*	**по току, M_i, О.Е.** *for current, Mi, relative units*	**по мощности, M_s, О.Е.** *for power, Ms, relative units*
Низкого напряжения, НН *Low voltage, LV*	0,1	21,44	0,0047	0,00047
Высокого напряжения, ВН *High voltage, HV*	0,038	3,42	0,011	0,0004

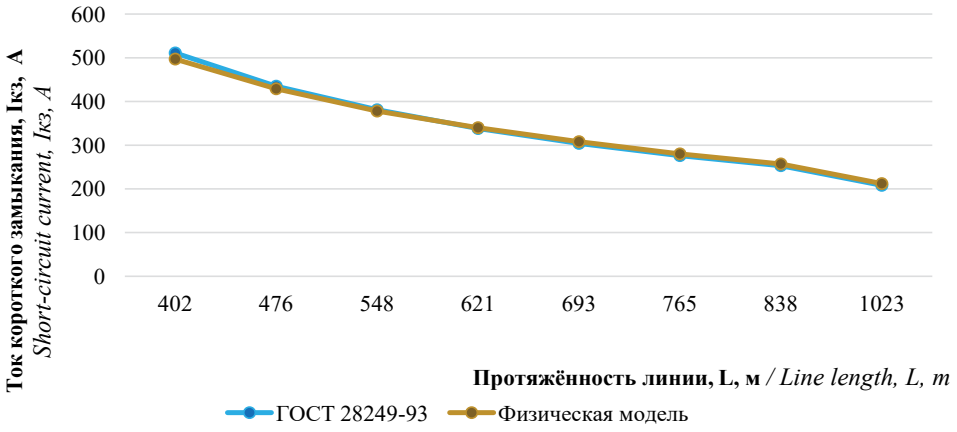


Рис. 4. Ток двухфазного короткого замыкания, определенный расчетным методом и физическим моделированием

Fig. 4. Two-phase short-circuit current determined by calculation and physical simulation

Таблица 3

Токи двухфазного и двухфазного на нулевой проводник коротких замыканий в электрической сети 0,4 кВ, полученные физическим моделированием

Table 3

Currents of two-phase and two-phase to zero-conductor conductor short circuits in a 0.4 kV power supply network determined by physical simulation

Удаленность КЗ от вывода 0,4 кВ трансформатора, L, м *Distance of short-circuit from the 0.4 kV transformer output, L, m*	**Режим** / *Mode*				
	Двухфазное КЗ *Two-phase short circuit*		**Двухфазное КЗ на нулевой проводник** *Two-phase short-circuit on the zero conductor*		
	ток фазы В, I(B), А *phase B current, I(B), A*	**ток фазы С, I(C), А** *phase C current, I(C), A*	**ток фазы В, I(B), А** *phase B current, I(B), A*	**ток фазы С, I(C), А** *phase C current, I(C), A*	**ток в нейтрали, I(N), А** *neutral current, I(N), A*
402	497	497	483	465	18
476	429	429	416	402	16
548	378	378	370	355	15
621	340	340	331	316	15
693	308	308	286	272	14
765	280	280	261	249	13
838	257	257	244	231	12
1023	212	212	192	180	12

Токи двухфазного короткого замыкания выше токов двухфазного короткого замыкания на нулевой проводник. Полные мощности режима двухфазного короткого замыкания, полученные с использованием формулы (4), при возникновении аварии от 402 до 1023 м от вывода низкого напряжения трансформатора изменяются от 121 до 213 кВА, а для двухфазного короткого замыкания на нулевой проводник при тех же точках аварии – от 77 до 187 кВА.

В режиме двухфазного короткого замыкания токи протекают в фазах «В» и «С» (при экспериментальном исследовании было принято, что повреждаются эти фазы), при этом значения токов равны, что можно выразить в виде соотношения [19]:

$$I_{\text{по}}^{(2)}(B) = I_{\text{по}}^{(2)}(C), \qquad (1)$$

где $I_{\text{по}}^{(2)}(B)$ – начальное значение периодической составляющей тока двухфазного короткого замыкания в фазе В, А; $I_{\text{по}}^{(2)}(C)$ – начальное значение периодической составляющей тока двухфазного короткого замыкания в фазе С, А [19].

