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



Агроинженерия
Agricultural Engineering (Moscow)

Том 28. № 5
СЕНТЯБРЬ-ОКТЯБРЬ
2026

Подписной индекс агентства «Пресса России» 42252

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

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научный журнал

Том 28. № 5 / 2026

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

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

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

Основан в 2003 году

Периодичность: 6 номеров в год

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

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

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 26.10.2026
Формат 60 84/8
Тираж 500 экз.

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

Главный научный редактор

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

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

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

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

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

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

Владимир Ильич Загинайлов, д-р техн. наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехники имени академика И.А. 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

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

Владимир Федорович Сторчевой, д-р техн. наук. профессор, профессор кафедры «Теоретическая электротехника», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (г. Москва, Россия), https://orcid.org/0000-0002-6929-3919, v.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 электроснабжения, Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина (г. Краснодар, Россия), https://orcid.org/0000-0002-3435-4873, etsh1965@mail.ru

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

Павел Викторович Авраменко, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой стандартизации, метрологии и инженерной графики Белорусского аграрного технического университета (г. Минск, Белоруссия); https://orcid.org/0000-0002-8420-3977, pavel.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. 28(5)/2026

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

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

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

Founded in 2003

Publication Frequency:
Bimonthly

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

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

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 26.10.2026
Format – 60 84/8
Circulation – 500 copies.

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

Science Editor-in-Chief

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

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

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

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

Editorial Board:

Nikolay V. Aldoshin, DSc (Eng), Professor, Federal State Budgetary Research Institution – Federal Scientific Agroengineering Center (VIM) (Moscow, (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

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

С.Г. Мударисов, И.М. Фархутдинов, А.Ф. Фаюршин, В.Х. Имангулов
Комбинированное моделирование абразивного износа рабочих органов почвообрабатывающих машин методом дискретных и конечных элементов 4

А.И. Кутырёв
Разработка AI-агента поддержки принятия решений для промышленного садоводства на основе больших языковых моделей (LLM) и компьютерного зрения 15

А.Б. Калинин, И.З. Теплинский, И.С. Немцев
Выбор и обоснование параметров рабочих органов почвообрабатывающего модуля комбинированного фумигатора для возделывания картофеля 28

С.А. Ракутько, Е.Н. Ракутько
Компартментальная модель для оценки потоков субстанций в сельскохозяйственной искусственной биоэнергетической системе 38

В.В. Красовский, Ю.Б. Гербер
Верификация полуэмпирической модели дисперсности распыла двухфазной пневматической форсункой с тангенциальной закруткой воздуха 48

А.В. Капустин, В.Л. Чумаков, С.Н. Девянин, Р.С. Федоткин, А.В. Бижаев
Расчетный анализ эффективности улучшения антидетонационных характеристик двигателя 57

И.Ю. Игнаткин, М.М. Прокофьев, Н.А. Шевкун, С.В. Золотарев
Повышение аэродинамической эффективности модульного охладителя-дезинфектора 70

С.Ф. Вольвак, Д.Н. Бахарев, А.Г. Пастухов
Оценка качества приготовления рассыпного комбикорма малогабаритным комбикормовым агрегатом 79

Ю.Г. Иванов, С.П. Рудобашта, Д.А. Павлов
Исследование теплообменных процессов в терморегулируемом матрасе для коров 87

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

И.И. Руденко, А.С. Апатенко, О.А. Ступин
Стендовые испытания на износ плунжерных пар на биодизельном топливе с различным содержанием рапсового и соевого масел 97

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

И.В. Юдаев, Ю.В. Даус, И.В. Шаров, Е.А. Рожков, Е.Е. Рудь
Агробиоэлектротехнология борьбы с нежелательной и сорной растительностью в садах и виноградниках: обоснование и принципы технической реализации 103

И.В. Наумов, Н.Н.Б. Жосселин, И.В. Ямщикова
Качество электрической энергии в распределительных электрических сетях низкого напряжения Республики Камерун 115

CONTENTS

FARM MACHINERY AND TECHNOLOGIES

S.G. Mudarisov, I.M. Farkhutdinov, A.F. Fayurshin, V.Kh. Imangulov
Combined discrete-finite element modeling of abrasive wear in tillage tool elements 4

A.I. Kutyrev
LLM and computer vision-based intelligent decision support system for digital horticulture 15

A.B. Kalinin, I.Z. Teplinsky, I.S. Nemtsev
Design and optimization of working elements for the tillage module of a combined fumigator in potato production 28

S.A. Rakutko, E.N. Rakutko
Compartmental model for assessing the flows of substances in an engineered agricultural bio-energy system 38

V.V. Krasovskiy, Yu.B. Gerber
Verification of a semi-empirical model of spray dispersion for a two-phase pneumatic nozzle with tangential air swirl 48

A.V. Kapustin, V.L. Chumakov, S.N. Devyanin, R.S. Fedotkin, A.V. Bizhayev
Computational analysis of the efficiency of improving engine knock resistance 57

I.Y. Ignatkin , M.M. Prokofiev , N.A. Shevkun , S.V. Zolotarev
Method for increasing the aerodynamic efficiency of a modular cooler-disinfector 70

S.F. Volvak, D.N. Bakharev, A.G. Pastukhov
Quality assessment of loose compound feed preparation using a small-sized compound feed unit 79

Yu.G. Ivanov, S.P. Rudobashta, D.A. Pavlov
Study of heat transfer processes in a temperature-controlled water mattress for dairy cows 87

TECHNICAL SERVICE IN AGRICULTURE

I.I. Rudenko, A.S. Apatenko, O.A. Stupin
Bench wear tests of plunger pairs using biodiesel fuel with various contents of rapeseed and soybean oils 97

POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

I.V. Yudaev, Y.V. Daus, I.V. Sharov, E.A. Rozhkov, E.E. Rud
Agrobioelectrotechnology for weed control in orchards and vineyards: rationale and principles of technical implementation 103

I.V. Naumov, N.N.B. Josselin, I.V. Yamshchikova
Power quality assessment and mitigation of unbalanced loads in low-voltage distribution grids: Case study of Douala, Cameroon 115

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.3.02:620.178
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-4-14

Комбинированное моделирование абразивного износа рабочих органов почвообрабатывающих машин методом дискретных и конечных элементов

***С.Г. Мударисов*[1]✉, *И.М. Фархутдинов*[2], *А.Ф. Фаюршин*[3], *В.Х. Имангулов*[4]**

[1, 2, 3, 4] Башкирский государственный аграрный университет; г. Уфа, Россия

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

[2] ildar1702@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-6443-8584

[3] azamatff@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-8787-8750

[4] imangulov.vener@mail.ru; https://orcid.org/0009-0000-9171-2369

Аннотация. Рабочие органы почвообрабатывающих машин в процессе эксплуатации подвержены абразивному износу. Для детального изучения процессов износа рабочих органов можно использовать методы моделирования. Исследования проведены с целью разработки и верификации модели абразивного износа фрагмента рабочего органа почвообрабатывающей машины в лабораторной установке сухого резино-песчаного истирания с использованием метода дискретных элементов (DEM) и метода конечных элементов (FEM). Моделирование абразивного износа с применением гибридного подхода выполнили в среде ANSYS Workbench и Rocky DEM: частицы песка (сфера, 0,25 мм) описали DEM с контактной моделью гистерезисной линейной пружины, для стального образца и резинового колеса применили FEM с тетраэдрической сеткой (0,5 и 1,0 мм). Реализовали закон износа Арчарда с масштабированием пути скольжения в 1000 раз. Численное моделирование абразивного износа, проведенное при нагрузках на испытуемую деталь со стороны резинового колеса 17…100 Н, показало увеличение объемного износа по степенному закону $V_m \approx 1{,}22N^{1{,}2}$. При нагрузке 100 Н за 7 с модельного расчета достигнут максимальный износ 328,5 мм^3. Определили три стадии износа: приработка (менее 30 Н), установившийся процесс (более 50 Н), ускоренное разрушение (более 85 Н). При нагрузках более 50 Н формируется W-образное распределение интенсивности износа с двумя боковыми максимумами по причине деформации резинового обода. Гибридный FEM-DEM подход по сравнению с мономоделью DEM повысил точность прогноза на 15…20%. Впервые получены количественные закономерности трансформации пятна интенсивности износа с ростом нагрузки для резино-песчаной установки; обоснованы пороговые значения контактного давления для стали 45. Разработанную модель рекомендуем применять для оптимизации режимов работы почвообрабатывающих орудий. Для песчаных почв с абразивными включениями предельная нагрузка на 1 мм режущей кромки не должна превышать 50 Н, что соответствует скорости движения 8…9 км/ч.

Ключевые слова: износ; нагрузка; закон износа Арчарда; метод дискретных элементов; метод конечных элементов; Rocky DEM; ANSYS; моделирование; моделирование абразивного износа

Для цитирования: Мударисов С.Г., Фархутдинов И.М., Фаюршин А.Ф., Имангулов В.Х. Комбинированное моделирование абразивного износа рабочих органов почвообрабатывающих машин методом дискретных и конечных элементов // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 4-14. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-4-14

© Мударисов С.Г., Фархутдинов И.М., Фаюршин А.Ф., Имангулов В.Х., 2026

ORIGINAL ARTICLE

Combined discrete-finite element modeling of abrasive wear in tillage tool elements

***S.G. Mudarisov*[1]✉, *I.M. Farkhutdinov*[3], *A.F. Fayurshin*[3], *V.Kh. Imangulov*[4]**

[1, 2, 3, 4] Bashkir State Agrarian University; Ufa, Russia

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

[2] ildar1702@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-6443-8584

[3] azamatff@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-8787-8750

[4] imangulov.vener@mail.ru; https://orcid.org/0009-0000-9171-2369

Abstract. The soil-engaging parts of tillage machinery are highly susceptible to intensive abrasive wear during field operations. Numerical modeling is an effective approach for conducting detailed studies of these wear processes. To this end, a numerical model of abrasive wear for a section of a tillage tool element was developed and validated against experimental data from a laboratory dry rubber-wheel (sand-abrasion) test installation. The simulation framework employs a combined discrete element method (DEM) and finite element method (FEM) approach. Co-simulations were performed using ANSYS Workbench and Rocky DEM: the abrasive sand particles (spherical, 0.25 mm in diameter) were modeled via DEM using a linear hysteretic spring contact model, while the steel specimen and the rubber wheel were discretized via FEM using a tetrahedral mesh with element sizes of 0.5 mm and 1.0 mm, respectively. Archard's wear law, integrated with a wear-path scaling factor ($\alpha = 1000$) to accelerate computation, was implemented. Numerical experiments were conducted under normal loads ranging from 17 to 100 N. The results demonstrate that the volumetric wear increases according to a power law: $V_m \approx 1{,}22N^{1,2}$. Under a load of 100 N, the wear volume reached 328.5 mm^3 within a 7-second interval. Three distinct wear stages were identified: running-in, steady-state wear, and accelerated wear at loads of 85 N and above. At loads exceeding 50 N, a characteristic W-shaped wear-intensity distribution with two lateral maxima emerged due to the elastic deformation of the rubber wheel rim. The hybrid FEM-DEM approach improves wear prediction accuracy by 15-20% compared to standalone DEM simulations. For the first time, quantitative patterns governing the transformation of the wear-intensity field under increasing loads were established for a rubber-sand abrasive environment, and critical contact pressure thresholds for Grade 45 steel were determined. The developed model is highly recommended for optimizing the design and operating parameters of tillage implements. For operations in sandy soils containing highly abrasive inclusions, the maximum linear load along the cutting edge should not exceed 50 N/mm, which corresponds to an operating speed of 8-9 km/h.

Keywords: wear; load; Archard's wear law; discrete element method; finite element method; Rocky DEM; ANSYS Workbench; modeling; abrasive wear modeling

For citation: Mudarisov S.G., Farkhutdinov I.M., Fayurshin A.F., Imangulov V.Kh. Combined discrete-finite element modeling of abrasive wear in tillage tool elements. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):4-14. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-4-14

Введение

Износ рабочих органов почвообрабатывающих машин (ПОМ) представляет собой одну из основных проблем в сельскохозяйственном машиностроении и агроинженерии. Износ приводит к значительным экономическим потерям, связанным с затратами на замену рабочих органов, увеличением тягового усилия, ростом расхода топлива и снижением качества обработки почвы. По данным отечественных исследований [1], до 80…90% стоимости ремонта почвообрабатывающих орудий составляют расходы на запасные части. Ресурс серийно выпускаемых культиваторных лап составляет 7…18 га на одну деталь, дисковых борон – 8…30 га на один диск [1]. При затуплении лезвий рабочих органов повышается удельная нагрузка на сельскохозяйственную машину и, как следствие, увеличивается расход топлива.

Как отмечают A. Yazici [2] и D. Singh et al. [3], изношенные лезвия плугов и культиваторов не обеспечивают должного подрезания пласта, что способствует образованию уплотненной «плужной подошвы», ухудшает агротехнические показатели и приводит к снижению урожайности [4]. Неравномерный износ лемеха является следствием соответствующего неравномерного распределения давления почвы, зависящего от ее типа и физико-механической характеристики, что напрямую влияет на качество вспашки и энергозатраты [5].

Согласно оценкам Karamis [6] в Турции при двукратной обработке 13,4 млн га теряется около 9700 т

стали, что в энергетическом эквиваленте составляет 897 ГДж. В России на песчаных почвах с каменистыми включениями потери массы лемеха могут достигать 260…450 г/га, на глинистых почвах этот показатель составляет лишь 2…30 г/га. Кроме того, как подчеркивают P. Kostencki и др. [7], попадание в почву продуктов износа, содержащих такие элементы, как Co, Cr, Cu, Mn, Ni, может создавать токсикологическую угрозу для окружающей среды. Таким образом, изучение механизмов износа и влияющих на него факторов, а также разработка методов повышения износостойкости являются критически важными задачами для повышения эффективности и устойчивости сельскохозяйственного производства.

По оценкам специалистов, расходы на замену деталей вследствие износа составляют примерно 40% от всех затрат на замену компонентов почвообрабатывающей техники [8]. Кроме того, потери, связанные с износом и трением в сельском хозяйстве и горнодобывающей промышленности, составляют около 2,7% от общего ежегодного мирового объема выбросов CO_2 [9].

Несмотря на значительный прогресс в области исследования износа ПОМ, ряд проблем остается нерешенным. Во многих исследованиях акцент делается на измерении потери материала, а не на глубинном анализе доминирующих механизмов износа и типов контакта с помощью микроструктурного анализа.

Интенсивность износа рабочих органов зависит от множества факторов – таких, как тип и состав почвы, влажность, степень уплотнения, механические свойства материала рабочих органов, геометрия инструмента, а также параметры режима работы машины (глубина обработки, скорость движения) [10-12]. Научное понимание механизмов износа и разработка методов его прогнозирования являются критически важными для оптимизации конструкции рабочих органов, выбора материалов и технологий упрочнения поверхностей.

В последнее десятилетие наблюдается существенное развитие методов теоретического описания процессов износа. Исследователи все более активно применяют численное моделирование (метод дискретных элементов DEM, метод конечных элементов FEM, вычислительная гидродинамика CFD) в сочетании с экспериментальными методами для разработки прогностических моделей [13-15].

Наиболее перспективным для моделирования процесса износа рабочих органов ПОМ является метод дискретных элементов. Основными преимуществами DEM являются возможность моделирования взаимодействия отдельных частиц почвы с рабочим органом, вычисление контактных напряжений и скорости скольжения в каждой точке контакта, а также выявление локализованных зон максимального давления [16-18]. А при интегрировании в DEM-модель процесса обработки почвы закона износа Арчарда можно моделировать и процесс износа рабочих органов ПОМ. Однако отметим, что использование только метода дискретных элементов не позволяет получить полноценную картину износа. DEM дает возможность оценить динамические параметры взаимодействия: например, контактные силы, скорость частиц, траекторию их движения, а также локализацию зон повышенного давления. Вместе с тем для количественного определения параметров износа (весовых и объемных характеристик удаленного материала, локальной скорости изнашивания, эволюции геометрии поверхности и перераспределения контактных напряжений в твердом теле) DEM-моделирования недостаточно. Это связано с тем, что метод дискретных элементов не учитывает напряженно-деформированного состояния изнашиваемой детали, упругих деформаций контактирующих тел и связанного с ними изменения фактической площади контакта. Поэтому для достоверного прогнозирования абразивного износа рабочих органов почвообрабатывающих машин необходимо сочетать метод дискретных элементов (DEM) и метод конечных элементов (FEM).

Гибридный подход дает возможность получить как динамические характеристики взаимодействия, так и количественные показатели износа (массу, объем, скорость изнашивания, форму изношенной поверхности), что необходимо для оптимизации конструкции и режимов работы почвообрабатывающих орудий.

Цель исследований: разработка и верификация комбинированной DEM-FEM-модели абразивного износа фрагмента рабочего органа почвообрабатывающей машины в лабораторной установке сухого резино-песчаного истирания для количественного прогнозирования объемного износа, скорости изнашивания и эволюции поверхности при различных нагрузках.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Обосновать параметры контактной модели метода дискретных элементов для моделирования процесса износа рабочих органов ПОМ.

2. Разработать гибридную модель процесса износа детали в лабораторной установке сухого абразивного истирания.

3. Провести численные эксперименты при различных нагрузках и выявить закономерности объемного износа, интенсивность износа, распределение контактных напряжений и эволюцию пятна износа во времени.

Материалы и методы

Базовой моделью для теоретического описания объема абразивного износа является закон Арчарда [10]:

$$V = k\frac{N \cdot L}{H}, \quad (1)$$

где V – объем износа, мм^3; k – безразмерная константа износа (коэффициент износа); N – нормальная нагрузка, Н; L – расстояние скольжения, м; H – твердость более мягкого материала, Па или НВ.

Для применения закона Арчарда к условиям обработки почвы, когда нагрузки распределены по контактной поверхности и изменяются во времени, используется модифицированная форма, в которой объем износа зависит от контактного давления и относительной скорости скольжения [11]:

$$\frac{dV}{dt} = k \cdot p(t) \cdot V(t), \quad (2)$$

где $p(t)$ – контактное давление в момент времени t, Па; $V(t)$ – относительная скорость скольжения, м/с.

Согласно закону Арчарада (1) коэффициент износа

$$k = \frac{V \cdot H}{N \cdot L} \quad (3)$$

обратно пропорционально зависит от расстояния скольжения L, что в свою очередь в полевых условиях равняется пути рабочего органа в почве.

Прямое использование реального пути L в моделировании приводило бы к чрезмерно длительным расчетам, невозможным на имеющихся вычислительных ресурсах. Поэтому согласно [12] применяется усиленный коэффициент износа k_m, увеличенный на коэффициент масштабирования пути:

$$k_m = k \cdot \alpha, \quad (4)$$

где $\alpha = L/L_m$ – отношение реального пути скольжения L к модельному L_m.

Тогда объемный износ по закону Арчарда в модели рассчитывался как

$$V_m = k_m\frac{N \cdot L}{H}. \quad (5)$$

В модели нами принят коэффициент увеличения $\alpha = 1000$, что позволяет сократить путь скольжения в 1000 раз при сохранении соответствия реальному объему износа.

Согласно данным исследования [12] коэффициент износа $k = 1$. Тогда с учетом коэффициента увеличения масштабирования пути согласно (4) усиленный коэффициент износа $k_м = 1000$.

Основным ограничением использования закона Арчарда является определение коэффициента износа k, который зависит от материалов в контакте, почвенных условий, температуры и других факторов. Экспериментальное определение k обычно проводится с использованием стандартных тестов – таких, как испытание абразивного износа в сухом песко-резиновом аппарате типа ASTM G65 [11]. Данный аппарат состоит из стального колеса с резиновой шиной (диаметром 220 мм и шириной 12 мм), к которому прижимается образец с помощью рычажного механизма.

Для моделирования абразивного износа в лабораторной установке (ASTM G65) предлагаем гибридный подход, сочетающий метод дискретных элементов (DEM) для моделирования сыпучей среды и метод конечных элементов (FEM) для описания напряженно-деформированного состояния испытуемого образца и резинового колеса, реализации закона износа Арчарда на поверхности и отслеживания потери объема. Данная схема позволяет учитывать не только дискретное взаимодействие частиц абразива с поверхностью, но и перераспределение контактных давлений вследствие локальной деформации контактирующих тел.

Реализация гибридного моделирования выполнена в интегрированной среде ANSYS Workbench совместно с модулем Rocky DEM (интеграция через интерфейс «Coupling»). Процесс включал в себя четыре этапа:

1. Построение конечно-элементных моделей

Образец *1* размерами 24 × 50 × 10 мм и колесо *2* с резиновым ободом (диаметр – 220 мм, ширина – 12 мм) были импортированы из КОМПАС 3D в ANSYS Mechanical (рис. 1). Для каждого тела построена тетраэдрическая сетка *3* с размерами элементов: для образца – 0,5 мм, для колеса – 1,0 мм (рис. 2). Материал образца – сталь 45 (модуль Юнга $2{,}1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона 0,3), резина – гиперупругая модель Муни-Ривлина (C_{10} = 0,35 МПа, C_{01} = 0,10 МПа, несжимаемость).

2. Генерация дискретной фазы в Rocky DEM

Частицы песка *1* (сферическая форма, диаметр – 0,25 мм, насыпная плотность – 1600 кг/м^3)

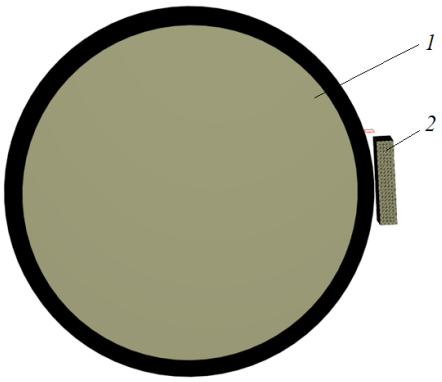


Рис. 1. Трехмерная модель аппарата абразивного износа:
1 – образец; 2 – колесо с резиновым ободом

Fig. 1. Three-dimensional model of the abrasive wear unit:
1 – sample; 2 – wheel with a rubber rim

генерировались через входное отверстие *2* с заданной скоростью подачи 0,5 г/с (рис. 2). В качестве контактной модели для взаимодействий «Частица-частица» и «Частица-стенка» согласно [12] выбрана модель гистерезисной линейной пружины (Hysteretic Linear Spring) с параметрами, представленными в таблице 1.

3. Совместный расчет (Coupling)

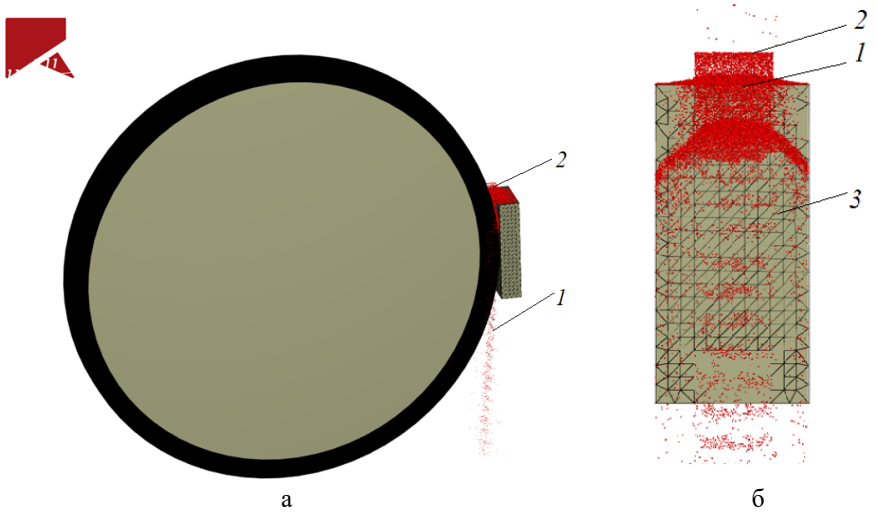
На каждом временном шаге ($\Delta t = 1 \cdot 10^{-6}$ с) Rocky DEM передает в ANSYS силы контакта от частиц на поверхность образца и колеса. ANSYS в свою очередь вычисляет поле упругих перемещений и уточняет геометрию контактной области для следующего шага. Обмен данными осуществляется через поверхностные интерфейсные узлы. Такой подход позволяет моделировать не только износ по Арчарду, но и его влияние на перераспределение напряжений (например, образование локальных зон концентрации на кромках изношенной поверхности).

4. Реализация закона износа в FEM-DEM модели

При комбинированном моделировании износа методом дискретных элементов, согласно алгоритму их взаимодействия [12], для каждого контактного узла на поверхности образца вычисляется тангенциальная работа трения за шаг ($\Delta E_{\tau,i}$):

$$\Delta E_{\tau,i} = \sum (F_{\tau,i} \cdot \Delta s_i), \quad (6)$$

где $F_{\tau,i}$ – сила трения в узле; Δs_i – относительное смещение.



а б

Рис. 2. Моделирование процесса абразивного износа в программе Rocky DEM:
1 – частицы песка; 2 – входное отверстие; 3 – тетраэдрическая сетка

Fig. 2. Simulation of the abrasive wear process in Rocky DEM:
1 – sand particles; 2 – inlet opening; 3 – tetrahedral mesh

Таблица 1

Параметры контактной модели гистерезисной линейной пружины

Table 1

Parameters of the contact model of a hysteretic linear spring

Свойства материала	Параметры контактной модели		
	Песок	**Образец**	**Резина (колесо)**
Насыпная плотность, кг · м$^{-3}$	1600	–	–
Плотность, кг · м$^{-3}$	2660	7850	1600
Модуль упругости в объеме, МПа	100	–	–
Модуль Юнга, МПа	–	2,1× 10^5	300
Коэффициент Пуассона	0,3	0,3	0,4
Размер частиц, мм	0,25	–	–
Свойства взаимодействия материалов	**Песок-песок**	**Сталь-песок**	**Резина-песок**
Коэффициент статического трения	0,7	0,3	0,3
Коэффициент динамического трения	0,7		
Коэффициент тангенциальной жесткости	1	0,25	0,25
Коэффициент восстановления	0,3	0,3	0,3

Потеря объема в результате абразивного износа в модели определяется как смещение вершин треугольной поверхности тетраэдров внутрь (рис. 2). Расстояние, на которое смещается каждая вершина, рассчитывается таким образом, чтобы изменение объема ΔV равнялось потере объема в результате износа, рассчитанной по закону износа Арчарда (1). Тогда потеря объема в результате износа за временной шаг моделирования будет определяться как

$$\Delta V_i = \frac{k}{H} \cdot \Delta E_{\tau,i}. \quad (7)$$

Затем вершины тетраэдров смещаются нормально внутрь на величину $\delta = \Delta V_i / A_i$ (где A_i – эффективная площадь, приходящаяся на узел). Коэффициент масштабирования пути $\alpha = 1000$ применялся аналогично мономодели DEM.

Гибридная методика позволяет одновременно оценивать износ, эволюцию поля контактных напряжений, а также учитывать влияние упругой деформации резинового колеса на кинематику частиц абразива.

Моделирование и постобработку результатов производили на компьютере с процессором Intel Core i5-16400KF (3,5 ГГц) и 64 ГБ ОЗУ.

Моделирование процесса абразивного износа проводили при нагрузках на испытуемую деталь со стороны резинового колеса N = 17, 34, 51, 68, 85 и 100 Н. Общее время расчета для каждого случая составляло 7 с. Высыпание абразивного песка между деталью и колесом инициировалось до установления их контакта, что обеспечивало в расчетах учет контактного взаимодействия «Колесо-песок-деталь».

Результаты и их обсуждение

Результаты визуализации интенсивности износа (W, Вт/м^2) исследуемого образца при различной нагрузке на деталь со стороны колеса представлены на рисунке 3.

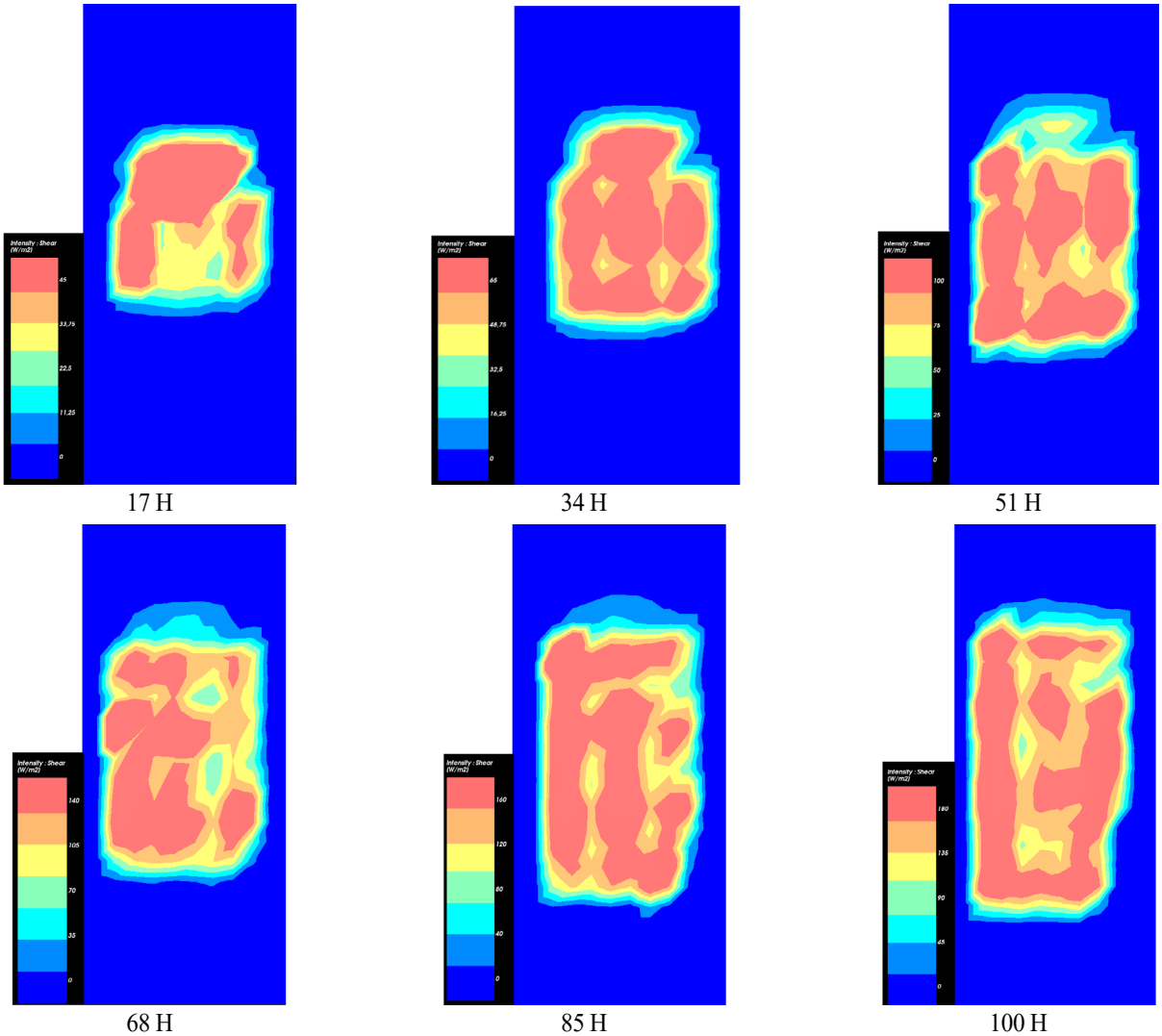


Рис. 3. Визуализация интенсивности износа W, Вт/м², при различной нагрузке на деталь

Fig. 3. Visualization of wear intensity W, W/m², under different loads on the part

Данные рисунка 3 наглядно демонстрируют эволюцию пространственного распределения интенсивности абразивного износа при увеличении нагрузки от 17 до 100 Н. Отметим основные особенности износа:

– при $N < 30$ Н износ является минимальным, что показывает наличие пороговой нагрузки, ниже которой интенсивность износа низкая;

– при $N > 50$ Н наблюдается переход от центрального износа к краевому (подковообразная форма);

– при высоких нагрузках $N > 85$ Н вклад краевых зон доминирует в суммарном объеме износа и формируется W-образное распределение интенсивности износа с двумя боковыми максимумами ввиду деформации резинового обода.

Комбинированное моделирование позволяет также получать информацию о напряжениях в зоне контакта образца и колеса. Увеличение давления, действующее на поверхность образца, увеличивает износ материала.

На рисунке 4 представлены временные реализации нормального напряжения в зоне контакта образца с колесом при нагрузках 17, 51 и 100 Н. Можно заметить, что с увеличением нагрузки возрастает как среднее значение напряжения (с 800 МПа при 17 Н до 4200 МПа при 100 Н), так и амплитуда его колебаний. Колебания обусловлены дискретным характером подачи частиц песка: при прохождении единичной частицы через зону контакта возникает локальный пик давления. С ростом нагрузки частота и высота пиков возрастают, что интенсифицирует микрорезание и усталостные механизмы износа.

Средние значения напряжений в зоне контакта образца и резинового колеса при различных нагрузках, полученные при усреднении данных нормального напряжения по времени (рис. 4), показаны на рисунке 5.

Гистограммы распределения напряжений (рис. 5) при повышенных нагрузках имеют выраженную асимметрию в сторону высоких значений (до 28000 МПа), в то время как при 17 Н разброс является незначительным, с максимумом 1000…1500 МПа. Это подтверждает, что при высоких нагрузках доминирует абразивное воздействие крупных частиц, а не постоянное давление резинового обода.

Эволюция пятна износа на образце в зависимости от нагрузки показана на рисунке 6. При нагрузке 17 Н в конце испытаний зона износа остается локализованной в центральной части следа колеса (площадь – ~12 мм^2). При 100 Н формируется обширная область (площадь – ~48 мм^2) с выраженным «корытообразным» профилем. Особый интерес представляет появление двух боковых зон повышенного износа

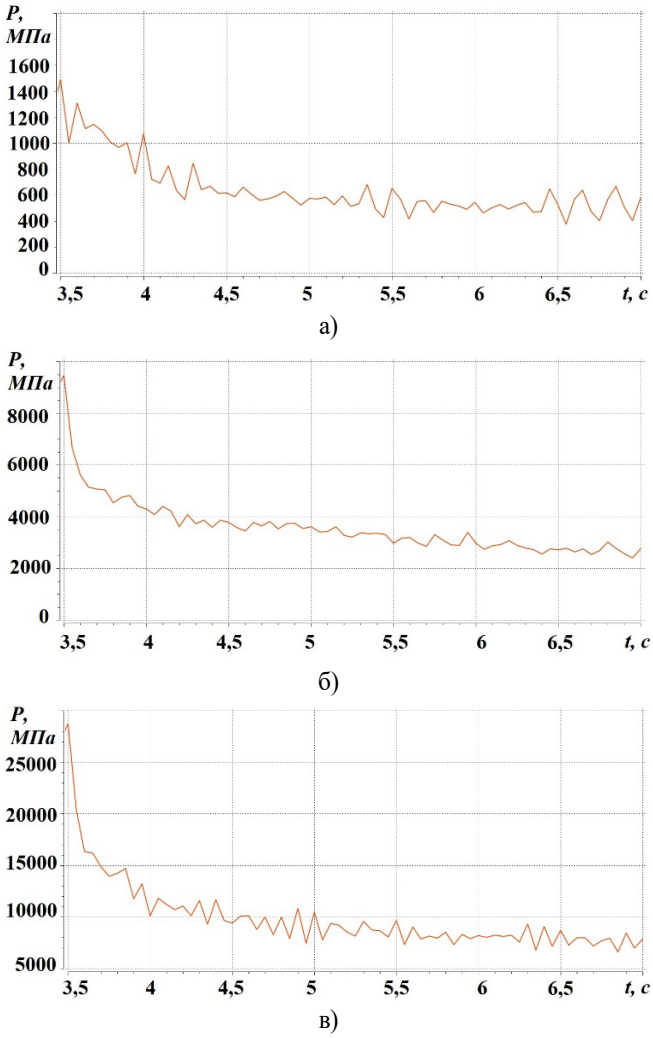


Рис. 4. Изменение нормального напряжения в зоне контакта по времени при различных нагрузках: а) N = 17 Н; б) N = 51 Н; в) N = 100 Н

Fig. 4. Variation of normal stress in the contact zone over time under different loads: a) N = 17 N; b) N = 51 N; c) N = 100 N

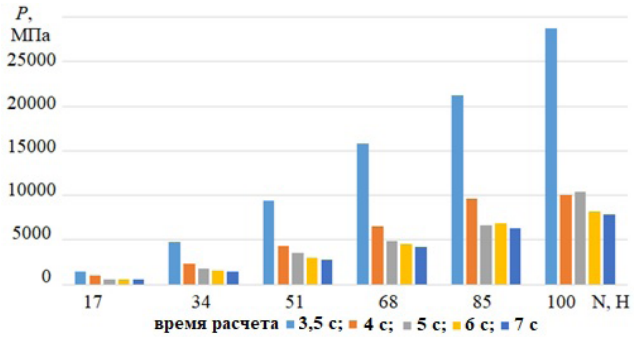


Рис. 5. Гистограммы напряжений в зоне контакта при различных нагрузках в разные моменты

Fig. 5. Histograms of stresses in the contact zone under different loads at different time points

при нагрузках 68…100 Н (рис. 3), что объясняется деформацией резинового обода: края контактной площади испытывают большие сдвиговые деформации,

прижимающие абразивные частицы под углом к поверхности образца.

Результаты объемного износа при разной нагрузке обода колеса на деталь по времени расчета представлены в таблице 2.

Анализ данных таблицы 2 показывает нелинейный рост объемного износа V_m при увеличении нагрузки. Например, за 7 с при 17 Н износ составил 40,17 мм^3, при 34 Н – 73,34 мм^3, при 51 Н – 126,82 мм^3, а при 100 Н – 328,52 мм^3. Зависимость аппроксимируется степенной функцией $V_m \approx 1{,}22N^{1,2}$ (коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}98$), что характерно для абразивного износа с участием эластичного контртела. Отклонение от линейного закона Арчарда ($V_m \approx N$) объясняется ростом фактической площади контакта за счет вдавливания резины при высоких нагрузках, что увеличивает число одновременно работающих абразивных частиц.

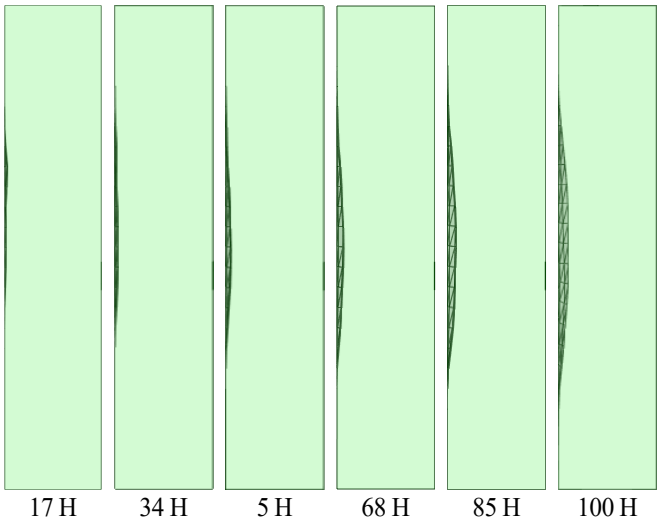


Рис. 6. Характер износа моделируемого образца при различных нагрузках

Fig. 6. Wear pattern of the simulated sample under different loads

Результаты расчета потери массы образца (сталь 45, плотность ρ = 7850 кг/м^3) по данным объемного износа из таблицы 1 за 7 с модельного расчета представлены в таблице 3.

Значения массы износа m получены при масштабировании пути скольжения с коэффициентом α = 1000. Это означает, что в реальных условиях (без масштабирования) такой же объем износа достигался бы на пути, в 1000 раз большем. Однако для лабораторной установки ASTM G65 данные значения могут быть непосредственно использованы для калибровки модели при известном пути скольжения.

График объемного износа образца испытуемой детали в зависимости пройденного пути и времени при разном давлении обода колеса изображен на рисунке 7. График зависимости массового износа от нагрузки по данным таблицы 3 представлен на рисунке 8.

Все кривые объемного износа (рис. 7) имеют три характерные зоны:

1. Зона приработки (s = 0…2000 мм), характеризующаяся высоким темпом износа, особенно при N > 50 Н (скорость – до 70 мм^3/мм).

2. Зона установившегося износа (s = = 2000…8000 мм), отличающаяся снижением скорости до 30…40 мм^3/мм (для 100 Н) ввиду образования упрочненного поверхностного слоя.

Таблица 2

Объемный износ V_m, мм^3, при разной нагрузке N и времени расчета t

Table 2

Volumetric wear V_m, mm^3, under different loads N and calculation times t

Время t, с	Объемный износ образца V_m, мм^3, при нагрузках N					
	17 Н	34 Н	51 Н	68 Н	85 Н	100 Н
3,5	0	0	0	0	0	0
4	5,65	13,24	22,29	32,7	48,93	65,05
5	16,46	33,83	59,34	88,92	124,14	159,32
6	27,3	53,52	94,98	138,61	191,46	248,48
7	40,17	73,34	126,82	183,85	255,95	328,52

Таблица 3

Потеря массы m, г, образца в зависимости от нагрузки N

Table 3

Mass loss m, g, of the sample as a function of load N

Нагрузка N, Н	17	34	51	68	85	100
Масса износа m, г	0,32	0,58	1,0	1,44	2,01	2,58

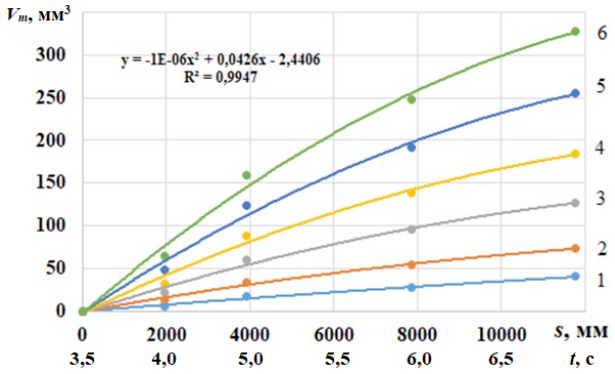


Рис. 7. Зависимость объемного износа (V_m, мм³) от пройденного пути (*s*, мм) и времени (*t*, с):
1) N = 17 Н; 2) N = 34 Н; 3) N = 51 Н; 4) N = 68 Н; 5) N = 85 Н; 6) N = 100 Н

Fig. 7. Relationship between volumetric wear (V_m, mm³), the distance traveled (*s*, mm), and time (*t*, s):
1) N = 17 N; 2) N = 34 N; 3) N = 51 N; 4) N = 68 N; 5) N = 85 N; 6) N = 100 N

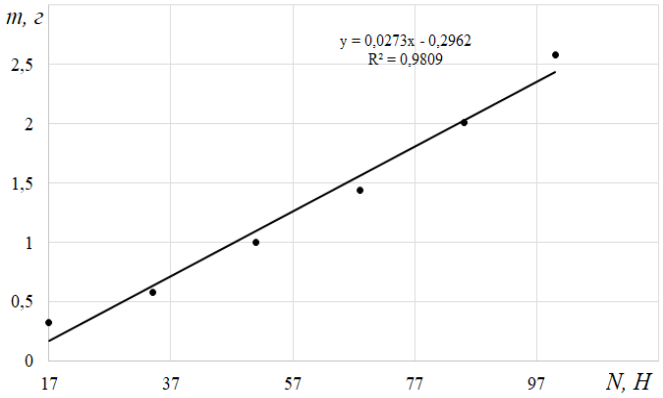


Рис. 8. Зависимость массового износа (*m*, г) от нагрузки (*N*, Н)

Fig. 8. Relationship between mass wear (*m*, g) and load (*N*, N)

3. Зона ускоренного износа (s =8000…10000 мм), характеризующаяся ростом скорости износа при N ≥ 85 Н, связанным с достижением критической пластической деформации поверхностного слоя и выкрашиванием частиц материала.

График зависимости массового износа *m* от нагрузки *N* (рис. 8) аппроксимирован нами линейной зависимостью согласно закону Арчарада, где объем (и масса) износа прямо пропорциональны нормальной нагрузке *N* и пути скольжения *L* (формула 1). Однако можно заметить, что при малых нагрузках (17…34 Н) прирост износа невелик, затем, начиная с 51 Н, темп роста увеличивается. Наибольшее абсолютное приращение массы износа наблюдается между 85 и 100 Н – около 0,57 г.

Наилучшее приближение зависимости массового износа *m* от нагрузки *N* достигается при использовании линейной функции $m \approx 0{,}0273 \cdot N$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0{,}9809$. Таким образом, линейная зависимость $m = f(N)$ полностью соответствует теоретическим ожиданиям. Отклонение от линейности на начальном участке (17…34 Н) может объясняться порогом истирания: при низких нагрузках частицы песка не внедряются достаточно глубоко и механизм микрорезания активируется не в полной мере. Однако в целом в диапазоне 34…100 Н зависимость остается линейной, что подтверждает корректность использованной модели и масштабирования пути скольжения.

Сравнение мономодели DEM (только Rocky) с гибридной FEM-DEM показало, что учет упругости резины повышает точность прогноза объемного износа на 15…20% для нагрузок выше 50 Н, поскольку в мономодели контактное давление завышается ввиду жесткой фиксации геометрии колеса. Гибридный подход также позволяет оценивать остаточные напряжения в образце после прохождения абразивной ленты, что является важным для прогнозирования усталостной долговечности реальных рабочих органов ПОМ.

Полученные закономерности согласуются с результатами Katinas и др. [12] для песчаных почв и Schramm и др. [13] для тестов с царапанием. В то же время впервые для резино-песчаной установки показано, что переход к нагрузкам более 80 Н приводит к качественной смене механизма износа: от микрорезания к фрагментации поверхностного слоя с отделением частиц размером 50…100 мкм. Примененный гибридный FEM-DEM подход позволяет моделировать этот эффект в отличие от классического DEM с жесткими стенками.

Потеря массы образца m = 2,58 г при нагрузке N = 100 Н за 7 с моделирования (табл. 3) хорошо согласуется с типичной массой износа для стали 45 в резино-песчаном тесте [12].

Ограничением метода является необходимость калибровки не только контактных параметров DEM (трение, восстановление), но и гиперупругой модели резины. Однако, как показано в наших расчетах, чувствительность выходного износа к вариациям коэффициента Пуассона резины в пределах 0,45…0,49 не превышает 7%, а к модулю упругости (в диапазоне 200…400 МПа) – 12%. Это делает метод устойчивым для инженерных приложений.

С практической точки зрения выявленная нелинейность износа с нагрузкой и наличие пороговой нагрузки (≈50 Н для стали 45) могут быть использованы при выборе режимов работы почвообрабатывающих орудий: превышение скорости, приводящее к росту контактных сил выше порогового значения, вызывает лавинообразное увеличение износа.

Для культиваторных лап, работающих в песчаных почвах, это означает необходимость ограничения скорости движения 8…9 км/ч, тогда как на глинистых почвах пороговая нагрузка может быть выше.

Выводы

1. Разработанная гибридная методика моделирования абразивного износа, сочетающая метод дискретных элементов (Rocky DEM) для песчаных частиц и метод конечных элементов (ANSYS) для упругодеформируемого резинового колеса и стального образца, позволяет учитывать перераспределение контактных давлений и эволюцию геометрии поверхности в процессе износа.

2. Массовый износ растет по линейной зависимости $m \approx 0{,}0273 \cdot N$ (при N от 34 до 100 Н) и имеет три временные стадии: приработка, установившийся износ и ускоренный износ (при $N \geq 85$ Н). При нагрузке 100 Н массовый износ достигает 2,58 г на пути скольжения, масштабированном с коэффициентом $\alpha = 1000$.

3. Эволюция пятна износа показывает, что при нагрузках 68…100 Н формируются боковые зоны повышенного износа, вызванные деформацией резинового обода. Площадь износа при 100 Н через 4 с достигает 48 мм^2, что в 4 раза превышает площадь контакта по Герцу.

4. Сравнение мономодели DEM и гибридной FEM-DEM показало повышение точности прогноза объемного износа на 15…20% для нагрузок >50 Н за счет учета упругого вдавливания резины. Рекомендуется использовать гибридный подход для моделирования рабочих органов ПОМ, взаимодействующих с абразивной средой через эластичные элементы (например, колесные ножи, катки).

5. Полученные зависимости позволяют обоснованно назначать режимы работы почвообрабатывающих машин (скорость, глубину обработки) с целью минимизации удельного износа. В частности, для условий песчаных почв с включениями кварца критическая нагрузка на лезвие не должна превышать 50 Н на 1 см^2 режущей кромки.

Перспективы дальнейших исследований включают в себя валидацию разработанной модели на натурных стендах с измерением профиля изношенной поверхности оптическими методами, а также учет коррозионно-механического износа при переменной влажности почвы.

Список источников/ References

1. Сидоров С.А., Лялякин В.П., Зволинский В.Н., Миронов Д.А. Повышение технического уровня рабочих органов агрегатов для предпосевной обработки почвы // Технический сервис машин. 2019. № 1 (133). С. 136-148. EDN: YUGVWH

Sidorov S.A., Lyalyakin V.P., Zvolinsky V.N., Mironov D.A. Improving the technical level of the working bodies tools for pre-sowing tillage. *Machinery Technical Service*. 2019;1:136-148. (In Russ.)

2. Yazıcı A. Wear on steel tillage tools: A review of material, soil and dynamic conditions. *Soil and Tillage Research*. 2024;242:106161. https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106161

3. Singh D., Nandede B.M., Raul A.K., Singh R.S. Effect of heat treatment on wear rate of different agricultural grade steels and associated cost economics. *Economic Affairs*. 2018;63(1):203-208. https://doi.org/10.30954/0424-2513.2018.00150.25

4. Spakale P.R., Tiwari G., Sharma A.K. Influence of surface hardening processes on wear characteristics of soil working tools-a review. *International Journal of Engineering Science and Emerging Technologies*. 2016;8(4):191-201

5. Миронов Д.А., Костомахин М.Н., Лискин И.В. Исследования закономерностей изнашивания лезвий почвообрабатывающих деталей // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2024. № 6. С. 19-26. https://doi.org/10.33920/sel-10-2406-04

Mironov D.A., Kostomakhin M.N., Liskin I.V. Simulation of soil cutting blade wear. *Selskokhozyaystvennaya tekhnika*: *obsluzhivanie i remont.* 2024;6:19-26. (In Russ.) https://doi.org/10.33920/sel-10-2406-04

6. Karamis M.B. Energy losses resulting from tillage tool wear in Turkish agricultural fields, In: Third International Symposium Ismir, Turkey, October 26-29, *Mechanization and Energy in Agriculture*: Proceedings. Pp. 211-219.

7. Kostencki P., Stawicki T., Królicka A. Wear of the working parts of agricultural tools in the context of the mass of chemical elements introduced into soil during its cultivation. *International Soil and Water Conservation Research*. 2021;9(2):229-240. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.11.001

8. Bedolla P.O., Vorlaufer G., Rechberger C. et al. Combined experimental and numerical simulation of abrasive wear and its application to a tillage machine component. *Tribology International*. 2018;127:122-128. https://doi.org/10.1016/j.triboint. 2018.03.019

9. Katinas E., Chotěborský R., Linda M., Jankauskas V. Wear modelling of soil ripper tine in sand and sandy clay by discrete element method. *Biosystems Engineering*. 2019;188:305-319. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng. 2019.10.022

10. Zhang P., Zhang X., Hu X. et al. Simulation and experimental study on frictional wear of plough blades in soil cultivation process based on the Archard model. *Biosystems Engineering*. 2024;248:190-205. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng. 2024.10.009

11. Schramm F., Kalácska Á., Pfeiffer V. et al. Modelling of abrasive material loss at soil tillage via scratch test with the discrete element method. *Journal of Terramechanics*. 2020;91:275-283. https://doi.org/10.1016/j.jterra. 2020.08.002

12. Cai Z., Yan J., Qiao Y. et al. Impact wear behavior of austenitic steel bucket teeth based on machine learning. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025;36:6128-6141. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.04.258

13. Wang Y., Li D., Nie C. et al. Research progress on the wear resistance of key components in agricultural machinery. *Materials*. 2023;16(24):7646. https://doi.org/10.3390/ma16247646

14. Tekeste M.Z., Balvanz L.R., Hatfield J.L., Ghorbani S. Discrete element modeling of cultivator sweep-to-soil interaction: Worn and hardened edges effects on soil-tool

forces and soil flow. *Journal of terramechanics*. 2019;82:1-11. https://doi.org/110.1016/j.jterra.2018.11.001

15. Ucgul M. Simulating soil-disc plough interaction using discrete element method-multi-body dynamic coupling. *Agriculture*. 2023;13(2):305. https://doi.org/10.3390/agriculture13020305

16. Mudarisov S.G., Gabitov I., Lobachevsky Ya. et al. Systematic evaluation and experimental validation of discrete element method contact models for soil tillage simulation. *AgriEngineering*. 2025;7(8):256. https://doi.org/10.3390/agriengineering7080256

17. Mudarisov S.G., Farkhutdinov I.M., Bagautdinov R.Yu. Justification of dual-level opener parameters in digital twin by the discrete element method. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(2):229-243. https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.229-243

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

19. Archard J.F. Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*. 1953;24(8):981-988. https://doi.org/10.1063/1.1721448

20. Zhang P., Zhang X., Hu X. et al. Simulation and experimental study on frictional wear of plough blades in soil cultivation process based on the Archard model. *Biosystems Engineering*. 2024;248:190-205. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.10.009

21. Katinas E., Chotěborský R., Linda M., Kuře J. Sensitivity analysis of the influence of particle dynamic friction, rolling resistance and volume/shear work ratio on wear loss and friction force using DEM model of dry sand rubber wheel test. *Tribology International*. 2021;156:106853. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106853

Информация об авторах

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

[2] **Фархутдинов Ильдар Мавлиярович,** д-р техн. наук, доцент; ildar1702@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-6443-8584; SPIN-код: 8646-6670

[3] **Фаюршин Азамат Фаритович,** канд. техн. наук, доцент; azamatff@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-8787-8750; SPIN-код: 5544-8158

[4] **Имангулов Венер Ханифович,** младший научный сотрудник; imangulov.vener@mail.ru; https://orcid.org/0009-0000-9171-2369; SPIN-код: 4345-2695

[1, 2, 3, 4] **Башкирский государственный аграрный университет,** кафедра мехатронных систем и машин аграрного производства; 450001, Российская Федерация, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. 50 лет Октября, 34

Вклад авторов

С.Г. Мударисов – руководство исследованиями, концептуализация, методология, создание и подготовка рукописи;
И.М. Фархутдинов – разработка компьютерных программ, осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных, формальный анализ;
А.Ф. Фаюршин – проведение исследований, интерпретация результатов;
В.Х. Имангулов – проведение исследований, верификация данных, визуализация;

Конфликт интересов

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

Статья поступила 08.05.2026, после рецензирования и доработки 08.07.2026, принята к публикации 12.07.2026

Author Information

Salavat G. Mudarisov [1], DSc (Eng), Professor; salavam@gmail.com✉; https://orcid.org/0000-0001-9344-2606; Scopus Author ID: 57200284613

Ildar M. Farkhutdinov [3], DSc (Eng), Associate Professor; ildar1702@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-6443-8584; ResearcherID: G-2816-2018

Azamat F. Fayurshin [3], CSc (Eng), Associate Professor; azamatff@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-8787-8750; Scopus Author ID: 57205764476

Vener Kh. Imangulov [4], Junior Research Fellow; imangulov.vener@mail.ru

[1, 2, 3, 4] Bashkir State Agrarian University, Department of Mechatronic Systems and Machines for Agricultural Production; 50 Let Oktyabrya Str., 34, Ufa, 450001, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

Author Contributions

S.G. Mudarisov – supervision, conceptualization, methodology, writing – original draft;
I.M. Farkhutdinov – software development, investigation; data curation; formal analysis;
A.F. Fayurshin – investigation, formal analysis;
V.Kh. Imangulov – investigation, validation, visualization.

Conflict of Interest

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

Received 08.05.2026; Revised 08.07.2026; Accepted 12.07.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 004.8:631.15
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-15-27

Разработка AI-агента поддержки принятия решений для промышленного садоводства на основе больших языковых моделей (LLM) и компьютерного зрения

А.И. Кутырёв
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия
alexeykutyrev@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-7643-775X

Аннотация. Современное промышленное садоводство оснащают автоматизированными метеостанциями, датчиками мониторинга состояния растений и почвы, а также IoT-платформами. Развитие цифровизации производственных процессов садоводства обусловливает необходимость разработки интеллектуальной системы поддержки принятия решений. Применение методов обработки естественного языка (NLP) с использованием больших языковых моделей (LLM), компьютерного зрения и анализа данных позволило разработать программный комплекс «AI-агент поддержки принятия решений» для садоводства. В составе AI-агента реализованы механизм генерации с дополненным поиском (RAG), позволяющий получать ответы на профессиональные вопросы, интерфейс анализа изображений растений на базе YOLO, модуль мониторинга с настройкой уведомлений и интеграцией с внешними источниками (MQTT, API), а также инструменты А/Б тестирования для сравнения эффективности ответов. AI-агент построен на открытых библиотеках Python, предоставляет веб-интерфейс (Gradio) и REST API. Экспериментальная оценка показала, что применение RAG повышает релевантность ответов: в 84% случаев эксперты отдали предпочтение ответам, дополненным информацией из базы знаний (доверительный интервал для 95% составил [78,2%; 89,8%] при p менее 0,001). Распознавая объекты яблоневого сада, модуль компьютерного зрения на основе YOLO достиг точности 0,82 и полноты 0,76. Система мониторинга обеспечивает прием данных через MQTT и HTTP с пропускной способностью до 500 записей/с и отправляет оповещения в Telegram со средней задержкой 2 с. Разработанный AI-агент можно использовать как исследовательский инструмент для проведения научных экспериментов и создания коммерческих решений в области точного садоводства: например, автоматизированных рабочих мест агронома, платформ для мониторинга растений, сервисов дистанционной диагностики болезней, систем раннего оповещения о неблагоприятных событиях (заморозки, засуха, вредители) и модулей прогнозирования урожайности.

Ключевые слова: садоводство; анализ изображений растений; мониторинг; AI-агент поддержки принятия решений; LLM; RAG; YOLO

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № FGUN-2025-0011).

Для цитирования: Кутырёв А.И. Разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений для промышленного садоводства на основе больших языковых моделей (LLM) и компьютерного зрения // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 15-27. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-15-27

ORIGINAL ARTICLE

LLM and computer vision-based intelligent decision support system for digital horticulture

A.I. Kutyrev
Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia
alexeykutyrev@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-7643-775X

Abstract. Modern industrial horticulture is increasingly integrating automated weather stations, soil and plant sensors, and the Internet of Things (IoT) platforms. This pervasive digitalization necessitates the development of intelligent decision support systems (IDSS) capable of interpreting complex agro-data. By leveraging natural language processing (NLP) via Large Language Models (LLMs), computer vision, and real-time data analysis, the author has developed the “AI Decision Support Agent” – a specialized software package for digital horticulture.

© Кутырёв А.И., 2026

The system features a Retrieval-Augmented Generation (RAG) mechanism for expert-level query resolution, a YOLO-based computer vision interface for plant phenotyping and object detection, and a monitoring module with MQTT and API integration for real-time sensor data acquisition. Additionally, an A/B testing framework was implemented to evaluate the qualitative accuracy of system responses. Built using open-source Python libraries, the agent provides a Gradio-based web interface and a scalable REST API. Experimental evaluation demonstrated that the RAG mechanism significantly enhances response relevance: in 84% of cases, experts preferred RAG-augmented responses over standard LLM outputs (95% confidence interval (CI) [78.2%, 89.8%]; $p < 0.001$). For apple orchard object detection, the YOLO-based vision module achieved a precision of 0.82 and a recall of 0.76. The data acquisition system maintains a throughput of up to 500 records per second via MQTT and HTTP, with notification delay averaging 2 seconds. The developed IDSS serves as a versatile tool for both academic research and commercial applications in precision horticulture, including automated agronomist workstations, plant monitoring platforms, remote disease diagnostics, early-warning systems for biotic and abiotic stresses (frost, drought, pests), and yield forecasting modules.

Keywords: horticulture; plant image analysi; monitoring; AI decision support agent; large language models (LLM); retrieval-augmented generation (RAG); YOLO

Funding. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Theme No. FGUN-2025-0011).

For citation: Kutyrev A.I. LLM and computer vision-based intelligent decision support system for digital horticulture. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):15-27. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-15-27

Введение

В современное промышленное садоводство внедряются автоматизированные метеостанции, стационарные и мобильные датчики для мониторинга состояния растений и почвы, датчики фитосанитарного контроля, а также IoT-платформы, объединяющие устройства в единую сенсорную сеть [1-3]. В результате формируются большие объемы разнородных данных (Big Data), требующие эффективных методов обработки. Для анализа данных и планирования выполнения технологических операций используется специализированное программное обеспечение [4, 5]. Чтобы использовать эти данные, требуется понимание биологических особенностей растений и факторов, влияющих на продуктивность насаждений [6]. Внедрение цифровых технологий сдерживается в связи с недостатком специалистов, способных интерпретировать поступающую информацию для принятия управленческих решений, а также ввиду отсутствия единой платформы, объединяющей существующие информационные системы. В результате данные остаются невостребованными, а решения принимаются несвоевременно и на основе неполной информации, что приводит к потерям урожая и нерациональному использованию ресурсов.

В исследованиях в области создания систем поддержки принятия решений [7-9] для классификации болезней растений по фотографиям применяют сверточные нейронные сети (CNN). Данные методы успешно применяются для анализа состояния плодов и листьев яблони [10, 11]. Однако в отличие от экспертных систем, учитывающих множество факторов, CNN-модели не могут интерпретировать результат в комплексе с другими данными – они способны распознавать только те признаки заболеваний, на которых обучались [12]. Тем не менее технологии дообучения с низким рангом (LoRA) [13] позволяют адаптировать предобученные модели под предметную область с минимальными вычислительными затратами. Кроме того, в сельском хозяйстве стали применять большие языковые модели (LLM) с дополненным поиском (Retrieval-Augmented Generation, RAG) для генерации ответов с использованием информации из справочников и научных статей [14, 15]. В «умном сельском хозяйстве» широко применяют системы мониторинга на основе MQTT и анализа потоковых данных [16].

Интеграция LLM с данными датчиков в реальном времени остается актуальной научной задачей. В исследованиях [17, 18] представлены архитектуры мультимодальных ассистентов, сочетающих анализ изображений и текста. Несмотря на активное развитие отдельных направлений, комплексные решения, объединяющие методы обработки естественного языка, компьютерного зрения и потокового анализа данных, в едином веб-интерфейсе отсутствуют.

Цель исследований: разработка программного комплекса «AI-агент поддержки принятия решений», объединяющего функции консультационного сервиса на основе RAG, автоматический сбор и анализ данных с датчиков, а также мультимодальный анализ изображений растений на базе компьютерного зрения

и LLM для проведения экспериментов (А/Б тестирование) и механизма обучения модели под конкретные условия хозяйства.

Практическая реализация AI-агента позволит агроному получать оперативные, научно обоснованные рекомендации, основанные как на актуальных данных мониторинга, так и на проверенных источниках знаний.

Материалы и методы

Разработка AI-агента выполнена на языке Python с использованием широкого спектра библиотек. Система построена по модульному принципу и включает в себя такие компоненты, как модуль взаимодействия с пользователем (веб-интерфейс и REST API), модуль языковой модели, модуль базы знаний, модуль компьютерного зрения, модуль мониторинга и уведомлений, модуль логирования и А/Б-тестирования, модуль обучения, модуль администрирования (рис. 1). Все модули интегрированы и обмениваются данными через единую систему баз данных.

Модуль базы знаний и RAG реализован на основе векторной базы данных ChromaDB. Для оценки смысловой близости между текстовыми фрагментами используется косинусная метрика сравнения их векторных представлений (эмбеддингов), создаваемых моделью SentenceTransformer intfloat/multilingual-e5-small размерностью 384. Процесс добавления документа включает в себя извлечение текстового содержимого в зависимости от формата исходного файла. Для текстовых файлов (.txt) выполняется чтение в кодировках UTF-8, cp1251, latin1 и др. с использованием библиотеки chardet. Из PDF-документов текст извлекается построчно с помощью PyPDF2. Для файлов Microsoft Word (.docx) применяется библиотека python-docx для чтения параграфов. Таблицы Excel (.xlsx) обрабатываются библиотекой pandas с извлечением всех листов и преобразованием содержимого в текстовое представление с разделителями табуляции. CSV-файлы анализируются с автоматическим определением разделителя (csv.Sniffer) и последующим построчным чтением. HTML-страницы обрабатываются библиотекой BeautifulSoup4 с удалением скриптов и стилей. После извлечения текст сегментируется на фрагменты. Размер фрагмента

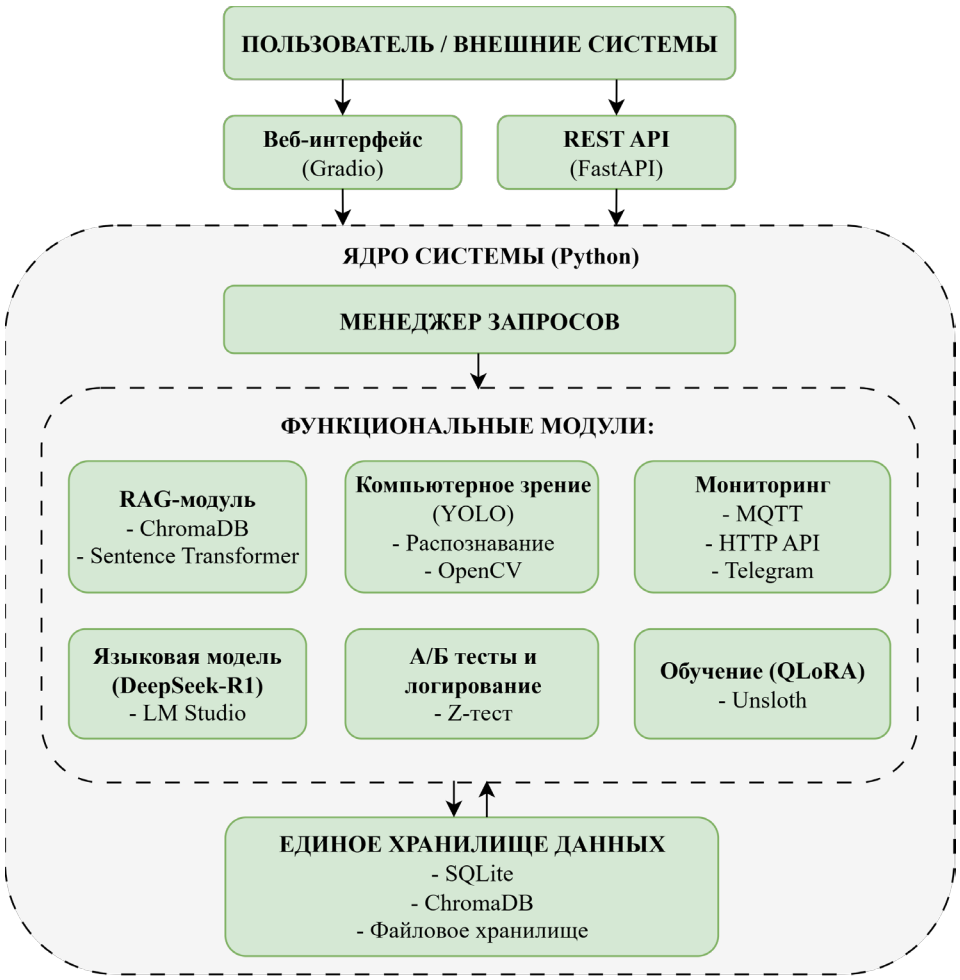


Рис. 1. Архитектура системы

Fig. 1. System architecture

и величина перекрытия между соседними фрагментами задаются пользователем (по умолчанию 500 символов с перекрытием 50 символов).

Алгоритм разбиения стремится сохранить целостность слов: граница фрагмента устанавливается по последнему пробелу в пределах заданной длины. Перекрытие необходимо для сохранения контекста на границах и предотвращения потери релевантной информации при поиске. Каждый фрагмент преобразуется в векторное представление с помощью модели intfloat/multilingual-e5-small. Сформированные векторы вместе с идентификатором (хеш от имени файла и номера фрагмента), текстом фрагмента и метаданными (имя исходного файла, номер фрагмента) сохраняются в ChromaDB. При выполнении поиска запрос пользователя аналогичным образом преобразуется в вектор той же моделью. ChromaDB выполняет поиск k ближайших векторов (по умолчанию k = 3) на основе косинусного сходства по формуле:

$$\text{cosine}_{\text{similarity (a, b)}} = \frac{a \cdot b}{\|a\|\|b\|} = \frac{\sum_{i=1}^{n} a_i b_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} a_i^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n} b_i^2}}, \quad (1)$$

где a, b $\in R^n$ – векторные представления (эмбеддинги) запроса и фрагмента документа, полученные с помощью модели intfloat/multilingual-e5-small, $n = 384$ – размерность эмбеддингов.

Результат принимает значения в диапазоне [–1, 1], при этом значение, близкое к 1, указывает на высокую смысловую близость. Найденные три наиболее релевантных фрагмента передаются языковой модели, подставляются в системный промпт (запрос к модели) в качестве контекста.

В качестве базовой языковой модели AI-агента использована DeepSeek-R1 (версия deepseek/deepseek-r1-0528-qwen3-8b, 8 млрд параметров). Модель загружается локально в 4-битном формате через приложение LM Studio (HTTP-сервер, совместимый с API OpenAI), что обеспечивает достаточную производительность для задач консультирования на русском языке при умеренных аппаратных требованиях (рекомендуется GPU с 8+ ГБ видеопамяти) (рис. 2).

Для режима RAG разработан специальный системный промпт (инструкция или входные текстовые данные, которые отправляются нейросети для выполнения конкретной задачи), предписывающий модели отвечать строго в рамках тематики садоводства, указывать источники информации и формулировать краткие научно обоснованные ответы. Для свободного диалога, не ограниченного предметной областью, используется отдельный промпт без тематических ограничений. Дообучение модели под конкретные задачи реализовано с помощью библиотеки Unsloth, обеспечивающей применение метода QLoRA. Процесс дообучения начинается со сбора датасета из логов взаимодействий с AI-агентом; из таблицы базы данных SQLite извлекаются пары «вопрос-ответ», которые экспортируются в формат JSONL. Базовая

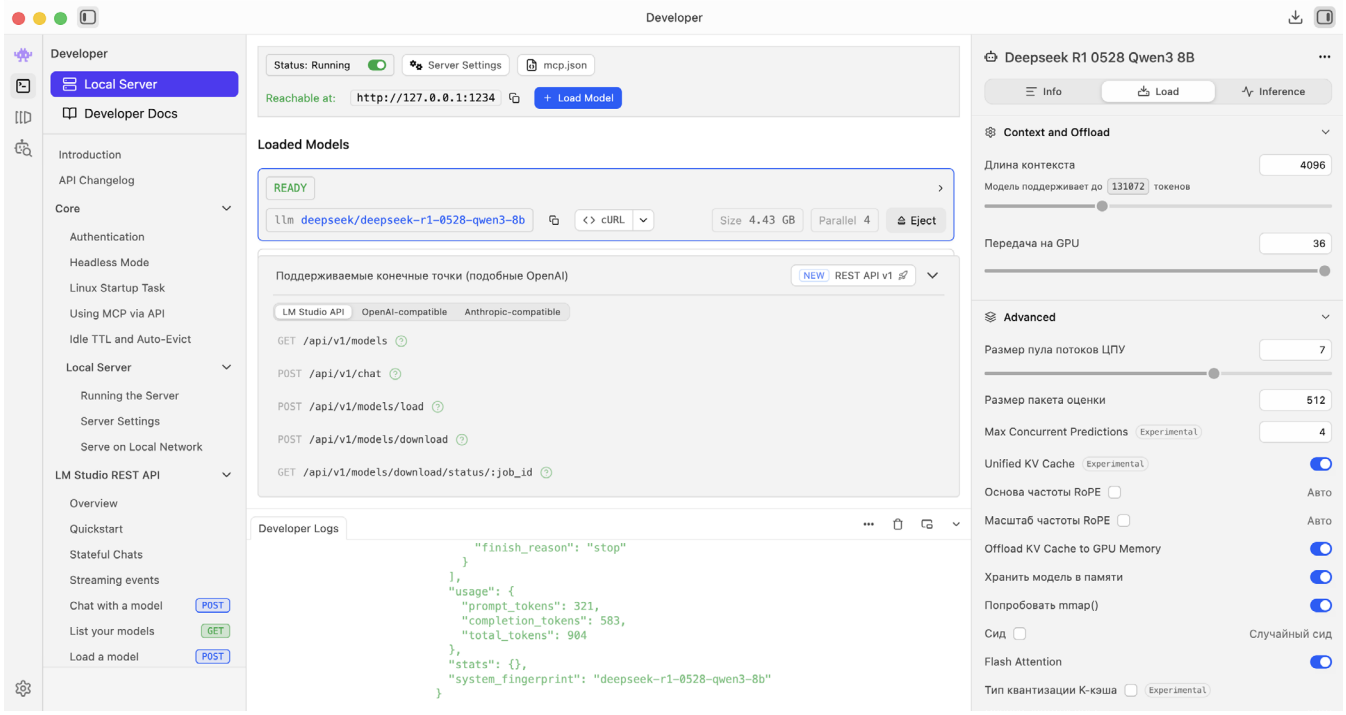


Рис. 2. Приложение LM Studio с запущенным локальным сервером с языковой моделью DeepSeek-R1

Fig. 2. LM Studio application with a local server running the DeepSeek-R1 language model

модель загружается с применением 4-битного квантования для снижения потребления видеопамяти. Для обучения используется класс SFTTrainer из библиотеки TRL со следующими гиперпараметрами: размер пакета данных (batch size) – 2; накопление градиентов (gradient accumulation) – 4; скорость обучения (learning rate) – 0,0002; количество шагов – 60; оптимизатор – AdamW 8-bit. По завершении обучения полученные адаптеры сохраняются в указанную директорию. Описанный метод обеспечивает возможность дообучения языковой модели на данных, характерных для конкретного хозяйства, что способствует повышению релевантности, стилистической точности и содержательной глубины генерируемых ответов. При этом требуемый объем видеопамяти не превышает 5 ГБ.

В основе модуля компьютерного зрения лежат сверточные нейронные сети семейства YOLO последних поколений, поддерживаемые фреймворком Ultralytics: YOLOv8, YOLOv10, YOLO11, YOLO12 и YOLO26. В качестве основной модели детекции выбрана YOLO26n (nano-версия), которая изначально предобучена на наборе данных COCO, а затем дообучена на специализированной выборке изображений, содержащих фотографии яблок, цветов, листьев и плодов [8, 10, 12]. Выбор YOLO26n обусловлен оптимальным соотношением точности (Precision = 0,82) и скорости инференса (0,05 с на кадр на GPU), что является важным для работы в режиме реального времени.

Дообучение выполнялось в течение 300 эпох с использованием оптимизатора AdamW (начальная скорость обучения – 0,001 с распадом по косинусному закону), размер пакета данных (Batch size) составил 16 изображений. Для компенсации дисбаланса классов (доминирование класса «apple») применялась взвешенная функция потерь, а также аугментация данных (горизонтальное отражение, поворот на ±15°, изменение яркости и контрастности, добавление шума). Модель загружается однократно при запуске приложения и постоянно находится в оперативной памяти для обеспечения быстрого отклика. Алгоритм обработки изображения включает в себя несколько этапов, исходное RGB-изображение преобразуется в цветовое пространство BGR, требуемое библиотекой OpenCV, после чего выполняется инференс – этап распознавания YOLO с настраиваемыми порогами уверенности (conf) и пересечения (iou). Результатами работы модели являются координаты ограничивающих рамок, идентификаторы классов и значения уверенности для каждого распознанного объекта. На основе этих данных на изображение наносятся ограничивающие рамки, после чего оно конвертируется обратно в RGB для корректного отображения в веб-интерфейсе. Обработанное изображение может быть сохранено в различных форматах с использованием библиотеки Pillow. Дополнительно рассчитываются статистика по обнаруженным объектам, количество экземпляров каждого класса и средняя уверенность распознавания. Эта информация может быть передана в языковую модель в качестве текстового контекста для мультимодального диалога, позволяя агенту учитывать визуальную информацию при формировании ответов. Предусмотрена возможность отключения модуля YOLO, в случае чего изображение передается в систему без детекции, и языковая модель отвечает исключительно на основе своего предварительного обучения.

Модуль мониторинга и уведомлений обеспечивает сбор данных от трех типов источников: ручного ввода через форму интерфейса (как одиночные показания, так и пакетная загрузка данных в формате JSON), подписки на MQTT-топики, указанные в конфигурации активных источников данных (реализовано через библиотеку paho-mqtt), а также HTTP-эндпоинта /api/monitoring, принимающего POST-запросы с массивом записей в формате JSON. Каждая запись мониторинга содержит временную метку, название метрики, числовое значение, единицу измерения и идентификатор источника. Все поступившие данные сохраняются в таблицу базы данных SQLite. Для последующего анализа и визуализации накопленных показаний используются библиотеки pandas и numpy. При добавлении каждой записи система автоматически проверяет ее соответствие правилам уведомлений, которые могут задавать условия вида >, <, =, >=, <= или «в диапазоне» с одним или двумя пороговыми значениями. В случае срабатывания правила соответствующее событие фиксируется в таблице базы данных SQLite, и уведомление отправляется в Telegram с помощью HTTP-запросов (библиотека requests). Также через requests выполняется интеграция с внешним погодным API (OpenWeatherMap) для получения метеоданных. Пользователь может создавать, редактировать и удалять правила через специальный интерфейс на вкладке «Уведомления», а также просматривать историю срабатываний.

Параллельно с мониторингом функционирует модуль логирования и А/Б тестирования. Все взаимодействия пользователя с системой, включая задаваемые вопросы, полученные ответы (сгенерированные LLM), режим использования RAG, перечень источников информации и оценки релевантности, сохраняются в таблицу базы данных. Для проведения А/Б тестирования, сравнения двух версий ответов с использованием и без использования RAG предусмотрена

отдельная вкладка. Пользователь вводит вопрос, после чего система генерирует два варианта ответа с помощью LLM, с применением RAG и без него. Сравнив ответы, пользователь голосует за лучший вариант, и результат фиксируется в базе данных.

Для объективной оценки эффективности различных режимов работы системы применен Z-тест, позволяющий определить, является наблюдаемая разница в предпочтениях (ответах) пользователей статистически значимой или же она обусловлена случайными факторами. Данный статистический критерий вычисляется по формуле:

$$Z = \frac{\hat{p}_A - \hat{p}_B}{\sqrt{\hat{p}\left(1-\hat{p}\right)\left(\frac{1}{n_A}+\frac{1}{n_B}\right)}}, \quad (2)$$

где $\hat{p}_A$ – доля предпочтений (например, доля ответов, признанных лучшими) для варианта A (с RAG); $\hat{p}_B$ – доля предпочтений для варианта B (без RAG); n_A, n_B – количество оценок (голосов) для каждого варианта; $\hat{p}$ – доля ответов, которые пользователи или эксперты посчитали лучшими во всем эксперименте, без разделения на варианты A и B. Долю можно рассчитать по формуле:

$$\hat{p} = \frac{N_A^{\text{релевантно}} + N_B^{\text{нерелевантно}}}{n_A + n_B}, \quad (3)$$

где $N_A^{\text{релевантно}}$ – количество голосов, в которых вариант A признан релевантным; $N_B^{\text{нерелевантно}}$ – количество голосов, в которых вариант B признан нерелевантным.

При уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ значение $|Z| > 1{,}96$ свидетельствует о наличии статистически достоверной разницы между вариантами. Данный критерий применяется при анализе результатов А/Б тестирования, накопленных в базе данных системы, что позволяет объективно оценить эффективность использования механизма дополненной генерации.

Накопленные данные могут быть использованы для анализа эффективности различных режимов работы и для улучшения системы в целом. Возможна загрузки файлов с логами из внешних программ мониторинга (например, результаты мониторинга насаждений с использованием нейросетевых моделей) с форматами .txt, .pdf, .docx, .xlsx, .csv, .html. Содержимое файла автоматически извлекается и передается в языковую модель в качестве контекста (с использованием RAG). Пользователь может задать уточняющий вопрос, а модель – дать рекомендации на основе как загруженного файла, так и имеющейся базы знаний. Эта функция позволяет интегрировать данные из различных источников и получать экспертные заключения по уже собранным материалам.

Веб-интерфейс системы, построенный на библиотеке Gradio, содержит семь основных вкладок. Для обеспечения программного доступа к функциям системы создан REST API на базе FastAPI, сервер запускается под управлением ASGI-сервера uvicorn. Вкладка «AI-агент» включает в себя подразделы для обычного чата с возможностью включения RAG, интерактивного агента, собирающего уточняющие данные, мультимодального диалога с изображениями, свободного чата без тематических ограничений и анализа загруженных логов. Вкладка «Мониторинг» позволяет просматривать последние данные датчиков, строить графики выбранных метрик, добавлять показания и настраивать интеграцию с метеостанциями и погодным API. Вкладка «Анализ изображений» предоставляет инструменты для загрузки фотографий растений, настройки параметров модели YOLO и визуализации результатов распознавания. На вкладке «Уведомления» представлены функции создания правил уведомлений, просмотра истории их срабатывания и настройки Telegram-уведомлений с указанием токена и идентификатора чата. Вкладка «Датасет» отображает статистику собранных диалогов, позволяет экспортировать их в формате JSONL для дообучения LLM и проводить А/Б тестирование. Вкладка «База знаний» предназначена для загрузки документов, просмотра содержимого векторной базы. Вкладка «Администрирование» включает в себя инструменты резервного копирования всех данных (SQLite-базы, папка ChromaDB, датасеты) в ZIP-архив, восстановления из резервной копии, удаления записей мониторинга старше заданного числа дней, а также проверки работоспособности системы, которая оценивает доступность LM Studio, состояние MQTT-клиента, целостность баз данных, наличие настроек API метеостанции и доступность сервера Telegram-бота.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенных исследований разработан AI-агент поддержки принятия решений. Для оценки качества работы механизма генерации с дополненным поиском (Retrieval-Augmented Generation, RAG) подготовлено 50 вопросов по садоводству, учитывающих интерпретацию данных мониторинга, прогнозирование фенологических фаз (цветение, завязывание и созревание плодов), оценку фитосанитарного состояния, выявление корреляций между погодными условиями и урожайностью. В базу знаний загружены справочники (.PDF), научные публикации (.DOCX). Вопросы были сформированы совместно с экспертами таким образом, чтобы охватить пять основных направлений (фенология,

защита растений, полив, удобрения, интерпретация данных). Для каждого домена было составлено по 10 вопросов. Экспертное голосование включало в себя рандомизацию порядка предъявления ответов (с RAG и без RAG) для каждого эксперта с использованием генератора случайных чисел, чтобы исключить эффект порядка. Экспертам предлагали три варианта оценки: «Вариант А более релевантен», «Вариант Б более релевантен» или «Равноценны по релевантности». Голоса «Равноценны» были исключены из расчета Z-теста для проверки гипотезы о явном преимуществе одного из подходов по релевантности генерируемых ответов. Примеры запросов и ответов показывают, что ответы, сформированные языковой моделью с использованием найденных в базе знаний фрагментов, содержат конкретные рекомендации с указанием источника, тогда как ответы без привлечения внешних источников являются более общими.

Сравнение двух версий ответов (с использованием RAG и без него), проведенное с участием 10 экспертов в области агрономии, показало, что в 84% случаев эксперты отдали предпочтение ответам, дополненным информацией из базы знаний, в 10% случаев – ответам без RAG; оставшиеся 6% ответов были признаны равноценными. Доверительный интервал (ДИ) 95% для доли предпочтений с учетом кластеризации оценок (эффективный размер выборки $n_{eff} = 154$, вычисленный с поправкой на внутрикластерную корреляцию ICC = 0,25 при 10 экспертах и 50 вопросах) рассчитан по формуле:

$$\text{ДИ} = \hat{p} \pm 1{,}96 \cdot \sqrt{\frac{\hat{p}\left(1-\hat{p}\right)}{n_{eff}}}, \qquad (4)$$

где $\hat{p} = 0{,}84$ – доля предпочтений.

Полученный интервал [78,2%; 89,8%] подтверждает статистическую надежность оценки.

Статистическая значимость полученных различий была подтверждена с помощью Z-теста, примененного к оценкам 10 независимых экспертов ($n_A = n_B = 10$). При доле предпочтений $\hat{p}_A = 0{,}84$ (с RAG) и $\hat{p}_B = 0{,}10$ (без RAG) получено: $|Z| = 3{,}21 > 1{,}96$, $p < 0{,}001$, что указывает на преимущество ответов, дополненных информацией из базы знаний.

Согласованность мнений экспертов оценена с помощью статистического коэффициента каппы Коэна (κ), который применен для оценки межэкспертной согласованности при попарном сравнении двух вариантов ответов (с RAG и без RAG). Коэффициент рассчитан на основе матрицы согласий экспертов по 50 вопросам. Согласно шкале Лэндиса и Коха значение κ = 0,72 соответствует «существенному» уровню согласия. Это подтверждает, что предпочтения экспертов не являются случайными, а отражают объективное преимущество ответов, дополненных информацией из базы знаний. Полученные результаты подтверждают эффективность применения базы знаний для повышения релевантности ответов, генерируемых LLM. Время ответа с использованием поиска увеличивалось в среднем на 0,8 с, что не нарушает интерактивность диалога с LLM (рис. 3).

Для тестирования YOLO использован набор из 100 фотографий яблоневого сада с разметкой классов «apple», «flower», «ovary». Датасет для обучения включал в себя 1500 размеченных изображений, из которых 80% использовалось для обучения, 10% – для валидации, 10% – для тестирования. Разметка выполнялась вручную экспертами с использованием полигонов для точного выделения объектов. Валидационная и тестовая выборки формировались с сохранением пропорций классов. Метрики составили точность (precision) = 0,82, полнота (recall) – 0,76, средняя точность (mAP@0,5) – 0.78. Наиболее часто ошибки возникали при распознавании плодов, цветков и завязей, закрытых листьями, а также в условиях низкой освещенности. Время инференса для изображения 640 × 640 на Intel Core i9-10900X составляло ~0,4 с, на GPU NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti – ~0,05 с. В мультимодальном режиме распознавания модели YOLO передавались в LLM, что позволило агроному получать осмысленные ответы: например, о количестве яблок на дереве с учетом возможной скрытости части плодов (рис. 4).

Эффективность системы мониторинга проверялась путем эмуляции работы датчиков, отправляющих значения температуры воздуха через протокол MQTT. Были настроены два правила срабатывания: «температура ниже 2°C» (сигнал о риске заморозков) и «температура выше 30°C» (сигнал о необходимости полива) (рис. 5). Уведомления в Telegram приходили в среднем через 2 с после превышения пороговых значений. Пакетная загрузка JSON через HTTP-эндпоинт показала пропускную способность ~500 записей/с, проверка уведомлений для пакета из 1000 записей заняла 0,2 с.

Результаты дообучения модели методом QLoRA были оценены количественно в ходе дополнительного эксперимента. Пятеро экспертов, не участвовавших в первоначальном А/Б-тестировании RAG, сравнили ответы базовой и дообученной модели на тестовой выборке из 30 вопросов, не входивших в обучающий датасет. В 76% случаев эксперты отдали предпочтение ответам дообученной модели, указав на их большую детализированность и точность формулировок. Согласованность



Рис. 3. Пример работы RAG-механизма в интерфейсе AI-агента

Fig. 3. Example of RAG mechanism operation in the AI agent interface

экспертов (каппа Коэна) составила 0,68, что подтверждает воспроизводимость оценки. Результаты дообучения модели на 400 диалогах с положительными оценками пользователей (то есть диалоги, которые пользователи отметили как релевантные) показали улучшение стиля ответов. Языковая модель стала давать более развернутые рекомендации, чаще ссылаться на источники и избегать общих фраз (рис. 6). Например, на вопрос о борьбе с паршой яблони обученная модель предложила конкретные препараты и схему обработки, тогда как исходная модель давала лишь общую рекомендацию. Однако точность RAG зависит от качества загруженных документов. При наличии противоречивой информации в базе знаний модель может давать неоднозначные ответы.

Выполнена комплексная оценка других компонентов системы. Качество извлечения текста из документов различных форматов проверялось на тестовой выборке из 30 файлов включая PDF-документы, файлы Word, Excel-таблицы и HTML-страницы. Точность извлечения текста из PDF-файлов составила 98%, для форматов DOCX и XLSX – 100%, для HTML – 95% (ошибки возникали ввиду сложных вложенных таблиц). Среднее время обработки файла объемом 10 МБ не превышало 1,2 с.

Протестирована возможность загрузки внешних логов, файлов с результатами мониторинга, отчетами в форматах .txt, .pdf, .docx, .xlsx. На тестовой выборке из 10 файлов, содержащих данные фитосанитарных обследований, система успешно извлекала текст, находила релевантные фрагменты с помощью RAG

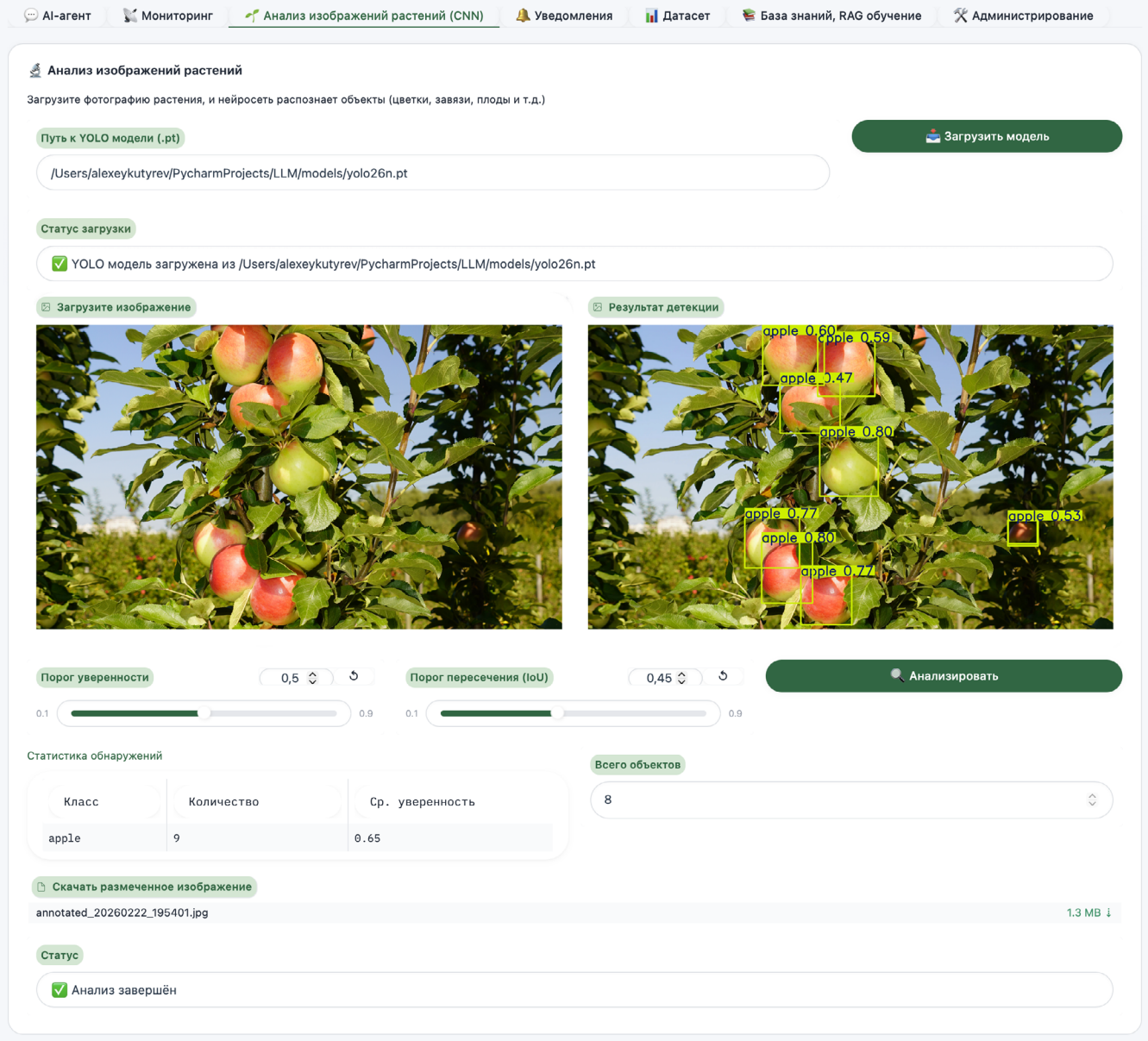


Рис. 4. Распознавание объектов с помощью модели YOLO26n в интерфейсе AI-агента

Fig. 4. Object detection using the YOLO26 model in the AI agent interface

и формировала экспертные заключения со ссылками на исходные данные. Во всех случаях ответы содержали отсылки к конкретным разделам загруженных файлов, что подтверждает эффективность интеграции внешних данных в диалог с AI-агентом.

Функциональность AI-агента, работающего в режиме интерактивного диалога, оценивалась в ходе 20 диалогов, проведенных по типовым сценариям: диагностика болезней яблони, определение оптимальных сроков проведения технологических операций. В 85% случаев AI-агент успешно собирал всю необходимую информацию (культура, фаза развития, наблюдаемые симптомы) и формировал корректную рекомендацию. В остальных 15% случаев требовалось дополнительное уточнение ввиду неоднозначности ответов пользователя, что указывает на необходимость дальнейшего совершенствования сценариев диалога.

Разработанная система не только реализует заявленные функции, но и обладает достаточной производительностью, надежностью и удобством использования для практического применения при решении задач поддержки принятия решений в промышленном садоводстве. Сводные результаты экспериментальной оценки компонентов системы представлены в таблице.

Разработанный AI-агент представляет собой не просто инструмент для обработки запросов, а принципиально новый интерфейс взаимодействия человека с данными о состоянии садовых насаждений и факторах, влияющих на их продуктивность. В отличие от традиционных информационных

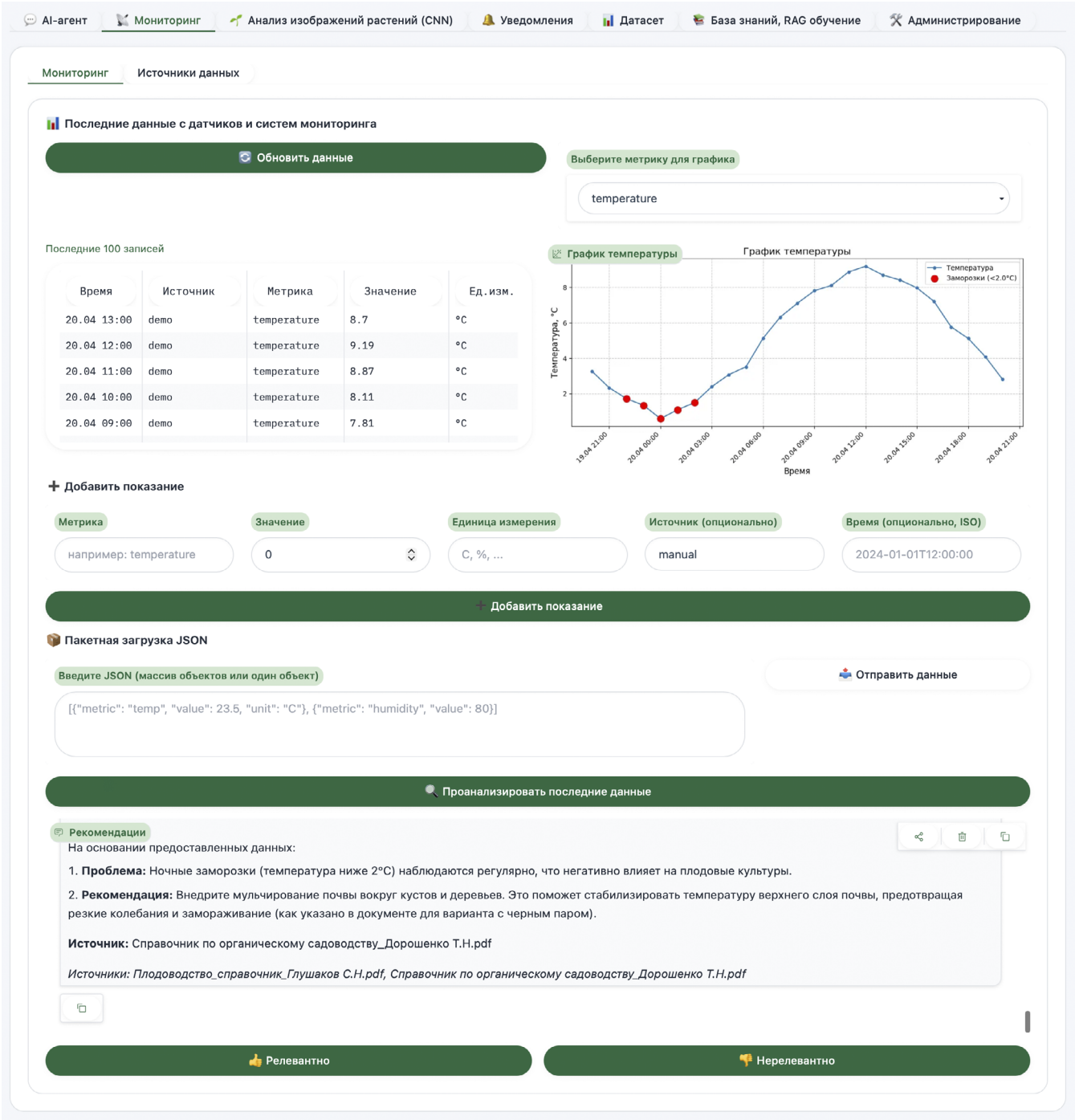


Рис. 5. Результаты мониторинга заморозков в интерфейсе AI-агента

Fig. 5. Results of frost monitoring in the AI agent interface

систем, где пользователь вынужден оперировать дашбордами, таблицами и сложными фильтрами, разработанный AI-агент позволяет перейти к диалоговой аналитике. Пользователь формулирует запрос на естественном языке, а система самостоятельно определяет контекст, использует необходимые данные из базы знаний, результаты мониторинга и компьютерного зрения, генерирует содержательный ответ и при необходимости запрашивает уточнения, продолжая итеративно уточнять решение.