Это соответствует основным положениям теории переходных процессов в электрических сетях, которые отмечают, что токи являются противоположно направленными. В фазе «А» токи короткого замыкания отсутствуют, как это выявлено и в ходе компьютерного моделирования [19].

При двухфазном коротком замыкании на нулевой проводник соотношение (1) не выполняется. При этом в нулевом проводнике протекает ток, равный разнице токов фаз «В» и «С», то есть выполняется соотношение, также подтвержденное в ходе компьютерного моделирования [19]:

$$I_{\text{по}}^{(2-N)}(B) = I_{\text{по}}^{(2-N)}(C) + I_{\text{по}}^{(2-N)}(N), \qquad (2)$$

где $I_{\text{по}}^{(2-N)}(N)$ – ток в нейтрали при двухфазном коротком замыкании на нулевой провод, А [19].

Соотношение (2) присуще замыканию на нулевой проводник фаз «В» и «С». При замыкании на нулевой проводник фаз «А» и «С» наибольший ток будет в фазе «С», при замыкании «А» и «В» – в фазе «А». Моделирование проведено для трансформаторов со схемой соединения «звезда-звезда с нулем» и группой соединения «0». Для других схем и групп соединения соотношения токов могут отличаться [19].

Распределение напряжений в электрической сети 0,4 кВ при двухфазном коротком замыкании на удалении 1023 м от вывода низкого напряжения силового трансформатора показано на рисунке 5.

Напряжение фаз «В» и «С», между которыми произошло короткое замыкание, имеет одинаковое значение по всей протяженности линии. Напряжения неповрежденной и поврежденных фаз отличаются в 1,3…1,9 раза с увеличением соотношения при удалении от трансформатора. Эта зависимость получена и при компьютерном моделировании [19].

Таким образом, при установке устройств секционирования на расстоянии уже от 200 м от вывода трансформатора их микроконтроллерные блоки управления могут достоверно определить разницу в напряжениях поврежденных и неповрежденных фаз.

Распределение напряжений по фазам при двухфазном коротком замыкании на нулевой провод показано на рисунке 6 [19].

При двухфазном коротком замыкании на нулевой проводник напряжения на замкнувших фазах в точке замыкания равны 0 В. Напряжение неповрежденной фазы превышает номинальное в 1,3 раза (в опыте превысило 292 В), как и при компьютерном моделировании [19]. Отношение напряжения неповрежденной фазы к напряжениям поврежденных фаз изменяется в 1,1…2,7 раза на протяженности линии до 50% от ее общей длины до точки короткого замыкания и при приближении к точке замыкания может увеличиваться практически в десятки раз (теоретически – до бесконечности). Здесь также при установке устройств секционирования на расстоянии от 200 м от вывода трансформатора их микроконтроллерные блоки управления могут достоверно определить разницу в напряжениях поврежденных и неповрежденных фаз, причем заметно отличие друг от друга и напряжений двух поврежденных фаз.

Выявленные зависимости токов и напряжений по протяженности линий электропередачи позволяют отличать режимы двухфазного и двухфазного на нулевой проводник коротких замыканий друг от друга и от других режимов. Это позволяет использовать полученные зависимости для идентификации данных режимов микроконтроллерными блоками управления секционирующих устройств и отключения участков сети с выявленными аварийными режимами. Средства секционирования оснащаются устройствами передачи данных. Поэтому идентификация исследуемых режимов позволяет получать диспетчеру сети информацию об их возникновении, на участках, где они произошли, что сократит время на поиск и выявление причин повреждений.