Несмотря на высокие показатели эффективности, разработанный AI-агент имеет ряд следующих ограничений, которые необходимо учитывать при его практическом применении:

1. Как и любая генеративная модель, DeepSeek-R1 может генерировать фактически неверные утверждения (риски галлюцинаций LLM), особенно если запрос выходит за пределы компетенций, описанных в системном промпте, или если в базе знаний отсутствуют релевантные фрагменты. Механизм RAG снижает этот риск, но не исключает его полностью.

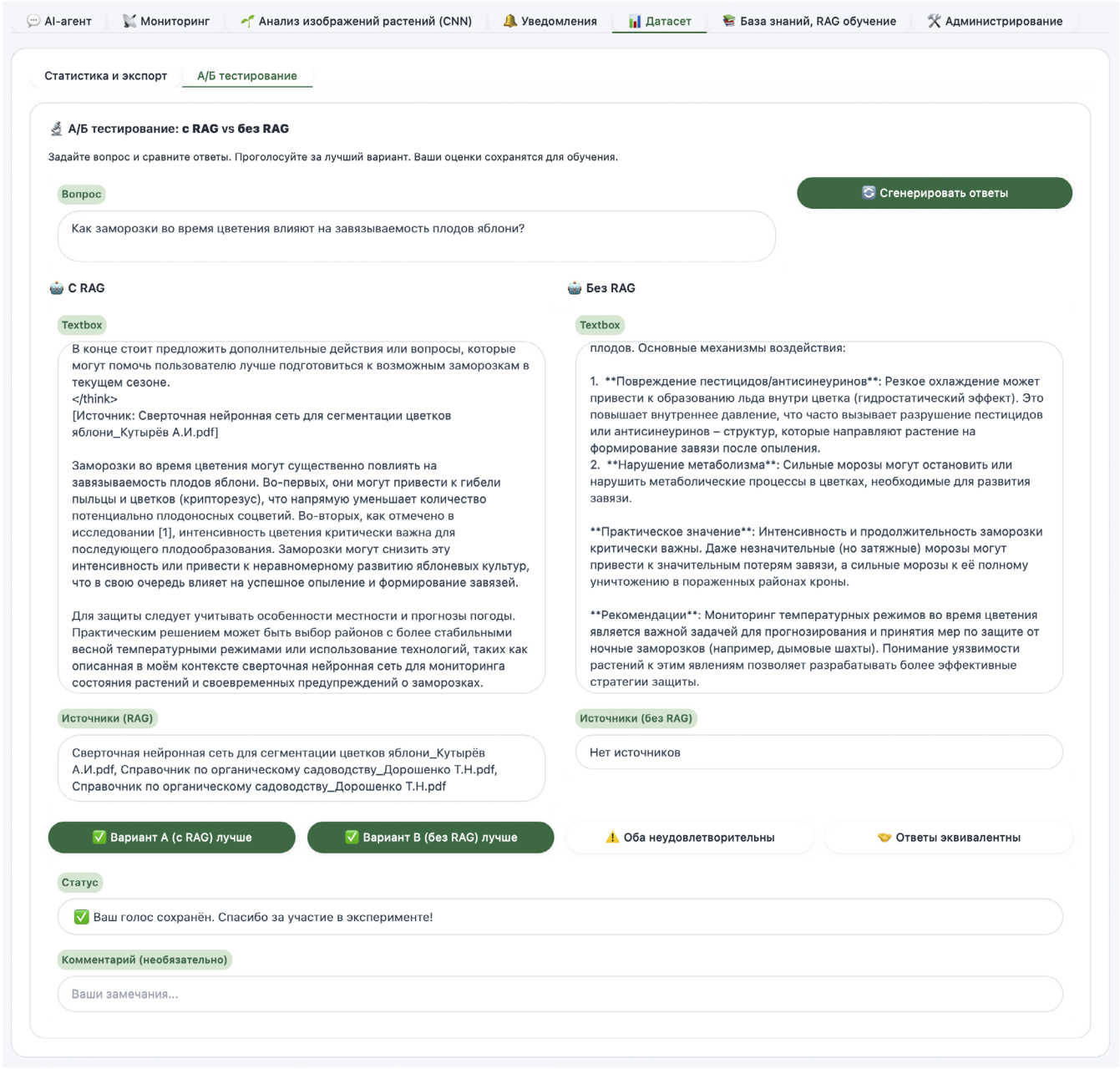


Рис. 6. Результаты А/Б-тестирования в интерфейсе AI-агента

Fig. 6. Results of A/B testing in the AI agent interface

В связи с этим все рекомендации, сгенерированные системой, должны рассматриваться как вспомогательные и требующие верификации агрономом.

2. Эффективность RAG напрямую зависит от полноты, актуальности и непротиворечивости загруженных документов. Наличие устаревших или взаимоисключающих данных в векторной базе может привести к формированию неоднозначных или ошибочных рекомендаций. Система требует регулярного администрирования базы знаний.

3. Работоспособность модуля уведомлений зависит от стабильного доступа в Интернет для отправки сообщений в Telegram и получения данных от внешних API. Для локального запуска LLM с приемлемой скоростью (менее 5 с на ответ) требуется наличие дискретного GPU с объемом видеопамяти не менее 8 ГБ, что может быть экономически ограничивающим фактором для небольших хозяйств.

4. Модуль YOLO показывает снижение точности при окклюзии (перекрытии) объектов листвой в условиях недостаточной освещенности или при нехарактерных ракурсах съемки. Это накладывает ограничения на условия проведения фотофиксации для диагностики.

В дальнейших исследованиях для повышения точности распознавания планируются дообучение модели YOLO на расширенной выборке, интеграция с моделями прогнозирования временных рядов (LSTM)

Таблица

Результаты экспериментальной оценки компонентов системы

Table

Results of experimental evaluation of system components

Компонент	Показатель	Значение
RAG-генерация	Доля предпочтительных ответов (экспертная оценка)	84% (95% ДИ: [78,2%; 89,8%])
	Увеличение времени ответа	+0,8 с
	Согласованность А/Б-тестов (Каппа Коэна)	0,72
YOLO-детекция	Precision (точность)	0,82
	Recall (полнота)	0,76
	mAP@0,5 (средняя точность)	0,78
	Время инференса на центральном процессоре (CPU)	~0,4 с
	Время инференса на графическом процессоре (GPU)	~0,05 с
Мониторинг	Срабатывание правил (заморозки)	4 раза за 1 час
	Задержка Telegram-уведомлений	~2 с
Извлечение текста	Точность (PDF/DOCX/XLSX/HTML)	98% / 100% / 100% / 95%
	Время обработки файла 10 МБ	≤ 1,2 с
Многошаговый агент	Успешных диалогов	85%
Дообучение модели (QLoRA)	Доля предпочтений дообученной модели (экспертная оценка); требуемый объем видеопамяти	76%; ≤ 5 ГБ

для оценки урожайности, разработка мобильного приложения и расширение базы знаний за счет открытых источников данных и публикаций.

Разработанный AI-агент закладывает основу для единой интеллектуальной системы управления садовыми насаждениями, объединяющей процессы сбора, анализа данных, принятия решений и их практической реализации.

Выводы

1. Разработанный программный комплекс «AI-агент поддержки принятия решений» для промышленного садоводства объединяет модули языковой модели (LLM) с механизмом RAG, компьютерного зрения (YOLO), мониторинга данных с датчиков (MQTT, HTTP), А/Б-тестирования и дообучения. Система, построенная на открытых библиотеках Python, предоставляет веб-интерфейс (Gradio) и REST API, что обеспечивает ее модульность, масштабируемость и адаптируемость под задачи промышленного садоводства.

2. Применение механизма генерации с дополненным поиском (RAG) статистически значимо повышает релевантность ответов LLM. В 84% случаев эксперты отдали предпочтение ответам, дополненным информацией из базы знаний (Z-тест: $|Z| = 3{,}21 > 1{,}96$. 95% ДИ: [78,2%; 89,8%], $p < 0{,}001$). Согласованность экспертов по каппе Коэна составила 0,72. Время генерации ответа при использовании RAG увеличивается в среднем на 0,8 с, что не нарушает интерактивности диалога.

3. Экспериментально подтверждена эффективность модуля компьютерного зрения на основе сверточной нейронной сети YOLO26n для детекции объектов яблоневого сада. Точность (метрика Precision) составила 0,82, полнота (метрика Recall) – 0,76, средняя точность (метрика mAP@0,5) – 0,78. Время инференса на GPU NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti составляет 0,05 с на кадр, что позволяет использовать систему в режиме реального времени. Интеграция результатов детекции в языковую модель обеспечивает возможность мультимодального диалога о состоянии растений.

4. Разработанный модуль мониторинга обеспечивает прием данных от различных источников (через MQTT, HTTP, ручной ввод) с пропускной способностью до 500 записей/с, автоматическую проверку правил уведомлений и отправку оповещений со средней задержкой 2 с. Точность извлечения текста из загружаемых документов (PDF, DOCX, XLSX, HTML) объемом 10 МБ в течение 1,2 с составляет не менее 95%.

5. Возможность эффективного дообучения языковой модели методом QLoRA на диалогах из логов системы позволяет адаптировать AI-агента под условия конкретного хозяйства. В ходе тестирования в 76% случаев эксперты отдали предпочтение ответам дообученной модели в сравнении с базовой. В 85% тестовых режимов интерактивного диалога агент успешно собирал необходимую информацию и формировал корректные рекомендации.

6. Разработанный AI-агент может быть использован как исследовательский инструмент для проведения научных экспериментов и как основа для создания коммерческих решений в области точного садоводства: автоматизированных рабочих мест агронома, платформ мониторинга растений, сервисов дистанционной диагностики болезней, систем раннего оповещения о неблагоприятных событиях (заморозки, засуха, вредители) и модулей прогнозирования урожайности.

Список источников/ References

1. Soussi A., Zero E., Sacile R. et al. Smart sensors and smart data for precision agriculture: A review. *Sensors.* 2024;24(8):2647. https://doi.org/10.3390/s24082647 PMC11053448

2. Miller T., Mikiciuk G., Durlik I. et al. The IoT and AI in agriculture: The time is now-a systematic review of smart sensing technologies. *Sensors.* 2025;25(12):3583. https://doi.org/10.3390/s25123583 PMC12196926

3. Kalaany C.M.A., Kimaita H.N., Abdelmoneim A.A. et al. The potential of low-cost IoT-enabled agrometeorological stations: A systematic review. *Sensors.* 2025;25(19):6020. https://doi.org/10.3390/s25196020 PMC12526549

4. Awais M., Wang X., Hussain S. et al. Advancing precision agriculture through digital twins and smart farming technologies: A review. *AgriEngineering.* 2025;7(5):137. https://doi.org/10.3390/agriengineering7050137

5. Хорт Д.О., Кутырев А.И., Смирнов И.Г., Воронков И.В. Разработка системы автоматизированного управления агротехнологиями в садоводстве // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. № 15 (2). С. 61-68. https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-2-61-68

Khort D.O., Kutyrev A.I., Smirnov I.G., Voronkov I.V. Development of an automated management system for agricultural technologies in horticulture. *Agricultural Machinery and Technologies.* 2021;15(2):61-68. (In Russ.) https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-2-61-68

6. Gherțescu C., Manta A.G., Bădîrcea R.M. Smart agriculture and technological innovation: A bibliometric perspective on digital transformation and sustainability. *Agriculture.* 2025;15(13):1388. https://doi.org/10.3390/agriculture15131388

7. Krishna M.S., Machado P., Otuka R.I. et al. Plant leaf disease detection using deep learning: A multi-dataset approach. *Multidisciplinary Scientific Journal.* 2025;8(1):4. https://doi.org/10.3390/j8010004

8. Кутырёв А.И., Смирнов И.Г., Андриянов Н.А. Сравнительный анализ моделей нейронных сетей для распознавания плодов яблони на кроне дерева // Садоводство и виноградарство. 2023. № 5. С. 56-63. https://doi.org/10.31676/0235-2591-2023-5-56-63

Kutyrev A.I., Smirnov I.G., Andriyanov N.A. Neural network models of apple fruit identification in tree crowns: comparative analysis. *Horticulture and Viticulture.* 2023;(5):56-63. (In Russ.) https://doi.org/10.31676/0235-2591-2023-5-56-63

9. Lv M., Xu Y-X., Miao Y-H., Su W-H. A comprehensive review of deep Learning in computer vision for monitoring apple tree growth and fruit production. *Sensors.* 2025;25(8):2433. https://doi.org/10.3390/s25082433

10. Хорт Д.О., Кутырев А.И., Смирнов И.Г. и др. Разработка алгоритмов системы распознавания ягод земляники садовой при роботизированном сборе // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. Т. 67, № 1. С. 133-141. https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-1-133-141

Khort D.O., Kutyrev A.I., Smirnov I.G. et al. Developing algorithms for a berry recognition system used in robotized harvesting of garden strawberry. *Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex.* 2020;67(1):133-141. (In Russ.) https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-1-133-141

11. Zhou C., Ge X., Chang Y. et al. A multimodal parallel transformer framework for apple disease detection and severity classification with lightweight optimization. *Agronomy.* 2025;15(5):1246. https://doi.org/10.3390/agronomy15051246

12. Kutyrev A., Andriyanov N., Khort D. et al. Adaptive CNN ensemble for apple detection: enabling sustainable monitoring orchard. *AgriEngineering.* 2025;7(11):369. https://doi.org/10.3390/agriengineering7110369

13. Benos L., Marinoudi V., Busato P. et al. Benchmarking large language models in evaluating workforce risk of robotization: Insights from agriculture. *AgriEngineering.* 2025;7(4):102. https://doi.org/10.3390/agriengineering7040102

14. Ravindran D.J.S., Skarga-Bandurova I., Awais M. et al. AgroLLM: Connecting farmers and agricultural practices through large language models for enhanced knowledge transfer and practical application. *AgriEngineering.* 2026;8(1):38. https://doi.org/10.3390/agriengineering8010038

15. Xiong J., Pan L., Liu Y. et al. Enhancing plant protection knowledge with large language models: A fine-tuned question-answering system using LoRA. *Applied Sciences.* 2025;15(7):3850. https://doi.org/10.3390/app15073850

16. Motamedi B., Villányi B. A reliable publish-subscribe mechanism for Internet of Things-enabled smart greenhouses. *Applied Sciences.* 2024;14(15):6407. https://doi.org/10.3390/app14156407

17. Dong H., Qiu X., Fan D. et al. LPDiag: LLM-Enhanced multimodal prototype learning framework for intelligent tomato leaf disease diagnosis. *Agriculture.* 2026;16(4):419. https://doi.org/10.3390/agriculture16040419

18. Islam M.B., Guerrieri A., Gravina R. et al. From traditional machine learning to fine-tuning large language models: A review for sensors-based soil moisture forecasting. *Sensors.* 2025;25(22):6903. https://doi.org/10.3390/s25226903

Информация об авторе

Кутырёв Алексей Игоревич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5; alexeykutyrev@gmail.com; SPIN-код: 9793-5074; https://orcid.org/0000-0001-7643-775X

Author Information

Aleksei I. Kutyrev, CSc (Eng), Lead Research Engineer; Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation; alexeykutyrev@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-7643-775X; ResearcherID: I-3699-2018; Scopus Author ID: 57206770758

Статья поступила 02.03.2026, после рецензирования и доработки 23.06.2026; принята к публикации 26.06.2026

Received 02.03.2026; Revised 23.06.2026; Accepted 26.06.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.319
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-28-37

Выбор и обоснование параметров рабочих органов почвообрабатывающего модуля комбинированного фумигатора для возделывания картофеля

А.Б. Калинин[1]✉***, И.З. Теплинский***[2]***, И.С. Немцев***[3]
[1, 2, 3] Санкт-Петербургский государственный аграрный университет; г. Санкт-Петербург, Россия
[1] andrkalinin@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-6301-5758
[2] teplinskij.igor.zinovevich@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-4464-066X
[3] ivannemcev180997@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-1786-2489

Аннотация. Фумигация почвы при возделывании картофеля позволяет защитить клубни от почвенных вредителей. Комбинированный фумигатор за один проход должен подготовить почву и внести гранулированный препарат, при этом создать условия для длительного нахождения паров фумиганта внутри обработанного слоя. Исследования проведены с целью выбора рациональных параметров рабочих органов почвообрабатывающего модуля комбинированного фумигатора, включающего в себя устройство дозирования препарата, рыхлительные лапы и активный прикатывающий каток. Фумигатор должен обеспечить сплошное крошение обрабатываемого слоя почвы на глубину до 30 см с образованием пористой структуры с твердостью не более 1 МПа и максимальную экспозицию летучих газов внутри почвы. Разработаны аналитические модели определения рациональных параметров настройки глубины хода рыхлительных лап и режима работы активного катка. Рациональный режим активного катка, обеспечивающий наибольшее уплотнение верхнего слоя почвы (0…2 см), определяли измерением крутящего момента на его валу при повышении степени буксования от 0 до 20%. Установлено, что комбинированный почвообрабатывающий агрегат при глубине обработки 35 см и скорости движения 8 км/ч обеспечил сплошное крошение почвы в корнеобитаемом слое и создал в зоне размещения гранул фумиганта пористую структуру с твердостью не более 1 МПа. Практическая проверка методики поиска рационального режима профильного активного катка по параметру крутящего момента показала, что при степени буксования катка 15% и крутящем моменте 15,6 Н/м экспозиция летучих газов внутри почвы достигла 26 мин, что на 73% больше по сравнению с нулевым значением буксования. Гипотеза об увеличении экспозиции паров фумиганта внутри корнеобитаемого слоя почвы с упрочненным поверхностным слоем подтверждена. Создание благоприятных условий для распространения паров фумиганта в зоне размещения корневой системы картофеля позволит защитить ее от различных почвенных вредителей и нематод.

Ключевые слова: картофель; фумигант; фумигатор; фумигация почвы; крошение почвы; рыхлительные лапы; активный прикатывающий каток; рациональный режим активного катка

Для цитирования: Калинин А.Б., Теплинский И.З., Немцев И.С. Выбор и обоснование параметров рабочих органов почвообрабатывающего модуля комбинированного фумигатора для возделывания картофеля // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 28-37. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-28-37

ORIGINAL ARTICLE

Design and optimization of working elements for the tillage module of a combined fumigator in potato production

A.B. Kalinin[1]✉***, I.Z. Teplinsky***[2]***, I.S. Nemtsev***[3]
[1, 2, 3] Saint Petersburg State Agrarian University; Saint Petersburg, Russia
[1] andrkalinin@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-6301-5758
[2] teplinskij.igor.zinovevich@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-4464-066X
[3] ivannemcev180997@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-1786-2489

Abstract. Soil fumigation in potato cultivation is an effective method for protecting tubers from soil-borne pests. A combined fumigator must perform multiple operations in a single pass – specifically, preparing the seedbed and applying granular agrochemicals – while simultaneously providing conditions for the prolonged retention of fumigant vapors within the treated soil layer. The study aimed to select and optimize rational parameters for the working

© Калинин А.Б., Теплинский И.З., Немцев И.С., 2026

elements of the tillage module of a combined fumigator, which incorporates a metering unit, loosening tines, and an active packer roller. The machine must ensure continuous crumbling of the treated soil layer to a depth of up to 30 cm, establish a porous soil structure with a penetration hardness of no more than 1 MPa, and maximize the retention time of volatile gases within the soil profile. The authors developed analytical models to determine optimal parameter settings for the working depth of the loosening tines and the operating mode of the active roller. The optimal operating mode of the active roller, which ensures maximum compaction of the topsoil layer (0-2 cm), was determined by measuring shaft torque as the slip ratio increased from 0% to 20%. Experimental results demonstrated that the combined tillage implement, operating at a tillage depth of 35 cm and a forward speed of 8 km/h, successfully provided continuous soil crumbling in the root zone and created a porous structure with a hardness of no more than 1 MPa in the fumigant placement zone. Practical validation of the methodology for determining the optimal operating mode of the profile active roller based on torque measurements revealed that at a roller slip ratio of 15% and a torque of 15.6 N · m, the retention time of volatile gases in the soil reached 26 minutes, representing a 73% increase compared to zero-slip conditions. The findings confirm the hypothesis that compacting the topsoil layer significantly extends fumigant vapor retention within the potato root zone. Establishing favorable conditions for fumigant vapor distribution in the root zone will enhance crop protection against various soil pests and nematodes.

Keywords: potato; fumigant; fumigation soil fumigation; soil crumbling; loosening tines; active packer roller; rational operation mode of the active roller

For citation: Kalinin A.B., Teplinsky I.Z., Nemtsev I.S. Design and optimization of working elements for the tillage module of a combined fumigator in potato production. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):28-37. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-28-37

Введение

Для производства картофеля предпочтительным является использование легких и средних по физико-механическим свойствам почв, однако в связи с незначительной площадью таких земель применяют укороченный севооборот. Высокая концентрация культуры на ограниченной площади приводит к ухудшению фитосанитарного состояния агроландшафтов, возникновению специфичных болезней и очагов опасных почвенных вредителей (нематод, проволочника, подкапывающих совок), паразитирующих на корнях и клубнях картофеля, что приводит к существенным потерям ввиду недобора урожая и потерям при хранении.

Одним из эффективных приемов борьбы с почвенными вредителями является обработка почвы специальными химическими препаратами фумигантного действия посредством их внесения в почву с помощью фумигаторов[1] [1]. Комбинированный фумигатор подготавливает почву, вносит гранулированные препараты фумигантного действия и создает условия для длительного нахождения паров внутри обработанного слоя. Поэтому основными требованиями к функционированию комбинированного агрегата являются точное поддержание заданной нормы внесения гранул фумиганта [2], создание рыхлой структуры почвы, позволяющей парам препарата распространяться по порам и трещинам обрабатываемого слоя почвы, а также реализация приема, способствующего увеличению экспозиции препарата.

Можно предположить, что подбор рациональной глубины хода рыхлительных лап, обеспечивающих сплошное крошение почвы на заданной глубине внесения фумиганта, и оптимальной степени буксования катка, упрочняющего поверхностный слой почвы, позволят обеспечить наиболее полное распространение паров внутри корнеобитаемого слоя и увеличить время присутствия газа в почвенном массиве, что существенно повышает эффективность фумигации.

Цель исследований: совершенствование технологического процесса функционирования комбинированного фумигатора за счет выбора рациональных параметров рабочих органов почвообрабатывающего модуля и обоснование режимов их работы.

Материалы и методы

Комбинированный фумигатор разработан в ФГБОУ ВО СПбГАУ с целью совмещения процессов подготовки почвы под посадку картофеля и выполнения фитосанитарных работ с применением препаратов фумигантного действия (рис. 1).

Почвообрабатывающий модуль агрегата состоит из рамы *1*, на которой в два ряда установлены глубокорыхлительные лапы на пружинных стойках *2* [3]. Глубокорыхлительные лапы первого ряда рыхлят почву в основании гребней, а питатели *7* фитосанитарного модуля, закрепленные на их стойках, выполняют ленточное равномерное внесение гранул фумиганта на требуемую глубину. На стойках лап *2* второго ряда закреплены окучивающие корпуса *3*.

[1] Велецкий И.Н., Лысов А.К. и др. Механизация защиты растений. М.: Агропромиздат, 1992. 222 с.

Устройство дозирования препарата фитосанитарного модуля включает в себя бункер *12*, высевающий аппарат 8 катушечного типа с приводом от электромотора *9* с настраиваемой частотой вращения посредством электронного блока *11*, датчик частоты вращения *10* и весоизмерительную[2] платформу *13*. Контроль рабочего процесса высевающего аппарата осуществляется блоком цифрового контроля *14*, на который поступают сигналы от датчиков частоты вращения *10*, скорости агрегата *15* и тензодатчиков весоизмерительной платформы. К раме *1* шарнирно присоединен адаптер управления экспозицией паров фумиганта в виде гладкого диаболического катка *4* с приводом от гидросистемы трактора. Частота вращения катка настраивается через электроуправляемый дроссель-регулятор *5*. Настройка и поддержание рационального режима работы адаптера *4* для управления экспозицией фумиганта в почве осуществляются с помощью блока цифрового управления *6*.

Условием высококачественной фумигации почвы является формирование в корнеобитаемой зоне значительного объема пор, в которых могут распространяться пары вносимого фумиганта. Наиболее эффективным приемом формирования пористого пространства внутри почвы является воздействие на нее рыхлительных лап, при котором в обрабатываемом слое возникают и развиваются опережающие трещины, расходящиеся перед рабочими органами в переднем и боковых направлениях[2] [4, 5]. Отсюда следует необходимость теоретического обоснования рациональных параметров настройки глубины хода рыхлительных лап, после прохода которых на глубине пахотного слоя (20…22 см) будет обеспечиваться сплошное крошение почвы. На основе закономерностей распространения зон деформации, предложенной проф. В.С. Жегаловым[3], и различий физико-механических свойств почвы в подпахотном (a_1), пахотном (a_2) и поверхностном (a_3) горизонтах получена

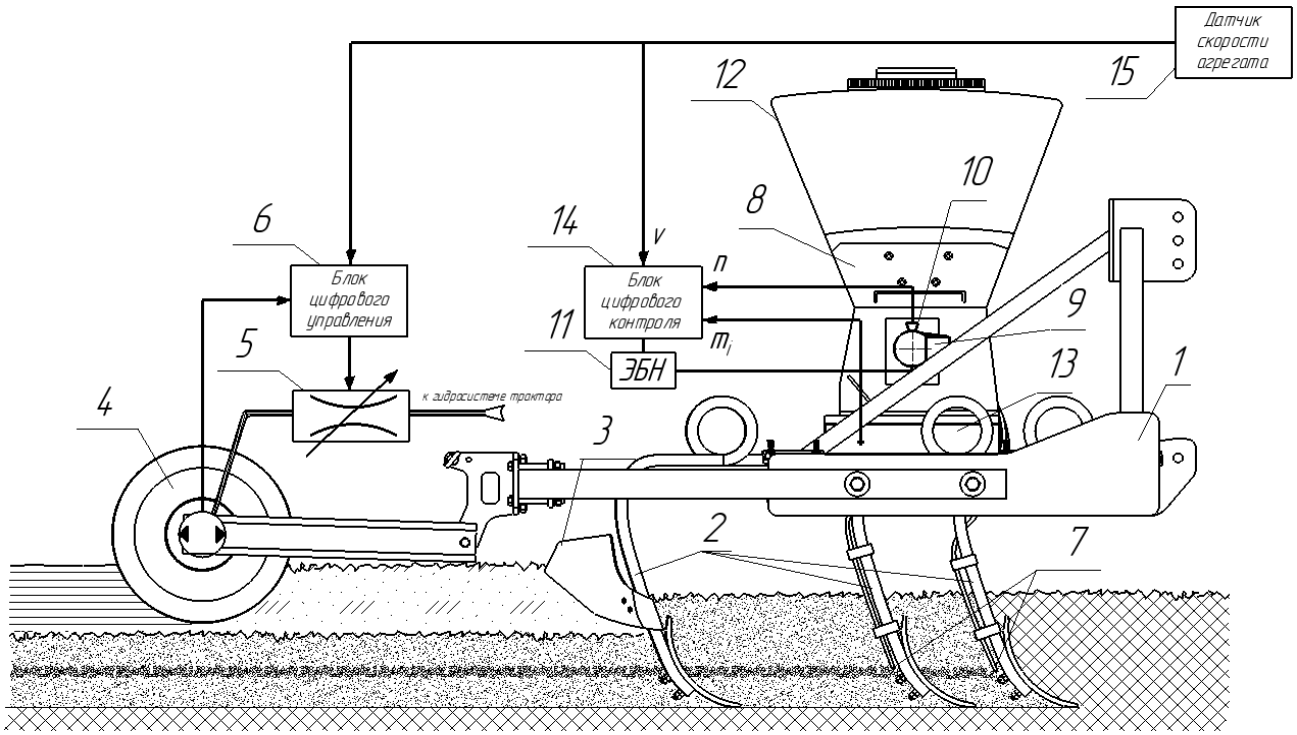


Рис. 1. Технологическая схема комбинированного фумигатора:
1 – рама; 2 – пружинные стойки; 3 – окучивающие корпуса; 4 – диаболический каток;
5 – электроуправляемый дроссель-регулятор; 6 – блок цифрового управления; 7 – питатели;
8 – высевающий аппарат; 9 – электромотор; 10 – датчик частоты вращения; 11 – электронный блок настройки;
12 – бункер; 13 – весоизмерительная платформа; 14 – блок цифрового контроля; 15 – датчик скорости агрегата

Fig. 1. Operating diagram of a combined fumigator
1 – frame; 2 – spring struts; 3 – hilling bodies; 4 – diabolic roller; 5 – electrically controlled throttle regulator;
6 – digital control unit; 7 – feeders; 8 – seeding unit; 9 – electric motor; 10 – speed sensor;
11 – electronic adjustment unit; 12 – hopper; 13 – weighing platform; 14 – digital control unit; 15 – unit speed sensor

[2] Труфанов В.В. Глубокое чизелевание почвы / Всесоюзная академия сельскохозяйственных наук имени В.И. Ленина. М.: Агропромиздат, 1989. 140 с.

[3] Кленин Н.И., Киселев С.Н., Левшин А.Г. Сельскохозяйственные машины: Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Агроинженерия». М.: Издательство КолосС, 2008. 815 с.

математическая модель. Модель позволяет выполнять настройку глубины хода глубокорыхлительных лап комбинированного агрегата $a_н$ при известных значениях коэффициентов внутреннего и внешнего трения в горизонтах и текущих значениях влажности почвы с целью обеспечения сплошного крошения почвы на заданной глубине внесения препарата $a_{гр}$ через питательные трубки, причем $a_{гр} = a_3 + a_0$ (рис. 2).

Аналитическое выражение для определения рациональных параметров настройки глубины хода рыхлительных лап комбинированного фумигатора представлено в виде следующего выражения

$$a_н \geq \left(b - \frac{d}{2} - \frac{(a_3 + a_2 - a_{гр}) tg\psi_2}{\sin\psi_2} \right) \cdot \frac{\sin\theta_1}{tg\theta_1} + a_2 + a_3, \quad (1)$$

где b – расстояние между рыхлительными лапами; d – ширина рыхлительной лапы; a_2 – глубина пахотного горизонта; a_3 – глубина поверхностного слоя; $a_{гр}$ – глубина заделки гранул фумиганта; ψ_2 – угол распространения деформаций в пахотном горизонте; θ_1 – углом внутреннего трения «почва-почва».

Для оценки результатов рациональной настройки рабочих органов, формирующих рыхлую почвенную структуру, предложено использовать показатель твердости почвы, определяемый твердомером. С этой целью проведены измерения твердости почвы пенетрологгером, регистрирующим усилие проникновения металлического деформатора конусной формы одновременно с глубиной его погружения [6].

Для надежного удержания паров фумиганта внутри подготовленной под посадку картофеля профилированной поверхности предложено верхний слой уплотнить активным катком, функционирующим в режиме буксования. Теоретическое обоснование рационального режима работы активного катка, обеспечивающего наибольшее уплотнение верхнего слоя почвы, выполнено с учетом одного из элементов уравнения реологической модели почвенного состояния, описывающего изменение плотности почвы в зависимости от нормальных и касательных напряжений, возникающих в элементарном почвенном объеме в результате воздействия на него прикатывающего катка [7]. Данный элемент реологической модели почвы представляет собой оценку изменения исходной плотности почвы в зависимости от напряжений, возникающих в элементарном почвенном объеме[4], и описывается выражением:

$$\rho = \rho_0 + b \cdot \ln(\sigma_{ср} + c \cdot \tau_{max}), \quad (2)$$

где ρ – плотность почвы; ρ_0 – начальное значение плотности почвы; b и c – эмпирические коэффициенты; τ_{max} – предельное касательное напряжение.

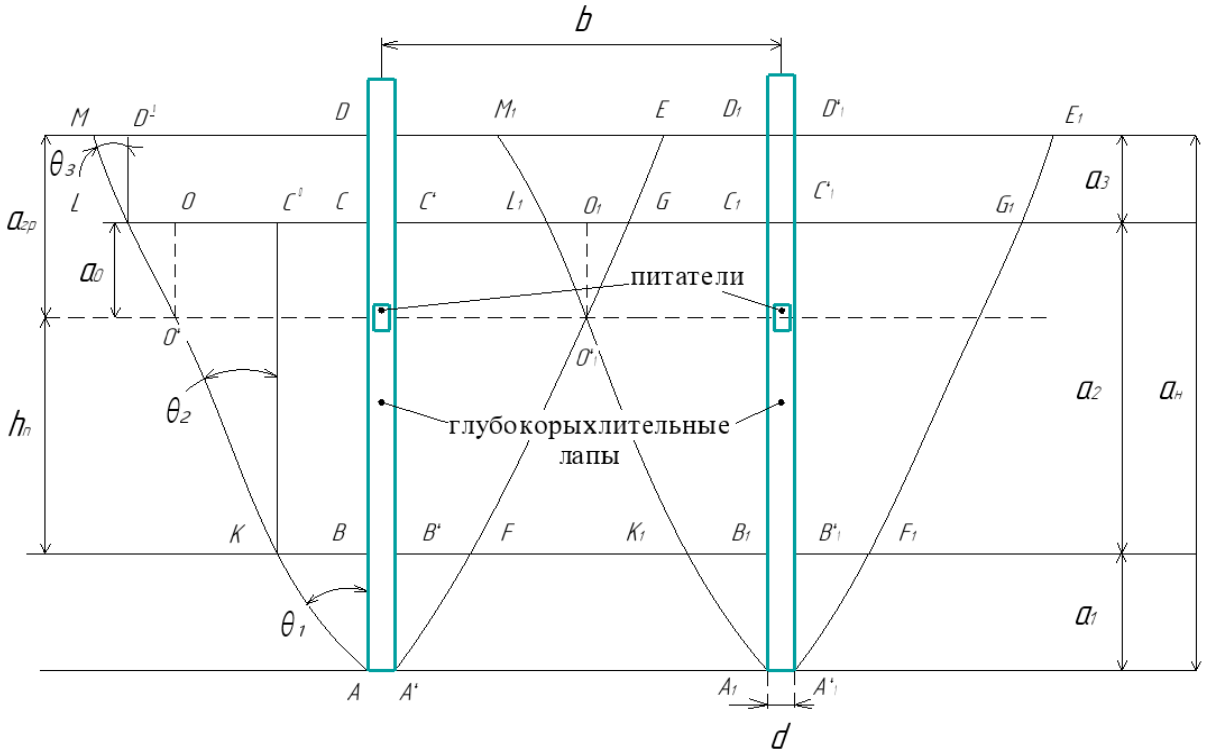


Рис. 2. Схема распространения зон деформации почвы от смежных глубокорыхлительных лап в поперечной плоскости

Fig. 2. Distribution pattern of soil deformation zones from adjacent deep-loosening tines in the transverse plane

[4] Кушнарёв А.С., Кочев В.И. Механико-технологические основы обработки почвы. Киев: Урожай, 1989. 140 с.

Анализируя выражение (2), можно заключить, что при воздействии на почву прикатывающего катка, функционирующего в режиме буксования, прирост плотности почвы происходит за счет предельных касательных напряжений, возникающих в зоне контакта катка с почвой. Это обеспечивает максимальную экспозицию паров фумиганта внутри обрабатываемого слоя. Для анализа закономерности формирования упрочненного верхнего слоя почвы активным катком рассмотрим схему, представленную на рисунке 3.

При качении активного катка по поверхности почвы с некоторой вертикальной нагрузкой Q необходимо приложить некоторый крутящий момент M к его приводному валу, чтобы обеспечить заданную степень буксования ε. В зоне контакта катка с почвой на дуге ABC вертикальная нагрузка Q и усилия на ободе катка R, возникающие при крутящем моменте M, преобразуются в распределенную нагрузку $q(\varphi)$, которая воздействует на элементарный почвенный массив на некоторой глубине z. При качении активного катка по деформируемой поверхности на дуге обода ABC, находящейся в контакте с почвой, существуют две зоны: сцепления (дуга AB), когда траектория частиц почвы, соприкасающихся с катком, совпадает с траекторией точки на поверхности катка; буксования (дуга BC), когда траектории точек на поверхности катка и прилегающих частиц почвы являются различными [8].

Согласно данным рисунка 3 нормальное напряжение в верхнем элементе почвы, возникающее от действия распределенной нагрузки в зоне сцепления AB, ограниченной сектором $(\varphi - \varphi_1)$, будет иметь вид:

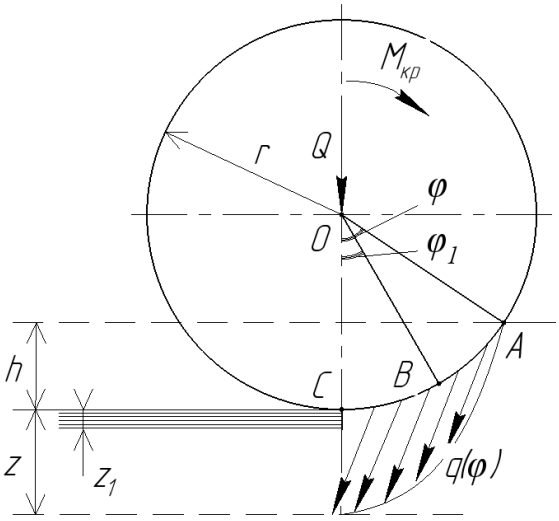


Рис. 3. Схема формирования упрочненного поверхностного слоя почвы при работе активного катка

Fig. 3. Pattern of surface soil layer consolidation during operation of an active roller

$$d\sigma = \frac{dq \cdot \cos(\varphi_1)}{dl}, \quad (3)$$

причем $dl = r \cdot d\varphi$, где r – радиус катка.

Поскольку на этом участке частицы почвы, соприкасающиеся с ободом катка, удерживаются на его поверхности за счет сил сцепления, то в поверхностном слое, соприкасающемся с катком, возникают касательные напряжения τ, которые вызывают в нем сдвиговые деформации. На этом участке обода ближе к точке B касательные напряжения τ возрастают, пока не достигнут своего предельного значения $\tau_{пр} = \tau_{max}$, определяемого по выражению:

$$\tau_{пр} = \sigma \cdot \mathrm{tg}(\Psi_{с-п}) + c_{с-п}, \quad (4)$$

где $tg(\Psi_{с-п})$ – коэффициент трения «сталь-почва»; $c_{с-п}$ – коэффициент сцепления «сталь-почва».

В точке B происходит отрыв почвенной частицы от поверхности катка и начинается их взаимное скольжение на участке BC, на котором касательные напряжения τ в поверхностном слое имеют постоянное значение, соответствующее режиму скольжения $\tau_{ск}$:

$$\tau_{ск} = \sigma \cdot \mathrm{tg}(\Psi_{с-п}). \quad (5)$$

Для нижних слоев почвы, не соприкасающихся с ободом катка, максимальные касательные напряжения в зоне сцепления и касательные напряжения в зоне буксования определяются по выражениям (4) и (5), в которые вместо коэффициентов трения $\Psi_{с-п}$ и сцепления $c_{с-п}$ «Сталь-почва» подставляются соответствующие коэффициенты $\Psi_{п-п}$ и $c_{п-п}$ «Почва-почва». Отсюда следует, что наибольшая плотность почвы $\rho_{пов}$ в поверхностном слое формируется при таком режиме работы активного катка, когда размер зоны сцепления AB имеет максимально возможную величину и существенно превышает участок BC в зоне буксования. В этом случае максимальные касательные напряжения τ_{max} на каждом участке зоны сцепления имеют значения, близкие к критическим, то есть $\tau_{max} \approx \tau_{пр}$. Отметим, что с помощью этих выражений невозможно аналитическим путем определить рациональный режим работы активного катка ввиду сложности определения коэффициентов трения и сцепления и их значительной вариабельности в реальных условиях функционирования [9]. Поэтому определение рационального режима работы активного катка комбинированного фумигатора предлагается выполнить по косвенному показателю на основе силового анализа схемы взаимодействия катка и почвы.

При работе активного катка передаваемый на его вал крутящий момент $M_{кр}$ уравновешивается

моментом, возникающим под действием равнодействующей силы R, приложенной к ободу:

$$M_{кр} = d \cdot R, \quad (6)$$

где d – расстояние от линии действия силы R до оси катка.

Равнодействующая R определяется выражением:

$$R = \sqrt{N^2 + T^2}, \quad (7)$$

где N – равнодействующая нормальных сил; T – равнодействующая касательных сил, действующих на каток со стороны почвы.

Равнодействующая касательных сил T является суммой касательных сил, возникающих в зоне буксования $T_б$ и в зоне сцепления $T_{сц}$, которые определяются как $T_б = N_б \cdot \text{tg}(\Psi_{с-п})$ и $T_{сц} = N_{сц} \cdot \text{tg}(\Psi_{с-п} + c_{с-п})$ соответственно. В этом случае максимальное значение крутящего момента $M_{кр.max}$ будет соответствовать режиму качения катка, при котором значение равнодействующей касательных сил в зоне сцепления $T_{сц}$ имеет максимально возможное значение. При увеличении частоты вращения катка при постоянной скорости движения агрегата, а следовательно, и увеличении степени его буксования, значения крутящего момента на его валу будут снижаться по причине уменьшения размера зоны действия коэффициентов сцепления «Сталь-почва» и «Почва-почва».

Определение рационального режима работы активного катка возможно путем оперативного вычисления производной $M'_{кр}(\varepsilon)$ процесса крутящего момента $M_{кр}$ по мере увеличения степени буксования ε путем увеличения его частоты вращения при постоянной скорости МТА [10]. Степень буксования ε активного катка, при которой производная $M'_{кр}(\varepsilon) = 0$ (при изменении значения с положительного на отрицательный) соответствует рациональному режиму его работы, обеспечивающему формирование наиболее плотной поверхности почвы $\rho_{пов}$, препятствующей улетучиванию фумиганта в атмосферу. В этом случае время экспозиции фумиганта в почве приминает максимальное значение T_{max}, то есть

$$M_{кр.max} \sim \rho_{пов.max} \sim T_{max}. \quad (9)$$

Для проверки теоретических исследований метода определения рационального режима работы адаптера управления экспозицией фитосанитарного модуля агрегата с помощью газоанализатора определяли время удерживания метана внутри слоя почвы после прохода комбинированного агрегата [11]. Схема проведения эксперимента с упрочненным поверхностным слоем почвы представлена на рисунке 4.

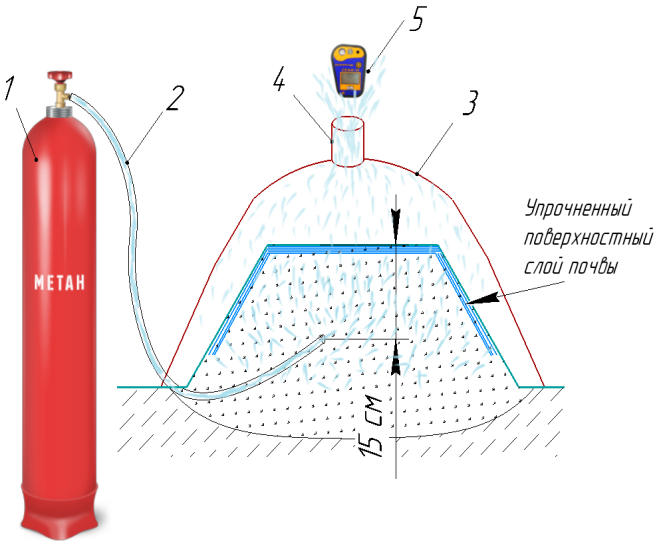


Рис. 4. Схема оценки экспозиции газа внутри почвы после прохода комбинированного фумигатора:
1 – баллон с газом; *2* – трубка*;*
3 – газонепроницаемый кожух; 4 – горловина;
5 – газоанализатор

Fig. 4. Measurement pattern of the gas leaking through the soil after the passage of a combined fumigator
1 – gas cylinder; 2 – tube; 3 – gas-tight casing;
4 – neck; 5 – gas analyzer

После прохода фумигатора в почвенный массив на глубину 15 см вводили трубку *2*, по которой из баллона *1* внутрипочвенно подавали метан. Часть гребня над трубкой была плотно закрыта газонепроницаемым кожухом *3*. Внутренняя поверхность кожуха выполнена обтекаемой, чтобы поднимающийся газ беспрепятственно перемещался в его верхнюю часть, где в сквозном отверстии горловины кожуха *4* размещен газоанализатор *5*. С подачей газа синхронно проводили измерения газоанализатором. Через 10 с подачу прекращали. Газоанализатор записывал значения концентрации до момента, пока ее значение не приблизится к нулю.

Результаты и их обсуждение

Для разрушения переуплотненного почвенного горизонта и минимизации затрат энергии на обработку почвы использовали алгоритм поиска переуплотненного горизонта путем вычисления производной процесса изменения твердости почвы R по мере увеличения глубины h [12, 13]. После определения положения переуплотненного слоя была установлена глубина обработки – 35 см. Рабочая скорость движения агрегата при такой глубине обработки составляла 8 км/ч. После измерения ординат случайного процесса глубины обработки почвы $a(l)$ получили оценки его статистических характеристик (табл. 1).

Таблица 1

Оценки статистических характеристик глубины обработки почвы рыхлительными лапами комбинированного фумигатора

Table 1

Estimates of statistical characteristics of the depth of soil cultivation by loosening tines of a combined fumigator

Случайный процесс	Статистическая характеристика	Числовая оценка статистической характеристики	Доверительный интервал
Глубина рыхления, $a(l)$	m_a, см	35,7	33,4…38,1
	$б_a$, см	2,93	2,35…4,52
	V_a, %	8,2	7,04…8,97

Анализируя данные таблицы 1, можно заключить, что настроечное значение глубины обработки почвы ($a_н$) позволяет минимизировать влияние факторов профиля поверхности поля и твердости почвы на равномерность хода орудия. Коэффициент вариации V_a, не превышающий 9%, характеризует стабильность протекания процесса глубины обработки почвы при работе комбинированного фумигатора. Доверительные интервалы оценок статистических характеристик процесса глубины обработки почвы $a(l)$ рассчитывали с 95%-ной вероятностью.

Оценку процесса твердости почвы $R_p(l)$ после ее рыхления культиватором-глубокорыхлителем выполняли в соответствии с принятой методикой экспериментальных исследований, где твердость определяли пенетрологгером, оснащенным деформатором конусного типа [14]. Угол конуса 60° соответствует воздействию на почву развивающейся корневой системы растений. По результатам выполненных измерений получили оценки статистических характеристик процесса изменения твердости почвы $R_p(l)_i$ для каждого 5-сантиметрового слоя опытного участка поля после применения орудия, настроенного на глубину $a_н$ = 35 см (табл. 2).

Анализируя данные, представленные в таблице 2, можно сказать, что комбинированный почвообрабатывающий агрегат для обеззараживания почвы полностью устранил уплотнение почвы в корнеобитаемом слое глубиной до 35 см. Математическое ожидание твердости почвы в слое до 30 см не превышает значения 1 МПа, что свидетельствует о формировании в обработанном слое рыхлой структуры с большим количеством пор и капилляров. Применив формулу М.Н. Шарова[5] для определения состояния почвы по показателям твердости почвы, измеренной конусным деформатором, установили, что она становится рыхлой и легкообрабатываемой после прохода культиватора.

Рациональный режим активного катка определяли измерением крутящего момент на его валу $M_{кр}$ при постепенном повышении степени буксования δ от 0 до 20% путем изменения частоты вращения катка при поддержании постоянной скорости движения (табл. 3).

Из данных таблицы 3 следует, что при степени буксования активного катка δ = 15% имеем максимальную плотность почвы влажностью 23% и наблюдаем максимальное значение крутящего момента на валу активного катка. На основании данных таблицы 3 построены графики изменения плотности почвы ρ и крутящего момента на валу активного катка в зависимости от степени буксования δ (рис. 5).

Отметим, что крутящий момент на валу катка и плотность почвы в поверхностном слое почвы растут с увеличением степени буксования от 5 до 15%. При дальнейшем увеличении до 20% отмечается некоторое снижение плотности верхнего слоя почвы, что объясняется уменьшением зоны сцепления на его ободе.

Таблица 2

Оценки статистических характеристик процесса изменения твердости почвы $R_p(l)_i$ после прохода комбинированного почвообрабатывающего агрегата для обеззараживания почвы

Table 2

Estimates of statistical characteristics of the processes of change in cone index $R_p(l)i$ after passing a combined soil-cultivating unit for soil disinfection

Статистические характеристики	Глубина слоя, см													
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
m_{Rp}, МПа	0,6	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	2,6	3,7	4,8	4,0	3,1	2,3	2,5	3,3
$σ_{Rp}$, МПа	0,17	0,24	0,18	0,19	0,16	0,22	0,73	0,89	1,01	0,76	0,71	0,55	0,5	0,73
V_{Rp}, %	28	30	25	27	23	31	28	24	21	19	23	24	20	22

[5] Шаров Н.М. Эксплуатационные свойства машинно-тракторных агрегатов. М.: Колос, 1981. 240 с.

Таблица 3

Оценки статистических характеристик крутящего момента $M_{кр}$ и плотности почвы $\rho_{пов}(l)$ в слое 0…2 см в зависимости от степени буксования активного катка δ

Table 3

Estimates of the statistical characteristics of the torque $M_{кр}$ and soil density ρ(l) in the 0-2 cm layer depending on the degree of slippage of the active roller δ

Степень буксования катка δ, %	Крутящий момент на валу активного катка $m_{M_{кр}}$, Н/м	Оценки статистических характеристик процесса плотности почвы $\rho_{пов}$ (*l*) в слое 0…2 см		
		m_ρ, г/см³	σ_ρ, г/см³	V_ρ, %
0	8,2	1,12	0,07	6,3
5	10,4	1,08	0,06	5,6
10	13,3	1,15	0,07	6,1
15	15,21	1,26	0,07	5,6
20	14,36	1,20	0,14	6,7

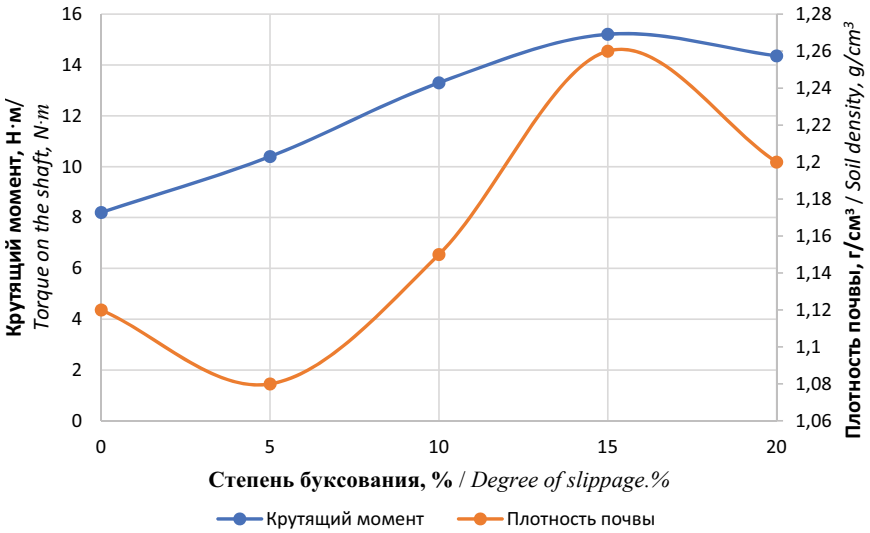


Рис. 5. Изменение средних значений плотности почвы m_ρ в слое 0…2 см и крутящего момента на валу активного катка $m_{M_{кр}}$ в зависимости от степени буксования δ

Fig. 5. Change in average values of soil density m_ρ in the 0-2 cm layer and torque on the shaft of the active roller $m_{M_{кр}}$ depending on the degree of slippage δ

С целью подтверждения гипотезы об увеличении экспозиции паров фумиганта внутри корнеобитаемого слоя почвы с упрочненным поверхностным слоем провели измерение времени присутствия легкого газа в почвенном массиве в зависимости от уровня упрочнения поверхностного слоя почвы, соответствующего различным настроечным значениям степени буксования катка δ. Время экспозиции метана $T_{эксп}$ определяли до момента, когда концентрация метана на выходе из отверстия кожуха снижалась до нуля. Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 4.

Проведенные исследования показали, что максимальная экспозиция паров газов (26 мин) внутри обрабатываемого слоя наблюдается при степени буксования 15% и максимальном крутящем моменте на валу катка 15,6 Н/м.

Таблица 4

Оценка времени экспозиции газов в зависимости от уровня упрочнения поверхностного слоя почвы при различных значениях степени буксования активного катка δ

Table 4

Estimate of gas exposure time as a function of the degree of soil surface layer compaction for various values of the active roller slip ratio δ

Степень буксования катка δ, %	Крутящий момент на валу активного катка $m_{M_{кр}}$, Н/м	Экспозиция паров в слое 4…10 см, мин
0	8,9	15
5	10,2	19
10	13,5	22
15	15,6	26
20	14,7	24

Выводы

1. Рациональная расстановка рыхлительных лап почвообрабатывающего модуля комбинированного фумигатора, выполненная с учетом неоднородности почвенных горизонтов по глубине обработки и изменения физико-механических свойств почвы, позволила в зоне размещения гранул фумиганта создать пористую структуру корнеобитаемого слоя, твердость которого на глубине 30 см не превышает 1 МПа. Создание благоприятных условий для распространения паров фумиганта в зоне размещения основной массы корневой системы картофеля позволяет защитить ее от различных почвенных вредителей и нематод.

2. Методика определения рационального режима работы активного катка по показателю максимального значения крутящего момента на валу привода позволила установить, что наиболее плотная поверхность гребней почвы влажностью 23% формируется при 15%-ном буксовании. При этом время экспозиции летучих газов внутри почвы составило 26 мин, что на 73% больше по сравнению с нулевым значением буксования.

Список источников

1. Bukłaha A., Wieczorek A. et al. New trends in application of the fumigation method in medical and non-medical fields. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*: *AAEM*. 2021;29(2):185-189. https://doi.org/110.26444/aaem/144136

2. Калинин А.Б., Теплинский И.З., Смелик В.А. и др. Совершенствование методов мониторинга качества работы дозирующих систем машин химизации // Аграрный научный журнал. 2022. № 6. С. 94-98. https://doi.org/10.28983/asj.y2022i6pp94-98

3. Калинин А.Б., Теплинский И.З., Шпиганович П.М. Методы и средства управления режимами влагообеспечения в технологии возделывания оригинальных семян картофеля в условиях глобального изменения климата // Аграрный научный журнал. 2023. № 4. С. 112-118. https://doi.org/10.28983/asj.y2023i4pp112-118

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

5. Рахимов Р.С., Рахимов З.С., Рахимов И.Р., Рахимжанов А.Р. Обоснование конструктивной схемы и тягового сопротивления чизельных орудий с одновременным внесением минеральных удобрений // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2021. № 1. С. 111-119. https://doi.org/10.31563/1684-7628-2021-57-1-111-119

6. Киреев И.М., Коваль З.М. Измерительное средство для определения сопротивления почвы при погружении в нее плунжеров с наконечниками // АгроФорум. 2019. № 6. С. 54-57. EDN: EWHTBA

7. Ружьев В.А., Калинин А.Б., Теплинский И.З. и др. Совершенствование рабочих органов машин и орудий для обработки почвы на основе реологической модели почвенного состояния // Аграрный научный журнал. 2024. № 11. С. 163-174. https://doi.org/10.28983/asj.y2024i11pp163-174

8. Бородянский В.П. Сопротивление качению жесткого колеса по упруго-пластичному основанию // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2008. № 1. С. 91-94. EDN: JWRMZJ

9. Almuaythir S., Zaini M.S.I., Lodhi R.H. Predicting soil compaction parameters in expansive soils using advanced machine learning models: a comparative study. Scientific Reports. 2025;15:24018. https://doi.org/10.1038/s41598-025-09279-2

10. Смелик О.В. Результаты экспериментальных исследований активного катка в составе комбинированного ботвоуборочного агрегата // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2014. № 36. С. 206-211. EDN: UXKRSB

11. Шарков И.Н. Методика количественного определения дыхания почвы в полевых условиях // Почвы и окружающая среда. 2025. Т. 8, № 3. https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.334

Reference

1. Bukłaha A., Wieczorek A., Majewski P. et al. New trends in application of the fumigation method in medical and non-medical fields. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*: *AAEM*. 2021;29(2):185-189. https://doi.org/10.26444/aaem/144136

2. Kalinin A.B., Teplinsky I.Z., Smelik V.A. et al. Improving the quality control methods for the functioning of dosing systems of chemicalization machines. *Agrarian Scientific Journal.* 2022;6:94-98. (In Russ.). https://doi.org/10.28983/asj.y2022i6pp94-98

3. Kalinin A.B., Teplinsky I.Z., Shpiganovich P.M. Methods and means for managing moisture supply regimes during original potato seed growing in the context of global climate change. *Agrarian Scientific Journal*. 2023;4:112-118. (In Russ.). https://doi.org/10.28983/asj.y2023i4pp112-118

4. Mudarisov S.G. Modeling the interaction of working tools with soil. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2005;7:27-30. (In Russ.).

5. Rakhimov R.S., Rakhimov Z.S., Rakhimov I.R., Rakhimzhanov A.R. Justification of the constructive scheme and traction resistance of chisel tools with the simultaneous application of mineral fertilizers. *Vestnik Bashkir State Agrarian University*. 2021;1:111-119. (in Russ.) https://doi.org/10.31563/1684-7628-2021-57-1-111-119

6. Kireev I.M., Koval Z.M. Measuring instrument for determining soil resistance when immersing plungers with tips into it. *AgroForum*. 2019;6:54-57. (in Russ.).

7. Ruzhev V.A., Kalinin A.B., Teplinsky I.Z. et al. Improvement of working bodies of machines and tools for soil cultivation based on a rheological model of the soil state. *Agrarian Scientific Journal*. 2024;11:163-174. (in Russ.). https://doi.org/10.28983/asj.y2024i11pp163-174

8. Borodyansky V.P. Rolling resistance of a rigid wheel on an elastic-plastic base. *Izvestiya Vuzov*. *Food technology*. 2008;1:91-94. (in Russ.).

9. Almuaythir S., Zaini M.S.I., Lodhi R.H. Predicting soil compaction parameters in expansive soils using advanced machine learning models: a comparative study. *Scientific Reports*. 2025;15:24018. https://doi.org/10.1038/s41598-025-09279-2

10. Smelik O.V. Results of experimental studies of the active rollers as part of the rink in the combined unit remover topper. *Izvestiya Saint Petersburg State Agrarian University*. 2014;36:206-211. (in Russ.).

11. Sharkov I.N. Methodology of quantitative determination of soil respiration in field conditions. *The Journal of Soils and Environment*. 2025;8(3): e334. https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.334

12. Teplinsky I.Z., Kalinin A.B. Algorithm for adjusting chisel plows for operating depth. *Tractors and Agricultural Machinery.* 1997;2:22-24. (in Russ.).

12. Теплинский И.З., Калинин А.Б. Алгоритм настройки чизельных плугов на глубину обработки // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1997. № 2. С. 22-24. EDN: TRTPTP

13. Kalinin A.B., Novikov M.A., Ruzhev V.A., Teplinsky I.Z. Improving the efficiency of the soil uncompaction by the cultivator-subsoiler through the use of digital systems for working depth control. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Mechanization, engineering, technology, innovation and digital technologies in agriculture. 2021;723(3):032061. https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032061

14. Левшин А.Г., Ерохин М.Н. Научно-методические основы формирования нормированной шкалы твердости почвы // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2017. № 6 (82). С. 28-34. EDN: ZWKXWH

13. Kalinin A.B., Novikov M.A., Ruzhev V.A., Teplinsky I.Z. Improving the efficiency of the soil uncompaction by the cultivator-subsoiler through the use of digital systems for working depth control. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Mechanization, engineering, technology, innovation and digital technologies in agriculture. 2021;723(3):032061. https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032061

14. Levshin A.G., Erokhin M.N. Scientific and methodical grounds to make normalized scale of soil hardness. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"*. 2017;6:28-34. (In Russ.)

Сведения об авторах

[1] **Калинин Андрей Борисович,** д-р техн. наук; andrkalinin@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-6301-5758; SPIN-код: 6759-2761
[2] **Теплинский Игорь Зиновьевич,** канд. техн. наук, профессор; teplinskij.igor.zinovevich@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4464-066X; SPIN-код: 5967-8078
[3] **Немцев Иван Сергеевич,** старший преподаватель; ivannemcev180997@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1786-2489; SPIN-код: 6776-1692
[1, 2, 3] Санкт-Петербургский государственный аграрный университет; 196601, г. Санкт-Петербург, Пушкин, Петербургское шоссе, 2

Author Information

Andrei B. Kalinin[1], DSc (Eng); andrkalinin@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-6301-5758
Igor Z. Teplinsky[2], CSc (Eng), Professor; teplinskij.igor.zinovevich@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4464-066X
Ivan S. Nemtsev[3], Senior Lecturer; ivannemcev180997@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-1786-2489
[1, 2, 3] Saint Petersburg State Agrarian University; 2, Petersburgskoe Highway, St. Petersburg, Pushkin, 196601, Russian Federation

Вклад авторов

Калинин А.Б. – руководство исследованиями, создание окончательной версии статьи;
Теплинский И.З. – концептуализация и редактирование рукописи;
Немцев И.С. – получение и обработка данных, визуализация.

Конфликт интересов

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

Author Contribution

A.B. Kalinin – research supervision, wring – review and editing of the manuscript;
I.Z. Teplinsky – conceptualization; wring – review and editing of the manuscript;
I.S. Nemtsev – data curation, visualization.

Conflict of interest

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

Статья поступила 23.04.2026, после рецензирования и доработки 13.05.2026, принята к публикации 09.06.2026

Received 23.04.2026; Revised 13.05.2026; Accepted 09.06.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.172:631.2
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-38-47

Компартментальная модель для оценки потоков субстанций в сельскохозяйственной искусственной биоэнергетической системе

С.А. Ракутько[1]✉, ***Е.Н. Ракутько***[2]

[1, 2] Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ; г. Санкт-Петербург, Россия

[1] sergej1964@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-2454-4534

[2] elena.rakutko@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-3536-9639

Аннотация. Моделирование систем управления позволяет оптимизировать технологии и повысить энергоэффективность и экологичность сельскохозяйственного производства. С целью разработки теоретических основ оценки энергоэффективности и экологичности создана компартментальная модель искусственной биоэнергетической системы, в которой животноводческая ферма и тепличный комплекс рассматриваются как единая интегрированная агроэкосистема. Компартментальная модель, учитывающая поток субстанций (вещества и энергии) между компонентами системы, позволяет оценить энергоэкологичность системы. Искусственная биоэнергетическая система учитывает процессы потребления, внутрисистемного обмена, потерь и вывода полезной продукции. Представленная модель включает в себя компартменты животноводства и растениеводства, характеризующие соответствующие энерготехнологические процессы, блоки преобразования вещества и определяющие их функционирование блоки преобразования энергии. Представлен комплекс показателей, характеризующих энергетическую и материальную эффективность, потери, диссипацию, коэффициенты обмена и синтеза, а также интегральный показатель – коэффициент энергоэкологичности. Модель послужит научной основой для оптимизации технологий и перехода к принципам циркулярной экономики в АПК. Результаты исследований могут быть использованы для разработки энергоэффективных и экологически безопасных технологий в сельском хозяйстве, снижающих антропогенную нагрузку на окружающую среду.

Ключевые слова: компартментальная модель; энергоэффективность; экологичность; энергоэкологичность; коэффициент энергоэкологичности; тепличный комплекс; животноводческая ферма; искусственная биоэнергетическая система; поток субстанций

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания ФГБНУ ФНАЦ ВИМ FGUN-2025-0010.

Для цитирования: Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Компартментальная модель для оценки потоков субстанций в сельскохозяйственной искусственной биоэнергетической системе // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 38-47. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-38-47

ORIGINAL ARTICLE

Compartmental model for assessing the flows of substances in an engineered agricultural bio-energy system

S.A. Rakutko[1]✉, ***E.N. Rakutko***[2]

[1, 2] Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM; Saint Petersburg, Russia

[1] sergej1964@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-2454-4534

[2] elena.rakutko@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-3536-9639

Abstract. The modeling of control systems enables the optimization of technological processes, thereby enhancing both the energy efficiency and environmental sustainability of agricultural production. To establish a theoretical foundation for evaluating these performance indicators, the authors have developed a compartmental model of an engineered bioenergy system (EBES), wherein a livestock farm and a greenhouse complex are treated as a single integrated agroecosystem. Taking into account the dynamic mass (matter) and energy flows between components, this compartmental model enables a comprehensive assessment of the system's energy-environmental

© Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., 2026

performance. The model explicitly represents resource consumption, intra-system exchange, losses, and the output of useful products. The model framework incorporates distinct compartments for livestock and crop production to characterize their respective energy-technological processes, alongside material and energy conversion units that govern the system's operation. A comprehensive set of indicators is introduced to evaluate material and energy efficiency, dissipation, losses, exchange and synthesis coefficients, as well as a composite indicator – the energy-environmental coefficient. This model provides a rigorous scientific foundation for technological optimization and the transition toward circular economy principles within the agro-industrial sector. Furthermore, the findings can guide the development of energy-efficient and environmentally safe agricultural technologies, ultimately minimizing the anthropogenic environmental impact.

Keywords: compartmental model; energy efficiency; environmental sustainability; energy-environmental performance; energy-environmental coefficient; greenhouse complex; livestock farm; engineered bioenergy system; flow of substances

Funding: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the State Assignment of the Federal Scientific Center for VIM FGUN-2025-0010.

For citation: Rakutko S.A., Rakutko E.N. Compartmental model for assessing the flows of substances in an engineered agricultural bio-energy system. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):38-47. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-38-47

Введение

Сельское хозяйство как совокупность искусственных агроэкосистем представляет собой сложную организационно-техническую систему, обеспечивающую интенсивное производство сельскохозяйственной продукции на основе биологических и машинных технологий [1]. Как отмечают С.И. Барцев и А.Г. Дегерменджи [2], так же, как и в естественных экосистемах, в искусственной системе растения (продуценты) поглощают углерод и создают биомассу, а животные (консументы) ее потребляют. Круговорот веществ между растениями и животными объединяет животноводство и растениеводство как взаимосвязанные компоненты агроэкосистемы [3].

Особенности структуры энергообеспечения сельскохозяйственного производства требуют особого подхода к оптимизации системы энергоснабжения [4]. Одним из способов энергоэффективного и экологически безопасного производства сельскохозяйственной продукции является объединение животноводческой фермы с тепличным комплексом в единую искусственную систему, что обеспечивает возможность рационального использования выделяемых животными субстанций выращиваемыми здесь же растениями [5]. Так, по мнению В.В. Гордеева и др. [6], молочная ферма на 100 коров с теплицей обеспечивает минимальную антропогенную нагрузку на окружающую среду и способствует повышению эффективности и конкурентоспособности производства молока.

В прифермской теплице, образующей вместе с фермой искусственную агроэкосистему, одновременно решаются проблемы утилизации стоков и обеспечения растений питательными веществами. При этом энергозатраты на полив и минеральную подкормку растений могут быть компенсированы за счет энергосодержания стоков доильного зала. По оценкам Е.Е. Хазанова [7], энергетический потенциал стоков от одной коровы составляет около 28 ГДж в год, что почти в 13 раз превышает энергозатраты на полив и минеральную подкормку растений, произрастающих на 1 м^2 теплиц. Согласно оценкам Т.Ю. Мироновой и В.В. Гордеева [8] для полной утилизации навозосодержащих стоков доильного зала молочной фермы на 640 коров полезная площадь прифермской теплицы-розария должна составлять 2281 м^2. При этом капитальные вложения составят 1714 млн руб., годовой экономический эффект – 6173 млн руб., срок окупаемости – 3,3 месяца. В результате расчета Е.Е. Хазановым [9] теплового баланса новой молочной фермы, совмещенной с тепличным комплексом, установлено, что за счет рационального использования выделяемого животными тепла, уменьшения площади наружных ограждений и применения новых строительных материалов потери тепла могут быть сокращены в 2,7 раза по сравнению с типовым проектным решением.

Перспективным является использование нетрадиционных источников энергии – в частности, солнечной в комбинированных гелиотеплицах и животноводческих фермах. Так, Б.Э. Хайриддинов и др. [10] отмечают, что в комбинированных гелиотеплицах животноводческих ферм аккумулируемая в почве за день солнечная энергия передается растениям в ночное время, повышая скорость их роста и продолжительность выращивания. Исследования В.Т. Тайсаева и Л.Р. Мазаева [11] показали, что оптимизация элементов конструкции теплицы

с аккумулированием избыточного солнечного тепла в совмещенных с конструкциями теплиц аккумуляторах позволяет снизить энергопотребление и выброс углекислого газа в 2 раза.

Кроме того, перспективным является использование газообразных выбросов животноводческих ферм. В исследовании Е.Е. Хазанова и С.Г. Хазановой [12] расчетно-аналитическим методом показано, что содержащиеся в вентиляционных выбросах коровника углекислый газ и аммиак могут использоваться для подкормки растений в теплицах. При этом эффективность использования растениями удобрений повышается на 16,8%, удельный расход минеральных удобрений снижается на 8,9%, а коэффициент энергетической эффективности внесенных удобрений увеличивается на 25,3%. Энергетический потенциал газообразных выделений одной коровы за стойловый период составляет около 21 ГДж. Согласно оценке В.Н. Миронова и др. [13] при выращивании цветов аккумулирование выбросов в подпочвенном слое теплицы позволит снизить удельные энергетические затраты на 20,5%, повысить энергосодержание готовой продукции на 65,5%; коэффициент энергетической эффективности при этом возрастет на 25%. Дополнительный эффект будет проявлен в виде повышения урожайности, увеличения плодородия субстрата, сокращения расхода минеральных удобрений.

Детальный анализ функциональных связей между элементами сложной системы (тепличный комплекс + животноводческая ферма) [14] и моделирование систем управления сельскохозяйственных экосистем позволят достигнуть высоких производственных показателей. В экологическом моделировании агросистем широко применяют потоковые модели [15]. Энергетическая модель животноводческой экосистемы служит эффективным аналитическим инструментом для проведения экономических расчетов, моделирования последствий внешних воздействий, оценки энергетической эффективности системы через анализ баланса входных и выходных потоков энергии [16]. Анализ энергетических потоков в теплице позволяет оценить возможности энергосбережения на каждом этапе преобразования энергии и вещества в светокультуре [17].

Для повышения энергоэффективности и экологичности производства в условиях соблюдения заданных требований и ограничений по устойчивости его функционирования, качества и надежности управления актуальной является разработка средств моделирования систем управления в сельскохозяйственных экосистемах.

Цель исследований: разработка теоретических основ оценки энергоэффективности и экологичности сельскохозяйственной искусственной биоэнергетической системы (*ИБЭС*) с помощью модели потоков субстанций.

Материалы и методы

Исследование закономерности преобразования потоков антропогенной энергии в агроэкосистеме проведено с применением эколого-энергетического анализа[1]. В балансовых компартментальных моделях рассматриваются потоки вещества и энергии между составляющими модель компартментами. Моделируемая искусственная биоэнергетическая система состоит из блоков – компартментов (*compartment* – отделение, раздел). Компартменты взаимодействуют между собой и с окружающей средой, обмениваясь веществом и энергией[2]. Рассмотрены обменные материальные процессы как между системой и окружающей средой, так и внутри системы (межблоковый обмен). Скорости обмена заданы на основе биологических данных [18].

В качестве инструмента для анализа, оптимизации и разработки энерготехнологических процессов (*ЭТП*) использовали математический аппарат метода конечных отношений профессора В.Н. Карпова[3]. Протекающие в *ЭТП* операции связаны с перемещением различного вида субстаций при возникновении градиента потенциала.

Первичный анализ взаимосвязи параметров модели проведен с помощью ИИ DeepSeek-R1. Построение графических зависимостей выполнено на языке программирования Piton в Google Colab.

Результаты и их обсуждение

Сложная искусственная биоэнергетическая система, представленная в виде совокупности взаимосвязанных подсистем, обеспечивает компонентам подсистем относительную независимость и одновременно улучшает управляемость системой в целом.

Разработанная компартментальная модель *ИБЭС* (рис. 1) включает в себя два блока: $ЭТП^{К}$ и $ЭТП^{Р}$. Функционирование системы описывается величинами потоков субстанций, которыми система обменивается с окружающей средой (*ОС*), а также циркулирующих внутри системы[4]. Материальные

[1] Odum H.T. Environmental accounting, emergy and environmental decision making. New Yourk: John Willey&Sons, Inc, 1996.

[2] Шеин Е.В., Рыжова И.М. Математическое моделирование в почвоведении: Учебник. М., 2016. 377 с.

[3] Карпов В.Н. Энергосбережение. Метод конечных отношений: Монография. Санкт-Петербург, 2005. 138 с.

[4] Иерархическая информационная модель искусственной биоэнергетической системы: Пат. РФ № 2528577 / Ракутько С.А. 2014103138/08; заявл. 29.01.14; Опубл. 18.06.2015.

потоки включают движение семян, рассады, удобрений, пестицидов, воды, субстрата, углекислоты и других газов, урожая, кормов и добавок, поголовья животных для выращивания и откорма, подстилочных материалов, упаковки и тары, навоза, готовой продукции, биологических отходов и стоков. Энергетические потоки образованы различными видами энергии (тепловой, механической, электрической, световой, различными видами топлива).

На рисунке 1 показана вложенность уровней модели с указанием потоков энергии и вещества: первый уровень *ИБЭС* функционирует в пределах *ОС*; второй уровень соответствует *ЭТП*; третий уровень характеризует блоки преобразования энергии (*БПЭ*) и вещества (*БПВ*) в каждом блоке второго уровня. Интенсивность преобразований вещества в *БПВ* определяется процессами преобразования энергии в *БПЭ*.

В компартментальной модели выделены следующие процессы:

Потребление. Входные потоки вещества $M_н$ и энергии $Q_н$ различных видов (образующие входной поток субстанций $S_н$) участвуют в энерготехнологических процессах животноводства $ЭТП^Ж$ ($M_н^Ж$ и $Q_н^Ж$) и растениеводства $ЭТП^Р$ ($M_н^Р$ и $Q_н^Р$).

Внутрисистемный обмен. Часть продукции и энергии, которые следует отнести к потерям в своем *ЭТП*, используется в другом *ЭТП*, то есть потоки $M_о^{Ж-Р}$ и $Q_о^{Ж-Р}$ из $ЭТП^Ж$ поступают на входы $ЭТП^Р$, а потоки $M_о^{Р-Ж}$ и $Q_о^{Р-Ж}$ из $ЭТП^Р$ поступают на входы $ЭТП^Ж$.

Потери. Не используемые далее в своих *ЭТП* потоки вещества ($\Delta M^Ж$ и $\Delta M^Р$) и энергии ($\Delta Q^Ж$ и $\Delta Q^Р$) составляют потоки потерь вещества ΔM и энергии ΔQ, образующие общие потери субстанций ΔS.

Вывод. Потоки выводимой хозяйственно-полезной продукции $M_к^Ж$ и $M_к^Р$ составляют поток $M_к$, образующий поток полезной субстанции $S_к$.

Сформированные после преобразований энергетические потоки ($Q_к^Ж$ в $БПЭ^Ж$ и $Q_к^Р$ в $БПЭ^Р$) определяют функционирование, соответственно, блоков $БПВ^Ж$ и $БПВ^Р$.

Режимы проведения энерготехнологических процессов определяются управляющими параметрами X_i на уровнях *БПЭ* и *БПВ*.

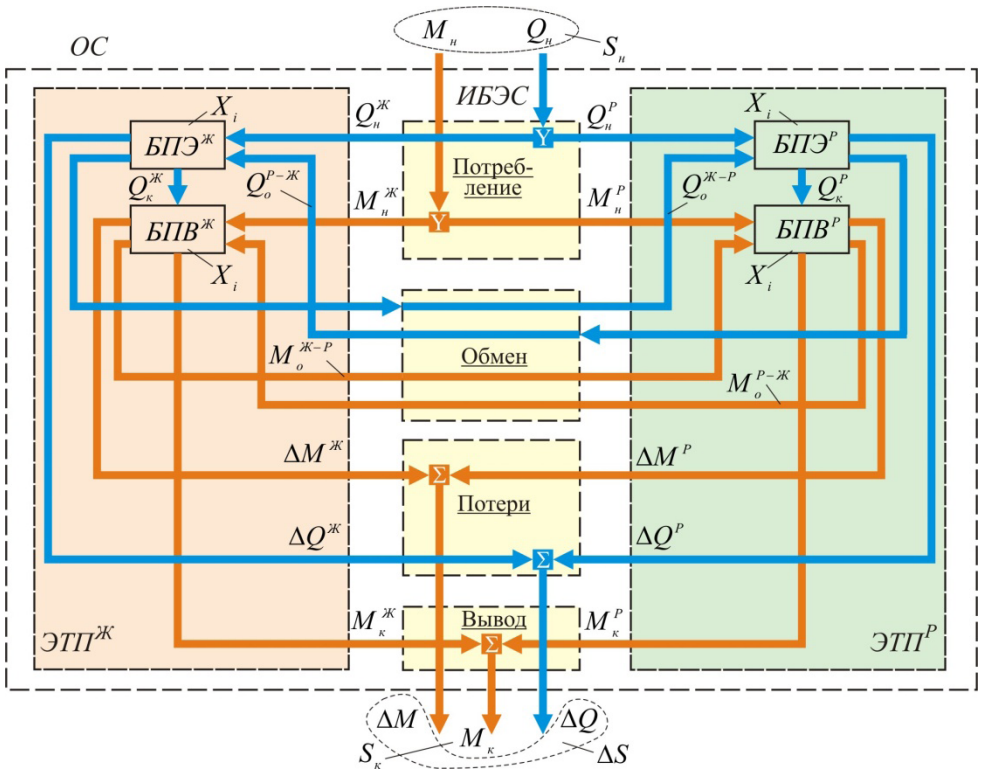


Рис. 1. Компартментальная модель потоков субстанций в искусственной биоэнергетической системе (ИБЭС):
ОС – окружающая среда; $ЭТП^Ж$ и $ЭТП^Р$ – энерготехнологические процессы в животноводстве и растениеводстве;
БПЭ – блок преобразования энергии; *БПВ* – блок преобразования вещества;
M, *Q* и *S* – потоки вещества, энергии и субстанций; ΔM, ΔQ и ΔS – потери вещества, энергии и субстанций

Fig. 1. Compartmental model of mass and energy flows in the EBES:
OC – environment; $ЭТП^Ж$ and $ЭТП^Р$ – energy-technological processes in livestock and crop production;
БПЭ – energy conversion unit; *БПВ* – substance conversion unit; *M*, *Q* and *S* – flows of matter, energy, and substances;
ΔM, ΔQ and ΔS – losses of matter, energy, and substances

Модель опирается на балансовые соотношения, которые можно записать одновременно для потоков вещества *M* и энергии *Q*, используя общее обозначение для субстанций *S*:

$$\begin{cases} S_{\text{н}} = S_{\text{н}}^{\text{Ж}} + S_{\text{н}}^{\text{Р}} \\ S_{\text{н}}^{\text{Ж}} + S_{\text{о}}^{\text{Р–Ж}} = S_{\text{к}}^{\text{Ж}} + \Delta S^{\text{Ж}} + S_{\text{О}}^{\text{Ж–Р}} \\ S_{\text{н}}^{\text{Р}} + S_{\text{о}}^{\text{Ж–Р}} = S_{\text{к}}^{\text{Р}} + \Delta S^{\text{Р}} + S_{\text{О}}^{\text{Р–Ж}} \\ \Delta S = \Delta S^{\text{Ж}} + \Delta S^{\text{Р}}. \end{cases} \quad (1)$$

Отметим основные показатели модели, характеризующие потоки субстанций в *ЭТП*^{Ж}, *ЭТП*^{Р} и *ИБЭС*:

1. Энергетическая эффективность (КПД по энергии) (η_Q, отн. ед.) отражает долю полезно используемой энергии от потребляемой энергии:

$$\eta_Q^{\text{Ж}} = \frac{Q_{\text{к}}^{\text{Ж}}}{Q_{\text{н}}^{\text{Ж}}}; \eta_Q^{\text{Р}} = \frac{Q_{\text{к}}^{\text{Р}}}{Q_{\text{н}}^{\text{Р}}}; \eta_Q^{\text{ИБЭС}} = \frac{Q_{\text{к}}}{Q_{\text{н}}} = \frac{Q_{\text{к}}^{\text{Ж}} + Q_{\text{к}}^{\text{Р}}}{Q_{\text{н}}^{\text{Ж}} + Q_{\text{н}}^{\text{Р}}}. \quad (2)$$

2. Материальная эффективность (КПД по веществу) (η_M, отн. ед.) отражает долю полезно используемого вещества от количества используемого вещества:

$$\eta_M^{\text{Ж}} = \frac{M_{\text{к}}^{\text{Ж}}}{M_{\text{н}}^{\text{Ж}}}; \eta_M^{\text{Р}} = \frac{M_{\text{к}}^{\text{Р}}}{M_{\text{н}}^{\text{Р}}}; \eta_M^{\text{ИБЭС}} = \frac{M_{\text{к}}}{M_{\text{н}}} = \frac{M_{\text{к}}^{\text{Ж}} + M_{\text{к}}^{\text{Р}}}{M_{\text{н}}^{\text{Ж}} + M_{\text{н}}^{\text{Р}}}. \quad (3)$$

3. Коэффициент потерь энергии (δ_Q, отн. ед.) показывает долю потерь энергии от потребляемой энергии:

$$\delta_Q^{\text{Ж}} = \frac{\Delta Q^{\text{Ж}}}{Q_{\text{н}}^{\text{Ж}}}; \delta_Q^{\text{Р}} = \frac{\Delta Q^{\text{Р}}}{Q_{\text{н}}^{\text{Р}}}; \delta_Q^{\text{ИБЭС}} = \frac{\Delta Q}{Q_{\text{н}}}; \quad (4)$$

$$\delta_Q^{\text{Ж}} = 1 - \eta_Q^{\text{Ж}}; \delta_Q^{\text{Р}} = 1 - \eta_Q^{\text{Р}}; \delta_Q^{\text{ИБЭС}} = 1 - \eta_Q^{\text{ИБЭС}}. \quad (5)$$

4. Коэффициент потерь вещества (δ_M, отн. ед.) показывает долю потерь вещества от количества используемого вещества:

$$\delta_M^{\text{Ж}} = \frac{\Delta M^{\text{Ж}}}{M_{\text{н}}^{\text{Ж}}}; \delta_M^{\text{Р}} = \frac{\Delta M^{\text{Р}}}{M_{\text{н}}^{\text{Р}}}; \delta_M^{\text{ИБЭС}} = \frac{\Delta M}{M_{\text{н}}}. \quad (6)$$

5. Коэффициент диссипации энергии (ϑ_Q, отн. ед.) учитывает долю потерь энергии от полезно используемой энергии:

$$\vartheta_Q^{\text{Ж}} = \frac{\Delta Q^{\text{Ж}}}{Q_{\text{к}}^{\text{Ж}}}; \vartheta_Q^{\text{Р}} = \frac{\Delta Q^{\text{Р}}}{Q_{\text{к}}^{\text{Р}}}; \vartheta_Q^{\text{ИБЭС}} = \frac{\Delta Q}{Q_{\text{к}}}. \quad (7)$$

6. Коэффициент диссипации вещества (ϑ_M, отн. ед.) учитывает долю потерь вещества от количества полезной продукции:

$$\vartheta_M^{\text{Ж}} = \frac{\Delta M^{\text{Ж}}}{M_{\text{к}}^{\text{Ж}}}; \vartheta_M^{\text{Р}} = \frac{\Delta M^{\text{Р}}}{M_{\text{к}}^{\text{Р}}}; \vartheta_M^{\text{ИБЭС}} = \frac{\Delta M}{M_{\text{к}}}. \quad (8)$$

7. Удельные потери энергии на единицу продукции (ρ_Q, Дж·кг$^{-1}$) отражают потери энергии, связанные с синтезом единицы полезной продукции:

$$\rho_Q^{\text{Ж}} = \frac{\Delta Q^{\text{Ж}}}{M_{\text{к}}^{\text{Ж}}}; \rho_Q^{\text{Р}} = \frac{\Delta Q^{\text{Р}}}{M_{\text{к}}^{\text{Р}}}; \rho_Q^{\text{ИБЭС}} = \frac{\Delta Q}{M_{\text{к}}}. \quad (9)$$

8. Удельные потери вещества на единицу полезной энергии (ρ_M, кг·Дж$^{-1}$) отражают потери вещества, связанные единицей полезно используемой энергии:

$$\rho_M^{\text{Ж}} = \frac{\Delta M^{\text{Ж}}}{Q_{\text{к}}^{\text{Ж}}}; \rho_M^{\text{Р}} = \frac{\Delta M^{\text{Р}}}{Q_{\text{к}}^{\text{Р}}}; \rho_M^{\text{ИБЭС}} = \frac{\Delta M}{Q_{\text{к}}}. \quad (10)$$

9. Энергоемкость процессов ($\varepsilon_{\text{П}}$, отн. ед.) показывает превышение потребляемого количества энергии по сравнению с полезно используемой энергией:

$$\varepsilon_{\text{П}}^{\text{Ж}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{Ж}}}{Q_{\text{к}}^{\text{Ж}}}; \varepsilon_{\text{П}}^{\text{Р}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{Р}}}{Q_{\text{к}}^{\text{Р}}}; \varepsilon_{\text{П}}^{\text{ИБЭС}} = \frac{Q_{\text{н}}}{Q_{\text{к}}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{Ж}} + Q_{\text{н}}^{\text{Р}}}{Q_{\text{к}}^{\text{Ж}} + Q_{\text{к}}^{\text{Р}}}. \quad (11)$$

10. Массоемкость процессов ($\mu_{\text{П}}$, отн. ед.) показывает превышение количества используемого вещества по сравнению с полезной продукцией:

$$\mu_{\text{П}}^{\text{Ж}} = \frac{M_{\text{н}}^{\text{Ж}}}{M_{\text{к}}^{\text{Ж}}}; \mu_{\text{П}}^{\text{Р}} = \frac{M_{\text{н}}^{\text{Р}}}{M_{\text{к}}^{\text{Р}}}; \mu_{\text{П}}^{\text{ИБЭС}} = \frac{M_{\text{н}}}{M_{\text{к}}} = \frac{M_{\text{н}}^{\text{Ж}}}{M_{\text{к}}^{\text{Ж}}} \frac{M_{\text{н}}^{\text{Р}}}{M_{\text{к}}^{\text{Р}}}; \quad (12)$$

$$\mu_{\text{П}}^{\text{Ж}} = 1/\eta_{\text{М}}^{\text{Ж}}; \mu_{\text{П}}^{\text{Р}} = 1/\eta_{\text{М}}^{\text{Р}}; \mu_{\text{П}}^{\text{ИБЭС}} = 1/\eta_M^{\text{ИБЭС}}. \quad (13)$$

11. Энергоемкость продукции (ε_M, Дж·кг$^{-1}$) показывает количество полезной используемой энергии, необходимой для получения единицы полезной продукции:

$$\varepsilon_M^{\text{Ж}} = \frac{Q_{\text{к}}^{\text{Ж}}}{M_{\text{к}}^{\text{Ж}}}; \varepsilon_M^{\text{Р}} = \frac{Q_{\text{к}}^{\text{Р}}}{M_{\text{к}}^{\text{Р}}}; \varepsilon_M^{\text{ИБЭС}} = \frac{Q_{\text{к}}}{M_{\text{к}}} = \frac{Q_{\text{к}}^{\text{Ж}} + Q_{\text{к}}^{\text{Р}}}{M_{\text{к}}^{\text{Ж}} + M_{\text{к}}^{\text{Р}}}. \quad (14)$$

12. Удельный коэффициент синтеза вещества (ω_Q, кг·Дж$^{-1}$) отражает количество используемого вещества, преобразуемого в полезную продукцию под действием единицы полезно используемой энергии:

$$\omega_Q^{\text{Ж}} = \frac{M_{\text{н}}^{\text{Ж}}}{Q_{\text{к}}^{\text{Ж}}}; \omega_Q^{\text{Р}} = \frac{M_{\text{н}}^{\text{Р}}}{Q_{\text{к}}^{\text{Р}}}; \omega_Q^{\text{ИБЭС}} = \frac{M_{\text{н}}}{Q_{\text{к}}} = \frac{M_{\text{н}}^{\text{Ж}} + M_{\text{н}}^{\text{Р}}}{Q_{\text{к}}^{\text{Ж}} + Q_{\text{к}}^{\text{Р}}}. \quad (15)$$

13. Энергоемкость используемого вещества (энергоемкость сырья) (ε_C, Дж·кг$^{-1}$) показывает количество потребляемой энергии, затрачиваемой при синтезе единицы используемого вещества:

$$\varepsilon_{\text{С}}^{\text{Ж}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{Ж}}}{M_{\text{н}}^{\text{Ж}}}; \varepsilon_{\text{С}}^{\text{Р}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{Р}}}{M_{\text{н}}^{\text{Р}}}; \varepsilon_{\text{С}}^{\text{ИБЭС}} = \frac{Q_{\text{н}}}{M_{\text{н}}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{Ж}} + Q_{\text{н}}^{\text{Р}}}{M_{\text{н}}^{\text{Ж}} + M_{\text{н}}^{\text{Р}}}. \quad (16)$$

14. Удельная энергоемкость ($\varepsilon_{\text{уд}}$, отн. ед.·кг$^{-1}$) показывает численное значение энергоемкости процессов на единицу полезной продукции:

$$\varepsilon_{\text{уд}}^{\text{Ж}} = \frac{\varepsilon_{\text{П}}^{\text{Ж}}}{M_{\text{к}}^{\text{Ж}}}; \varepsilon_{\text{уд}}^{\text{Р}} = \frac{\varepsilon_{\text{П}}^{\text{Р}}}{M_{\text{к}}^{\text{Р}}}; \varepsilon_{\text{уд}}^{\text{ИБЭС}} = \frac{\varepsilon_{\text{П}}^{\text{ИБЭС}}}{M_{\text{к}}}. \quad (17)$$

15. Коэффициенты обмена по энергии (σ_Q, отн. ед.) и веществу (σ_M, отн. ед.) отражают долю возвращаемой субстанции в соседний *ЭТП* по сравнению с потребляемой субстанцией в данном блоке:

$$\sigma_Q^{\text{Р–Ж}} = \frac{Q_{\text{О}}^{\text{Р–Ж}}}{Q_{\text{н}}^{\text{Ж}}}; \sigma_Q^{\text{Ж–Р}} = \frac{Q_{\text{О}}^{\text{Ж–Р}}}{Q_{\text{н}}^{\text{Р}}}; \sigma_M^{\text{Р–Ж}} = \frac{M_{\text{О}}^{\text{Р–Ж}}}{M_{\text{н}}^{\text{Ж}}}; \sigma_M^{\text{Ж–Р}} = \frac{M_{\text{О}}^{\text{Ж–Р}}}{M_{\text{н}}^{\text{Р}}}. \quad (18)$$

16. Зависимости между количеством полезно потребляемой энергии и полезной продукцией

в соответствующих компартментах определяются экспериментально в виде функций:

$$M_{к}^{Ж} = f_{Ж}(Q_{к}^{Ж}); M_{к}^{Р} = f_{Р}(Q_{к}^{Р}). \quad (19)$$

17. Коэффициент энергоэкологичности ($K_{ЭЭ}$, отн. ед.) отражает долю полезной продукции от количества использованного на ее получение вещества:

$$K_{ЭЭ}^{Ж} = \frac{M_{к}^{Ж}}{M_{н}^{Ж}} = \frac{M_{н}^{Ж} - \Delta M^{Ж}}{M_{н}^{Ж}} = 1 - \delta_{M}^{Ж};$$

$$K_{ЭЭ}^{Р} = 1 - \delta_{M}^{Р}; K_{ЭЭ}^{ИБЭС} = 1 - \delta_{M}^{ИБЭС}. \quad (20)$$

Система основных показателей модели, характеризующих потоки субстанций, представлена на рисунке 2. Начало стрелки соответствует потоку в числителе соответствующей формулы, конец стрелки отвечает потоку в знаменателе. Символы показателей указаны напротив стрелок, в круглых скобках указаны формулы для их вычисления. «Несимметричность» системы показателей относительно *БПЭ* и *БПВ* вызвана неполной симметрией процессов в *ИБЭС*: выход $Q_к$ *БПЭ* является входом *БПВ*, однако его выход $M_к$ уже является выходом всего *ЭТП*.

Для предлагаемой компартментальной модели выбраны три показателя энергоемкости: $\varepsilon_С$, $\varepsilon_П$ и ε_M (рис. 2), обобщенно характеризующие энергоэкологичность *ИБЭС*.

Связь энергоемкости и энергоэкологичности в *ЭТП*^{Ж}, *ЭТП*^{Р} и *ИБЭС*, отн. ед., можно записать в виде выражений:

$$K_{ЭЭ}^{Ж} = \frac{\varepsilon_{С}^{Ж}}{\varepsilon_{П}^{Ж}\varepsilon_{M}^{Ж}}; K_{ЭЭ}^{Р} = \frac{\varepsilon_{С}^{Р}}{\varepsilon_{П}^{Р}\varepsilon_{M}^{Р}}; K_{ЭЭ}^{ИБЭС} = \frac{\varepsilon_{С}^{ИБЭС}}{\varepsilon_{П}^{ИБЭС}\varepsilon_{M}^{ИБЭС}}. \quad (21)$$

Связь показателей эффективности преобразования энергии и вещества на макроуровне модели с физическими величинами, характеризующими процессы на ее микроуровне в *ЭТП*^{К}, *ЭТП*^{Р} и *ИБЭС* с учетом выражения для полезно используемой энергии, кВт·ч (с использованием обозначений для поперечной ζ и продольной ξ переменных $Q_к = \zeta_к \xi_к$ [19]), можно записать как

$$\frac{\varepsilon_{M}^{Ж}\varepsilon_{П}^{Ж}}{\varepsilon_{уд}^{Ж}} = \zeta_{к}^{Ж}\xi_{к}^{Ж}; \frac{\varepsilon_{M}^{Р}\varepsilon_{П}^{Р}}{\varepsilon_{уд}^{Р}} = \zeta_{к}^{Р}\xi_{к}^{Р}; \frac{\varepsilon_{M}^{ИБЭС}\varepsilon_{П}^{ИБЭС}}{\varepsilon_{уд}^{ИБЭС}} = \zeta_{к}^{ИБЭС}\xi_{к}^{ИБЭС}. \quad (22)$$

Оптимизация функционирования *ИБЭС* для каждого компонента ее модели X_j по критерию минимальной энергоемкости процессов требует соблюдения условий:

$$\frac{\partial\varepsilon_{П}^{Ж}}{\partial X_i} = 0; \frac{\partial\varepsilon_{П}^{Р}}{\partial X_i} = 0; \frac{\partial\varepsilon_{П}^{ИБЭС}}{\partial X_i} = 0. \quad (23)$$

Максимальная энергоэкологичность (оптимум функционирования) *ЭТП*^{К}, *ЭТП*^{Р} и *ИБЭС* в целом ($K_Э = 1$) в соответствии с выражениями (21) наблюдается при соблюдении соотношений:

$$\varepsilon_{П}^{Ж} = \frac{\varepsilon_{С}^{Ж}}{\varepsilon_{M}^{Ж}}; \varepsilon_{П}^{Р} = \frac{\varepsilon_{С}^{Р}}{\varepsilon_{M}^{Р}}; \varepsilon_{П}^{ИБЭС} = \frac{\varepsilon_{С}^{ИБЭС}}{\varepsilon_{M}^{ИБЭС}}. \quad (24)$$

Для этого случая без указания принадлежности к определенным компартаментам можно записать уравнение баланса субстанций в процессе их преобразований в *ИБЭС*:

$$\varepsilon_{С} = \varepsilon_{П} \cdot \varepsilon_{M} \text{ или } \frac{Q_{н}}{M_{н}} = \left(\frac{Q_{н}}{Q_{к}}\right) \cdot \left(\frac{Q_{к}}{M_{к}}\right). \quad (25)$$

Научно-технологическое развитие агропромышленного комплекса требует решения вопросов энергосбережения и экологии. Идея совместного учета и интеллектуального управления потоками субстанций оказалась весьма плодотворной для оценки энергоэффективности и экологичности *ИБЭС* [20].