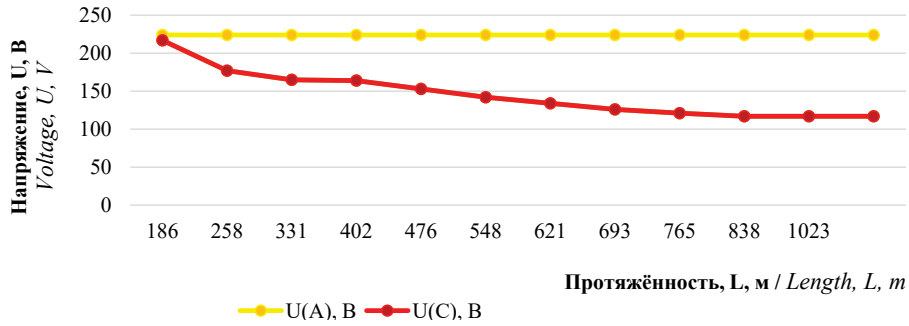


Рис. 5. Распределение напряжений в электрической сети 0,4 кВ при двухфазном коротком замыкании на удалении 1023 м от вывода низкого напряжения силового трансформатора

Fig. 5. Voltage distribution in the 0.4 kV power supply network with a two-phase short circuit at a distance of 1023 m from the low voltage output of the power transformer

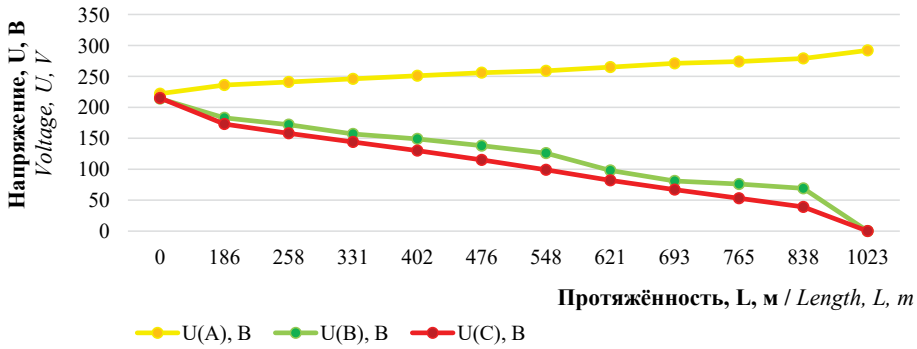


Рис. 6. Распределение напряжений по фазам при двухфазном коротком замыкании на нулевой провод

Fig. 6. Distribution of voltages by phases during a two-phase zero-conductor short circuit

Выводы

1. Особенности режимов двухфазного и двухфазного на нулевой проводник коротких замыканий в электрических сетях 0,4 кВ недостаточно изучены. В нормативных документах не содержатся указания по расчету двухфазного короткого замыкания на нулевой проводник, что затрудняет математическое моделирование данного режима и его идентификацию.

2. Выполненное физическое моделирование выявило, что при двухфазном коротком замыкании в сети 0,4 кВ токи в поврежденных фазах равны,

а соотношение напряжений на неповрежденной и поврежденных фазах составляет 1,3…1,9 раза, и оно возрастает при отдалении от вывода низкого напряжения трансформатора. При двухфазном коротком замыкании на нулевой проводник в одной из фаз протекает ток, значение которого равно алгебраической сумме тока нейтрали и тока, протекающего в другой фазе. Отношение напряжений неповрежденной и поврежденных фаз находится в диапазоне 1,1…2,7 раза на длине линии до 50% от общей до точки замыкания и при приближении к точке замыкания может увеличиваться практически в десятки раз (теоретически – до бесконечности).

3. Выявленные зависимости токов и напряжений по протяженности линий электропередачи позволяют отличать режимы двухфазного и двухфазного на нулевой проводник коротких замыканий друг от друга и от других режимов. Это позволяет использовать полученные зависимости для идентификации данных режимов микроконтроллерными блоками управления секционирующих устройств и отключения участков сети с выявленными аварийными режимами. Идентификация исследуемых режимов позволяет получать диспетчеру сети информацию об их возникновении, участке, на которых они произошли, что сократит время на поиск и выявление причин повреждений.