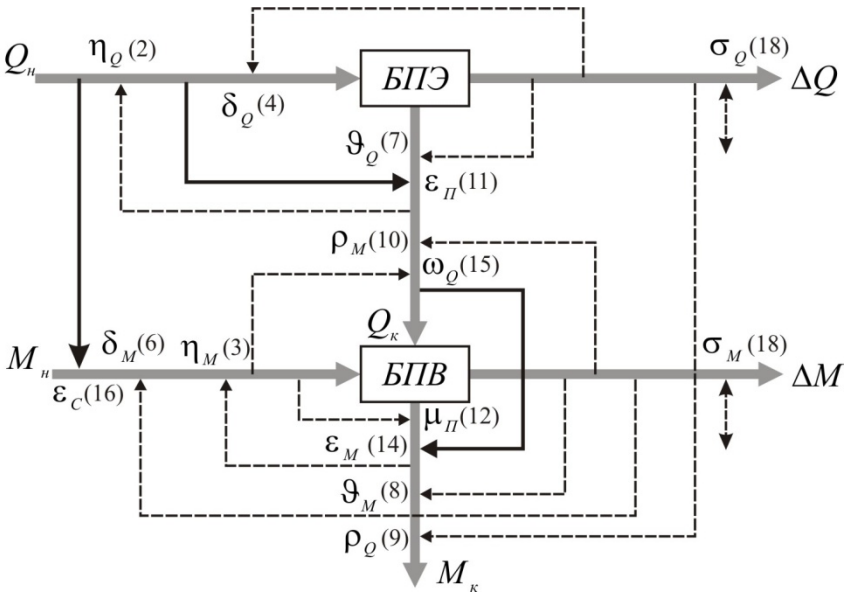


Рис. 2. Соответствие между потоками субстанций и взаимосвязанными с ними показателями

Fig. 2. Basic relationship between the flows of substances and the indicators characterizing their relationship

Ряд предложенных нами показателей совпадает с известными применяемыми показателями. Например, коэффициент конверсии корма *FCR* (*Feed Conversion Ratio*), представляющий собой отношение массы потребленного корма к массе прироста продукции (мяса, молока, яиц), в рамках предложенной модели соответствует показателю $\mu_{П}^{Ж}$. Его типовые значения, согласно оценке J.P. Fry и др. [21], для бройлеров составляют 1,4…1,8 отн. ед., для свиней на откорме – 2,5…3,0 отн. ед., для КРС – 5,6…6,0 отн. ед. и более. Этот же показатель применяется для оценки эффективности использования питательных веществ *NUE*, *Nutrient Use Efficiency* (например, по азоту *NUE-N*, фосфору *NUE-P*, калию *NUE-K* и других элементов), а также для оценки эффективности потребления воды *WUE* (*Water Use Efficiency*). Уровень выделения отходов (количество экскрементов (навоза, мочи) на единицу продукции) может быть охарактеризован показателем $\vartheta_{M}^{Ж}$. Показателем эффективности использования энергии *EUE* (*Energy Use Efficiency*) является отношение энергии, содержащейся в растениеводческой продукции, к затраченной энергии. Ему соответствует показатель $\eta_{Q}^{Р}$.

В данной работе представлен единый подход к характеристике потоков субстанций системой показателей. В результате моделирования установлено, что энергоемкость сырья $\varepsilon_{с}$ отражает количество потребляемой энергии $Q_{н}$, затрачиваемой при обработке единицы используемого вещества $M_{н}$. Меньшие значения $\varepsilon_{с}$ свидетельствуют о меньших энергозатратах. Энергоемкость процессов $\varepsilon_{п}$ отражает то, насколько количество потребляемой энергии $Q_{н}$ превосходит количество полезно используемой энергии $Q_{к}$. Меньшие значения $\varepsilon_{п}$ свидетельствуют о большей энергоэффективности процессов в *ИБЭС*. Энергоемкость продукции $\varepsilon_{м}$ отражает количество полезно используемой энергии $Q_{к}$, приходящейся на синтез единицы полезной продукции $M_{к}$. Меньшее значение $\varepsilon_{м}$ свидетельствует о меньших энергозатратах.

Согласно уравнению (25), связывающему показатели $\varepsilon_{с}$, $\varepsilon_{п}$ и $\varepsilon_{м}$ при $K_{ЭЭ}$ =1, построена плоскость (и ее сечения) (рис. 3).

Поверхность, изображенная на рисунке 3а, представляет собой часть гиперболического параболоида, построенного в квадрантах с положительными значениями показателей. Согласно данным рисунка чем выше $\varepsilon_{п}$ и $\varepsilon_{м}$, тем быстрее растет $\varepsilon_{с}$. Если $\varepsilon_{п}$ и $\varepsilon_{м}$ падают, то снижается энергоемкость сырья $\varepsilon_{с}$.

Рассмотрим частные случаи сечения поверхности характерными плоскостями:

a) при $\varepsilon_{п} = const$ (прямая линия) и, например, $\varepsilon_{п}$ = 1,5 (потери энергии 50%) (рис. 3б). С ростом $\varepsilon_{м}$ энергоемкость сырья $\varepsilon_{с}$ увеличивается;

b) при $\varepsilon_{м} = const$ (прямая линия) и, например, $\varepsilon_{м}$ = 2 (каждая единица массы полезного продукта содержит 2 единицы полезно используемой энергии) (рис. 3в). С ростом $\varepsilon_{п}$ увеличивается $\varepsilon_{с}$.

Вывод 1. При фиксированной $\varepsilon_{п}$ (или $\varepsilon_{м}$) величина $\varepsilon_{с}$ увеличивается при увеличении $\varepsilon_{м}$ (или $\varepsilon_{п}$);

c) при симбатном изменении $\varepsilon_{п}$ и $\varepsilon_{м}$ в сечении образуется парабола, поскольку при $\varepsilon_{п} = \varepsilon_{м}$, $\varepsilon_{С} = \varepsilon_{П}^{2}$ или $\varepsilon_{С} = \varepsilon_{M}^{2}$ (рис. 3г).

Вывод 2. Одновременное снижение $\varepsilon_{п}$ и $\varepsilon_{м}$ более эффективно обеспечивает снижение $\varepsilon_{с}$;

d) при $\varepsilon_{С} = const$ (*гипербола*) и, например, $\varepsilon_{с}$ = 6, $\varepsilon_{П} \cdot \varepsilon_{M}$ = 6 (рис. 3д). Гиперболическая зависимость означает компромисс между $\varepsilon_{п}$ и $\varepsilon_{м}$: можно допустить повышение одного из показателей, но тогда придется обеспечить снижение другого.

Вывод 3. Для заданной энергоемкости сырья $\varepsilon_{с}$ существует множество вариантов технологии, при которых возможны разные комбинации $\varepsilon_{п}$ и $\varepsilon_{м}$.

На рисунке 3е все сечения показаны вместе.

В работе дан один из возможных наборов показателей. Анализ и синтез системы показателей являются задачей дальнейших исследований. В качестве первейшей задачи можно указать их «симметризацию» с выявлением физического смысла вновь введенных показателей. Другой перспективой исследований можно считать экспериментальное получение численных значений введенных показателей.

Концепция энергоэкологичности, означающая совместное рассмотрение вопросов энергоэффективности и экологичности путем цифровизации, внедрения новейших информационных автоматизированных систем, оптимизации технологических процессов, контроля их параметров, позволила рассмотреть энергетику *ИБЭС* с учетом ее многоуровневости и закономерностей взаимодействия сельскохозяйственных биологических объектов и искусственной среды обитания[5].

Совершенствование систем и процессов в *ИБЭС* с применением ресурсов энергосбережения и мер по его реализации является важнейшей частью организации производства. В аспекте энергосбережения оптимальное значение энергоемкости достигается путем минимизации энергоемкости конечных значений всех энерготехнологических процессов электроэнергетической системы, что требует разработки и применения унифицированной методики анализа эффективности энерготехнологических процессов.

[5] Ракутько С.А. Прикладная теория энергосбережения: научные основы, применение в агроинженерном образовании: Монография. СПб.: ЛЕМА, 2024. 254 с.

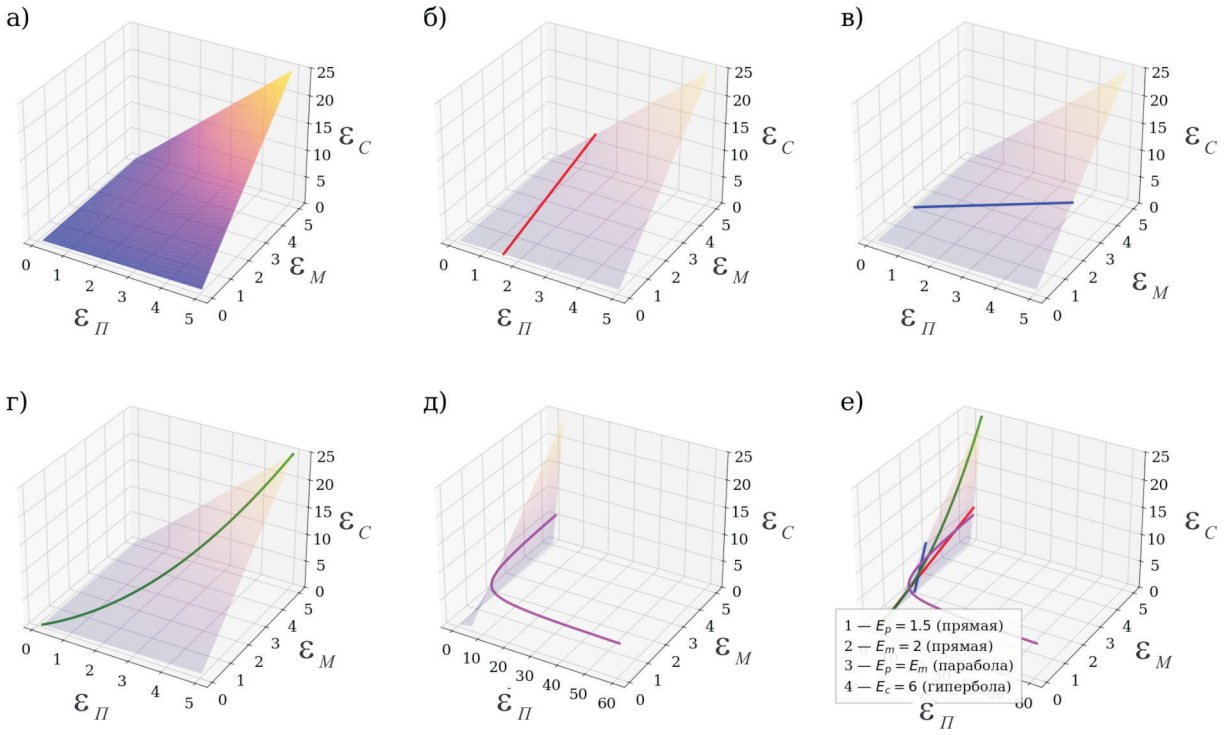


Рис. 3. Плоскость уравнения баланса субстанций и ее сечения

Fig. 3. Plane of the substance balance equation and its cross-sections

Выводы

1. Разработанная компартментальная модель сельскохозяйственной искусственной биоэнергетической системы (*ИБЭС*) позволяет комплексно оценить энергоэффективность и экологичность сельскохозяйственных систем, объединяющих животноводство и растениеводство. Модель основана на взаимосвязи потоков вещества и энергии между компонентами системы и позволяет производить оптимизацию технологических процессов.

2. Модель включает в себя энерготехнологические процессы животноводства и растениеводства, а также описывает потоки субстанций (вещества и энергии) как внутри системы, так и между системой и окружающей средой, что позволяет проводить комплексный эколого-энергетический анализ.

3. Предложенный набор показателей характеризует энергетическую и материальную эффективность, потери, диссипацию, энерго- и массоемкость, коэффициенты обмена и синтеза. Введенный интегральный показатель (коэффициент энергоэкологичности) отражает устойчивость и эффективность функционирования *ИБЭС*.

4. Учитывая энергоемкость сырья, энергоемкость процессов и энергоемкость продукции, можно оценить энергоэкологичность *ИБЭС*. Анализ модели показал, что одновременное снижение энергоемкости процессов и энергоемкости продукции является наиболее эффективным способом уменьшения энергоемкости сырья. Это открывает возможности для разработки инновационных технологий, направленных на минимизацию энергопотребления и повышение устойчивости агроэкосистем.

Список источников

1. Брюханов А.Ю., Попов В.Д., Васильев Э.В., Папушин Э.А. Концепция управления экологической безопасностью агроэкосистем // АгроЭкоИнженерия. 2022. № 4 (113). С. 4-18. EDN: CMQXUA

2. Барцев С.И., Дегерменджи А.Г. Замкнутые экологические системы: от биосферы к системам жизнеобеспечения и обратно // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93, № 9. С. 876-885. https://doi.org/10.31857/S0869587323090049

3. Hercher-Pasteur J., Loiseau E., Sinfort C. et al. Energetic assessment of the agricultural production system. A review. Agronomy for Sustainable Development. 2020;40:29. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00627-2

References

1. Briukhanov A.Yu., Popov V.D., Vasilev E.V., Papushin E.A. Management concept of ecological safety of agro-ecosystems. *AgroEkoInzheneriya*. 2022;4(113):4-18. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-4113-4-18

2. Bartsev S.I., Degermendzhi A.G. Closed ecological systems: from the biosphere to life support systems and back. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2023;93(9):876-885. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S0869587323090049

3. Hercher-Pasteur J., Loiseau E., Sinfort C. et al. Energetic assessment of the agricultural production system. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2020;40:29. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00627-2

4. Тимофеев Е.В., Эрк А.Ф., Судаченко В.Н., Размук В.А. Оптимизация энергоснабжения сельскохозяйственных объектов методом математического моделирования структуры энергетических потоков // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 94. С. 48-55. https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10006

5. Попов В.Д., Гордеев В.В., Хазанов Е.Е., Хазанов В.Е. Научные принципы экологически безопасного функционирования системы «Животное-растение» // Экология и сельскохозяйственная техника: Материалы 6-й Международной научно-практической конференции. 2009. С. 47-58. EDN: RZOYKJ

6. Гордеев В.В., Хазанов В.Е., Миронов В.Н. и др. Молочная ферма с теплицей // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2014. № 3 (15). С. 184-187. EDN: SKDOLD

7. Хазанов Е.Е. Энергетический потенциал использования сточных вод доильных залов молочных ферм в культивационных сооружениях // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2001. № 72. С. 120-124. EDN: SZTROL

8. Миронова Т.Ю., Гордеев В.В. Экономические аспекты применения системы внутрипочвенного внесения навозосодержащих стоков доильных залов в теплице // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 3 (100). С. 161-170. https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10199

9. Хазанов Е.Е. Оценка энергетической эффективности безотходной молочной фермы-теплицы // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 1998. № 68. С. 70-78. EDN: TBGJHH

10. Хайриддинов Б.Э., Холмирзаев Н.С., Эргашев Ш.Х. и др. Комбинирование гелиотеплицы-животноводческих ферм с подпочвенным аккумулятором тепла // Символ науки: Международный научный журнал. 2017. Т. 2, № 1. С. 16-23. EDN: YGWNSV

11. Тайсаева В.Т., Мазаев Л.Р. Разработка энергоэффективных биотехнических систем на примере молочной фермы и солнечной теплицы с тепловыми аккумуляторами // Ползуновский вестник. 2014. № 4-1. С. 173-177. EDN: SZJREB

12. Хазанов Е.Е., Хазанова С.Г. Энергетический потенциал использования вентиляционных выбросов коровника в прифермской теплице // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2001. № 72. С. 113-120. EDN: SZTROB

13. Миронов В.Н., Гордеев В.В., Миронова Т.Ю. Энергетический потенциал вентиляционных выбросов коровника // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 1 (98). С. 201-209. https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10138

14. Дорохов А.С., Кирсанов В.В., Баишева Р.А., Кирсанов С.В. Искусственный интеллект в управлении животноводческой фермой // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 1. С. 16-25. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-16-25

15. Patten B.C., Higashi M. Modified cycling index for ecological applications. Ecological Modelling. 1984;25(1-3):69-83. https://doi.org/10.1016/0304-3800(84)90033-4

16. Зайцева Н.К., Гаркуша К.Э. Модель энергетических потоков в животноводческих комплексах // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2002. № 2. С. 89-93. https://energy.bntu.by/jour/article/view/1329

4. Timofeev E.V., Erk A.F., Sudachenko V.N., Razmuk V.A. Optimization of power supply of agricultural facilities by mathematical modeling of power flows structure. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rasteniyevodstva i zhivotnovodstva*. 2018;94:48-55. (In Russ.) https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10006

5. Popov V.D., Gordeev V.V., Khazanov E.E., Khazanov V.E. Scientific principles of environmentally safe functioning of the "animal-plant" system. In: *Ekologiya i selskokhozyaystvennaya tekhnika*. *Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference*. 2009;47-58. (In Russ.)

6. Gordeev V.V., Khazanov V.E., Mironov V.N. et al. Dairy farm with a greenhouse. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatelskogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva.* 2014;3(15):184-187. (In Russ.)

7. Khazanov E.E. Energy potential of utilizing wastewater from milking parlors of dairy farms in greenhouse facilities. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2001;72:120-124. (In Russ.)

8. Mironova T.Yu., Gordeev V.V. Economic aspects of subsurface application of manure-bearing wastewater from milking parlours in a greenhouse. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2019;3(100):161-170. (In Russ.) https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10199

9. Khazanov E.E. Evaluation of the energy efficiency of a waste-free dairy farm-greenhouse. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 1998;68:70-78. (In Russ.)

10. Khairiddinov B.E., Kholmirzaev N.S., Ergashev Sh.Kh. et al. Integration of solar greenhouse-and-livestock farm systems with a subsoil heat accumulator. *Symbol of Science*: *International Scientific Journal*. 2017;2(1):16-23. (In Russ.)

11. Taisaeva V.T., Mazaev L.R. Development of energy-efficient biotechnical systems using the example of a dairy farm and a solar greenhouse with heat accumulators. *Polzunovskiy Vestnik*. 2014;4-1:173-177. (In Russ.)

12. Khazanov E.E., Khazanova S.G. Energy potential of using ventilation emissions from a cowshed in an on-farm greenhouse. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2001;72:113-120. (In Russ.)

13. Mironov V.N., Gordeev V.V., Mironova T.Yu. Energy potential of ventilation emissions from a cow barn. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2019;1(98):201-209. (In Russ.) https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10138

14. Dorokhov A.S., Kirsanov V.V., Baisheva R.A., Kirsanov S.V. Use of artificial intelligence for managing a livestock farm. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(1):16-25 (In Russ.) https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-16-25

15. Patten B.C., Higashi M. Modified cycling index for ecological applications. *Ecological Modelling*. 1984;25(1-3):69-83. https://doi.org/10.1016/0304-3800(84)90033-4

16. Zaitseva N.K., Garkusha K.E. Model of energy flows in livestock facilities. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. 2002;2:89-93. (In Russ.) https://energy.bntu.by/jour/article/view/1329

17. Rakutko S.A., Rakutko E.N. Simulation and numerical analysis of energy-and-ecological compatibility of indoor plant lighting. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019;13(3):11-17. (In Russ.) https://doi.org/10.22314/20737599-2019-13-3-11-17

17. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Моделирование и численный анализ энергоэкологичности светокультуры // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2019. Т. 13, № 3. С. 11-17. https://doi.org/10.22314/20737599-2019-13-3-11-17

18. Фельдман О.В. Потоковые модели агроэкосистем // Математическое моделирование. 1999. Т. 11, № 10. С. 31-48. https://share.google/83HKqegwN6LhjQk9P

19. Ракутько С.А. От понятия потребительской энергетической системы к иерархической информационной модели искусственной биоэнергетической системы // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2014. № 35. С. 312-318. EDN: SGOMDL

20. Ракутько Е.Н., Миронова Т.Ю., Гордеева Т.И., Васькин А.Н. Управление искусственной агроэкосистемой, утилизирующей стоки и выбросы животноводческих ферм // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 2 (119). С. 71-82. EDN: HEIUSM

21. Fry J.P., Mailloux N.A., Love D.C., Milli M.C., Cao L. Feed conversion efficiency in aquaculture: do we measure it correctly? Environmental Research Letter. 2018;13(2):024017. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa273

18. Feldman O.V. Flow models of agricultural osystems. *Matematicheskoe modelirovanie*. 1999;11(10):31-48.

19. Rakutko S.A. From the concept of a consumer energy system to a hierarchical information model of an artificial bioenergy system. *Izvestiya Saint Petersburg State Agrarian University*. 2014(35):312-318. (In Russ.)

20. Rakutko E.N., Mironova T.Yu., Gordeeva T.I., Vaskin A.N. Management of an artificial agro-ecosystem, which utilizes wastewater and emissions from livestock farms. *AgroEkoInzheneriya*. 2024;2(119):71-82. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-2119-71-81

21. Fry J.P., Mailloux N.A., Love D.C. et al. Feed conversion efficiency in aquaculture: do we measure it correctly? *Environmental Research Letter*. 2018;13(2):024017. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa273

Информация об авторах

[1] **Ракутько Сергей Анатольевич,** д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник отдела агроэкологии в животноводстве; sergej1964@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-2454-4534

[2] **Ракутько Елена Николаевна,** научный сотрудник отдела агроэкологии в животноводстве; elena.rakutko@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-3536-9639

[1, 2] Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ; 196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., 3

Author Information

Sergei A. Rakutko[1], DSc (Eng), Chief Research Engineer, Department of Agroecology in Livestock Production, sergej1964@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-2454-4534

Elena N. Rakutko[2], Research Engineer, Department of Agroecology in Livestock Production; elena.rakutko@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-3536-9639

[1, 2] Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoe Highway, Tyarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russian Federation

Конфликт интересов

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

Conflict of interest

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

Статья поступила 08.04.2026, после рецензирования и доработки 18.05.2026, принята к публикации 21.05.2026

Received 08.04.2026; Revised 18.05.2026; Accepted 21.05.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.3:532.5
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-48-56

Верификация полуэмпирической модели дисперсности распыла двухфазной пневматической форсункой с тангенциальной закруткой воздуха

В.В. Красовский[1]✉, ***Ю.Б. Гербер***[2]

[1, 2] Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского; г. Симферополь, Российская Федерация

[1] Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма; г. Симферополь, Российская Федерация

[1] vitaliy-krasovskiy@mail.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-5556-9531

[2] gerber_1961@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-3224-6833

Аннотация. Дифференцированное внесение средств защиты растений требует создания распылителей, способных сохранять мелкодисперсность факела при снижении расхода жидкости. Двухфазная пневматическая форсунка с тангенциальной закруткой воздуха является перспективным решением, однако для такого устройства полуэмпирическая модель дисперсности не верифицирована. С целью верификации полуэмпирической модели аналитически рассчитан прогнозируемый среднесаутровский диаметр капель (SMD) и сопоставлен со значением, полученным CFD-моделированием. Аналитическая модель определения SMD построена на основе корреляции Нукиямы-Танасавы. CFD-моделирование выполнено в программе ANSYS Fluent (модель Mixture + DPM, турбулентность – k-ω SST) для девяти режимов, представленных комбинацией скорости воды 4, 6, 8 м/с и скорости воздуха 100, 150, 200 м/с. Определено влияние параметра GMR (отношение массового расхода газа к массовому расходу жидкости) на сходимость аналитических и CFD-расчетов SMD. Установлено, что с ростом параметра GMR обе модели демонстрируют монотонное уменьшение значения SMD в диапазоне 0,0307…0,1227. Количественные расхождения наблюдаются для режимов с максимальным (18,4%) и минимальным (–14,3%) GMR. Наилучшая сходимость результатов достигнута при GMR = 0,04…0,06. Расхождение результатов обусловливают тангенциальная закрутка воздуха, особенности моделирования вторичного дробления и эмпирические коэффициенты корреляции. Установили, что корреляция Нукиямы-Танасавы для закрученных течений должна учитывать поправочный коэффициент. При условии GMR < 0,035 предлагаем поправочный коэффициент 0,85…0,90, при GMR > 0,080 рекомендуем коэффициент 1,10…1,20, для диапазона GMR = 0,035…0,080 поправка не требуется. Предложенные поправочные коэффициенты позволят повысить точность инженерных расчетов SMD при проектировании двухфазных форсунок, обеспечивающих дифференцированное внесение средств защиты растений.

Ключевые слова: двухфазная пневматическая форсунка; тангенциальная закрутка воздуха; среднесаутровский диаметр; корреляция Нукиямы-Танасавы; CFD-моделирование; ANSYS Fluent; дифференцированное внесение средств защиты растений

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 26-26-20042 «Исследование динамики взаимодействия рабочих органов с растениями для создания адаптивных систем защиты садовых насаждений (на примере Крымского региона)».

Для цитирования: Красовский В.В., Гербер Ю.Б. Верификация полуэмпирической модели дисперсности распыла двухфазной пневматической форсункой с тангенциальной закруткой воздуха // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 48-56. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-48-56

© Красовский В.В., Гербер Ю.Б., 2026

ORIGINAL ARTICLE

Verification of a semi-empirical model of spray dispersion for a two-phase pneumatic nozzle with tangential air swirl

V.V. Krasovskiy[1]✉, ***Yu.B. Gerber***[2]

[1,2] V.I. Vernadsky Crimean Federal University; Simferopol, Russia

[1] Research Institute of Agriculture of Crimea; Simferopol, Russia

[1] vitaliy-krasovskiy@mail.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-5556-9531

[2] gerber_1961@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-3224-6833

Abstract. Variable-rate application (VRA) of plant protection products necessitates the development of atomizers capable of maintaining fine droplet dispersion at reduced liquid flow rates. Two-phase pneumatic nozzles with tangential air swirl offer a promising solution; however, the semi-empirical models governing their dispersion characteristics require rigorous verification. In this study, the Sauter mean diameter (SMD) predicted by an analytical model based on the Nukiyama–Tanasawa correlation was compared against Computational Fluid Dynamics (CFD) benchmarks. CFD simulations were performed in ANSYS Fluent using the Mixture model coupled with the Discrete Phase Model (DPM) and the k-ω SST turbulence closure across nine operating modes (water velocities: 4, 6, and 8 m/s; air velocities: 100, 150, and 200 m/s). The influence of the gas-to-liquid mass ratio (GMR) on the convergence of analytical and CFD calculations of the model was evaluated. Both models demonstrated a monotonic decrease in SMD as GMR increased from 0.0307 to 0.1227. Notable quantitative discrepancies occurred at GMR extremes (+18.4% and –14.3%), while the highest agreement was achieved within GMR = 0.04-0.06. The deviations are attributed to tangential swirl effects and secondary breakup dynamics not captured by conventional correlations. The findings prove that the Nukiyama–Tanasawa correlation for swirling flows requires a correction factor. To improve predictive accuracy, GMR-dependent correction factors have been proposed: 0.85-0.90 for GMR < 0.035, and 1.10-1.20 for GMR > 0.080, with no correction required for the intermediate range (GMR = 0.035-0.080). These refinements enhance the reliability of engineering calculations of SMD when designing two-phase pneumatic nozzles for variable-rate pesticide application.

Keywords: two-phase pneumatic nozzle; tangential air swirl; Sauter mean diameter (SMD); Nukiyama–Tanasawa correlation; CFD simulation; ANSYS Fluent; variable-rate application (VRA) of plant protection products

Funding: The work was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 26-26-20042, "Study of the Dynamics of Interaction Between Working Elements and Plants for the Development of Adaptive Protection Systems for Orchard Plantations (Case Study of the Crimean Region)."

For citation: Krasovskiy V.V., Gerber Yu.B. Verification of a semi-empirical model of spray dispersion for a two-phase pneumatic nozzle with tangential air swirl. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):48-56. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-48-56

Введение

Дифференцированное внесение средств защиты растений (СЗР), при котором норма расхода рабочей жидкости адаптируется к пространственной неоднородности состояния посевов, повышает ресурсоэффективность и экологическую безопасность сельскохозяйственного производства [1-3]. Однако широкое внедрение этой технологии сдерживается фундаментальным техническим противоречием. Как отмечают A.H. Lefebvre[1], Д.М. Юмаев, П.Ю. Коренков и др. [4, 5], традиционные гидравлические форсунки не являются способными сохранять требуемое качество распыла при значительном снижении расхода жидкости. В частности, S. Nukiyama, R.D. Reitz и др. [6, 7] уточняют, что при снижении давления резко падает энергия диспергирования, и это приводит к укрупнению капель и «схлопыванию» факела.

В качестве альтернативы В.Г. Гейер и В.Н. Соколов[2] разработали систему двухфазного (пневматического) распыления, где диспергирование осуществляется высокоскоростным потоком воздуха. Преимуществом таких систем, по мнению В.В. Цыбулевского и др. [3], является возможность независимого управления потоками жидкости и газа. Согласно расчетам [2, 4] при снижении расхода жидкости на 25…30% и сохранении постоянного давления воздуха параметр GMR (gas-to-liquid mass ratio – отношение массового расхода воздуха к массовому расхо-

[1] Lefebvre A.H., McDonell V.G. Atomization and Sprays. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017. 300 p.

[2] Гейер В.Г., Соколов В.Н. Струйные аппараты. М.: Энергия, 1977. 128 с.

ду жидкости) возрастает на 22…33%, а угол распыла не сужается, а расширяется.

По мнению A.H. Lefebvre[3], ключевым параметром качества распыления является дисперсный состав факела, в качестве количественной меры которого служит среднесаутровский диаметр капель (Sauter Mean Diameter – SMD). От показателя SMD зависят покрывающая способность, удерживаемость на листьях, глубина проникновения в растительный покров и риск сноса капель [4, 8, 9]. Согласно стандарту[4] ASABE S572.1 и исследованиям R. Murugan, Д.В. Гвоздякова, L. Jiang и др. [8-10] для эффективной обработки большинства культур требуется мелкодисперсный распыл с показателем SMD в диапазоне 50…150 мкм, а для специальных задач необходимым является ультрамелкодисперсный распыл (менее 50 мкм).

Для инженерного прогнозирования SMD в двухфазных форсунках широко используются полуэмпирические корреляции. Наиболее известна корреляция Нукиямы-Танасавы [6], разработанная для коаксиальных форсунок с осевой подачей воздуха. Но для форсунки с тангенциальной закруткой воздуха, по мнению H. Jin, P. Wang и др. [11, 12], механизм диспергирования существенно изменяется. Тангенциальная закрутка воздуха создает дополнительные центробежные силы и турбулентные пульсации, которые могут интенсифицировать распад жидкой пленки.

Численные исследования двухфазных форсунок и сопел [13-15], а также смежные CFD-исследования двухфазных сопел [16] показали, что систематические количественные сравнения аналитических корреляций SMD с результатами CFD-моделирования[4] для двухфазных форсунок с тангенциальной закруткой воздуха практически отсутствуют. Также не определены границы применимости корреляции Нукиямы-Танасавы для закрученных течений в диапазоне режимов, характерном для дифференцированного внесения средств защиты растений [1, 2, 4].

Цель исследований: верификация полуэмпирической модели дисперсности распыла в двухфазной пневматической форсунке с тангенциальной закруткой воздуха путем сравнения аналитической корреляции Нукиямы-Танасавы и CFD-моделирования.

Материалы и методы

В качестве объекта исследований послужила двухфазная пневматическая форсунка с тангенциальной закруткой воздуха, предназначенная для распыления рабочей жидкости (воды) высокоскоростным потоком воздуха. В работе исследуется физический процесс взаимодействия закрученного потока воздуха с жидкостью в камере смешения и последующего диспергирования.

Для численного моделирования в ANSYS Fluent построена трехмерная геометрическая модель расчетной области. Детальное описание геометрии, параметров расчетной сетки и граничных условий приведено в работе [2], где исследовалась геометрия факела той же форсунки. Двухфазная пневматическая форсунка представляет собой устройство, включающее в себя центральный канал воды диаметром 2,0 мм, два тангенциальных канала воздуха диаметрами 2,0 мм каждый, расположенных на расстоянии 2,9 мм от оси, камеру смешения диаметром 8,0 мм и длиной 14,5 мм, выходное сопло диаметром 2,0 мм и длиной 0,5 мм и расширенную область за срезом сопла размером 265 мм для развития факела.

Выбранные размеры соответствуют диапазонам, характерным для пневматических распылителей сельскохозяйственного назначения[5] [3-5, 17], и обеспечивают сильную закрутку потока[6] (геометрическая характеристика – A = 1,33…2,77) [3, 11].

Для аналитического прогнозирования среднесаутровского диаметра капель использована полуэмпирическая корреляция Нукиямы-Танасавы в форме, рекомендованной для пневматических форсунок [6, 8]:

$$SMD = 0{,}585 \cdot \sqrt{\frac{\sigma \cdot \rho_l}{W_g^2 \cdot \rho_g}} + 2{,}82 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{\mu_l^2 \cdot D_h}{\sigma \cdot \rho_l}\right)^{0{,}45} \cdot \left(\frac{1000 \cdot Q_l}{Q_g}\right)^{1{,}5}, \quad (1)$$

где SMD – среднесаутровский диаметр капли, мкм; σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости (0,072 Н/м); ρ_l – плотность жидкости (1000 кг/м^3); ρ_g – плотность воздуха (1,2 кг/м^3); W_g – скорость воздуха на выходе из тангенциальных каналов, м/с; μ_l – динамическая вязкость жидкости (0,001 Па·с); D_h – характерный размер (диаметр выходного сопла, 0,002 м); Q_l – объемный расход жидкости, м^3/с; Q_g – объемный расход воздуха, м^3/с.

[3] Lefebvre A.H., McDonell V.G. Atomization and Sprays. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017. 300 p.

[4] ASABE S572.1. Spray Nozzle Classification by Droplet Spectra. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009. 8 p.

[4] ANSYS Fluent User's Guide. Release 2023 R2. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc.; 2023. Available from: https://ansyshelp.ansys.com/ [дата обращения: 08.04.2026].

[5] Цыбулевский В.В. Опрыскиватели для обработки садов пневматическими щелевыми распылителями: Монография. Краснодар: Новация, 2024. 120 с.

[6] Гейер В.Г., Соколов В.Н. Струйные аппараты. М.: Энергия, 1977. 128 с.

Первый член корреляции описывает вклад аэродинамического диспергирования (размер капли обратно пропорционален скорости воздуха), второй член учитывает влияние вязкости жидкости и соотношение расходов фаз.

Постоянные физические свойства приняты для системы «Вода-воздух». Объемные расходы Q_l и Q_g рассчитывались на основе заданных скоростей и площадей сечений каналов с использованием коэффициентов расхода $\mu_l = 0{,}3$ и $\mu_g = 0{,}4$, учитывающих гидравлические потери и закрутку потока.

Численное моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS Fluent 2023 R2 [13, 14, 16]. Расчетная *CFD*-модель базируется на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса (RANS).

Для описания движения сплошных фаз (вода и воздух) применена эйлерова модель смеси (Mixture), решающая уравнения сохранения массы, импульса и энергии для смеси в целом, а также уравнение переноса объемной доли воды. После достижения сходимости по сплошным фазам активировалась дискретно-фазовая модель (DPM) для отслеживания траекторий капель [10, 14, 15].

Для замыкания уравнений Рейнольдса выбрана двухпараметрическая модель турбулентности *k*-ω SST (Shear Stress Transport) [18], хорошо зарекомендовавшая себя для расчета закрученных течений с высокими градиентами скорости.

Дискретизация уравнений конвекции выполнена по схеме второго порядка точности. Связь давления и скорости описана алгоритмом SIMPLE. Критерии сходимости: невязки < 10^{-4}, стабилизация интегральных расходов (изменение < 0,1% за 100 итераций).

Параметры неструктурированной тетраэдральной сетки (1,2 млн ячеек, призматические слои у стенок) и граничные условия (velocity inlet для воды и воздуха, pressure outlet на выходе) подробно описаны в работе [2], где показано, что сеточная сходимость достигнута (отклонение между базовой и мелкой сетками < 3%).

Для исследования влияния параметров режима на процесс двухфазного распыления реализован полный факторный эксперимент 3×3. Варьируемыми параметрами являются средняя скорость воды на входе в центральный канал W_l и средняя скорость воздуха на входе в тангенциальные каналы W_g.

Диапазоны скоростей выбраны на основе следующих соображений:

– $W_l = 4, 6, 8$ м/с соответствует изменению объемного расхода жидкости от 0,74 до 1,48 л/мин (при площади водяного сопла $3{,}09\times10^{-6}$ м^2), что перекрывает номинальный режим (1,5 л/мин) и режим пониженного расхода (снижение до 25…30%);

– $W_g = 100$, 150, 200 м/с охватывает диапазон от умеренного до высокоскоростного истечения, характерного для пневматических форсунок с давлением воздуха 2,5…3,0 бар [3, 5, 17].

Комбинации значений W_l и W_g образуют 9 расчетных режимов (табл. 1).

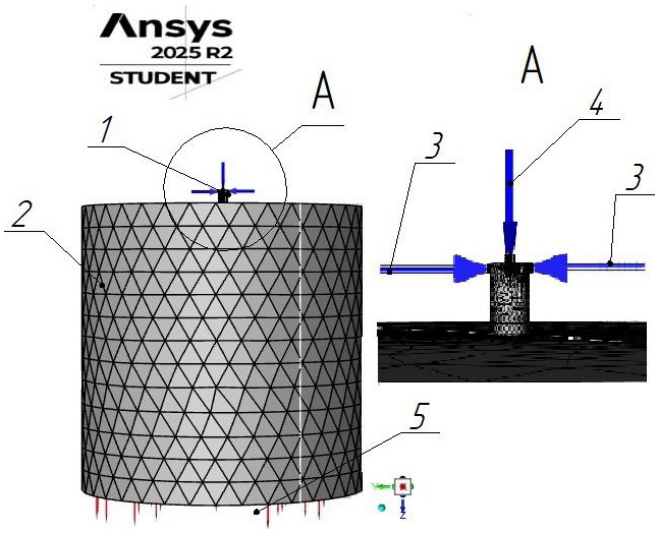


Рис. 1. Трехмерная модель расчетной области двухфазной пневматической форсунки в ANSYS Fluent:
1 – форсунка; 2 – расчетная область за срезом сопла для развития факела распыла; 3 – входы воздуха (inlet_air); 4 – вход воды (inlet_water); 5 – открытая граница на выходе из расчетной области (outlet)

Fig. 1. Three-dimensional computational domain model of the two-phase pneumatic nozzle in ANSYS Fluent:
1 – nozzle; 2 – computational domain downstream of the nozzle outlet for spray development; 3 – air inlets (inlet_air); 4 – water inlet (inlet_water); 5 – open boundary at the outlet of the computational domain (outlet)

Таблица 1

План численных экспериментов

Table 1

Plan of numerical experiments

Обозначение	W_l, м/с	W_g, м/с
W4_A100	4	100
W4_A150	4	150
W4_A200	4	200
W6_A100	6	100
W6_A150	6	150
W6_A200	6	200
W8_A100	8	100
W8_A150	8	150
W8_A200	8	200

Для каждого режима выполнен полный цикл расчета: решение уравнений многофазной гидродинамики до установления стационарного состояния (контроль невязок и интегральных расходов), затем – активация DPM-модели для отслеживания траекторий капель и сбора статистики по дисперсному составу.

Среднесаутровский диаметр капель D в CFD-модели определен на основе статистики траекторий дискретных частиц (DPM) на выходе из расчетной области (поверхность на расстоянии 265 мм от среза сопла). Статистика собиралась после достижения установившегося режима в течение 5000 временных шагов.

Для каждого режима фиксировались распределение капель по диаметрам, среднесаутровский диаметр $SMD = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2}$ и количество капель в выборке (не менее 10 000 для обеспечения статистической значимости).

Результаты и их обсуждение

Для девяти расчетных режимов определены массовые расходы воды и воздуха, а также рассчитан безразмерный параметр GMR (Gas-to-Mass Ratio), характеризующий отношение массового расхода воздуха к массовому расходу жидкости:

$$GMR = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_l}, \quad (2)$$

где $\dot{m}_g$ – массовый расход воздуха, кг/с; $\dot{m}_l$ – массовый расход жидкости, кг/с.

Параметр показывает, сколько килограммов газа приходится на 1 кг жидкости; с его ростом доля газа увеличивается, что интенсифицирует диспергирование и уменьшает SMD.

В таблице 2 представлены полученные значения.

Анализ таблицы 2 показывает, что GMR изменяется в диапазоне от 0,0307 (режим W8_A100) до 0,1227 (режим W4_A200). Увеличение скорости воздуха при фиксированной скорости воды приводит к линейному росту GMR. Снижение скорости воды (уменьшение расхода жидкости) при фиксированной скорости воздуха также вызывает увеличение GMR.

Для каждого режима рассчитаны значения среднесаутровского диаметра капель SMD двумя способами: аналитически (по корреляции Нукиямы-Танасавы) и численно (по результатам CFD-моделирования с использованием DPM-статистики). Результаты сравнения представлены в таблице 3 и на рисунке 2.

Из данных таблицы 3 и рисунка 2 следует, что обе модели демонстрируют одинаковый качественный

Таблица 2

Массовые расходы и параметр GMR для 9 режимов

Table 2

Mass flow rates and GMR parameter for nine modes

Режим	W_l, м/с	W_g, м/с	$\dot{m}_l$, кг/с	$\dot{m}_g$, кг/с	*GMR*
W4_A100	4	100	0,01234	0,000757	0,0614
W4_A150	4	150	0,01234	0,001136	0,0920
W4_A200	4	200	0,01234	0,001514	0,1227
W6_A100	6	100	0,01851	0,000757	0,0409
W6_A150	6	150	0,01851	0,001136	0,0614
W6_A200	6	200	0,01851	0,001514	0,0818
W8_A100	8	100	0,02468	0,000757	0,0307
W8_A150	8	150	0,02468	0,001136	0,0460
W8_A200	8	200	0,02468	0,001514	0,0614

Таблица 3

Сравнение аналитических и CFD-значений SMD

Table 3

Comparison of analytical and CFD SMD values

Режим	GMR	$SMD_{аналит}$, мкм	SMD_{CFD}, мкм	Отклонение, %
W4_A100	0,0614	65	68	+4,6
W4_A150	0,0920	48	54	+12,5
W4_A200	0,1227	38	45	+18,4
W6_A100	0,0409	85	84	–1,2
W6_A150	0,0614	65	70	+7,7
W6_A200	0,0818	52	60	+15,4
W8_A100	0,0307	105	90	–14,3
W8_A150	0,0460	80	78	–2,5
W8_A200	0,0614	65	68	+4,6

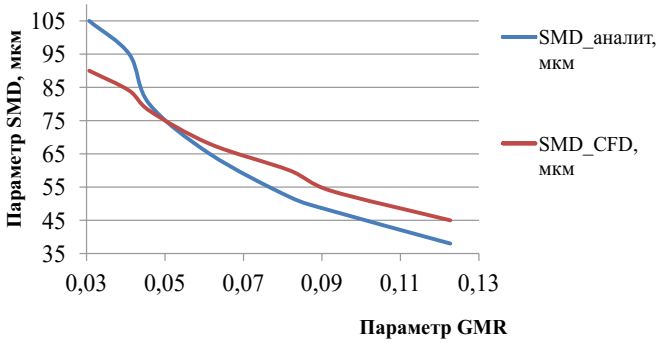


Рис. 2. Сравнение аналитической зависимости SMD от GMR (корреляция Нукиямы-Танасавы) с CFD-значениями

Fig. 2. Comparison of the analytical relationship between SMD and GMR (Nukiyama–Tanasawa correlation) with CFD values

тренд: с ростом параметра GMR (увеличением скорости воздуха или уменьшением расхода воды) SMD монотонно уменьшается. Однако наблюдаются систематические количественные расхождения.

При низких значениях GMR (режим W8_A100, GMR = 0,0307) аналитическая модель дает SMD = = 105 мкм, при CFD-моделировании SMD = 90 мкм, отклонение – 14,3% (аналитика завышает).

При высоких значениях GMR (режим W4_A200, GMR = 0,1227) аналитическая модель дает SMD = 38 мкм, моделирование показывает 45 мкм, отклонение составляет +18,4% (аналитика занижает).

Наилучшая сходимость наблюдается в диапазоне GMR = 0,04…0,06 (режимы W6_A100, W8_A150, W6_A150), где отклонение не превышает 5% по абсолютной величине.

Для визуализации совместного влияния скоростей воды и воздуха на дисперсность распыла построены поверхности отклика SMD по данным аналитической модели и CFD-расчетов (рис. 3).

Анализ поверхностей отклика позволяет сделать следующие выводы:

1. SMD уменьшается с ростом скорости воздуха W_g при всех значениях W_l. Этот эффект обусловлен увеличением аэродинамических сил, диспергирующих жидкость.

2. SMD уменьшается со снижением скорости воды W_l (уменьшением расхода жидкости). При постоянной скорости воздуха снижение W_l приводит к уменьшению соотношения расходов Q_l/Q_g, что уменьшает второй член корреляции.

3. Минимальные значения SMD (45 мкм по CFD, 38 мкм по аналитике) достигаются в режиме W4_A200 (W_l = 4 м/с, W_g = 200 м/с).

4. Максимальные значения SMD (90 мкм по CFD, 105 мкм по аналитике) достигаются в режиме W8_A100 (W_l = 8 м/с, W_g = 100 м/с).

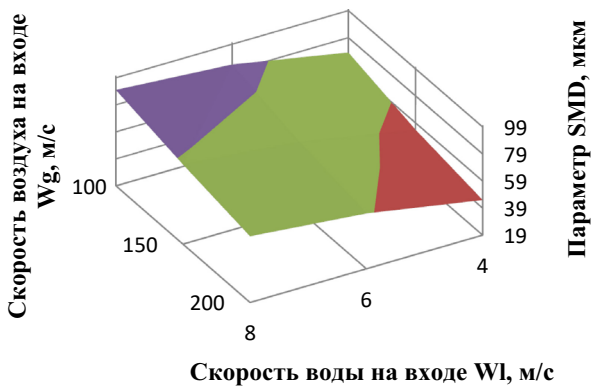


Рис. 3. Поверхность отклика SMD в зависимости от скоростей воды W_l и воздуха W_g

Fig. 3. Response surface of SMD as a function of water velocity W_l and air velocity W_g

Выявленные расхождения имеют систематический характер и могут быть объяснены следующими тремя причинами:

1. Влияние тангенциальной закрутки воздуха. Корреляция Нукиямы-Танасавы разработана для коаксиальных форсунок с осевой подачей воздуха. В представленной работе используется форсунка с тангенциальной закруткой, что создает дополнительные центробежные силы и турбулентные пульсации, интенсифицирующие диспергирование. При высоких GMR (режимы W4_A150, W4_A200, W6_A200) CFD дает меньшие значения SMD по сравнению с аналитикой, что согласуется с данными литературы о влиянии закрутки на уменьшение размера капель [11, 12].

2. Отсутствие моделирования вторичного дробления. В использованной DPM-модели вторичное дробление капель моделировалось упрощенно. При высокой скорости воздуха (200 м/с) этот эффект может быть значимым и приводить к дополнительному уменьшению SMD, что частично объясняет расхождения.

3. Эмпирические коэффициенты корреляции. Коэффициенты 0,585 и $2{,}82\times10^{-3}$ в формуле корреляции были получены Нукиямой и Танасавой для определенного диапазона режимов и свойств жидкостей. Их применение к условиям закрученного течения может потребовать калибровки.

Сопоставим полученные результаты с известными экспериментальными и расчетными данными для аналогичных типов форсунок (табл. 4).

Полученные в работе значения SMD (45…90 мкм в зависимости от режима) хорошо согласуются с данными литературы для аналогичных типов двухфазных форсунок. Результаты CFD для режима W8_A150 (SMD = 78 мкм) близки к данным Murugan et al. для twin-fluid форсунки в аналогичном диапазоне режимов (70…85 мкм).

Параметр GMR является ключевым безразмерным критерием, определяющим энергетику процесса диспергирования. На основе регрессионного анализа данных таблицы 3 установлено, что:

– при GMR < 0,035 аналитическая модель завышает SMD (отклонение –14,3%);

– при GMR = 0,04…0,06 отклонение является минимальным (менее 5%);

– при GMR > 0,08 аналитическая модель занижает SMD (отклонение до +18,4%).

Применительно к форсункам с тангенциальной закруткой воздуха предлагаем поправочные коэффициенты для корреляции Нукиямы-Танасавы (табл. 5).

Поправочный коэффициент вводится следующим образом:

$$SMD_{corr} = SMD_{N-T} \cdot k_{corr}, \quad (3)$$

где SMD_{N-T} – значение, рассчитанное по корреляции Нукиямы-Танасавы.

Для режима W4_A200 (GMR = 0,1227) применение коэффициента $k_{corr} = 1,15$ дает скорректированное значение $SMD_{corr} = 38 \cdot 1,15 = 43,7$ мкм, что отличается от CFD-значения (45 мкм) всего на 2,9%.

Таблица 4

Сравнение полученных значений SMD с данными других исследователей

Table 4

Comparison of the obtained SMD values with literature data

Тип форсунки (источник)	Режим	SMD, мкм
Пневматическая, тангенциальная закрутка воздуха (CFD-моделирование, настоящая работа)	W_l = 8 м/с, W_g = 150 м/с	78
Пневматическая, тангенциальная закрутка (расчет по корреляции Nukiyama-Tanasawa, представленная работа)	при GMR = 0,046	80
Twin-fluid, flow-blurring ([8])	P_g = 3 бар, Q_l = 1,5 л/мин	70…85
Internal-mixing air-assisted ([12])	Q_l/Q_g = 0,03	65…80
Swirl-flow atomizer ([11])	W_g = 140 м/с	60…75
Пневматическая, трехкомпонентные суспензии ([9])	номинальный режим	60…95
Two-phase nozzle ([10])	численно-экспериментальный	55…90

Таблица 5

Рекомендуемые поправочные коэффициенты

Table 5

Recommended correction factors

Диапазон GMR	Характер расхождения	Рекомендуемый коэффициент k_{corr}
< 0,035	Аналитика завышает SMD	0,85…0,90
0,035…0,080	Отклонение < 5%	1,00 (поправка не требуется)
> 0,080	Аналитика занижает SMD	1,10…1,20

Выводы

1. Количественное сравнение аналитической корреляции Нукиямы-Танасавы и CFD-моделирования SMD для двухфазной пневматической форсунки с тангенциальной закруткой воздуха показало, что обе модели демонстрируют одинаковый качественный тренд – монотонное уменьшение SMD с ростом параметра GMR в диапазоне 0,0307…0,1227.