Список источников

1. Mohammed T., Allali M., Boumediene B., Toufik T. Electrical Network's Modeling & Simulation Tools: The State of the Art. Journal of Electrical and Control Engineering. 2013;3:1-12 https://www.researchgate.net/publication/258120777_Electrical_Network's_Modeling_Simulation_Tools_The_State_of_the_Art

2. Комаров В.И., Кит Ю.В., Стэць Р.Е. Использование компьютерного моделирования для анализа электробезопасности в электрических сетях до 1 кВ // Актуальные научные исследования в современном мире. 2019. № 2-1 (46). С. 37-41. EDN: YZAQXR

3. Рахимов О.С., Мирзоев Д.Н. Моделирование низковольтных сельских электрических сетей 10/0,4 кВ // Вестник ПИТТУ имени академика М.С. Осими. 2018. № 4 (9). С. 37-42. EDN: FHEINT

4. Приходько В.М., Приходько И.В., Лучкин В.Ю. Особенности расчетов токов короткого замыкания с учетом сопротивления электрической дуги в судовых электроэнергетических системах // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2016. № 5 (39). С. 185-195. EDN: WVOQUL

5. Попов М.Г., Лапидус А.А., Соловьева С.Н. Особенности выбора расчетного вида короткого замыкания при определении чувствительности защитных аппаратов в сетях 0,4 кВ // Релейная защита и автоматизация. 2022. № 2 (47). С. 11-15. EDN: WJWHQB

6. Попов М.Г., Соловьева С.Н., Лапидус А.А. и др. Повышение эффективности защит дальнего резервирования в распределительных сетях электроснабжения до 1 кВ // Вестник Чувашского университета. 2020. № 1. С. 155-166. EDN: USEGSY

7. Фоминич Э.Н., Колесник И.В., Тишков А.А., Курьяков Е.А. Система контроля состояния электрической изоляции в сетях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 3 (48). С. 102-106. EDN: XQNIFF

8. Савицкий Л.В. Способ повышения уровня электробезопасности в трехфазных электрических сетях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью // Вестник Забайкальского государственного университета. 2013. № 4 (95). С. 84-89. EDN: SECKIR

9. Попов Н.М., Молодов И.А. Анализ переходных процессов в электрических сетях 0,38 кВ при однофазном коротком замыкании // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 8. С. 71-73. EDN: OBGJZT

10. Смирнов Е.С., Мамедов Т.А., Загинайлов В.И. Сравнение токов однофазного короткого замыкания в сетях с глухозаземленной нейтралью // Агротехника и энергообеспечение. 2023. № 2 (39). С. 14-21. EDN: RBHCRV

11. Сорокин Н.С., Виноградова А.В. Расчет трехфазных и однофазных коротких замыканий в электрических сетях 0,4 кВ для

References

1 Mohammed Tamali, Allali Malika, Boumediene Bouzidi, Toufik Toumi. Electrical Network's Modeling & Simulation Tools: The State of the Art. *Journal of Electrical and Control Engineering*. 2013;3:1-12. https://www.researchgate.net/publication/258120777_Electrical_Network's_Modeling_Simulation_Tools_The_State_of_the_Art

2. Komarov V.I., Kit Yu.V., Stets R.E. Using computer simulation to analyze electrical safety in power supply networks up to 1 kV. *Aktualnye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire*. 2019;2-1(46):37-41. (In Russ.)

3. Rakhimov O.S., Mirzoev D.N. Modeling of low-voltage rural electric networks 10/0.4 kV. *Vestnik PITTU imeni akademika M.S. Osimi*. 2018;4(9):37-42. (In Russ.)

4. Prikhodko V.M., Prikhodko I.V., Luchkin V.Yu. Features of payments current short circuit in view of resistance arc in the ship electric power system. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2016;5(39):185-195. (In Russ.)

5. Popov M.G., Lapidus A.A., Solovjeva S.N. The specifics of choosing the design type of short circuit when determining the sensitivity of protective devices in 0.4 kV networks. *Releynaya zashchita i avtomatizasiya*. 2022;2(47):11-15. (In Russ.)

6. Popov M.G., Solovjeva S.N., Lapidus A.A., Semenov K.N., Tereshkin A.V., Bogdanov A.V., Vasilyeva O.A. Improving efficiency of long-distance protection in distribution power supply networks up to 1 kV. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*. 2020;1:155-166. (In Russ.)

7. Fominich E.N., Kolesnik I.V., Tishkov A.A., Kuryakov E.A. System of electrical insulation state control in networks with voltages up to 1000 volts with dead-earthed neutral. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2018;3(48):102-106. (In Russ.)