2. Количественные расхождения между моделями достигают 18,4% для режимов с высоким GMR и –14,3% для режимов с низким GMR. Наилучшая сходимость (отклонение менее 5%) наблюдается в диапазоне GMR = 0,04…0,06, что соответствует номинальным режимам работы форсунки.

3. Причинами расхождений являются: во-первых, неучтенная в исходной корреляции тангенциальная закрутка воздуха, которая интенсифицирует диспергирование при высоких GMR; во-вторых, упрощенное моделирование вторичного дробления капель в CFD; в-третьих, эмпирические коэффициенты корреляции, требующие калибровки для закрученных течений.

4. Для корреляции Нукиямы-Танасавы при условии GMR < 0,035 рекомендуем ввести поправочный коэффициент k_{corr} = 0,85…0,90, при GMR > 0,080 k_{corr} = 1,10…1,20; для диапазона GMR = 0,035…0,080 поправка не требуется.

5. Полученные результаты позволяют повысить точность инженерных расчетов SMD при проектировании двухфазных форсунок с тангенциальной закруткой воздуха для систем дифференцированного внесения средств защиты растений. Предложенные поправочные коэффициенты могут быть использованы для прогнозирования дисперсности распыла в режимах пониженного расхода жидкости (при снижении на 25…30%) без дополнительных CFD-расчетов.

Список источников

1. Гербер Ю.Б., Красовский В.В. Технологии интеллектуального анализа и принятия решений в садоводстве // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2024. № 37 (200). С. 186-198. EDN: DOAPNV

2. Красовский В.В., Гербер Ю.Б., Бережная Т.Е. Моделирование дисперсного состава факела в двухфазной пневматической форсунке переменного расхода для систем дифференцированного внесения средств защиты растений // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2026. № 45 (208). С. 152-165. EDN: XZAKOM

3. Загидуллин Р.Р., Цыбулевский В.В., Тарасенко Б.Ф. и др. Обоснование схемы и параметров пневматического щелевого распылителя с проточной камерой // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 3. С. 271-280. https://doi.org/10.17816/0321-4443-624312

4. Юмаев Д.М., Рембалович Г.К., Костенко М.Ю. и др. Экспериментальное обоснование параметров форсунки-распылителя для агропромышленного комплекса // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. 2022. Т. 14, № 4. С. 193-200. EDN: TZCHSB

5. Коренков П.Ю., Космодемьянский Ю.В., Лукин Н.Д. Дисперсные характеристики факела распыления низконапорного пневматического распылителя // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2002. № 2-3. С. 42-45. EDN: QCAHPT

6. Nukiyama S., Tanasawa Y. Experiments on the atomization of liquids in an airstream. Transactions of the Society of Mechanical Engineers. 1939;5:68-75. https://doi.org/10.1299/kikai1938.5.68

7. Reitz R.D., Bracco F.V. Mechanism of atomization of a liquid jet. The Physics of Fluids. 1982;25(10):1730-1742. https://doi.org/10.1063/1.863650

8. Murugan R., Balusamy S., Kolhe P. Experimental study of liquid spray mode of twin fluid atomizer using optical diagnostic tool. Flow, Turbulence and Combustion. 2021;106(1):261-289. https://doi.org/10.1007/s10494-020-00195-1

9. Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Мальцев Л.И. Диспергирование трехкомпонентных суспензий после распыления пневматической форсункой // Теплофизика и аэромеханика. 2024. Т. 31, № 5. С. 961-971. EDN: CVLAYG

10. Jiang L., Rao W., Deng L. et al. Measuring Liquid Droplet Size in Two-Phase Nozzle Flow Employing Numerical and Experimental Analyses. Micromachines. 2022;13(5):684. https://doi.org/10.3390/mi13050684

11. Jin H., Xu H., Yu C. et al. Atomization and mixing characteristics of swirl-flow atomizers in the refining industry. Chemical Engineering & Technology. 2020;43(9):1823-1831. https://doi.org/10.1002/ceat.202000063

12. Wang P., Shi Y., Zhang L., Li Y. Effect of structural parameters on atomization characteristics and dust reduction performance of internal-mixing air-assisted atomizer nozzle. Process Safety and Environmental Protection. 2019;128:316-328. https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.06.014

13. Егорычев В.С., Шаблий Л.С., Кудинов И.В. Моделирование двухфазных потоков в форсунке камеры ЖРД с помощью ANSYS CFD // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 6-3. С. 667-670. EDN: SHQPNF

14. Sipatov A.M., Karabasov S.A., Gomzikov L.Yu. et al. Application of three-dimensional numerical study in air-blast atomizer designing. Computational Continuum Mechanics. 2013;6(3):346-353. EDN: RCLESR

15. Симаков Н.Н. Численное моделирование двухфазного потока, созданного распыливанием жидкости форсункой

References

1. Gerber Yu.B., Krasovskiy V.V. Technologies of intellectual analysis and decision-making in horticulture. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2024;37:186-198. (In Russ.)

2. Krasovskiy V.V., Gerber Yu.B., Berezhnaya T.E. Modeling of the dispersed composition of a flare in a two-phase variable flow pneumatic nozzle rate for differentiated application of plant protection products. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2026;45:152-165. (In Russ.)

3. Tsybulevsky V.V., Tarasenko B.F., Troyanovskaya I.P. et al. Justification of the layout and parameters of a pneumatic slot atomizer with a flow chamber. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2024;91(3):271-280. https://doi.org/10.17816/0321-4443-624312

4. Yumaev D.M., Rembalovich G.K., Kostenko M.Yu. et al. Experimental substantiation of the paramatars of the spray nozzle for the agro-industrial complex. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*. 2022;14(4): 193-200. (In Russ.)

5. Korenkov P.Yu., Kosmodemyanskiy Yu.V., Lukin N.D. Spray dispersion characteristics of a low-pressure pneumatic atomizer. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*. 2002;2-3:42-45. (In Russ.)

6. Nukiyama S., Tanasawa Y. Experiments on the atomization of liquids in an airstream. *Transactions of the Society of Mechanical Engineers*. 1939;5:68-75. https://doi.org/10.1299/kikai1938.5.68

7. Reitz R.D., Bracco F.V. Mechanism of atomization of a liquid jet. *The Physics of Fluids*. 1982;25(10):1730-1742. https://doi.org/10.1063/1.863650

8. Murugan R., Balusamy S., Kolhe P. Experimental study of liquid spray mode of twin fluid atomizer using optical diagnostic tool. *Flow, Turbulence and Combustion*. 2021;106(1):261-289. https://doi.org/10.1007/s10494-020-00195-1

9. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Maltsev L.I. Dispersion of three-component slurries after spraying with a pneumatic nozzle. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2024;31(5):961-971. (In Russ.)

10. Jiang L., Rao W., Deng L. et al. Measuring liquid droplet size in two-phase nozzle flow employing numerical and experimental analyses. *Micromachines*. 2022;13(5):684. https://doi.org/10.3390/mi13050684

11. Jin H., Xu H., Yu C. et al. Atomization and mixing characteristics of swirl-flow atomizers in the refining industry. *Chemical Engineering & Technology*. 2020;43(9):1823-1831. https://doi.org/10.1002/ceat.202000063

12. Wang P., Shi Y., Zhang L., Li Y. Effect of structural parameters on atomization characteristics and dust reduction performance of internal-mixing air-assisted atomizer nozzle. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019;128:316-328. https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.06.014

13. Egorychev V.S., Shabliy L.S., Kudinov I.V. Modeling of two-phase flow in the injector of LRE camera with ANSYS CFD. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra rossiyskoy akademii nauk*. 2013;15(6-3:667-670. (In Russ.)

14. Sipatov A.M., Karabasov S.A., Gomzikov L.Yu. et al. Application of three-dimensional numerical study in air-blast atomizer designing. *Computational Continuum Mechanics*. 2013;6(3):346-353. (In Russ.)

15. Simakov N.N. Numerical simulation of the two-phase flow produced by spraying a liquid by a nozzle. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki = Technical Physics*. 2017;62:1006-1012. (In Russ.) https://doi.org/10.1134/S1063784217070222

16. Kaddour A., Ouadha A. Numerical study of the flow in a two-phase nozzle for trilateral flash cycle applications. *International Journal of Thermofluids*. 2023;19:100393. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100393

// Журнал технической физики. 2017. Т. 87, № 7. С. 990-996. EDN: ZAPGBR

16. Kaddour A., Ouadha A. Numerical study of the flow in a two-phase nozzle for trilateral flash cycle applications. International Journal of Thermofluids. 2023;19:100393. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100393

17. Фазылбаков Р.Р., Халилов Э.М., Зиннатуллин Р.Ф. Исследование газодинамических процессов в распылителе пневматической форсунки // Новая наука: Опыт, традиции, инновации. 2017. № 1-2. С. 281-286. EDN: XIHKYH

18. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal. 1994;32(8):1598-1605. https://doi.org/10.2514/3.12149

17. Fazylbakov R.R., Khalilov E.M., Zinnatullin R.F. Study of gas-dynamic processes in a pneumatic nozzle atomizer. *Novaya nauka*: *opyt, traditsii, innovatsii*. 2017;1-2:281-286. (In Russ.)

18. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994;32(8):1598-1605. https://doi.org/10.2514/3.12149

Информация об авторах

Красовский Виталий Викторович, канд. техн. наук, доцент, vitaliy-krasovskiy@mail.ru
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского; 295007, Российская Федерация, г. Симферополь, пр. Вернадского, 4;
ФГБУН Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма; 295043, Российская Федерация; г. Симферополь, ул. Киевская, 150
Гербер Юрий Борисович, д-р техн. наук, профессор, gerber_1961@mail.ru
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского; 295007, Российская Федерация, г. Симферополь, пр. Вернадского, 4

Author Information

Vitaliy V. Krasovskiy, CSc(Eng) Associate Professor; vitaliy-krasovskiy@mail.ru; V.I. Vernadsky Crimean Federal University; 4, Vernadskogo Ave., 295007, Simferopol, Russian Federation; Research Institute of Agriculture of Crimea; 150, Kievskaya str., Simferopol, 295043, Russian Federation
Yuriy B. Gerber, DSc (Eng), Professor, gerber_1961@mail.ru; V.I. Vernadsky Crimean Federal University; 4, Vernadskogo Ave., Simferopol, 295007, Russian Federation

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

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

Статья поступила 23.04.2026, после рецензирования и доработки 08.05.2026, принята к публикации 20.05.2026

Received 23.04.2026; Revised 08.05.2026; Accepted 20.05.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 621.43:629.113
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-57-69

Расчетный анализ эффективности улучшения антидетонационных характеристик двигателя

А.В. Капустин[1]***, В.Л. Чумаков***[2]✉***, С.Н. Девянин***[3]***, Р.С. Федоткин***[4]***, А.В. Бижаев***[5]

[1] Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого; г. Великий Новгород, Россия

[2, 3, 4, 5] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

[1] aleksandr.kapustin@novsu.ru; https://orcid.org/0009-0002-7119-8192

[2] valery.chumakov@gmail.com✉; https://orcid.org/0000-0002-1442-4416

[3] devta@rambler.ru; https://orcid.org/0000-0001-6776-0432

[4] fedotkin@rgau-msha.ru; orcid.org/0000-0002-3991-4315

[5] a.bizhaev@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-0807-1255

Аннотация. Детонация сопровождается ухудшением эффективных показателей двигателя внутреннего сгорания (ДВС), поэтому оценка способов улучшения антидетонационных характеристик двигателя является актуальной задачей. Оценка эффективных показателей ДВС с искровым зажиганием при оптимизации его регулирования на грани начала детонации выполнена с помощью математической модели. Математическая модель термодинамического цикла ДВС предполагает анализ последовательного выгорания заряда, разделенного на 10 зон пропорционально доле сгорающего топлива. Расчеты согласуются с экспериментальными данными. Отмечена необходимость учета двухстадийного механизма возникновения детонации при использовании товарного бензина. Показано, что эффективными способами подавления детонации являются интенсификация теплообмена на начальных стадиях цикла, понижение начальной температуры цикла, сокращение длительности тепловыделения при пониженных показателях политропы сжатия. Оптимизация регулирования двигателя обеспечивает хороший антидетонационный эффект при избыточном повышении геометрической степени сжатия и снижении угла опережения зажигания по сравнению с их оптимальными значениями. Установлено, что интенсификация теплообмена на начальных стадиях цикла с понижением начальной температуры цикла на 10°С или снижение среднего показателя политропы сжатия на 0,01, или сокращение длительности тепловыделения на 10°пкв позволяют повысить степень сжатия на 0,5 ед. или снизить требования к октановому числу бензина на 3,2 ед. ОЧ при неизменной степени сжатия. Регулирование, предусматривающее «оптимальное пересжатие» двигателя (например, повышение степени сжатия на 2 ед. и смещение угла зажигания в сторону запаздывания на 10°пкв), повышает индикаторный КПД на полной нагрузке незначительно – всего на 1…2%, но на частичных нагрузках при оптимальных углах зажигания обеспечивается рост КПД порядка 5…6%. Обеднение смеси при расслоении заряда от 1 до 1,8 повышает допустимую степень сжатия на 3,7 ед.

Ключевые слова: ДВС; оптимизация регулирования двигателя; КПД; детонация; математическая модель термодинамического цикла ДВС; степень сжатия; цикл; угол опережения зажигания

Для цитирования: Капустин А.В., Чумаков В.Л., Девянин С.Н., Федоткин Р.С., Бижаев А.В. Расчетный анализ эффективности улучшения антидетонационных характеристик двигателя // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 57-69. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-57-69

© Капустин А.В., Чумаков В.Л., Девянин С.Н., Федоткин Р.С., Бижаев А.В., 2026

ORIGINAL ARTICLE

Computational analysis of the efficiency of improving engine knock resistance

***A.V. Kapustin*[1], *V.L. Chumakov*[2]✉, *S.N. Devyanin*[3], *R.S. Fedotkin*[4], *A.V. Bizhayev*[5]**

[1] Yaroslav the Wise Novgorod State University; Veliky Novgorod, Russia

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

[1] aleksandr.kapustin@novsu.ru; https://orcid.org/0009-0002-7119-8192

[2] valery.chumakov@gmail.com✉; https://orcid.org/0000-0002-1442-4416

[3] devta@rambler.ru; https://orcid.org/0000-0001-6776-0432

[4] fedotkin@rgau-msha.ru; orcid.org/0000-0002-3991-4315

[5] a.bizhaev@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-0807-1255

Abstract. Engine knock is accompanied by a deterioration in the performance indicators of internal combustion engines (ICE). Therefore, evaluating methods to improve engine knock resistance is a highly relevant task. An the performance indicators of a spark-ignition ICE when optimizing its control at the threshold of knock onset were evaluated using a mathematical model. The mathematical model of the thermodynamic cycle of an ICE involves analyzing the sequential combustion of the charge, which is divided into ten zones proportional to the fraction of burned fuel. The calculations are in good agreement with experimental data. The article highlights the necessity of considering the two-stage mechanism of knock initiation when using commercial gasolines. It is shown that effective methods of suppressing knock include intensifying heat transfer in the initial stages of the cycle; reducing the initial cycle temperature; shortening the heat release duration at lower values of the polytropic compression index. Optimizing engine control provides a good anti-knock effect under an excessive increase in the geometric compression ratio and retarded ignition timing compared to their optimal values. It has been established that intensifying heat transfer in the initial stages of the cycle with a 10°C reduction in the initial cycle temperature, or a 0.01 decrease in the average polytropic compression index, or a 10°CA (crank angle degrees) reduction in the heat release duration results in an increase in the compression ratio by 0.5 units, or a reduction in the gasoline octane number (ON) requirements by 3.2 ON units at a constant compression ratio. Engine control involving "optimal over-compression"–for example, increasing the compression ratio by 2 units and retarding the ignition timing by 10°CA – only slightly increases the indicated efficiency at full load (by 1-2%), but yields an efficiency increase of about 5-6% at partial loads with optimal ignition timing. Leaning the mixture during charge stratification from 1 to 1.8 increases the allowable compression ratio by 3.7 units.

Keywords: internal combustion engine (ICE); engine control optimization; efficiency; engine knock; mathematical model of the ICE thermodynamic cycle; compression ratio; cycle; ignition timing advance

For citation: Kapustin A.V., Chumakov V.L., Devyanin S.N., Fedotkin R.S., Bizhayev A.V. Computational analysis of the efficiency of improving engine knock resistance. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):57-69. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-57-69

Введение

Детонация в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) является одной из главных проблем при их эксплуатации. Детонация приводит к повышению выбросов токсичных компонентов, снижению ресурса двигателя, ухудшению его эффективных показателей и иных характеристик. Экспериментальная оценка детонации эффективна, но является сложной технической задачей, поскольку трудно выявить роль каждого фактора, определяющего возникновение детонации. Современные расчетные исследования на основе анализа математических моделей рабочего цикла поршневых двигателей ДВС, представленные Р.З. Кавтарадзе [1] и Д.В. Апелинским [2], отличаются методическим подходом и уровнем сложности, однако позволяют относительно быстро определить возможность повышения эффективных показателей двигателей. Улучшение характеристик современных ДВС связано с интенсификацией рабочих процессов и оптимизацией их регулирования на грани нарушений нормального сгорания – в частности, детонации. Математическое моделирование термодинамических циклов ДВС с прогнозированием детонации представлено в работах А.Л. Береснева [3], Л.Б. Ларионова [4], W.A. Manzoor [5] и D. Bradley [6]. Сложные модели рабочих циклов позволяют достаточно точно прогнозировать изменение эффективных показателей двигателя при независимом или одновременном воздействии ряда конструктивных, регулировочных и иных параметров на различные этапы протекания рабочего цикла ДВС. Однако пока не разработана математическая модель термодинамического цикла

ДВС для оценки степени влияния отдельных факторов на возникновение детонации и оптимизации регулирования двигателя.

Цель исследований: рассмотреть способы улучшения антидетонационных характеристик двигателя с применением математической модели рабочего цикла двигателя, позволяющей выявить основные факторы, определяющие возникновение детонации, и оценить степень их влияния.

Материалы и методы

В качестве базовой модели термодинамического цикла ДВС принята модель рабочего цикла А.Л. Максимова[1]. Разработанная математическая модель термодинамического цикла ДВС позволяет оценивать как текущие параметры рабочего цикла (температура, давление, тепловыделение), так и итоговые показатели (среднее давление, КПД, эффективность тепловыделения). Исходными данными для расчета являются конструктивные параметры цилиндропоршневой группы, параметры режимов работы ДВС и окружающей среды, условные эмпирические характеристики тепловыделения, физико-химические характеристики топлива (эталонных смесей и товарного бензина). Представленная математическая модель термодинамического цикла ДВС предполагает анализ последовательного выгорания заряда, разделенного на 10 зон пропорционально доле сгорающего топлива. В модели учитывается Махе-эффект процесса сгорания[2]. Чем раньше зона вступает в реакции горения, тем выше будет ее температура в конце процесса сгорания вследствие политропного поджатия от повышения давления в цилиндре. Температура несгоревшей части заряда определяется по политропному процессу сжатия. Учитываются потери на диссоциацию. Передача теплоты от сгоревшей к несгоревшей части заряда не учитывается, потому что турбулентная скорость горения больше скорости переноса теплоты теплопроводностью. Тепловые потери в стенки рассчитываются по уравнению Вошни[3] и методике, изложенной в работе [7]. Теоретические расчеты по модели рабочего цикла, выполненные при разных схемах расслоения заряда в цилиндре двигателя и широком диапазоне изменения степеней сжатия, показали хорошую сходимость по основным термодинамическим параметрам цикла с экспериментальными исследованиями [8, 9].

Текущая доля сгоревшего топлива определяется пропорционально текущему коэффициенту активного тепловыделения $\xi_{a\varphi}$:

$$\xi_{a\varphi} = \{1 - [1 - ((\theta_c + \varphi)/\varphi_{2T})^{\beta}]^m \cdot \xi_{ат}, \quad (1)$$

где θ_c – угол, град., поворота коленчатого вала (°пкв) начала тепловыделения, то есть «угол отрыва» линии сгорания от линии сжатия по индикаторной диаграмме, отсчитывающийся от верхней мертвой точки по аналогии с углом опережения зажигания; φ и φ_{2T} – соответственно текущая и общая длительность тепловыделения, °пкв; β, m – безразмерные показатели, характеризующие форму кривой активного тепловыделения (с увеличением m возрастает выделение теплоты в начальный период сгорания, а с увеличением β – в конце сгорания); $\xi_{ат}$ – коэффициент активного тепловыделения в конце сгорания (коэффициент использования теплоты).

В основу моделирования детонации заложено допущение о зарождении ударной волны вследствие самовоспламенения порций заряда, до которых фронт пламени доходит в последнюю очередь. Предполагается, что в порции должно быть достаточно топлива, энергетически обеспечивающего как зарождение и распространение детонационной волны, так и последующее многократное отражение ударной волны от стенок камеры сгорания. В целях подтверждения правильности прогнозирования детонации момент самовоспламенения топлива в модели определяется по двум кинетическим выражениям, полученным экспериментальным путем принципиально разными методами [7].

Первое выражение для расчета момента самовоспламенения, полученное на двигателях при работе на эталонных изооктано-гептановых смесях, имеет вид:

$$J = \frac{1}{19,75} \cdot \left(\frac{\text{ОЧ}}{100}\right)^{-3,4107} \cdot \int_0^{\tau} (10,2 \cdot p)^{1,7} \cdot e^{-3800/T_{\text{н}}} \cdot d\tau \geq 1, \quad (2)$$

где ОЧ – октановое число топлива: процентная объемная доля изооктана в смеси с нормальным гептаном; p – текущее термодинамическое давление цикла; $T_{\text{н}}$ – текущая термодинамическая температура несгоревшей части заряда, τ – время.

Второе выражение, определяющее наступление детонации, имеет вид:

$$J = \int_0^{\tau} (1/z) \cdot d\tau \geq 1, \quad (3)$$

где z – эмпирическое выражение задержки самовоспламенения, полученное на установках адиабатного (импульсного сжатия) в условиях постоянного объема на эталонных изооктано-гептановых стехиометрических смесях; τ – время.

[1] Максимов А.Л. Расчетная модель действительного цикла двигателя внутреннего сгорания // Труды Московского автомобильно-дорожного института. М.: МАДИ, 1976. С. 74-81.

[2] Капустин А.В., Смирнов С.В., Чумаков В.Л. Математическая модель рабочего цикла двигателя с искровым зажиганием // Чтения академика В.Н. Болтинского. 2021. Ч. 2. С. 86-95. EDN: FQYTNB.

[3] Woschni G. A universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine. SAE Techn. 1967. Paper 670931. https://doi.org/10.4271/670931.

Задержка самовоспламенения z учитывает две стадии[4]:

$$z = z_{нт} + z_{вт}, \quad (4)$$

где $z_{нт}$ – задержка низкотемпературной (холоднопламенной) стадии; $z_{вт}$ – задержка высокотемпературной (горячепламенной) стадии.

С учетом (4) интегрирование по (3) можно преобразовать как

$$J = \int_0^{\tau}\left(\frac{1}{z}\right)\cdot d\tau = \int_0^{\tau}\left(\frac{1}{z_{нт}} + \frac{1}{z_{вт}}\right)\cdot d\tau = \\ = \int_0^{\tau}\left(\frac{1}{z_{нт}}\right)\cdot d\tau + \int_0^{\tau}\left(\frac{1}{z_{вт}}\right)\cdot d\tau = J_{нт} + J_{вт}, \quad (5)$$

где $J_{нт}$ характеризует вклад в развитие самовоспламенения низкотемпературной стадии; $J_{вт} = J - J_{нт}$ – вклад высокотемпературной стадии.

Формулы для расчета задержек $z_{нт}$ и $z_{вт}$ приведены в работе [7]. Отметим, что задержка $z_{нт}$ имеет аномалию: ее длительность увеличивается с ростом температуры. Если доля несгоревшего топлива к моменту самовоспламенения превышает 0,1, происходит детонация. Поэтому в сравнительных расчетах для разделения нормального и детонационного горения принято условие:

$$J \geq 1 \text{ при доле сгоревшего топлива } X \leq 0{,}9, \quad (6)$$

где интеграл J определяется по уравнениям (1) и (5).

Результаты и их обсуждение

Несхожие условия воспламенения различных углеводородов[5] обусловливает необходимость учета величин низко- или высокотемпературной задержки воспламенения ($z_{нт}$ и $z_{вт}$). На рисунке 1 представлены результаты расчетов начала детонации по формуле (5), показывающие вклад в детонацию низкотемпературной стадии самовоспламенения при изменении температуры в конце впуска и частоты вращения. Допустимая по условиям детонации степень сжатия ε с точностью до 0,1 или октановое число (ОЧ) с точностью до 1 при ближайших значениях J и X определяли методом последовательных приближений при условиях, отвечающих уравнению (6).

В соответствии с данными рисунка 1 самовоспламенение низкооктанового топлива (ОЧ60) протекает преимущественно по низкотемпературному механизму. При T_a = 320 К интеграл $J_{нт}$ = 0,99. По мере увеличения T_a вклад низкотемпературной стадии снижается, и интеграл $J_{нт}$ = 0,6 при температуре T_a = 390 К. Поэтому для низкооктанового топлива допустимая по детонации степень сжатия мало зависит от начальной температуры T_a. Самовоспламенение изооктана (ОЧ100) протекает преимущественно по высокотемпературному механизму ($J_{нт}$ = 0,1±0,05), и зависимость допустимой по детонации степени сжатия является сильной.

Частота вращения n (временной фактор) также влияет на механизм развития самовоспламенения. По мере роста скорости влияние на самовоспламенение низкотемпературной стадии снижается. Для топлива ОЧ100 при n > 3750 об/мин интеграл $J_{нт}$ практически равен нулю. Зависимость от скорости допустимой по детонации степени сжатия более сильная у низкооктанового топлива. Отметим, что на длительность низкотемпературной стадии сильно влияет не только температура, но и начальное давление. При изменении начального давления (например, при наддуве) может изменяться и соотношение $J_{нт}$ и $J_{вт}$. Современные бензиновые двигатели работают на высокооктановом топливе, у которых преобладает высокотемпературный механизм самовоспламенения. Поэтому дальнейшие расчеты момента самовоспламенения выполнены преимущественно для топлива ОЧ100 по формуле (2).

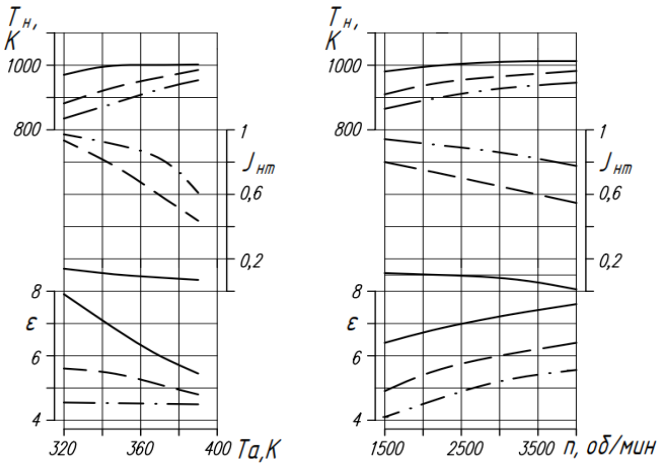


Рис. 1. Влияние температуры в конце наполнения T_a и частоты вращения n на допустимую по детонации степень сжатия ε и величину интеграла $J_{нт}$, характеризующего самовоспламенение:
——— – ОЧ100; — — — – ОЧ80; – ОЧ60

Fig. 1. Effect of temperature at the end of filling T_a and rotation speed n on the knock-limited compression ratio ε and the autoignition integral $J_{нт}$:
——— – Octane Number 100, — — — – Octane Number 80, – Octane Number 60

[4] Капустин А.В., Жданов А.М., Чумаков В.Л. и др. Прогнозирование детонации по задержкам самовоспламенения топлива // Чтения Академика В.Н. Болтинского. 2023. С. 131-138. EDN: MARJTQ.

[5] Капустин А.В., Жданов А.М., Чумаков В.Л. и др. Прогнозирование детонации по задержкам самовоспламенения топлива // Чтения Академика В.Н. Болтинского. 2023. С. 131-138. EDN: MARJTQ.

Влияющие на детонацию факторы можно разделить на 3 группы, характеризующие изменение условий теплообмена, процесс тепловыделения и управление режимом работы двигателя.

Воздействовать на отдельные тепловые потоки в реальном двигателе сложно, но изменить условия теплообмена в отдельных частях заряда или в отдельные периоды цикла можно несколькими способами. Например, увеличение площади вытеснителей камеры сгорания увеличит теплоотвод преимущественно от последних порций заряда. Повышение интенсивности движения заряда за счет геометрической формы камеры сгорания (КС) увеличит теплоотвод от всего заряда. Повышение уровня газодинамического состояния заряда за счет геометрии впускных каналов увеличит теплоотвод в процессе как сжатия, так и сгорания. Прерывистое или непрерывное охлаждение отдельных поверхностей камеры сгорания изменит теплообмен в отдельные периоды цикла. Применение материалов с более высокими коэффициентами теплопроводности увеличит теплопередачу от всего заряда. Очевидно, практический интерес представляет оценка способа, наиболее эффективно подавляющего детонацию.

Теоретические исследования проведены для бензинового двигателя диаметром цилиндра $D = 79$ мм, ходом поршня $S = 80$ мм, полусферической камерой сгорания с поверхностью со стороны головки цилиндров $F_г = 66$ см^2, отношением радиуса кривошипа к длине шатуна R/L = 0,29. Расчеты выполнены на режимах характерного появления детонации: частоте вращения $n = 2000$ об/мин; коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,0$; длительности тепловыделения $\varphi_{2T} = 50°$пкв; коэффициенте наполнения $\eta_v = 0,84$; характеристиках тепловыделения $\beta = m = 2,5$; температуре в конце впуска $T_a = 350$ К [7].

Изменение интенсивности передачи теплоты в процессе сгорания оценивали с помощью коэффициентов K_α и $K_{\alpha н}$, учитываемых в расчетной программе для изменения коэффициента теплоотдачи, рассчитанного по формуле Вошни[6]. Коэффициент K_α изменяет теплоотдачу от всего заряда, коэффициент $K_{\alpha н}$ – от несгоревшей части заряда. Коэффициенты показывают, во сколько раз передача теплоты в стенки увеличивается или уменьшается по сравнению с расчетом по исходному уравнению Вошни. Согласно результатам, представленным на рисунке 2, с увеличением теплопередачи от всего заряда ощутимо снижается коэффициент использования теплоты $\xi_{заг}$, что сопровождается уменьшением индикаторного КПД цикла η_i, несмотря на повышение допустимой по детонации степени сжатия.

Увеличение передачи теплоты от несгоревшей части заряда практически не влияет на коэффициент $\xi_{заг}$. При этом увеличиваются допустимая по детонации степень сжатия и индикаторный КПД цикла. Однако это увеличение незначительно и трудно реализуемо, так как интенсивность теплопередачи должна изменяться в диапазоне 0,5…1,5, то есть в 3 раза. Поэтому практический интерес воздействие на изменение теплопередачи в процессе сгорания не представляет.

Интенсивность теплопередачи зависит от температуры теплопередающих поверхностей камеры сгорания (КС): поверхности головки цилиндров, поверхности днища поршня и изменяющейся поверхности цилиндра. Практический интерес представляет площадь поверхности КС в головке цилиндров $F_г$, характеризующая компактность камеры сгорания.

В математической модели цикла расчет теплоотдачи по формуле Вошни выполняется только для процесса сгорания. Поэтому результаты, представленные на рисунке 3, относятся к изменению передачи теплоты только в процессе сгорания. Расчеты показывают, что можно пренебречь влиянием температуры стенок на детонацию и показатели цикла. Увеличение площади поверхности КС в головке $F_г$ существенно снижает коэффициент $\xi_{заг}$. Это сопровождается уменьшением КПД, несмотря на повышение допустимой по детонации степени сжатия.

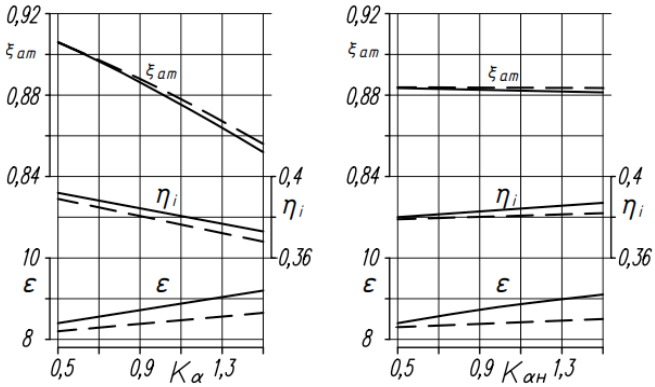


Рис. 2. Влияние коэффициента теплоотдачи от всего заряда (K_α) и коэффициента теплоотдачи от несгоревшей части заряда ($K_{\alpha н}$) на показатели цикла:
——— – расчет по формуле (2);
— — — — – расчет по формуле (5)

Fig. 2. Effect of the overall charge heat transfer coefficient K_α and the unburned zone heat transfer coefficient $K_{\alpha n}$ on engine cycle performance:
——— – calculated using Eq. (2);
— — — — – calculated using Eq. (5)

[6] Woschni G. A universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine. SAE Techn. 1967. Paper 670931. https://doi.org/10.4271/670931.

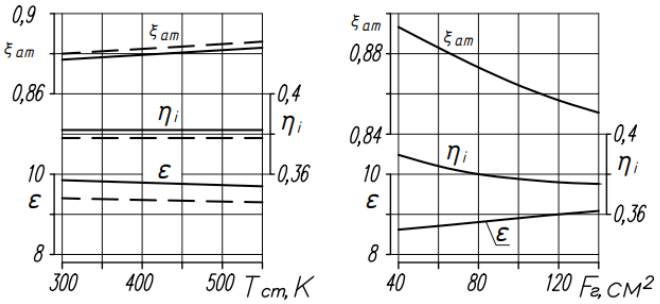


Рис. 3. Влияние осредненной температуры стенок $T_{ст}$ и площади поверхности камеры сгорания в головке цилиндров $F_г$ на показатели цикла:
——— – расчет по формуле (2);
— — — — – расчет по формуле (5)

Fig. 3. Effect of mean cylinder wall temperature T_{wt} and cylinder head surface area F_h on engine cycle performance:
——— – calculated using Eq. (2);
— — — — – calculated using Eq. (5)

Изменение теплопередачи в процессе сжатия моделировали путем варьирования показателя политропы сжатия n_c, характеризующего политропный процесс сжатия от его начала до момента начала тепловыделения (начало второй фазы сгорания). Этот показатель превышает средний показатель политропы сжатия от начала сжатия в нижней мертвой точке до конца сжатия в верхней мертвой точке – n_i.

Результаты расчетов по формуле (5), учитывающей двухстадийный механизм самовоспламенения топлива ОЧ100 и ОЧ60, приведены на рисунке 4. Согласно данным рисунка 4 уменьшение показателя политропы сжатия n_c (более интенсивное охлаждение смеси в процессе сжатия) позволяет повысить допустимую по детонации степень сжатия для высокооктанового топлива ОЧ100 (расчет по свойствам самовоспламенения изооктана). Уменьшение показателя с 1,44 до 1,34 ($\Delta n_c = 0,1$) позволяет повысить допустимую степень сжатия примерно с 7,7 до 11,7 ($\Delta\varepsilon = 4$ ед.). При этом индикаторный КПД увеличивается более чем на 10%. При допущении линейной связи можно считать, что снижение показателя политропы сжатия на каждые 0,01 дает возможность повысить допустимую по детонации степень сжатия на 0,4 ед. с повышением индикаторного КПД на 1%.

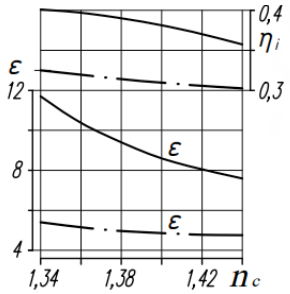


Рис. 4. Влияние среднего показателя политропы сжатия n_c на допустимую по детонации степень сжатия ε и индикаторный КПД η_i цикла:
——— – ОЧ100; — · — · — – ОЧ60

Fig. 4. Effect of the mean polytropic compression exponent n_c on the knock-limited compression ratio ε and indicated efficiency η_i:
——— – Octane Number 100; — · — – Octane Number 60

Отметим, что уменьшением показателя политропы сжатия и усилением теплопередачи в процессе сжатия можно существенно повысить допустимую по детонации степень сжатия и увеличить индикаторный КПД при использовании высокооктанового топлива. Для бензина, в котором ОЧ повышают за счет доли высокооктановых ароматических углеводородов (аренов), антидетонационный эффект от уменьшения показателя политропы сжатия будет больше, чем для изооктана, так как они имеют только одностадийный высокотемпературный механизм самовоспламенения и более высокую чувствительность к изменению температуры.

Тепловыделение, описываемое выражением (1), изменяется в соответствии с законом выделения теплоты и длительностью процеса. На рисунке 5 отражены три закона выделения теплоты в относительных координатах. При значениях $\beta = 1$ и $m = 2,5$ более интенсивное сгорание топлива протекает в начальный период тепловыделения, а при $\beta = 2,5$ и $m = 1$ – в конце периода тепловыделения. Значения допустимой по детонации степени сжатия ε и соответствующего КПД цикла η_i при общей длительности тепловыделения $\varphi_{2T} = 50°$пкв для топлива ОЧ100 приведены в таблице 1. Влияние длительности тепловыделения φ_{2T} на допустимую по детонации степень сжатия ε и соответствующий КПД η_i при оптимальном угле начала тепловыделения $\theta_{c\,опт}$ показано на рисунке 6.

Согласно данным таблицы 1 форма кривой активного тепловыделения оказывает сильное влияние на оптимальный угол начала подвода теплоты $\theta_{c\,опт}$. На практике это требует значительной коррекции

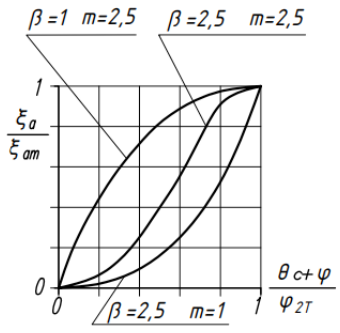


Рис. 5. Характеристики активного тепловыделения в относительных координатах

Fig. 5. Normalized active heat release rate profiles

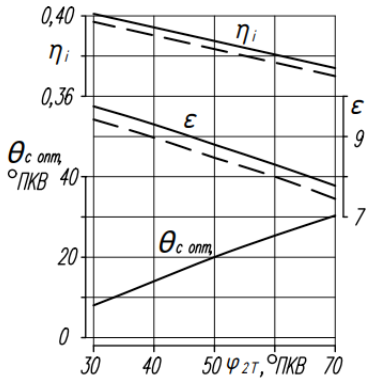


Рис. 6. Влияние длительности тепловыделения φ_{2T} на допустимую ε и η_i при оптимальном угле начала подвода теплоты $Q_{сопт}$:
——— – ОЧ100, расчет по (5);
— — — — – ОЧ100, расчет по (2)

Fig. 6. Effect of heat release duration φ_{2T} on the knock-limited compression ratio ε, and indicated efficiency ηi at optimal combustion start angle θ_{copm}
——— – Octane Number 100 (calculated using Eq. 5);
— — — — – Octane Number 100 (calculated using Eq. 2)

оптимального ула опережения зажигания – его значительного уменьшения при интенсификации начала процесса сгорания. Однако при неизменной длительности процесса тепловыделения φ_{2T} = 50°пкв динамика тепловыделения не влияет на детонационные характеристики, и допустимая степень сжатия остается практически неизменной. Незначительно меняется и КПД цикла, хотя небольшое преимущество может иметь интенсификация начальных периодов сгорания для кривой тепловыделения с показателями β = 1 и *m* = 2,5.

Сокращение длительности тепловыделения позволяет повысить допустимую по детонации степень сжатия ε и соответствующий КПД η_i. Так, при сокращении длительности тепловыделения φ_{2T} от 50 до 30°пкв допустимая по детонации ε повышается на Δε = 1 (в расчете по формулам 5 и 2). При этом индикаторный КПД увеличивается примерно на 5%. Также сокращение длительности тепловыделения на каждые 10°пкв позволяет повысить допустимую по детонации степень сжатия на 0,5 ед. или снизить требования к октановому числу бензина на 3,2 ед. при неизменной степени сжатия[7].

Из факторов, характеризующих управление рабочим процессом, представляет интерес поиск компромиссного варианта воздействия на рабочий процесс двигателя при оптимальном угле и допустимой по детонации степени сжатия либо при более высокой степени сжатия и позднем угле зажигания. Такое воздействие на рабочий процесс посредством повышения степени сжатия сверх оптимальной по началу детонации и при смещении угла зажигания в сторону более поздних углов можно назвать «пересжатием» двигателя. Возникают вопросы: целесообразно ли завышать степень сжатия, как сильно осуществлять пересжатие и есть ли такое соотношение степени сжатия и угла опережения зажигания, при котором достигается максимальный КПД двигателя? Пример оптимизации рабочего процесса при одновременном варьировании степени сжатия, угла опережения зажигания, октанового числа топлива, выполненного расчетно-графическим методом, представлен в работе [10]. Графики, полученные расчетом условий детонации по формуле (2), приведены на рисунке 7. Отметим, что расчеты детонации по формуле (5) дают близкие результаты.

Согласно данным рисунка 7 целесообразно проводить «пересжатие» двигателя. На исследованных режимах для получения более высокого КПД η_i возможно повышение допустимой по детонации степени сжатия ε на 2 ед. При этом углы начала подвода теплоты следует смещать примерно на 10°пкв ближе

Таблица 1

Влияние формы кривой активного тепловыделения на степень сжатия и КПД цикла

Table 1

Effect of the shape of the active heat release curve on the compression ratio and cycle efficiency

Параметр	Значение безразмерных показателей β и m		
	β = 1; m = 2,5	β = 2,5; m = 2,5	β = 2,5; m = 1
Оптимальный угол начала тепловыделения, $\theta_{c\ опт}$, °пкв	8	19	26
Рассчитанные по формуле (5) допустимая по детонации степень сжатия ε соответствующий КПД, η_i	 8,5 0,381	 8,7 0,384	 8,7 0,384
Рассчитанные по формуле (2) допустимая по условию детонации степень сжатия ε соответствующий КПД, η_i	 8,0 0,374	 8,3 0,380	 8,3 0,380

[7] Капустин А.В., Жданов А.М., Чумаков В.Л. и др. Прогнозирование детонации по задержкам самовоспламенения топлива // Чтения Академика В.Н. Болтинского. 2023. С. 131-138. EDN: MARJTQ.

к верхней мертвой точке, то есть организовать более позднее начало тепловыделения. Такая оптимизация процесса сгорания также обеспечивает небольшой рост индикаторного КПД на 1…2 относительных процента, но это при коэффициенте наполнении $\eta_v = 0{,}84$. При снижении нагрузки и работе с меньшим наполнением цилиндра в реальном двигателе угол опережения зажигания следует, насколько это возможно, приближать к оптимальному по условию детонации углу. Тогда повышенная на 2 ед. степень сжатия даст повышение топливной экономичности двигателя на частичных нагрузках на 5…6%.

Согласно международным экологическим требованиям современные двигатели должны работать на стехиометрических составах смеси для снижения выбросов токсичных компонентов отработавших газов, то есть при коэффициентах избытка воздуха $\alpha = 1{,}0$. Это снижает потенциальные показатели бензинового двигателя как по мощности, так и по экономичности. В этих условиях улучшение антидетонационных свойств современных двигателей может быть достигнуто при организации рабочего процесса с послойным смесеобразованием заряда в камере сгорания [9].

Исследования математической модели рабочего цикла показывают потенциальные возможности обеднения смеси в основной части камеры сгорания при сохранении топливной экономичности и бездетонационной работе [11]. Анализ условий детонации согласно формуле (2) проведен как на стехиометрических смесях, так и при обеднении смеси в диапазоне $\alpha = 1{,}0…1{,}8$. Для учета замедления сгорания бедных смесей получены уточненные алгоритмы расчета самовоспламенения смесей без турбулизации и с турбулизацией заряда в камере сгорания. Алгоритм расчета рабочего цикла учитывает закон тепловыделения по формуле (1), а потери на диссоциацию и теплопотери учитываются коэффициентом использования теплоты. Расчет температуры несгоревшего заряда выполняется по уравнению адиабатного процесса. Расчет показателей термодинамического цикла (давления и температуры цикла) выполняется при коэффициенте избытка $\alpha = 1$, а оценка условий детонации по самовоспламнению несгоревшего заряда при составах смеси $\alpha = 1{,}2…1{,}8$ – по уточненной формуле:

$$\frac{1}{19{,}75}\cdot\left(\frac{ON}{100}\right)^{-3.4107}\cdot\int_0^{\tau}(10{,}2\cdot p)^{1{,}7-0{,}55\cdot(\alpha_н-1{,}2)}\cdot e^{-3800/T_н}\cdot d\tau\geq 1, \quad (7)$$

где $\alpha_н$ – коэффициент избытка воздуха порций заряда, сгорающих в последнюю очередь.

Таким образом, на рисунке 7 моделировалось сгорание расслоенного заряда со средним значением $\alpha = 1$, предполагающего нормальное искровое воспламенение обогащенной смеси у свечи с $\alpha < 1$, и последующее сгорание в бедной смеси с $\alpha_н > 1{,}0…1{,}8$. Согласно данным рисунка 8 обеднение смеси порций заряда, до которых фронт пламени

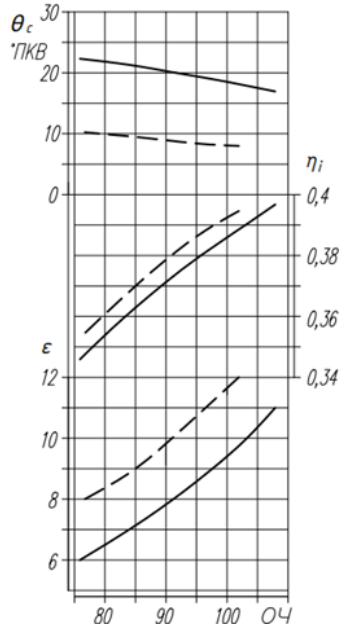


Рис. 7. Зависимости между требованиями ДВС к ОЧ топлива, допустимой по детонации степени сжатия ε и индикаторным КПД η_i:
——— – при оптимальном угле начала тепловыделения;
— — — — – при оптимальном пересжатии ДВС

Fig. 7. Correlation between fuel octane requirement, knock-limited compression ratio ε, and indicated efficiency η_i:
——— – optimal combustion start;
— — — — – optimal compression ratio

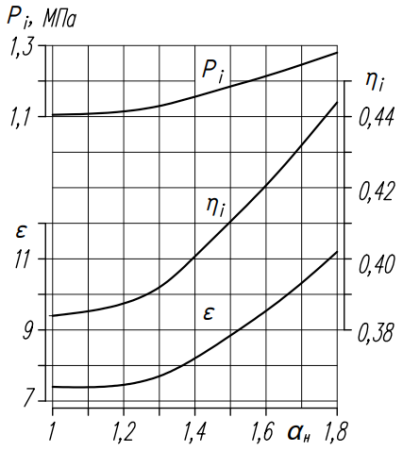


Рис. 8. Влияние обеднения смеси несгоревшего заряда на допустимую по детонации степнь сжатия ε, индикаторный КПД η_i и среднее индикаторное давление P_i

Fig. 8. Effect of unburned mixture excess air ratio on the knock-limited compression ratio ε, indicated efficiency η_i, and indicated mean effective pressure P_i

доходит в последнюю очередь, является эффективным способом подавления детонации. Обеднение порций, сгорающих в последнюю очередь, с $\alpha = 1{,}2$ до $\alpha = 1{,}8$ ($\Delta\alpha = 0{,}6$) позволяет повысить допустимую по детонации степень сжатия ε с 7,5 до 11,2 ($\Delta\varepsilon = 3{,}7$ ед.). КПД возрастает на 14,7%. Приняв для упрощения эту зависимость линейной (прямо пропорциональной), для повышения степени сжатия на единицу ($\Delta\varepsilon = 1$) нужно увеличивать коэффициент избытка воздуха (обеднять смесь) в последних порциях на 0,16 ($\Delta\alpha = 0{,}16$).

Рабочие процессы современных бензиновых автомобильных двигателей разрабатываются с учетом международных экологических требований, согласно которым состав смеси на всех нагрузочных режимах должен поддерживаться примерно как $\alpha = 1{,}0$. При этом для получения стабильного активного горения на малых нагрузках организуют расслоенные смеси (послойное смесеобразование). В учебной литературе[8] отмечается, что на полных нагрузках такое расслоение смеси не требуется. С точки зрения интенсификации процесса сгорания с этим можно согласиться, но с целью повышения антидетонационных свойств двигателей расслоение смеси является целесообразным и при полных нагрузках.

Результаты расчетов подтверждаются данными экспериментальных испытаний на выделенном цилиндре 4-цилиндрового двигателя с диаметром поршня $D = 82$ мм, ходом поршня $S = 71$ мм, $R/L = 029$, степени сжатия $\varepsilon = 9{,}52$. Выделенный 4-й цилиндр имел отдельную впускную систему с отдельным карбюратором, работал с полностью открытой дроссельной заслонкой при максимальном наполнении и мощностном составе смеси. Остальные три цилиндра работали от штатной системы питания с частично открытой дроссельной заслонкой. Использовался товарный бензин АИ-93. В диапазоне частоты вращения $n = 1400\ldots2400$ об/мин детонационная стойкость бензина не позволяла выйти на оптимальные углы опережения зажигания. Углы опережения зажигания устанавливались по началу слышимой детонации.

Для оценки влияния теплоотвода в камере сгорания эксперименты проводили с охлаждением днища поршня маслом. Опыты показали значительную эффективность воздействия охлаждения на улучшение антидетонационных характеристик. Расширялся диапазон регулирования угла опережения зажигания по началу детонации: при охлаждении днища поршня углы зажигания по началу детонации были на 4…5°пкв больше, чем в опытах без охлаждения. Индицирование цилиндра показало, что давление в цикле с охлаждением поршня заметно выше давления в цикле без охлаждения (рис. 9). Значения политропы сжатия $n_1\big|_{P_a}^{P_c}$ в циклах с охлаждением и без охлаждения днища поршня, представленные на рисунке 10, указывают на интенсивный отвод теплоты от камеры сгорания при охлаждении днища поршня.

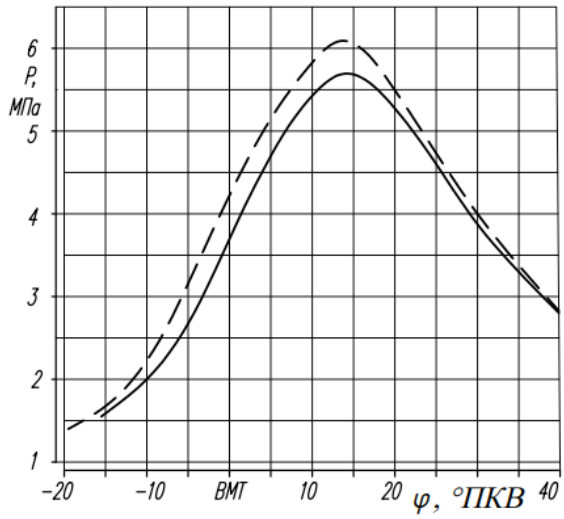


Рис. 9. Индикаторные диаграммы без охлаждения и с охлаждением днища поршня маслом:
——— – без охлаждения;
— — — – с охлаждением днища поршня

Fig. 9. Indicator diagrams with and without piston crown oil cooling:
——— – uncooled piston; — — — – oil-cooled piston crown

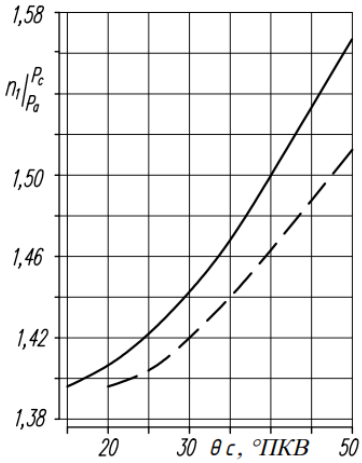


Рис. 10. Средние показатели политропы сжатия при разных углах начала тепловыделения θ_c:
——— – без охлаждения;
— — — – с охлаждением днища поршня

Fig. 10. Mean polytropic compression exponent versus combustion start angle θc:
——— – uncooled piston, — — — – oil-cooled piston crown

[1] Луканин В.Н., Морозов К.А., Хачиян А.С. и др. Двигатели внутреннего сгорания: Учебник для вузов: В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов. 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. В.Н. Луканина. М.: Высшая школа, 2005. 479 с.

Представленные показатели политропы сжатия $n_1|_{P_a}^{P_c}$ определены от давления начала сжатия P_a до давления P_c при угле θ_c («точке отрыва» линии сгорания от линии сжатия), который отсчитывается от верхней мертвой точки против вращения коленчатого вала. Чем больше угол θ_c, тем короче обрабатываемый участок сжатия. Из данных рисунка 10 следует, что в начальный период сжатия разница между показателями больше, и значит, интенсивнее происходит охлаждение сжимаемой газовой смеси ($n_1|_{P_a}^{P_c}$ при $\theta_c = 50°$пкв и при $\theta_c = 20°$пкв).

Для экспериментальной оценки интенсификации процесса тепловыделения на снижение детонации проведены сравнительные испытания двигателя с обычным (штатным) впускным клапаном и с заширмленным впускным клапаном, а также сравнительные испытания двигателя с одной свечой и с двумя свечами зажигания. Опыты с заширмлением впускного клапана выполнены на выделенном цилиндре со степенью сжатия $\varepsilon = 9{,}52$. Заширмленный клапан устанавливался и фиксировался в 4-х положениях. Угол охвата ширмы составлял 120°, высота ширмы – 10 мм. Регулировочные характеристики по углу опережения зажигания, снятые при работе на товарном бензине и на изооктане при частоте вращения n =1700 об/мин с заширмленным и штатным клапанами, представлены на рисунке 11. Приведены характеристики при положении заширмленного клапана, оказывающего наиболее сильный эффект сокращения длительности сгорания.

Из данных рисунка 11 следует, что заширмление клапана не оказывает антидетонационного эффекта. На бензине, детонационная стойкость которого не позволяет выйти на оптимальный угол зажигания $\theta_{опт}$, максимальный крутящий момент M_e при начале слышимой детонации одинаков для обоих вариантов испытаний. При испытании на изооктане разность между оптимальным углом зажигания и углом зажигания по началу детонации практически не изменилась: с заширмленным клапаном – 19°пкв, со штатным клапаном – 20°пкв. Это значит, что антидетонационные свойства двигателя практически не изменились. Чтобы установить причины этого, проведено индицирование выделенного цилиндра при работе на изооктане на частоте вращения 1700 об/мин и максимальном наполнении.

Индицирование показало, что длительность тепловыделения (от момента отрыва линии сгорания от линии сжатия до максимума температуры цикла) с заширмленным клапаном сократилась на 9°пкв, изменились характеристика активного тепловыделения и значение среднего показателя политропы сжатия.

Кривая активного тепловыделения (рис. 12) с заширмленным клапаном характеризует более медленное сгорание топлива в начальный период, что ведет к улучшению антидетонационных свойств двигателя. Это согласуется с результатами расчетных исследований (табл. 1). Сокращение длительности сгорания, достигнутое при усилении турбулизации заряда ширмой клапана, тоже улучшает антидетонационные свойства двигателя и согласуется с расчетами (рис. 5). Однако опыты не показали антидетонационного эффекта. Такие результаты можно объяснить изменением показателя $n_1|_{p_a}^{p_c}$, который в опытах с заширмленным клапаном

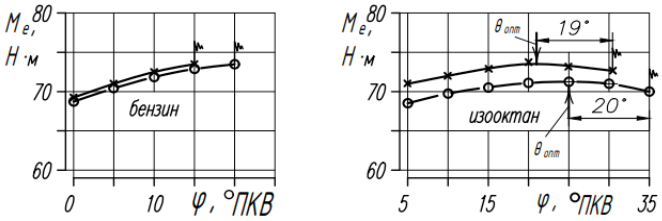


Рис. 11. Регулировочные характеристики по углу опережения зажигания:
– штатный клапан; – заширмленный клапан; – начало слышимой детонации

Fig. 11. Ignition timing characteristics and knock boundary:
– standard valve; – shrouded valve; – onset of audible knock

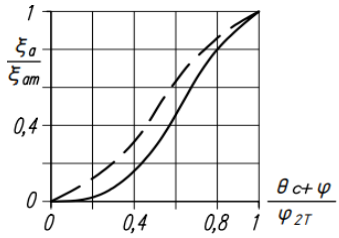


Рис. 12. Характеристики активного тепловыделения:
——— – заширмленный клапан; — — – штатный клапан

Fig. 12. Active heat release rate profiles:
——— – shrouded valve, — — – standard valve

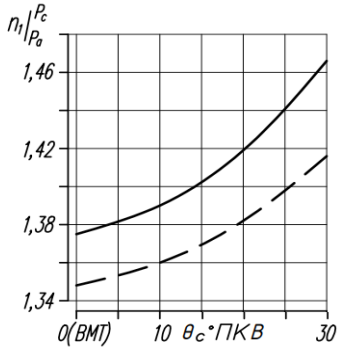


Рис. 13. Средние показатели политропы сжатия:
——— – заширмленный клапан; — — – штатный клапан

Fig. 13. Mean polytropic compression exponents:
——— – shrouded valve, — — – standard valve

больше (рис. 13). Это означает, что газовая смесь сильнее подогревается при сжатии с заширмленным клапаном ввиду увеличения коэффициента теплоотдачи от турбулизации заряда, и положительный эффект от сокращения длительности и изменения формы тепловыделения нейтрализуется отрицательным эффектом от увеличения показателя политропы сжатия.

В целях проверки рекомендаций расчетной модели по интенсификации процесса сгорания проведены эксперименты с одной и с двумя свечами зажигания. В качестве объекта исследований служила одноцилиндровая установка с диаметром цилиндра $D = 82$ мм, ходом поршня $S = 70$ мм и полисферической камерой сгорания со степенью сжатия $\varepsilon = 8{,}8$; свечи расположены в камере сгорания диаметрально противоположно.

На рисунке 14 представлены регулировочные характеристики по углу зажигания при работе двигателя на товарном бензине, из которых следует, что зажигание двумя свечами улучшает антидетонационные свойства двигателя. При работе на бензине с заниженным октановым числом с одной свечой зажигания слышимая детонация наступает при угле зажигания $\theta_{нд} = 21$°пкв, а оптимальный угол (определен на высокооктановом бензине) на этом режиме – $\theta_{опт} = 32$°пкв. При зажигании от двух свечей, соответственно, $\theta_{нд} = 17$°пкв и $\theta_{опт} = 25$°пкв.

Кривые активного тепловыделения в относительных координатах представлены на рисунке 15, а основные параметры процесса сгорания, полученные при обработке индикаторных диаграмм, отображены в таблице 2. При индицировании угол зажигания θ был уменьшен на 1°пкв по отношению к углу начала слышимой детонации $\theta_{нд}$.

Форма кривой тепловыделения для обоих вариантов меняется незначительно, но сокращение длительности тепловыделения приводит к заметному улучшению антидетонационных свойств двигателя.

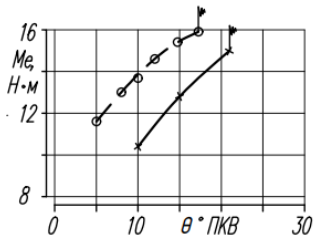


Рис. 14. Регулировочные характеристики по углу зажигания:
– одна свеча зажигания; – две свечи зажигания; – начало слышимой детонации

Fig. 14. Ignition timing characteristics and knock boundary:
– single-spark plug; – dual-spark plugs; – onset of audible knock

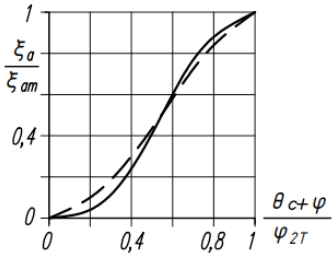


Рис. 15. Графики кривых активного тепловыделения:
——— – одна свеча зажигания; — — – две свечи зажигания

Fig. 15. Active heat release rate curves:
——— – single-spark plug, — — – dual-spark plugs

Таблица 2

Основные параметры процесса сгорания

Table 2

Key parameters of the combustion process

Зажигание	Угол опережения зажигания θ, °пкв	Угол отрыва линии сгорания от линии сжатия, θ_c, °пкв	Длительность первой фазы сгорания, φ_1, °пкв	Длительность второй фазы сгорания до максимума давления, φ_{2z}, °пкв	Длительность второй фазы сгорания до максимума температуры (длительность тепловыделения), φ_{2T}, °пкв
Одна свеча	20	13	7	34	52
Две свечи	16	13	3	29,5	47

Выводы

1. Математическое моделирование рабочего цикла двигателя является эффективным способом исследования детонационных характеристик бензиновых двигателей. Экспериментально подтверждена правильность расчетного прогнозирования детонации по математической модели.

2. Расчетное прогнозирование детонации требует учета двухстадийного механизма возникновения детонации для применяемого товарного бензина с низким октановым числом и с преобладающим групповым составом парафина (алканов).

3. Эффективным способом подавления детонации в поршневых ДВС является интенсификация

теплообмена на начальных стадиях цикла за счет уменьшения начальной температуры цикла, снижения показателя политропы сжатия, а также сокращения длительности тепловыделения. Для высокооктанового топлива снижение начальной температуры цикла на 10°С позволяет повысить допустимую по детонации степень сжатия на 0,4 ед.; снижение среднего показателя политропы сжатия на 0,01 повышает степень сжатия на 0,4 ед. и индикаторный КПД на 1%; сокращение длительности тепловыделения на 10°пкв позволяет повысить степень сжатия на 0,5 ед. или снизить требования к ОЧ бензина на 3,2 ед. ОЧ при неизменной степени сжатия.

4. Сокращение длительности тепловыделения за счет организации турбулизации или направленного вихря заряда на впуске может не оказать антидетонационного эффекта вследствие увеличения показателя политропы сжатия ввиду увеличения теплоотдачи от более интенсивной газодинамики.

5. Эффективным способом улучшения антидетонационных характеристик двигателя является оптимизация регулирования для получения наибольшего КПД, предусматривающая «оптимальное пересжатие» двигателя – избыточное повышение геометрической степени сжатия и снижение углов зажигания по сравнению с их оптимальными значениями. При скоростном режиме 2000 об/мин, полной нагрузке и длительности тепловыделения 50°пкв оптимальное пересжатие достигается при повышении степени сжатия на 2 ед. и смещении угла зажигания в сторону запаздывания на 10°пкв. При этом индикаторный КПД на полной нагрузке повышается на 1…2% в зависимости от ОЧ топлива. Но на частичных нагрузках при работе двигателя с оптимальными углами зажигания повышенная на 2 ед. степень сжатия даст заметное повышение КПД – на 5…6%.

6. Детонационные характеристики двигателя и его КПД могут быть улучшены при организации послойного смесеобразования. Расчеты показали: если порции заряда, до которых фронт пламени доходит в последнюю очередь, обеднить от $\alpha = 1$ до $\alpha = 1{,}8$, то степень сжатия по началу детонации можно повысить на 3,7 ед.

Список источников

1. Кавтарадзе Р.З. Развитие теории рабочих процессов ДВС в МГТУ им. Н.Э. Баумана: от метода Гриневецкого до современных 3D-моделей // Двигателестроение. 2019. № 2. С. 3-8. EDN: EGJULS

2. Апелинский Д.В., Яхутль Д.Р., Шендеровский И.М. Математические модели рабочего цикла ДВС с искровым зажиганием и их численная реализация // Автомобильная промышленность. 2012. № 1. С. 10-13. EDN: NCWIIX

3. Береснев А.Л., Береснев М.А. Разработка математической модели детонации в современном ДВС // Известия ЮФУ. Технические науки. 2020. № 2 (212). С. 123-133. EDN: DPSFHZ

4. Ларионов Л.Б., Болоев П.А., Ильин П.И. и др. Методика расчета детонации в цилиндре биогазового двигателя с искровым зажиганием // Известия МГТУ МАМИ. 2015. Т. 1, № 3. С. 80-85. EDN: UXKHBX

5. Manzoor W.A., Rawashdeh S., Mohammadi A. Real-time prediction of pre-ignition and super-knock in internal combustion engines. SAE International Journal of Engines. 2022;16(3):03-16-03-0021. EDN: ECOFSI

6. Bradley D., Kalghatgi G.T. Influence of autoignition delay time characteristics of different fuels on pressure waves and knock in reciprocating engines. Combustion and Flame. 2009;156(12):2307-2318. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.08.003

7. Капустин А.В., Чумаков В.Л., Девянин С.Н., Жоробеков Б.А. Математическое моделирование детонации в двигателях с искровым зажиганием // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 43-51. EDN: QPGNSQ

8. Чумаков В.Л., Девянин С.Н. Снижение выбросов оксидов при управлении процессом сгорания в дизельном двигателе // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 1. С. 48-56. https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-1-48-56

9. Chumakov V.L., Devyanin S.N., Bijaev A.V. Nitrogen oxide formation with nonuniform fuel distribution in diesel

References

1. Kavtaradze R.Z. Development of combustion theory in Bauman Technical University: from Grinevetsky method to modern 3d-models. *Engines Construction*. 2019;2:3-8. (In Russ.)

2. Apelinskiy D.V., Yakhutl D.R., Shenderovskiy I.M. Mathematical models of the spark-ignition engine working cycle and their numerical implementation. *Avtomobilnaya Promyshlennost*. 2012;1:10-13. (In Russ.)

3. Beresnev A.L., Beresnev M.A. Development of knock mathematical model for modern IC engine. *Izvestiya Sfedu. Engineering Sciences*. 2020;2:123-133. (In Russ.)

4. Larionov L.B., Boloev P.A., Iliin P.I. et al. Method of detonation calculation in the cylinder of biogas engine with spark ignition. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2015;1(3):80-85. (In Russ.)

5. Manzoor W.A., Rawashdeh S., Mohammadi A. Real-time prediction of pre-ignition and super-knock in internal combustion engines. *SAE International Journal of Engines*. 2022;16(3):03-16-03-0021.

6. Bradley D, Kalghatgi G.T. Influence of autoignition delay time characteristics of different fuels on pressure waves and knock in reciprocating engines. *Combustion and Flame*. 2009;156(12):2307-2318. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.08.003

7. Kapustin A.V., Chumakov V.L., Devyanin S.N., Zhorobekov B.A. Mathematical modeling of engine detonation in spark ignition engines. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2023;25(4):43-51. (In Russ.)

8. Chumakov V.L., Devyanin S.N. Oxide Emissions Reduction from Combustion Control in a Diesel Engine. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(1):48-56. (In Russ.) https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-1-48-56

9. Chumakov V.L., Devyanin S.N., Bijaev A.V. Nitrogen oxide formation with nonuniform fuel distribution in diesel engine. *Journal of Physics*: *Conference Series*. 2020;1679:52089. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/5/052089

engine. Journal of Physics: Conference Series. 2020;1679:52089. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/5/052089

10. Турсунбаев Ж.Ж., Жоробеков Б.А., Капустин А.В. и др. Исследование антидетонационных свойств бензиновых двигателей с помощью регрессионного анализа // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2025. № 2. С. 8-14. EDN: XQKLZW

11. Новиков М.А., Капустин А.В., Чумаков В.Л., Павлов С.Б. Расчетное прогнозирование детонации при работе двигателя на бедных составах смеси // Аграрный вестник Верхневолжья. 2025. № 4 (53). С. 101-107. EDN: MGZRPY

Информация об авторах

[1] **Капустин Александр Васильевич,** канд. техн. наук, доцент; aleksandr.kapustin@novsu.ru; SPIN-код: 4981-5158; https://orcid.org/0009-0002-7119-8192

[2] **Чумаков Валерий Леонидович,** канд. техн. наук, профессор; valery.chumakov@gmail.com; SPIN-код: 8443-2880; https://orcid.org/0000-0002-1442-4416

[3] **Девянин Сергей Николаевич,** д-р техн. наук, профессор; devta@rambler.ru, SPIN-код: 2747-6968; https://orcid.org/0000-0001-6776-0432

[4] **Федоткин Роман Сергеевич,** канд. техн. наук; fedotkin@rgau-msha.ru, SPIN-код: 2417-4241; https://orcid.org/0000-0002-3991-4315

[5] **Бижаев Антон Владиславович,** канд. техн. наук; доцент; a.bizhaev@mail.ru; SPIN-код: 9728-8666; https://orcid.org/0000-0002-0807-1255

[1] Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого; 173003, Российская Федерация, г. Великий Новгород, Большая Санкт-Петербургская ул., 41

[2, 3, 4, 5] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

А.В. Капустин – методология, программное обеспечение, руководство и проведение исследований, формальный анализ, создание черновика рукописи;
В.Л. Чумаков – программное обеспечение, проведение исследований, визуализация, создание черновика рукописи.
С.Н. Девянин – верификация данных, формальный анализ;
Р.С. Федоткин – ресурсы, верификация данных;
А.В. Бижаев – верификация данных, формальный анализ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 25.06.2026, после рецензирования и доработки 03.07.2026, принята к публикации 06.10.2026

10. Tursunbaev Zh., Zhorobekov B., Kapustin A. Investigation of anti-detonation properties of gasoline engines using regression analysis. *Nauka, novye tekhnologii i innovatsii Kyrgyzstana.* 2025;2:8-14. (In Russ.)

11. Novikov M.A., Kapustin A.V., Chumakov V.L., Pavlov S.B. Detonation prediction when an engine is operating on lean mixture compositions. *Agrarniy vestnik Verkhnevolzhya.* 2025;4:101-107. (In Russ.)

Author Information

A.V. Kapustin[1], CSc(Eng), Associate Professor, aleksandr.kapustin@novsu.ru; https://orcid.org/0009-0002-7119-8192

V.L. Chumakov[2], CSc(Eng), Professor; valery.chumakov@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-1442-4416

S.N. Devianin[3], DSc(Eng), Professor; devta@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0001-6776-0432

R.S. Fedotkin[4], CSc(Eng), fedotkin@rgau-msha.ru, https://orcid.org/0000-0002-3991-4315

A.V. Bizhayev[5], CSc(Eng), Associate Professor, a.bizhaev@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-0807-1255

[1] Yaroslav the Wise Novgorod State University; 41 Bolshaya Sankt-Peterburgskaya Str., Veliky Novgorod, 173003, Russian Federation

[2, 3, 4, 5] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contribution

A.V. Kapustin – methodology, software, research supervision, investigation, formal analysis, writing – original draft;
V.L. Chumakov – software, investigation, visualization, writing – original draft;
S.N. Devyanin– validation, formal analysis;
R.S. Fedotkin – resources, validation;
A.V. Bizhayev – validation, formal analysis.

Conflict of interest

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

Received 25.06.2026; Revised 03.07.2026; Accepted 06.10.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.22.01
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-70-78

Повышение аэродинамической эффективности модульного охладителя-дезинфектора

***И.Ю. Игнаткин*[1]✉, *М.М. Прокофьев*[2], *Н.А. Шевкун*[3], *С.В. Золотарев*[4]**

[1, 2, 3, 4] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

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

[2] m.prokofiev@rgau-msha.ru

[3] energo-shevkun@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7451-7828

[4] zolotarev@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-3615-6130

Аннотация. Оптимизация микроклимата способствует улучшению физиологического состояния свиней и повышению их продуктивности. Водоиспарительные системы свиноводческих комплексов нуждаются в модернизации. С целью повышения аэродинамической эффективности модульного охладителя-дезинфектора за счет равномерного распределения воздуха по поверхности охлаждающих кассет предложили использовать спрямляющий аппарат и систему дефлекторов. Прогнозируемый прирост производительности установки с дефлекторами составил 2%. Экспериментально полученные средние значения скорости потока подтвердили повышение производительности оптимизированной конструкции охладителя (с дефлекторами) в сравнении с исходной в 1,02 раза. Установлена положительная динамика выравнивания поля скоростей при установке трех дефлекторов и спрямляющего аппарата. Сравнительный анализ показал снижение потерь давления модульного охладителя с дефлекторами на 4% в сравнении с установкой без дефлектора. Применение спрямляющего аппарата и трех дефлекторов обеспечило прирост средней скорости потока воздуха и привело к увеличению повышению производительности установки на 289 м^3/ч. Оптимизация аэродинамических параметров установки обеспечила снижение коэффициента вариации скорости воздушного потока на 28,6%, что гарантирует на 90% площади охлаждающих кассет скорость движения воздуха с отклонением, не превышающим 20% от среднего значения. Разработанный модернизированный модульный охладитель-дезинфектор рекомендуем применять в свиноводческих комплексах для оптимизации микроклимата.

Ключевые слова: водоиспарительные системы; микроклимат; модульный охладитель-дезинфектор; повышение аэродинамической эффективности; расход воздуха; свиноводство; спрямляющий аппарат; дефлектор

Для цитирования: Игнаткин И.Ю., Прокофьев М.М., Шевкун Н.А., Золотарев С.В. Повышение аэродинамической эффективности модульного охладителя-дезинфектора // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 70-78. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-70-78

ORIGINAL ARTICLE

Method for increasing the aerodynamic efficiency of a modular cooler-disinfector

***I.Y. Ignatkin*[1], *M.M. Prokofiev*[2], *N.A. Shevkun*[3], *S.V. Zolotarev*[4]**

[1, 2, 3, 4] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

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

[2] m.prokofiev@rgau-msha.ru

[3] energo-shevkun@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7451-7828

[4] zolotarev@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-3615-6130

Abstract. Microclimate optimization is crucial for enhancing the physiological well-being and productivity of pigs. However, conventional evaporative cooling systems in swine-breeding facilities often suffer from aerodynamic inefficiencies that demand technological modernization. The study proposes the integration of a flow straightener and an optimized deflector system to improve the aerodynamic efficiency of a modular cooler-disinfector by ensuring uniform air distribution across the cooling cassettes. Numerical simulations predicted a 2% increase in unit performance with the proposed deflectors, which was subsequently validated experimentally by an identical

© Игнаткин И.Ю., Прокофьев М.М., Шевкун Н.А., Золотарев С.В., 2026

performance improvement factor of 1.02 relative to the baseline design. Incorporating three deflectors and a flow straightener equalized the velocity field, resulting in a 4% reduction in aerodynamic pressure losses compared to the installation without deflectors. Furthermore, this optimized configuration enhanced the average air flow velocity, boosting the overall volumetric capacity of the unit by 289 m^3/h. Aerodynamic optimization achieved a 28.6% reduction in the coefficient of variation of the air flow velocity, ensuring that local air velocity deviates by no more than 20% from the mean value across over 90% of the cooling cassette surface area. The developed modernized modular cooler-disinfector is recommended for implementation in swine-breeding facilities to optimize microclimate conditions and energy performance.

Keywords: water-evaporative cooling systems; microclimate; modular cooler-disinfector; aerodynamic efficiency; airflow distribution; swine production; flow straightener; deflector

For citation: Ignatkin I.Y., Prokofiev M.M., Shevkun N.A., Zolotarev S.V. Method for increasing the aerodynamic efficiency of a modular cooler-disinfector. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):70-78. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-70-78

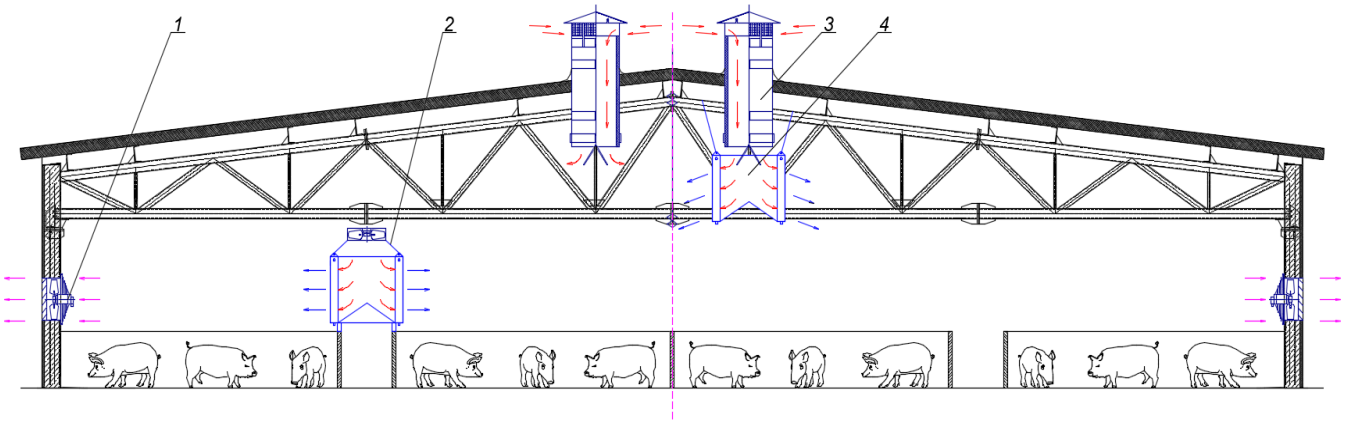
Введение

Оптимизация микроклимата является фундаментальным технологическим аспектом интенсивного животноводства, влияющим на физиологическое состояние свиней и уровень реализации их генетического потенциала [1-3]. Эффективная система микроклимата обеспечивает стабильность температурного и влажностного режима в производственных помещениях [4-6] и гарантирует соблюдение санитарно-гигиенических нормативов содержания поголовья [7, 8].

В современном свиноводстве для регулирования температурно-влажностного режима и организации воздухообмена применяются водоиспарительные системы [9]. Согласно оценкам В.А. Гулевского и др. [9, 10] наиболее универсальные и энергоэффективные климатические системы, функционирующие по принципу адиабатического охлаждения и имеющие орошаемую поверхность, снижают температуру приточного воздуха относительно наружного на 15°C. Модульные водоиспарительные системы можно интегрировать в существующие вентиляционные системы без проведения капитальных строительно-монтажных работ [11-13]. По оценкам В.П. Шацкого, Ю.Г. Иванова, В.В. Кирсанова и др. [9, 14-16] размещение оборудования внутри производственных помещений позволяет снизить затраты на отопление в зимний период в сравнении с панельными системами на 6…9%. Кроме того, водоиспарительная система может быть задействована для дезинфекции воздушной среды, что расширяет ее функциональные возможности [5].

Модульный охладитель-дезинфектор можно применять в стационарном исполнении при агрегатировании с приточными шахтами или в передвижном напольном варианте, при котором движение воздуха побуждается вентилятором (рис. 1). В обоих случаях поток воздуха направляется сверху вниз и поворачивается на 90°.

Такая организация воздушного потока имеет недостатки: во-первых, повышаются потери давления при



а б

Рис. 1. Система вентиляции с применением модульного охладителя-дезинфектора в напольном (а) и подвесном (б) исполнении

Fig. 1. Ventilation system using a modular cooler-disinfector in various designs:
a) floor-standing; b) suspended

повороте потока; во-вторых, воздух по поверхности охлаждающих кассет распределяется неравномерно. В случае с вентилятором ситуация усугубляется, так как поток воздуха закручивается и пульсирует. Описанные явления снижают производительность установки и эффективность охлаждения воздуха. Решение указанных проблем возможно за счет снижения потерь давления при повороте на 90° и равномерного распределения воздушного потока по всей площади охлаждающих кассет модульного охладителя-дезинфектора.

Цель исследований: повышение аэродинамической эффективности модульного охладителя-дезинфектора.

Материалы и методы

Повысить аэродинамическую эффективность модульного охладителя-дезинфектора предлагаем за счет спрямления закрученного потока и обеспечения равномерной подачи воздуха по поверхности охлаждающих кассет. Для реализации поставленных задач применили спрямляющий аппарат *8* и дефлекторы *9* (рис. 2).

Источниками потерь давления в местных сопротивлениях модульного охладителя-дезинфектора являются вход, диффузор, поворот на 90°, увлажняемые кассеты и выход. Наибольшим источником потерь считаются увлажняемые кассеты, однако модернизация конструкции промышленного изделия в рамках данной работы не предусмотрена. Следующим по значению источником потерь являются диффузор и поворот потока на 90° (рис. 2а). Опираясь на работу И.Е. Идельчика, отметим, что наличие за диффузором равномерно распределяющего по сечению сопротивления в виде сетки, решетки или разделительной стенки обеспечивает упорядочивание потока и приводит к некоторому снижению потерь[1].

При равных условиях функционирования установок с дефлекторами и без них расход подаваемого воздуха будет определяться перепадом давления Δp на участке. Изменение расхода воздуха (Q) на участке поворота модульного охладителя определим по формуле:

$$Q = \mu\omega\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}},$$

где μ – коэффициент расхода; ω – площадь модульного охладителя, м^2; Δp – перепад давления на участке, Па; ρ – плотность воздуха, кг/м^3.

$$\Delta p = \xi\frac{\rho v^2}{2},$$

где v – скорость воздушного потока, м/с; ξ – коэффициент местного сопротивления.

Для диффузоров, снабженных разделительными стенками (дефлекторами), коэффициент местного сопротивления составляет:

$$\xi = 0{,}65\xi_д,$$

где $\xi_д$ – коэффициент местного сопротивления диффузора без разделительной стенки.

Работающий вентилятор на выходе охладителя создает закрученную пульсирующую струю воздуха,

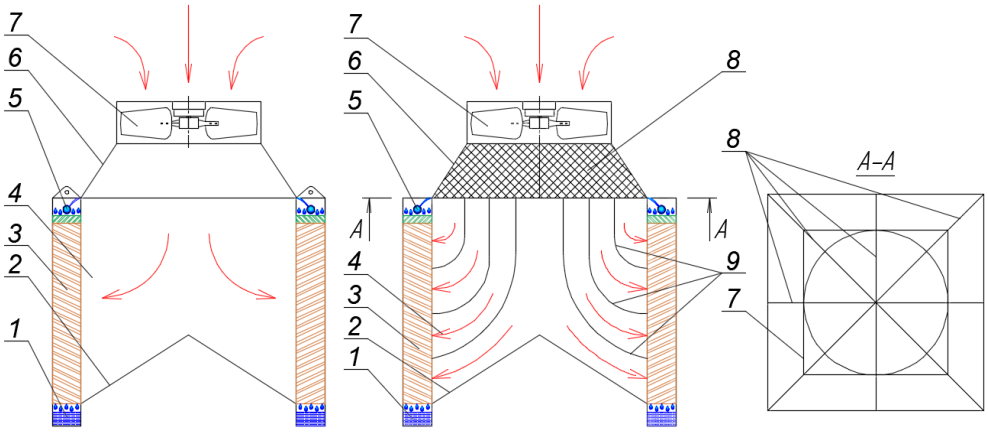


Рис. 2. Модульный охладитель-дезинфектор в исходном (а) и оптимизированном (б) исполнении:
1 – поддон для воды; 2 – угловое дно охладителя; 3 – охлаждающих кассеты; 4 – корпус охладителя; 5 – водопровод; 6 – раструб; 7 – вентилятор; 8 – спрямляющий аппарат; 9 – дефлекторы

Fig. 2. Modular cooler-disinfector in the original (a) and optimized (b) versions:
1 – water tray; 2 – angular bottom of the cooler; 3 – humidified cassettes; 4 – cooler body; 5 – water supply; 6 – bell; 7 – fan; 8 – flow straightener; 9 – deflectors

[1] Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М.О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

что не позволяет добиться распределения скоростей воздуха с погрешностью, не превышающей стандартные 5%, поэтому требуется кардинальная переработка конструктивной схемы и элементного состава аппарата. При измерении скоростей порядка единиц метров в секунду 1% отклонения составляет 0,02 м/с, достоверное измерение скорости движения воздуха с такой точностью в нестационарном потоке имеет смысл только при оценке динамических характеристик, а добиваться установившегося стационарного потока воздуха в рассматриваемой установке не имеет смысла в отношении экономики. Аппарат является компактным, расстояние от вентилятора до выхода воздуха из установки не превышает 1,7 калибра, а от края спрямляющего аппарата – 1,3 калибра. По общим рекомендациям[2] в линейном воздуховоде режим устанавливается через 3 калибра. Порог чувствительности системы к отклонениям скорости является довольно высоким и проявляется при значениях, превышающих ±10%. Также слеет учесть, что по периметру охлаждающих кассет проявляются краевые эффекты (например, эффект Коанда), поэтому в качестве целевого параметра следует принимать отклонение скорости от среднего арифметического значения не более чем на 20% и на 90% от площади охлаждающих кассет. Указанные значения достижимы и не повлекут за собой кардинальной переработки конструктивной схемы и элементного состава аппарата.

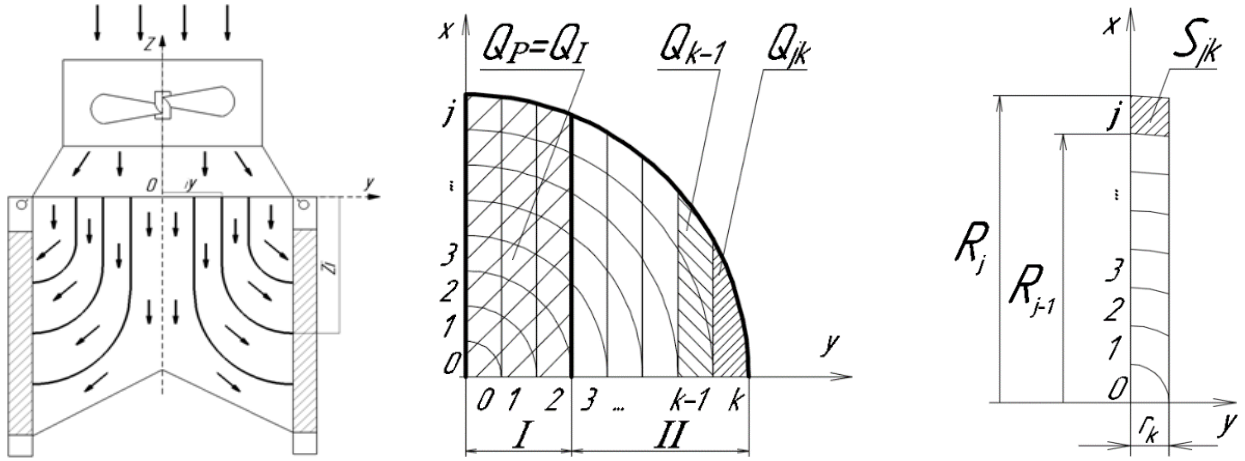
В случае напорной схемы и побуждения потока воздуха вентилятором сталкиваемся с неравномерностью распределения скоростей в сечении вентилятора, закрученностью потока и малым расстоянием от вентилятора до охлаждающих кассет. С целью обеспечения равномерной подачи воздуха на охлаждающие кассеты предлагаем разделить поток от вентилятора до кассет на зоны равного расхода; за оптимальное количество зон принять минимальное, обеспечивающее отклонение от среднего арифметического значения скорости воздуха на выходе из охлаждающих кассет не более чем на 20% и на 90% от площади охлаждающих кассет.

Для решения задачи деления потока воздуха на фрагменты равного расхода следует рассмотреть схему движения воздуха. Вентилятор захватывает охлаждаемый воздух и направляет в спрямляющий аппарат, а затем поток поворачивается на 90° и подается на охлаждающие кассеты (рис. 3а).

Деление установки на зоны равного расхода с помощью дефлекторов позволит снизить потери напора при повороте на 90°. Рассмотрим решение задачи на примере одного дефлектора. В этом случае расход воздуха Q_i, направляемый на i-й участок охлаждающих кассет, определяется по формуле:

$$Q_i = \frac{Q}{z\,n}, \qquad (1)$$

где Q – расход вентилятора установки, м^3/ч; z – количество рабочих поверхностей (сторон); n – количество секций, на которые разделяется поверхность охлаждающих кассет.



а) б) в)

Рис. 3. Схема определения параметров:
а) продольный разрез установки; б) сектор поперечного сечения в срезе (0) от выхода вентилятора;
в) площади элементарного участка воздушной струи

Fig. 3. Parameter determination diagram:
a) longitudinal section of the unit; b) cross-sectional sector at cutoff (0) from the fan outlet;
c) area of the elementary section of the air stream

[2] Иванов О.П., Мамченко В.О. Аэродинамика и вентиляторы: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Холодильные и компрессорные машины и установки». Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986. 280 с.

При использовании предложенной схемы количество дефлекторов (z) определяется количеством секций (n), на которые разделяется поверхность охлаждающих кассет: $z = n - 1$. Для обеспечения равномерного распределения воздушного потока по всей площади охлаждающих элементов необходимо определить координаты z_i и y_i установки каждого дефлектора. В случае прямоугольной геометрии кассет их горизонтальная координата z_i может быть найдена по формуле:

$$z_i = \frac{H}{z}, \quad (2)$$

где H – высота охлаждающих кассет, м; z – количество дефлекторов.

Распределение скоростей в сечении вентилятора – осесимметричное неравномерное и зависит от радиуса ($v = f(r)$). Линии равных скоростей представляют собой множество концентрических окружностей с общим центром на оси вентилятора. При установке дефлектора по хорде круга сталкиваемся с нелинейностью деления как по площади, так и по скорости.

Расход воздуха в выделенном секторе можно определить по формуле:

$$Q_{jk} = \sum_{0}^{k}\sum_{0}^{j} v_j s_{jk}, \quad (3)$$

где j – номер кольцевого сечения; k – номер ряда; v_k – скорость элементарной струйки в j-м кольце, м/с; S_{kj} – площадь элементарной струйки, м^2.

В случае деления потока хордой расходы воздуха в сегментах должны быть одинаковыми. Определим координату положения дефлектора, обеспечивающую деление потока на равные доли:

$$y_i = \Delta r m_i, \quad (4)$$

где Δr – ширина ряда, м; m_i – количество рядов в участке.

С целью обеспечения требуемой точности результаты вычислений должны отвечать следующему условию:

$$\delta = \frac{Q_{k\,\max}}{2Q_p} \cdot 100\% \le [\delta], \quad (5)$$

где $Q_{k\,\max}$ – максимальное значение расхода одного ряда, м^3/ч; $[\delta]$ – допустимое значение погрешности, %.

Начальную ширину ряда следует определять по формуле:

$$\Delta r \le \frac{2\pi R_в [\delta]}{zp \cdot 100\%}, \quad (6)$$

где $R_в$ – радиус вписанной окружности сечения спрямляющего аппарата, м; z – количество сторон (рабочих поверхностей аппарата); p – количество участков.

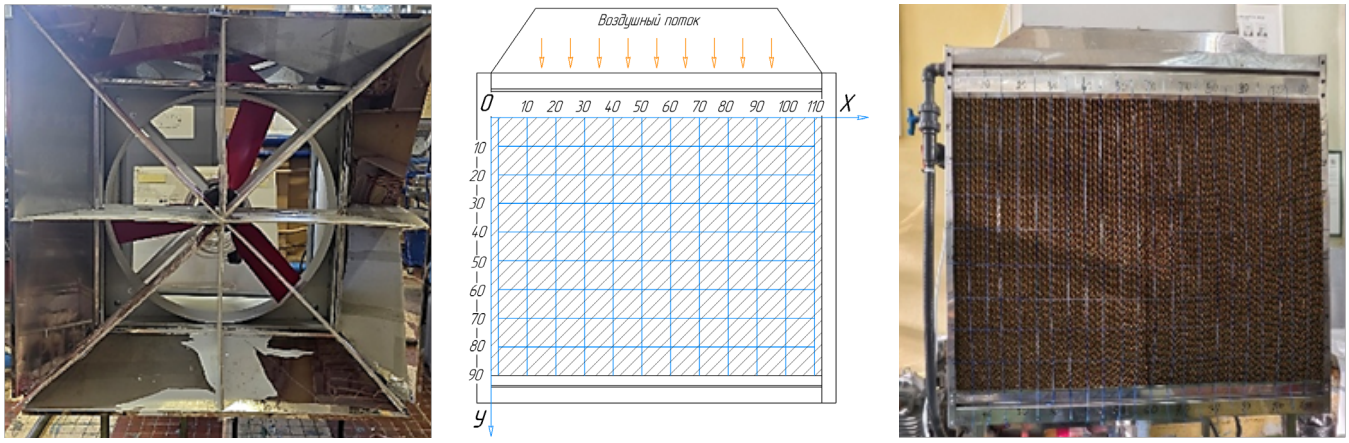
Для вычислений необходимо получить зависимость скорости потока от радиуса вентилятора. Наиболее точные результаты получились при определении скорости потока по измеренному значению динамического давления:

$$v = \sqrt{\frac{2p_{дин}}{0{,}95\rho}},$$

где $p_{дин}$ – динамическое давление в контрольной точке измерения, м/с; ρ – плотность воздуха, кг/м^3; 0,95 – коэффициент восстановления трубки Пито.

Измерение давления воздушного потока выполняли с шагом 50 мм по направлению от центра к периферии (рис. 4а).

Для определения динамического давления использовали комбинированный измерительный комплекс, включающий в себя трубку Пито, соединенную с пьезометром. Подключение данной системы к дифференциальному манометру обеспечивает



а б в

Рис. 4. Опытный образец установки:
а) вентилятор и раструб со спрямляющим аппаратом; б) схема размещения точек измерения; в) общий вид установки

Fig. 4. Experimental model of the installation:
a) fan and funnel with a flow straightener; b) diagram of the placement of measurement points; c) general view of the installation

прямое считывание значений аэродинамической составляющей давления без необходимости дополнительных вычислений. Использовались приборы стенда «Типовой комплект учебного оборудования ОГД-10-13ЛР-01». Далее определяли расход воздуха, проходящий через охлаждающие кассеты, на основании замера его скорости на выходе из кассет с помощью крыльчатого анемометра Benetech GM8902. Для этого вся поверхность охладительной кассеты была разбита на квадраты (рис. 4б). Измерение скорости проводили в центрах выделенных квадратов в трехкратной повторности.

Для количественной оценки равномерности распределения скорости воздуха по поверхности охлаждающих кассет использовали коэффициент вариации $K\upsilon$:

$$K\upsilon = \frac{\sigma}{\bar{x}}, \quad (7)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение, м/с; $\bar{x}$ – среднеарифметическое значение скорости воздушного потока, м/с.

Результаты и их обсуждение

По результатам измерений скорости воздуха на выходе из спрямляющего аппарата получили данные, представленные на рисунке 5. В результате аппроксимации результатов получили математическую зависимость изменения скорости воздуха от радиуса вентилятора:

$$v = -502{,}42 \cdot r^4 + 276{,}5 \cdot r^3 - 14{,}358 \cdot r^2 + 13{,}191 \cdot r. \quad (8)$$

Коэффициент детерминации полученной модели – 0,95.

На основе экспериментальных данных установлено, что при использовании одного дефлектора оптимальное расстояние от центра сечения составляет 250 мм. При установке дефлектора на расстояние R/2 (225 мм) соотношение расходов в образовавшихся секциях составляет 0,44/0,56.

Согласно формуле (6) в случае необходимости разделения потока на три секции шаг дискретности следует принимать как менее 43 мм, а для четырех секций – соответственно 25 мм.

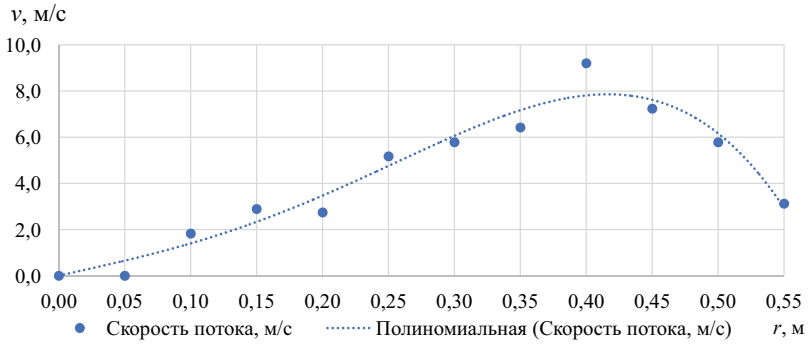


Рис. 5. Распределение скорости потока в сечении спрямляющего аппарата

Fig. 5. Velocity distribution in the section of the straightener

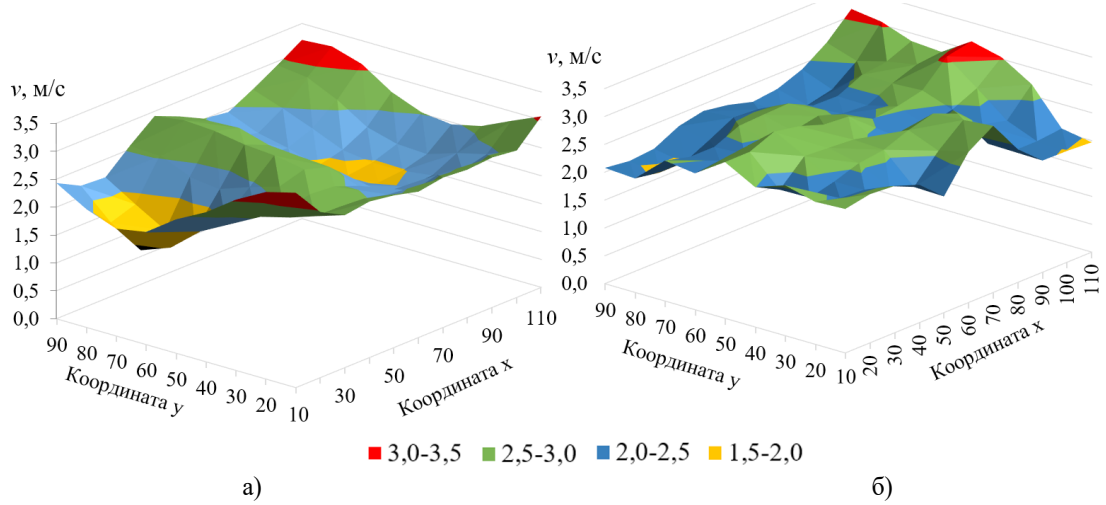


Рис. 6. Распределение скорости воздуха по площади охлаждающих кассет:
а) исходный вариант; б) оптимизированный вариант

Fig. 6. Air velocity distribution across the cooling cassette surface:
a) original version; b) optimized version

При установке трех дефлекторов и спрямляющего аппарата наблюдали положительную динамику выравнивания поля скоростей (рис. 6).