8. Savitskiy L.V. Method of increasing the level of electrical safety in three-phase electric network with voltage up to 1000 V with grounded neutral. *Trans-Baikal State University Journal*. 2013;4(95):84-89. (In Russ.)

9. Popov N.M., Molodov I.A. Electric networks, transient process, phase coordinates, single-phase short circuit. *Achievements of science and technology of agro-industrial complex*. 2011;8:71-73. (In Russ.)

10. Smirnov E.S., Mammadov T.A., Zaginailov V.I. Comparison of single-phase short-circuit currents in networks with a deeply earthed neutral. *Agrotekhnika i Energoobespechenie*. 2023;2(39):14-21. (In Russ.)

11. Sorokin N.S., Vinogradova A.V. calculation of three-phase and single-phase short circuits in 0.4 kV electric networks for checking the sensitivity of protective devices. *Agrotekhnika i energoobespechenie*. 2020;4(29):25-34. (In Russ.)

проверки чувствительности защитных аппаратов // Агротехника и энергообеспечение. 2020. № 4 (29). С. 25-34. EDN: MKNXTA

12. Ершов А.М., Хлопова А.В. Физическая модель электрической сети напряжением 10/0,38 кВ // Электробезопасность. 2016. № 2. С. 13-21. EDN: WKGNUN

13. Валеев Р.Г., Млоток А.В., Ершов А.М., Сидоров А.И. Моделирование электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями в программной среде MATLAB-Simulink // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. № 9-10. С. 116-128. EDN: RUHUEV

14. Лансберг А.А., Виноградов А.В., Панфилов А.А. Оценка достоверности математической модели сельской электрической сети 0,4 кВ в MATLAB Simulink на примере исследования установившегося режима однофазного короткого замыкания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25, № 6. С. 14-28. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-6-14-28

15. Млоток А.В., Ершов А.М., Валеев Р.Г., Сидоров А.И. Опытная электрическая сеть напряжением 380 В // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2014. № 2 (19). С. 96-107. EDN: SNZESB

16. Егорушкин И.О., Костюченко Л.П. Выбор автоматических выключателей для защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ с учетом допустимого времени отключения // Вестник КрасГАУ. 2007. № 5. С. 191-196. EDN: IARSNX

17. Егорушкин И.О., Костюченко Л.П., Кунгс Я.А. Учет допустимого времени отключения при выборе автоматических выключателей для защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ // Промышленная энергетика. 2009. № 2. С. 25-30. EDN: KGBEHL

18. Лансберг А.А., Виноградов А.В. Разработка физической модели сельской электрической сети 0,4 кВ // Техника и оборудование для села. 2024. № 8 (326). С. 39-43. EDN: YRWLCA

19. Лансберг А.А., Букреев А.В. Компьютерное моделирование режимов несимметричных коротких замыканий в сельской электрической сети 0,4 кВ // Вестник НГИЭИ. 2025. № 1 (164). С. 45-57. EDN: NENRPD

20. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Виноградова А.В. Анализ конфигурации электрических сетей 0,4 кВ Орловской области // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70, № 4 (53). С. 22-29. EDN: LHIRSK

21. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Сорокин Н.С. Характеристика электросетевых компаний по количеству и протяженности линий электропередачи, мощности подстанций // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69, № 2 (47). С. 31-41. EDN: AJQSZN

12. Ershov A.M., Khlopova A.V. The physical model of the mains voltage of 10/0.38 kV. *Electrical Safety*. 2016;2:13-21. (In Russ.)

13. Valeev R.G., Molotok A.V., Ershov A.M., Sidorov A.I. Modeling the power supply voltage 380 with overhead lines in the software environment Matlab-Simulink. *Izvestia vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2013;9-10:116-128. (In Russ.)

14. Lansberg A.A., Vinogradov A.V., Panfilov A.A. Assessment of the reliability of the mathematical model of the 0.4 kV rural electric network in Matlab Simulink on the example of a study of the steady-state mode of a single-phase short circuit. *Power Engineering*: *Research, Equipment, Technology*. 2023;25(6):14-28. (In Russ.) https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-6-14-28

15. Mlotok A.V., Ershov A.M., Valeev R.G., Sidorov A.I. An experimental 380 V electrical network. *Vestnik inzhenernoy shkoly dalnevostochnogo federalnogo universiteta*. 2014;2(19):96-107. (In Russ.)

16. Egorushkin I.O., Kostyuchenko L.P. Choosing circuit breakers for the protection of rural power supply networks of 0.4 kV, taking into account the permissible shutdown time. *Bulletin of KSAU*. 2007;5:191-196. (In Russ.)

17. Egorushkin I.O., Kostyuchenko L.P., Kungs Ya.A. Accounting for the permissible shutdown time when choosing circuit breakers to protect rural power supply networks of 0.4 kV. *Promyshlennaya Energetika*. 2009;2:25-30. (In Russ.)

18. Lansberg A.A., Vinogradov A.V. Development of a physical model of a rural 0.4 kV electric network. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024;8(326):39-43. (In Russ.)

19. Landsberg A.A., Bukreev A.V. Computer simulation of the modes of asymmetric short circuits in a rural 0.4 kV electrical network. *Vestnik NGIEI*. 2025;1(164):45-57. (In Russ.)

20. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Vinogradova A.V. Analysis of the configuration of 0.4 kV electrical grids in the Orel region. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2023;4(53):22-29. (In Russ.)

21. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Sorokin N.S. Characteristics of electric companies by the number and length of transmission lines and substation capacity. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2022;2(47):31-41. (In Russ.)

Информация об авторах

[1] **Виноградов Александр Владимирович,** д-р техн. наук, доцент; winaleksandr@gmail.com; SPIN-код: 6652-9426, AuthorID: 690615

[2] **Лансберг Александр Александрович,** аспирант; lansbergaa@vk.com; SPIN-код: 5921-1955, AuthorID: 1032281

[1, 2] Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Author Information

Aleksandr V. Vinogradov[1], DSc (Eng), Associate Professor, Head of the Laboratory of Power Supply; winaleksandr@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-6141-984X

Aleksandr A. Lansberg[2], postgraduate student; lansbergaa@vk.com; https://orcid.org/0000-0002-2834-6092

[1,2] Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutskiy Proezd Str., 5

Вклад авторов

А.В. Виноградов – научное руководство, концептуализация, анализ полученных данных, разработка рекомендаций, критический анализ, доработка текста;

А.А. Лансберг – методология, моделирование, визуализация, анализ полученных данных, формирование выводов исследования.

Статья поступила 23.11.2024, после рецензирования и доработки 28.04.2025; принята к публикации 29.04.2025

Author Contribution

A.V. Vinogradov – research supervision, conceptualization, formal analysis, development of recommendations, critical analysis, writing – review and editing of the manuscript;

A.A. Lansberg – methodology, modeling, visualization, formal analysis, research conclusions.

Received 23.11.2024; Revised 28.04.2025; Accepted 29.04.2025

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 автора[1], инициалы, фамилия второго автора[2]

[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/..
[2] e-mail первого автора; https://orcid.org/..

Аннотация – самостоятельный законченный материал. Вводная часть минимальна. Нужно коротко и емко отразить актуальность и цель исследований, условия и схемы экспериментов, привести полученные результаты (с обязательным аргументированием на основании цифрового материала), сформулировать выводы. Нельзя использовать аббревиатуры и сложные элементы форматирования (например, верхние и нижние индексы) (объем 200 слов, включает ключевые слова!).

Ключевые слова: 7-10 слов или словосочетаний для поисковых систем и классификации статей по темам.

Финансирование. Сведения о грантах, финансировании.

Для цитирования: ФИО авторов. Название статьи // Агроинженерия. Год. Том. № . С. . https://doi.org/10.26897/2687-1149-.

© ФИО авторов, год

ORIGINAL ARTICLE

Article title

Full name[1], Full name[2]

[1] Name of the organization; full address; e-mail
[2] Name of the organization; full address; e-mail
[1] e-mail; https://orcid.org/..
[2] e-mail; 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