Для предложенной схемы модульного охладителя выполнили расчеты величин суммарных потерь давления для двух вариантов компоновки установки: без дефлекторов и со спрямляющим аппаратом и тремя дефлекторами. Расчеты показали, что основную долю потерь (около 90%) составляют местные потери давления на орошаемом мате; их модернизация в рамках данной работы не рассматривалась.

Сравнительный анализ показал снижение потерь давления модульного охладителя с дефлекторами на 4,01% в сравнении образцом без дефлектора.

Прирост производительности установки с учетом влияния расчетного значения суммарных потерь давления в охладителе без дефлекторов (Q) по отношению к установке с дефлекторами ($Q_д$) определим из выражения:

$$\frac{Q}{Q_д} = \frac{A\sqrt{p_\Sigma}}{A\sqrt{0,96\,p_\Sigma}} = 1,02 \text{ раза},$$

где p_Σ – суммарные потери давления в установке.

Из представленного соотношения следует, что прогнозируемый прирост производительности установки с дефлекторами составляет 2%.

Оценка экспериментальных значений средних скоростей исходной и оптимизированной конструкции охладителя (с дефлекторами) (табл.) подтверждает теоретический прогноз по повышению производительности:

$$\frac{v_о}{v_и} = \frac{2,49}{2,45} = 1,016,$$

где $v_и$ – средняя скорость в исходной конструкции, м/с; $v_о$ – средняя скорость в оптимизированной конструкции, м/с.

Применение спрямляющего аппарата и дефлекторов обеспечивает прирост средней скорости потока (табл.) и увеличение повышение установки на 289 м^3/ч. Сходимость экспериментальных и теоретических значений составляет 80%.

Отклонения скорости потока от среднего значения снизились с 45 до 24%. Доля площади с отклонениями, не превышающими 10%, возросла на 35% и достигла 62%. На 90% площади охлаждающих кассет отклонение скорости от среднего значения не превышает 20%. Результаты статистической обработки данных представлены в таблице.

Оптимизация аэродинамических параметров установки обеспечила снижение коэффициента вариации скорости воздушного потока на 28,6%, что свидетельствует о существенном повышении равномерности его распределения вдоль водоиспарительных поверхностей модульного охладителя-дезинфектора.

Таблица

Результаты статистической обработки данных по распределению скоростей

Table

Results of statistical processing of speed distribution data

Версия охладителя	Параметр			
	Средняя скорость, м/с	Стандартное отклонение, м/с	Коэффициент вариации *Kv*	Снижение *Kv*, %
Исходная	2,45	0,40	0,16	28,6
Оптимизированная	2,49	0,29	0,12	

Выводы

Установка спрямляющего аппарата и трех дефлекторов в модульном охладителе-дезинфекторе обеспечивает отклонение скорости потока воздуха в пределах 20% на 90% площади охлаждающих кассет. При этом равномерность распределения скорости воздуха по поверхности охлаждающих кассет увеличилась на 28,6%, коэффициент вариации составил 0,12. Производительность установки возросла на 289 м^3/ч.

Список источников

1. Тихомиров А.В., Маркелова Е.К., Тихомиров Д.А. Основные направления по совершенствованию систем и средств энергообеспечения сельхозобъектов // Агротехника и энергообеспечение. 2017. № 3 (16). С. 34-42. EDN: ZGUDUF

2. Тихомиров Д.А., Тихомиров А.В. Совершенствование и модернизация систем и средств энергообеспечения – важнейшее направление решения задач повышения

References

1. Tikhomirov A.V., Markelova E.K., Tikhomirov D.A. The main directions for improvement of systems and means of energy supply of agricultural objects. *Agrotekhnika i energoobespechenie.* 2017;3:34-42. (In Russ.)

2. Tikhomirov D.A., Tikhomirov A.V. Improvement and modernization of systems and energy supply means -the most important direction in problem solution of agricultural production energy

энергоэффективности сельхозпроизводства // Техника и оборудование для села. 2017. № 11. С. 32-36. EDN: ZTMESB

3. Игнаткин И.Ю., Шевкун Н.А., Архипцев А.В. и др. Об особенностях организации реверсивного оттаивания в рекуператорах теплоты вытяжного воздуха // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 15-19 https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-15-19

4. Гулевский В.А., Рязанцев А.А. О возможностях водоиспарительного охлаждения в свиноводческих помещениях // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. 2017. № 1. С. 145-152. EDN: YNUJET

5. Кирсанов В.В., Игнаткин И.Ю. Энергосбережение при обеспечении микроклимата в свиноводстве: Монография. М.: Редакция журнала «Механизация и электрификация сельского хозяйства», 2020. 178 с. EDN: RTLOAC

6. Гулевский В.А., Евсюкова В.П. Эффективность работы водоиспарительных агрегатов охлаждения прямого и косвенного принципов действия // Актуальные вопросы физико-математических и технических наук в свете современных исследований АПК: Материалы Национальной научно-практической конференции, г. Воронеж, 23 октября 2024 г. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, 2024. С. 161-164. EDN: HSPJHA

7. 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. С. 74-77. https://doi.org/10.51794/27132064-2021-2-74

8. Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А., Мошонкин А.М., Жумагулов Ж.Б. Анализ математических моделей контроля параметров, характеризующих состояние теплового стресса животных на молочных фермах // Техника и технологии в животноводстве. 2023. № 4. С. 36-41. https://doi.org/10.22314/27132064-2023-4-36

9. Казанцев С.П., Игнаткин И.Ю. Система микроклимата в свиноводстве с применением охладителей новой конструкции // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2014. № 5. С. 18-20. EDN: UXQNTN

10. Гулевский В.А., Евсюкова В.П., Маковичко В.С. Экспериментальные исследования работы агрегатов охлаждения воздуха // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: Материалы Международной научно-практической конференции, г. Воронеж, 12 февраля 2024 г. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, 2024. С. 245-249. EDN: JTDUWD

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

12. Ильин И.И., Смолинский Е.А., Нестерова О.М. Новые технологии в проектировании, реконструкции и строительстве свиноводческих комплексов // Перспективное свиноводство: теория и практика. 2010. № 2. С. 13. EDN: NBVWCV

13. Шацкий В.П., Высоцкая Ж.В., Гулевский В.А. К вопросу о работе водоиспарительных охладителей // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2008. № 3. С. 95-99. EDN: JVFKFJ

14. Шацкий В.П., Чесноков А.С. Варианты монтажа и характеристики работы водоиспарительных охладителей // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2010. № 3. С. 32-39. EDN: MTZYKJ

15. Иванов Ю.А., Иванов Ю.Г., Борулько В.Г., Понизовкин Д.А. Организация системы вентиляции с водоиспарительным охлаждением для производственных зон коровника

efficiency improvement. *Machinery and Equipment for Rural Area***.** 2017;11:32-36. (In Russ.)

3. Ignatkin I.Yu., Shevkun N.A., Arkhiptsev A.V. et al. On the peculiarities of organizing reverse defrosting in exhaust air heat recuperators. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2022;24(6):15-19. (In Rus.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-15-19

4. Gulevsky V.A., Ryazantsev A.A. About the possibilities photospreteen cooling in pig-breeding premises. *Konstruirovanie, ispolzovanie i nadezhnost mashin selskokhozyaystvennogo naznacheniya.* 2017;1:145-152. (In Russ.)

5. Kirsanov V.V., Ignatkin I.Yu. Energy efficiency in microclimate control for pig farming: Monograph. Moscow: Editorial office of the *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva Journal*, 2020. 178 p. (In Russ.)

6. Gulevsky V.A., Evsyukova V.P. The efficiency of water vaporizing cooling units of direct and indirect principles of action. *Aktualnye voprosy fiziko-matematicheskikh i tekhnicheskikh nauk v svete sovremennykh issledovaniy APK*: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference, Voronezh, October 23, 2024. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 2024. P. 161-164. (In Russ.)

7. 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;2:74-77. (In Russ.) https://doi.org/10.51794/27132064-2021-2-74

8. Ivanov Yu.G., Ponizovkin D.A., Moshonkin A.M., Zhumagulov Zh.B. Mathematical model of the effect of cowshed microclimate parameters on the clinical and physiological parameters of cattle. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2023;4:36-41. (In Russ.) https://doi.org/10.22314/27132064-2023-4-36

9. Kazantsev S.P., Ignatkin I.Yu. System microclimate in livestock using coolers new design. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva*. 2014;5:18-20. (In Russ.)

10. Gulevsky V.A., Evsyukova V.P., Makovichko V.S. Experimental studies of the operation of air cooling units. *Tendentsii razvitiya tekhnicheskikh sredstv i tekhnologiy v APK*: *Proceedings of the International scientific and practical conference*, Voronezh, February 12, 2024. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 2024. Pp. 245-249. (In Russ.)

11. Tikhomirov D.A. The ventilation and heating system is modular. *Selskiy mekhanizator*. 2012;9:32-33. (In Russ.)

12. Ilyin I.I., Smolinsky E.A., Nesterova O.M. Advanced technologies in the design, reconstruction, and construction of pig-breeding facilities. *Perspektivnoe svinovodstvo*: *teoriya i praktika*. 2010;2:13. (In Russ.)

13. Shatsky V.P., Vysotskaya Zh.V., Gulevsky V.A. On the operation of evaporative coolers. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineer*ing. *Construction and Architecture*. 2008;3:95-99. (In Russ.)

14. Shatsky V.P., Chesnokov A.S. Aircoolers variants of their installation and characteristics of work. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2010;3:32-39. (In Russ.)

15. Ivanov Yu.A., Ivanov Yu.G., Borulko V.G., Ponizovkin D.A. Organization of a ventilation system with evaporative cooling for the cowshed's producing areas. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2024;14(4):31-36. (In Russ.) https://doi.org/10.22314/27132064-2024-14-4-31

16. Kirsanov V.V., Ignatkin I.Yu. Mathematical model of water evaporative cooling in ventilation system. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"*. 2017;1(77):14-20. (In Russ.)

// Техника и технологии в животноводстве. 2024. Т. 14, № 4. С. 31-36. https://doi.org/10.22314/27132064-2024-14-4-31

16. Кирсанов В.В., Игнаткин И.Ю. Математическая модель водоиспарительного охлаждения в системах вентиляции // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2017. № 1 (77). С. 14-20. EDN: XVDGIX

Информация об авторах

[1] **Игнаткин Иван Юрьевич,** д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры сопротивления материалов и детали машин; ignatkin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-4867-1973; SPIN-код: 4391-8002

[2] **Прокофьев Михаил Михайлович,** аспирант 1 курса аспирантуры Института механики и энергетики имени В.П. Горячкина; m.prokofiev@rgau-msha.ru; SPIN-код: 8069-9252

[3] **Шевкун Николай Александрович,** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения и теплоэнергетики имени академика И.А. Будзко; energo-shevkun@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7451-7828; SPIN-код: 5852-6284

[4] **Золотарев Сергей Васильевич,** д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры ландшафтной архитектуры; zolotarev@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-3615-6130; SPIN-код: 9217-4310.

[1, 2, 3, 4] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

Игнаткин И.Ю. – руководство исследованиями, концептуализация, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
Прокофьев М.М. – проведение исследований, визуализация, создание черновика рукописи;
Шевкун Н.А. – ресурсы, формальный анализ;
Золотарев С.В. – ресурсы, формальный анализ.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 14.04.2026, после рецензирования и доработки 07.07.2026, принята к публикации 08.07.2026

Author Information

I.Yu. Ignatkin [1], DSc (Eng), Associate Professor, Professor, Department of Resistance of Materials and Machine Parts, ignatkin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-4867-1973; Scopus Author ID: 57222543815

M.M. Prokofiev [2], postgraduate student; the Institute of Mechanical and Power Engineering named after V.P. Goryachkin; m.prokofiev@rgau-msha.ru

N.A. Shevkun [3], PhD (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the I.A. Budzko Department of Electric Power Supply and Thermal Energy, energo-shevkun@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7451-7828; Scopus Author ID: 57222576008

S.V. Zolotarev [4], DSc (Eng), Professor, Professor of the Department of Landscape Architecture, zolotarev@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-3615-6130

[1, 2, 3, 4] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contribution

Ignatkin I.Yu. – research supervision, conceptualization, writing – review and editing of the manuscript;
Prokofiev M.M. – investigation, visualization, writing – original draft;
Shevkun N.A. – resources, formal analysis;
Zolotarev S.V. – resources, formal analysis;

Conflict of interest

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

Received 14.04.2026; Revised 07.07.2026; Accepted 08.07.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.363
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-79-86

Оценка качества приготовления рассыпного комбикорма малогабаритным комбикормовым агрегатом

С.Ф. Вольвак[1]✉, ***Д.Н. Бахарев***[2], ***А.Г. Пастухов***[3]

[1, 3] Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина; п. Майский, Россия

[2] Луганский государственный университет им. В. Даля; г. Луганск, Россия

[1] volvak.s@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-6955-7144

[2] baharevdn_82@mail.ru; https://orcid.org/0009-0005-4263-740X

[3] pastukhov_ag@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-6573-0950

Аннотация. Получить с минимальными затратами рассыпной комбикорм для кур позволяет многофункциональное оборудование. В частности, малогабаритный комбикормовый агрегат с объемным многокомпонентным дозатором и молотковым измельчителем-смесителем с вертикальным валом обеспечивает прямоточную схему технологического процесса приготовления в малых хозяйствах рассыпного комбикорма из собственного сырья и покупных добавок. Исследования проведены с целью оценки качества приготовленного агрегатом рассыпного комбикорма для кур-несушек и усовершенствования метода определения однородности смешивания кормовых смесей. Качество приготовленного рассыпного комбикорма определяли по результатам ситового анализа, модулю помола зерна, крупности и степени однородности смешивания комбикорма. Усовершенствованная методика определения степени однородности многокомпонентной кормовой смеси заключалась в определении процента подкрашенных частиц контрольного компонента в готовом рассыпном комбикорме. Экспериментально подтверждено соответствие качества приготовленного рассыпного комбикорма для кур-несушек зоотехническим требованиям. Модуль помола зерна составил 2,32 мм. Остаток на сите с отверстиями диаметром 5 мм соответствовал 0,07%, а на сите с отверстиями диаметром 3 мм достигал 25,93%; осталось 0,23% целых зерен. Степень однородности смеси составила 98,3%. Значения этих показателей подтверждают получение рассыпного комбикорма требуемого качества и доказывают правильность принятых решений при обосновании оптимальных параметров малогабаритного комбикормового агрегата. Определение степени однородности многокомпонентной кормовой смеси по проценту подкрашенного контрольного компонента совместно с оптической системой технического зрения позволит в перспективе обрабатывать изображения без процедуры пробоотбора и автоматизированно контролировать качество рассыпного комбикорма.

Ключевые слова: малогабаритный комбикормовый агрегат; комбикорм; рассыпной комбикорм для кур-несушек; оценка качества; модуль помола; степень однородности; крупность комбикорма

Для цитирования: Вольвак С.Ф., Бахарев Д.Н., Пастухов А.Г. Оценка качества приготовления рассыпного комбикорма малогабаритным комбикормовым агрегатом // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 79-86. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-79-86

ORIGINAL ARTICLE

Quality assessment of loose compound feed preparation using a small-sized compound feed unit

S.F. Volvak[1]✉, ***D.N. Bakharev***[2], ***A.G. Pastukhov***[3]

[1, 3] Belgorod State Agrarian University; Maisky, Russia

[2] Lugansk State University named after V. Dal; Lugansk, Russia

[1] volvak.s@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-6955-7144

[2] baharevdn_82@mail.ru; https://orcid.org/0009-0005-4263-740X

[3] pastukhov_ag@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-6573-0950

Abstract. Multifunctional processing equipment enables the cost-effective, on-farm production of loose compound feed for poultry. Specifically, small-sized compound feed unit integrated with a multi-component dispenser and a hammer grinder-mixer with a vertical shaft establishes a continuous streamlined workflow for processing loose feed

© Вольвак С.Ф., Бахарев Д.Н., Пастухов А.Г., 2026

from home-grown raw materials and purchased additives on small-scale farms. The study aimed to evaluate the quality of loose compound feed for laying hens prepared by the small-sized compound feed unit and to refine the methodology for assessing feed mixing uniformity. Loose feed quality was evaluated based on particle size distribution, fineness modulus, and mixture homogeneity using sieve analysis. The refined method for determining the homogeneity of the multi-component mixture relies on quantifying the percentage of colored tracer particles within the finished loose compound feed. Experimental results confirmed that the prepared feed meets the established technological standards. The fineness modulus of the ground feed was 2.32. Sieve analysis revealed a residue of 0.07% on a 5 mm sieve, 25.93% on a 3 mm sieve, and a negligible 0.23% of unbroken (whole) grains. The feed mixture achieved a high homogeneity level of 98.3%. The findings confirm that the produced loose feed meets rigorous quality standards, validating the design and operational parameters optimized for the small-sized compound feed unit. Furthermore, integrating this tracer-based homogeneity assessment with an optical computer vision system offers a promising path toward image processing without previous sampling and automated quality monitoring of loose compound feeds.

Keywords: small-sized compound feed unit; compound feed; loose compound feed for laying hens; quality assessment; fineness modulus; mixture homogeneity; compound particle size

For citation: Volvak S.F., Bakharev D.N., Pastukhov A.G. Quality assessment of loose compound feed preparation using a small-sized compound feed unit. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):79-86. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-79-86

Введение

Низкая рентабельность производства полнорационных комбикормов в условиях малых хозяйств обусловлена ограниченным ассортиментом компонентов комбикормов и слабо развитой системой малой механизации кормоприготовления. Как отмечают И.Н. Краснов и др.[1], «…технологический процесс производства комбикормов или кормовых смесей непосредственно в личных подсобных и фермерских хозяйствах не в полной мере отвечает рекомендациям по организации производства в специализированных кормоцехах. В этих условиях цель получения кормов высокого качества с минимальными затратами и максимальным использованием имеющихся в хозяйстве компонентов корма может быть достигнута за счет использования многофункционального оборудования».

Применение в фермерских хозяйствах комбикормового агрегата, состоящего из минимального количества оборудования, позволит снизить удельный расход электроэнергии, удельную энергоемкость и металлоемкость при требуемых показателях производительности и качества готового продукта. В частности, прямоточную схему построения непрерывного технологического процесса приготовления рассыпного комбикорма из собственного сырья и покупных добавок можно получить при использовании объемного многокомпонентного дозатора [1, 2] и молоткового измельчителя-смесителя с вертикальным валом [3]. В результате анализа конструкций предлагаемого оборудования и характера протекания процессов дозирования, измельчения и смешивания сыпучих компонентов рассыпного комбикорма[2] обоснована конструкция малогабаритного комбикормового агрегата[3,4]. В связи с этим необходимо рассмотреть технологический процесс приготовления рассыпного комбикорма с помощью разработанного малогабаритного комбикормового агрегата и оценить его качество в соответствии с зоотехническими требованиями.

Качество приготовления рассыпного комбикорма для кур-несушек оценивается по трем показателям в диапазонах, заданных зоотехническими требованиями[5] [4]: модуль помола зерновых компонентов – 1,8…2,6 мм (крупный помол) [5, 6]; степень однородности смеси – не менее 90% [7]; крупность комбикорма для взрослой птицы по ГОСТ Р 51851-2001[6].

[1] Краснов И.Н., Филин В.М., Глобин А.Н., Ладыгин Е.А. Производство комбикормов в условиях личных подсобных и фермерских хозяйств: Монография. М.: Ай Пи Ар Медиа, 2026. 226 с. URL: https://profspo.ru/books/154217.

[2] Вольвак С.Ф., Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н., Добрицкий А.А. Научные основы совершенствования технологических процессов и технических средств приготовления кормов для сельскохозяйственных животных и птицы: Монография. Белгород: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2022. 193 с. EDN: KJFAQR.

[3] Комбикормовый агрегат: Патент № 2805301 C1 Российская Федерация, МПК A23N17/00 / С.Ф. Вольвак, В.И. Шаповалов, Д.Н. Бахарев, А.А. Добрицкий; заявл. 18.05.2023; Опубл. 13.10.2023. EDN: RRFDDI.

[4] Малогабаритный комбикормовый агрегат: Патент № 2853007 C1 Российская Федерация, МПК A23N17/00 / С.Ф. Вольвак, В.И. Шаповалов, А.Г. Пастухов, Д.Н. Бахарев; заявл. 09.01.2025; Опубл. 17.12.2025. EDN: HWLPDG.

[5] Пахомов В.И., Рудой Д.В., Брагинец С.В., Бахчевников О.Н., Ольшевская А.В. Технологии и оборудование для производства комбикормов и премиксов: Учебное пособие. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. 228 с.

[6] ГОСТ Р 51851-2001. Комбикорма для сельскохозяйственной птицы. Номенклатура показателей. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200028983.

Для сухих комбикормов установлены три степени помола, характеризующие средневзвешенный диаметр частиц, мм (модуль): мелкий – 0,2…1 мм, средний – 1,0…1,8 мм, крупный – 1,8…2,6 мм»[7,8]. По ГОСТ Р 51851-2001 рекомендуемая крупность рассыпных комбикормов для взрослой птицы регламентируется остатком на сите с отверстиями диаметром 5 мм – не более 4,0%, остатком на сите с отверстиями диаметром 3 мм – не менее 2,0%, не более 4,5% целых зерен.

Смешивание компонентов проводится для выравнивания концентраций каждого элемента по всему объему камеры до образования однородной смеси[9]. Принято, что «…при однородности более 92% оценка смеси считается хорошей, при 90…92% – удовлетворительной, при 85…90% – недостаточно удовлетворительной, при ниже 85% – плохой. В условиях кормоцехов считается достаточным получать степень однородности кормовых смесей в пределах 90%»[10] [8].

Цель исследований: усовершенствовать метод определения однородности смешивания кормовых смесей, оценить качество приготовления рассыпного комбикорма для кур-несушек разрабатываемым малогабаритным комбикормовым агрегатом и его соответствие зоотехническим требованиям.

Материалы и методы

Рассыпной комбикорм для кур-несушек приготовлен из пяти исходных компонентов с процентным составом в соответствии с заданным рецептом. В качестве компонентов кормового сырья использовали зерно пшеницы (35%), зерно кукурузы (23,555%), соевые бобы (15%), жмых подсолнечный дробленый (15%), смесь обогатительных добавок (11,445%) (премикс П1-2, известняковая мука, монокальцийфосфат и др.). Рецепт рассчитан на программном комплексе «Корм оптима» для кур-несушек кросса «Хайсекс коричневый» [1-3].

Приготовление корма проводили на экспериментальной установке малогабаритного комбикормового агрегата при средней производительности 317,7 кг/ч (рис. 1) [3, 9]. Конструктивно-технологические параметры агрегата: сменное решето с диаметром отверстий 4 мм, 12 молотков на барабане, лопастная швырялка с двумя лопастями шириной по 50 мм, частота вращения вертикального вала – 1550 мин$^{-1}$ [9]. Уровень удельной энергоемкости процесса – 3,317 кВт·ч/т [9].

Для определения объемной массы исходных компонентов рассыпного комбикорма применяли влагомер «Wile-65», пурку литровую с падающим грузом ПХ-1МЦ, весы CAS MWP-3000. Массу навесок исходных компонентов рассыпного комбикорма определяли на весах MASTER MS-10. Для регистрации времени опытов использовали секундомер механический СОСпр-2б-2. Контроль частоты вращения горизонтального вала барабанного дозатора осуществляли тахометром часовым ТЧ 10-Р, а вертикального вала измельчителя-смесителя – тахометром цифровым Unit UT372. Для изменения частоты вращения вертикального вала измельчителя-смесителя использовали преобразователь частоты INNOVERT IVD302B43E. Для ситового анализа навесок и определения гранулометрического состава готовой смеси применили рассев лабораторный У1-ЕРЛ-1-1 и весы ВК-600.

Оценка качества приготовленного рассыпного комбикорма для кур-несушек малогабаритным комбикормовым агрегатом произведена по навескам (пробам) готового продукта. В соответствии с требованиями ГОСТ 13496.0-2016 из каждой порции полученного комбикорма отобраны пробы и проведен ситовой анализ для определения их гранулометрического состава (ГОСТ 13496.8-72[11]).

В соответствии с зависимостью, установленной В.И. Романовским, для заданной надежности результатов опытов $\alpha = 0,9$ и допустимой ошибки в пределах $\varepsilon = \pm\sigma$ принята пятикратная повторность опытов.

После пятикратного отбора проб[12] из разных участков приемного сменного контейнера (накопительной емкости) для готовой кормосмеси (рис. 2) их объединяли и перемешивали. Делением объединенной пробы получили навески массой 100 г для ситового анализа и определения степени однородности и крупности готового продукта.

Модуль помола готового рассыпного комбикорма определяли ситовым способом с учетом методики по ГОСТ 13496.8-72 и практики диссертационных

[7] Глебов Л.А., Демский А.Б., Веденьев В.Ф., Темиров М.М., Огурцов Ю.М. Технологическое оборудование предприятий отрасли (зерноперерабатывающие предприятия): Учебник. М.: ДеЛи принт, 2006. 815 с.

[8] Шкондин В.Н. Разработка способа измельчения кормового зерна и обоснование параметров двухступенчатого измельчителя: Дис. … канд. техн. наук. Зерноград, 2018. 173 с. URL: https://ачгаа.рф/files/sovettn/Shkondin/dissShkondin.pdf.

[9] Краснов И.Н., Филин В.М., Глобин А.Н., Ладыгин Е.А. Производство комбикормов в условиях личных подсобных и фермерских хозяйств: Монография. Зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2014. 228 с.

[10] Коба В.Г., Брагинец Н.В., Мурусидзе В.Ф., Некрашевич Д.Н. Механизация и технология производства продукции животноводства: Учебник. М.: Колос, 1999. 528 с.

[11] ГОСТ 13496.8-72. Комбикорма. Методы определения крупности размола и содержания неразмолотых семян культурных и дикорастущих растений. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200024327.

[12] Кононюк А.Е. Основы научных исследований (общая теория эксперимента): Монография. Кн. 1. Киев: КТН, 2011. 508 с.



Рис. 1. Экспериментальная установка малогабаритного комбикормового агрегата:
1 – пятисекционный дозатор с бункером; 2 – измельчитель-смеситель;
3 – циклон-разгрузитель; 4 – сменный контейнер

Fig. 1. Experimental installation of a small-sized compound feed unit:
1 – five-section dispenser with a hopper; 2 – grinder mixer; 3 – cyclone unloader; 4 – removable container



а) б)

Рис. 2. Размещение пробоотборников в сменном контейнере для готовой кормосмеси:
а – пустые пробоотборники;
б – наполненные пробоотборники

Fig. 2. Arrangement of samplers in the detachable container for the finished feed mixture:
a – empty samplers; *b* – filled samplers

исследований В.Н. Шкондина[13]. Использовали набор штампованных сит с круглыми пробивными отверстиями диаметром 1,0; 2,0; 3,0 мм и поддон для сбора массового остатка рассева. Для уточнения результатов ситового анализа усовершенствовали стандартную методику определения модуля помола путем добавления трех сит диаметром 0,2 мм для определения количества пылевидных частиц размером менее 0,2 мм и диаметром 4,0 и 5,0 мм в качестве контрольных для определения количества целых зерен.

[13] Шкондин В.Н. Разработка способа измельчения кормового зерна и обоснование параметров двухступенчатого измельчителя: Дис. … канд. техн. наук. Зерноград, 2017. 173 с.

Навески готового рассыпного комбикорма массой по 100 г просеивали в течение 5 мин на рассеве лабораторном У1-ЕРЛ-1-1. Остатки на ситах и поддоне взвешивали с точностью до 0,01 г на весах ВК-600. За окончательный результат принимали среднеарифметическое результатов двух параллельных определений, причем допускаемые расхождения между результатами параллельных определений не должны были превышать 0,1%.

Модуль крупности помола M, мм, определяли по формуле:

$$M = \frac{0,1 \cdot G_0 + 0,6 \cdot G_1 + 1,5 \cdot G_2 + 2,5 \cdot G_3}{100} + \frac{3,5 \cdot G_4 + 4,5 \cdot G_5 + 5,5 \cdot G_6}{100}, \quad (1)$$

где 0,1; 0,6; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5; 5,5 – средние размеры частиц в каждой фракции, мм; G_0 – массовый остаток на поддоне рассева, г; $G_1 \ldots G_6$ – массовые остатки на ситах с соответствующими отверстиями, г; 100 – суммарная оцениваемая масса навески, г.

Средние размеры частиц в каждой фракции вычислены как полусумма размеров отверстий двух смежных сит, между которыми заключена данная фракция.

Эффективность процесса смешивания компонентов комбикорма оценивали по «…степени однородности смеси, представляющей собой отношение содержания контрольного компонента в анализируемой пробе к содержанию того же компонента в идеальной смеси (рецептурной), выраженное в процентах или

долях единицы»[14]. Чем ближе значения к 100% (или единице), тем лучше завершен процесс [8].

Оценку однородности многокомпонентной смеси, определяющую ее качество, выполняли по степени распределения контрольного компонента с учетом известных методик[15,16]. При этом выделяли один (контрольный) компонент K_K, имеющий меньшую долю в комбикорме, остальные компоненты смеси объединяли во второй (условный) компонент K_o[17,18]. В качестве контрольного компонента K_K выбран подкрашенный дробленый подсолнечный жмых, имевший в основном зеленую и частично темную серо-коричневую окраску (рис. 3). В качестве красителя подсолнечного жмыха использовали спиртовой раствор бриллиантовый зеленый.

Для анализа лабораторных проб изготовлены две квадратные прозрачные пластины из органического стекла размером 250 × 250 мм (рис. 4). Посередине верхней пластины на квадрат площадью S_n = 0,04 м^2 с размерами сторон 200 × 200 мм нанесена сетка с квадратными ячейками с размерами сторон 10 × 10 мм. Каждую лабораторную пробу тонким слоем укладывали на нижнюю пластину, затем нижнюю и верхнюю пластины сжимали зажимами (рис. 4) и фотографировали с присвоением номера каждой фотографии. На основании анализа полученных фотографий определяли общую площадь квадратов $S_к$ размерами 10 × 10 мм, содержащих контрольный компонент. Если частица контрольного компонента одновременно находилась в нескольких квадратах, то считали суммарную площадь этих квадратов.



Рис. 3. Дробленый подсолнечный жмых, подкрашенный спиртовым раствором бриллиантового зеленого

Fig. 3. Crushed sunflower cake dyed with an ethanolic solution of brilliant green

Учитывая вероятностный характер процесса смешивания, оценку однородности многокомпонентной смеси (Θ, %) выполняли по коэффициенту вариации ν, %[19]:

$$\Theta = 100 - \nu = 100 - \frac{\sigma}{B_{\text{ср}}} \cdot 100; \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (B_i - B_{\text{ср}})^2}{n-1}}; \quad (3)$$

$$B_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} B_i}{n}; \quad (4)$$

$$B_i = \frac{S_{\text{к}}}{S_{\text{п}}}; \quad (5)$$

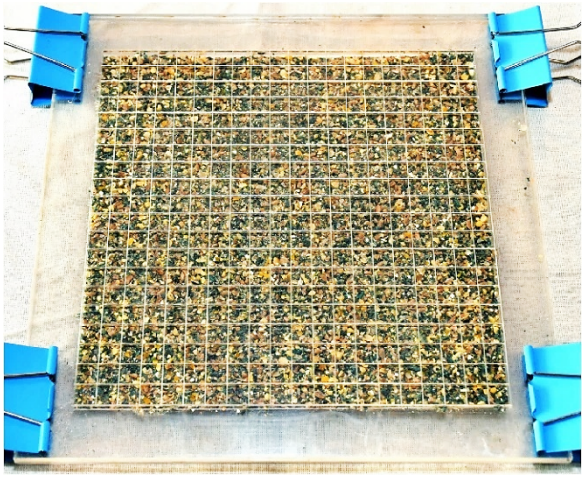


Рис. 4. Пластины для определения степени однородности смеси с контрольным компонентом

Fig. 4. Plates used to determine mixture homogeneity with a control tracer component

[14] Московский М.Н. Машины и оборудование для обеспечения животноводства. URL: https://de.donstu.ru/CDOCourses/structure/_new_/ 1058591/1501.pdf.

[15] Аль Атум Мохаммад. Повышение эффективности универсального измельчителя-смесителя кормов для мелкого рогатого скота: Дис. … канд. техн. наук. Кировоград, 2014. 168 с.

[16] Опара В.А., Корж О.В., Попсуй В.В. Упрощенный способ определения качества смешивания компонентов комбикормов в производственных условиях // Селекция на современных популяциях отечественного молочного скота как основа импортозамещения животноводческой продукции: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Белгород, 2018. С. 351-357. EDN: YUOYTB.

[17] Ведищев С.М. Совершенствование технологий и технических средств приготовления и раздачи кормосмесей в сельскохозяйственных свиноводческих организациях: Дис. … д-ра техн. наук. Тамбов, 2018. 381 с.

[18] Солонщиков П.Н., Мохнаткин В.Г. Разработка и исследование параметров работы установки для приготовления жидких кормовых смесей. Киров: Вятский государственный агротехнологический университет, 2021. 183 с.

[19] Киров Ю.А., Новиков В.В. Современные средства механизации для приготовления корма. Кинель: РИЦ СГСХА, 2015. 25 с.

$$\Theta = 100 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(B_i - B_{\text{ср}}\right)^2 \Big/ n-1}}{B_{\text{ср}}} \cdot 100, \qquad (6)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение контрольного компонента; $B_{ср}$ – среднее арифметическое содержание контрольного компонента, найденное в опыте; B_i – доля контрольного компонента в *i*-й пробе; *n* – число проб; $S_к$ – площадь квадратов, содержащих контрольный компонент, с размерами сторон 10 × 10 мм; S_n – площадь квадрата с размерами сторон 200 × 200 мм, S_n = 0,04 м^2.

Результаты и их обсуждение

Результат ситового анализа двух навесок по 100 г готового рассыпного комбикорма представлен в таблице 1.

В результате расчета по стандартной методике модуль крупности помола составил 2,33 мм, а по уточненной методике по формуле (1) – 2,32 мм, то есть полученные значения практически совпадают, что не противоречит методике испытаний по ГОСТ и позволяет сделать вывод о достоверности полученных результатов ситового анализа готового рассыпного комбикорма.

Массовые остатки рассыпного комбикорма на поддоне и ситах с соответствующими диаметрами отверстий показаны на рисунке 5.

Результаты ситового анализа навесок позволяют сделать вывод о соответствии зоотехническим требованиям гранулометрического состава по модулю помола 2,32 мм и крупности полученного готового рассыпного комбикорма для кур-несушек.

Результаты экспериментально определенной степени однородности кормовой смеси Θ на основе усредненных значений $S_к$, B_i, $B_{ср}$ представлены в таблице 2.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что степень однородности кормовой смеси обеспечивается в соответствии с регламентированным показателем для птицы.

Таким образом, полученные в работе [9] значения показателей качества по модулю помола, однородности

Таблица 1

Результаты ситового анализа готового рассыпного комбикорма

Table 1

Sieve analysis results for the finished loose compound feed

Размеры отверстий сит, мм							Целые зерна $N_з$, %	Пылевидные частицы, $N_п$, %	Модуль помола, *M*, мм
0	0,2	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0			
Средний размер частиц, мм									
0,1	0,6	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5			
Остатки на ситах, г									
7,64	7,66	12,30	46,47	24,76	1,10	0,07	0,23	7,64	2,32

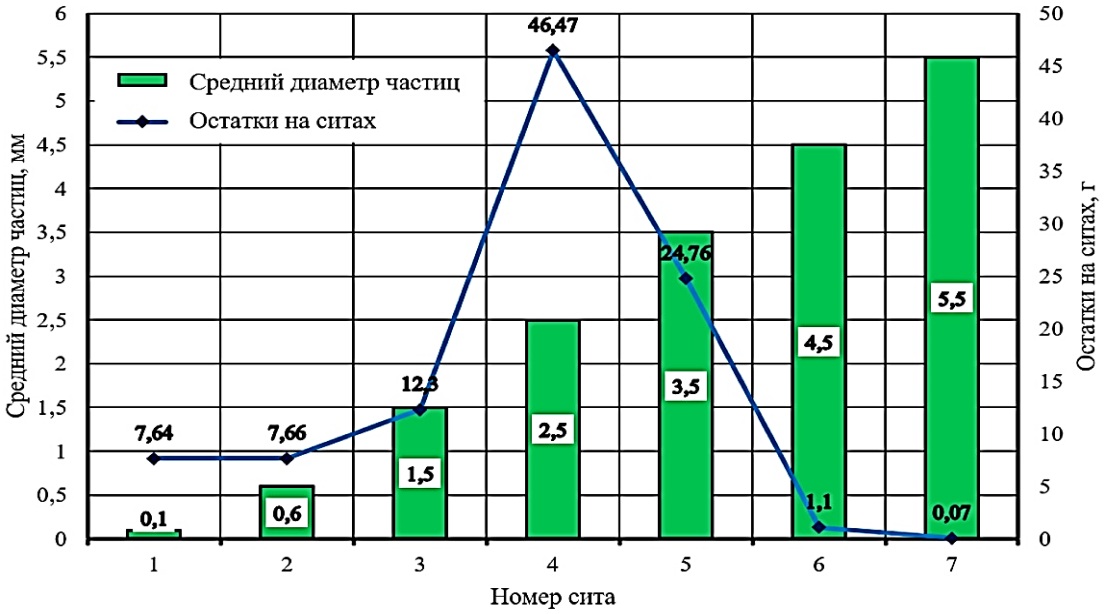


Рис. 5. Диаграмма зависимости массовых остатков рассыпного комбикорма от среднего диаметра частиц

Fig. 5. Sieve mass residue of loose compound feed as a function of the average particle diameter

и крупности готового продукта в виде критериев ограничения в многофакторном эксперименте при обосновании оптимальных параметров малогабаритного комбикормового агрегата приняты правильно.

В перспективе для автоматизации процедур контроля качества рассыпного комбикорма определение степени однородности многокомпонентной кормовой смеси с «разделением» компонентов по цвету целесообразно проводить с использованием методов оценки гомогенности кормовых смесей для сельскохозяйственных животных [10], анализа качества смеси по цвету [11] и цифровым изображениям смеси[20] [12, 13] с применением оптической системы технического зрения [14].

Таблица 2

Результаты экспериментального исследования степени однородности кормовой смеси

Table 2

Results of experimental evaluation of feed mixture homogeneity and mixing uniformity

K_o, %	K_K, %	S_n, 10^{-4} м^2	$S_к$, 10^{-4} м^2	B_i	$B_{ср}$	Θ, %
85,0	15,0	400	375	0,9375	0,9190	98,32
			372	0,9300		
			360	0,9000		
			368	0,9200		
			363	0,9075		

Выводы

1. Приготовленный малогабаритным комбикормовым агрегатом рассыпной комбикорм для кур-несушек характеризуется следующим фракционным составом: остаток на сите с отверстиями диаметром 5 мм – 0,07%; остаток на сите с отверстиями диаметром 3 мм – 25,93%; наличие целых зерен – 0,23%. Модуль помола зерновых компонентов составил 2,32 мм, а степень однородности смеси – 98,3%.

2. Экспериментально подтверждено соответствие качества приготовленного рассыпного комбикорма для кур-несушек современным зоотехническим требованиям по показателям модулю помола, однородности и крупности готового продукта. Полученные значения показателей качества, выступающих в виде критериев ограничения в многофакторном эксперименте, доказывают правильность принятия решения при обосновании оптимальных параметров малогабаритного комбикормового агрегата.

3. Определение степени однородности многокомпонентной кормовой смеси по проценту подкрашенного контрольного компонента совместно с оптической системой технического зрения позволит в перспективе обрабатывать изображения без процедуры пробоотбора и автоматизированно контролировать качество рассыпного комбикорма.

[20] Способ определения неоднородности смеси сыпучих материалов на базе цветовой сегментации изображений в LAB-пространстве: Патент № 2839819 C1 Российская Федерация, МПК G01N15/0227 (2024.01) / С.Ю. Булатов, Г.С. Малышев, О.А. Тареева; заявл. 04.12.2024; Опубл. 12.05.2025; Бюл. № 14.

Список источников

1. Вольвак С.Ф., Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н., Тимашов Е.П., Кощаев И.А. Определение рациональных параметров барабанного дозатора малогабаритного комбикормового агрегата по результатам экспериментальных исследований // Инженерные технологии и системы. 2026. Т. 36, № 2. С. 277-299. EDN: LQQMGI

2. Вольвак С.Ф., Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н., Кощаев И.А. Обоснование конструкции барабанного дозатора малогабаритного комбикормового агрегата // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2025. № 1 (45). С. 14-24. EDN: NBIGLJ

3. Вольвак С.Ф. Обоснование конструкции малогабаритного комбикормового агрегата // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2026. № 2 (50). С. 15-23. EDN: LYZEXM

4. Al-Maidi A.A.H., Himoud M.S., Kaliganov A.C. et al. Modelling the quality of the mixture in a continuous paddle mixer. International Journal of Agricultural and Statistical Sciences. 2021;16:1769-1774. EDN: NIZZWM

5. Сабиров Б.М., Зиганшин Б.Г., Дмитриев А.В. и др. Исследование устройства для дробления зерна // Вестник Казанского

References

1. Volvak S.F., Pastukhov A.G., Bakharev D.N., Timashov E.P., Koshchaev I.A. Determination of the rational parameters of a drum dispenser for a small-sized com-pound feed unit by the results of experimental studies. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(2):277-299. (In Russ.)

2. Volvak S.F., Pastukhov A.G., Bakharev D.N., Koshchaev I.A. Substantiation of the design of the drum dispenser of a small-sized feed unit. *Innovations in agricultural complex*: *problems and perspectives*. 2025;1(45):14-24. (In Russ.)

3. Volvak S.F. Substantiation of the design of a small-sized compound feed unit. *Innovations in agricultural complex*: *problems and perspectives*. 2026;2(50):15-23. (In Russ.)

4. Al-Maidi A.A.H., Himoud M.S., Kaliganov A.C. et al. Modelling the quality of the mixture in a continuous paddle mixer. *International Journal of Agricultural and Statistical Sciences*. 2021;16:1769-1774.

5. Sabirov B.M., Ziganshin B.G., Dmitriev A.V. et al. Study of a device for crushing grain. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2023;18(1):75-79. (In Russ.)

государственного аграрного университета. 2023. Т. 18, № 1. С. 75-79. EDN: JVHYQP

6. Khaliullin D., Badretdinov I., Naficov I., Lukmanov R. Theoretical justification of design and technological parameters of hulling machine main working bodies. Engineering for Rural Development. Virtual, Jelgava, 2021. Pp. 1501-1506. EDN: CAUCPH

7. Сторожук Т.А. Оптимизация процесса смешивания кормов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2019. № 148. С. 31-39. EDN: ZQZHYT

8. Коновалов В.В., Чупшев А.В., Фомина М.В. Моделирование изменения качества смеси лопастного смесителя на основе технологических параметров // Инновационная техника и технология. 2016. № 3. С. 57-66. EDN: WXTKXH

9. Вольвак С.Ф., Бахарев Д.Н., Пастухов А.Г., Тимашов Е.П. Обоснование оптимальных конструктивно-технологических параметров малогабаритного комбикормового агрегата // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2026. Т. 20, № 3. С. 31-41. EDN: DJWVBN

10. Миронова И.В., Латыпова Э.Х., Никитин Е.А., Благов Д.А. Системы и методы оценки гомогенности кормовых смесей для сельскохозяйственных животных // Аграрная наука. 2024. № 5. С. 56-62. EDN: GTEIYS

11. Костромина А.О., Комарова Н.Э., Дурнев А.С. Экспериментальное определение качества порошковой смеси по цвету // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 8-1. С. 90-91. EDN: QYYQJF

12. Демин О.В., Смолин Д.О., Першин В.Ф. Оценка качества смеси сыпучих материалов на основе анализа их цифровых изображений // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 157. EDN: RXUOKP

13. Штейнберг Т.С., Морозова О.В., Семикина Л.И., Аматуни А.Л. Метод анализа цифрового изображения зерна для оценки его качества // Хранение и переработка сельхозсырья. 2014. № 10. С. 47-51. EDN: TFEMHR

14. Малышев Г.С., Тареева О.А. Разработка метода определения однородности рассыпного комбикорма // Вестник НГИЭИ. 2023. № 12. С. 36-47. EDN: MUJZMI

6. Khaliullin D., Badretdinov I., Naficov I., Lukmanov R. Theoretical justification of design and technological parameters of hulling machine main working bodies. *Engineering for Rural Development*. Virtual, Jelgava, 2021:1501-1506.

7. Storozhuk T.A. Optimization of the process of mixing feed. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2019;148:31-39. (In Russ.)

8. Konovalov V.V., Chupshev A.V., Fomina M.V. Modeling of changes in the quality mix paddle mixer on the basis technological parameters. *Innovative Machinery and Technology*. 2016;3:57-66. (In Russ.)

9. Volvak S.F., Bakharev D.N., Pastukhov A.G., Timashov E.P. Substantiation of optimal design and technological parameters of a small-sized compound feed unit. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026;20(3):31-41. (In Russ.)

10. Mironova I.V., Latypova E.Kh., Nikitin E.A., Blagov D.A. Systems and methods for assessing the homogeneity of feed mixtures for farm animals (Review). *Agrarian Science*. 2024;5:56-62. (In Russ.)

11. Kostromina A.O., Komarova N.E., Durnev A.S. Experimental determination of the quality of a powder mixture by color. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2013;8-1:90-91. (In Russ.)

12. Demin O.V., Smolin D.O., Pershin V.F. Qualification mixes bulk materials based on their digital images. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013;2:157. (In Russ.)

13. Steinberg T.S., Morozova O.V., Semikina L.I., Amatuni A.L. The method of digital image analysis of grain for assess its quality. *Storage and Processing of Farm Products*. 2014;10:47-51. (In Russ.)

14. Malyshev G.S., Tareeva O.A. Methods for determining the uniformity of the feed mixture. *Vestnik NGIEI*. 2023;12:36-47. (In Russ.)

Информация об авторах

[1] **Вольвак Сергей Федорович,** канд. техн. наук, профессор; volvak.s@yandex.ru✉; SPIN-код: 7701-7068; https://orcid.org/0000-0002-6955-7144

[2] **Бахарев Дмитрий Николаевич,** д-р техн. наук, доцент; baharevdn_82@mail.ru; SPIN-код: 1175-0650; https://orcid.org/0009-0005-4263-740X

[3] **Пастухов Александр Геннадиевич,** д-р техн. наук, профессор; pastukhov_ag@mail.ru; SPIN-код: 3891-3927; https://orcid.org/0000-0001-8249-8970

[1, 3] Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина; 308503, Россия, Белгородская обл., Белгородский р-н, п. Майский, ул. Вавилова, 1

[2] Луганский государственный университет им. В. Даля; 291034, Луганская Народная Республика, г. Луганск, квартал Молодежный, дом 20А

Author Information

S.F. Volvak, CSc (Eng), Professor; volvak.s@yandex.ru✉; SPIN-code: 7701-7068; https://orcid.org/0000-0002-6955-7144

D.N. Bakharev, DSc (Eng), Associate Professor; baharevdn_82@mail.ru; SPIN-code: 1175-0650; https://orcid.org/0009-0005-4263-740X

A.G. Pastukhov, DSc (Eng), Professor; pastukhov_ag@mail.ru; SPIN-code: 3891-3927; https://orcid.org/0000-0001-8249-8970

[1, 3] Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin; 1, Vavilov Str., Maysky, Belgorod District, Belgorod Region, 308503, Russian Federation

[2] Lugansk State University named after V. Dal; 20A, Molodezhny District, Lugansk, 291034, Russian Federation

Вклад авторов

С.Ф. Вольвак – планирование и проведение исследований, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и её редактирование;
Д.Н. Бахарев – концептуализация, руководство исследованиями;
А.Г. Пастухов – методология, верификация данных.

Author Contribution

Sergey F. Volvak – conceptualization; investigation; writing – original draft, review and editing of the manuscript;
Dmitry N. Bakharev – conceptualization, research supervision;
Aleksandr G. Pastukhov – methodology, data validation

Статья поступила 10.04.2026, после рецензирования и доработки 30.09.2026, принята к публикации 30.09.2026

Received 10.04.2026; Revised 30.09.2026; Accepted 30.09.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.171
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-87-96

Исследование теплообменных процессов в терморегулируемом матрасе для коров

Ю.Г. Иванов[1]✉, ***С.П. Рудобашта***[2], ***Д.А. Павлов***[3]

[1, 2, 3] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

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

[2] rudobashta@mail.ru; https: orcid.org//0000-0002-3129-8562

[3] pavlovdaniil227@gmail.com

Аннотация. Коровы испытывают тепловой стресс при температуре воздуха в коровнике выше 24°С и нуждаются в обогреве в зимний период. Тепловой стресс коров сопровождается учащенным дыханием и пульсом и приводит к снижению молочной продуктивности. Для улучшения комфортного состояния коров в боксах требуется адаптивное терморегулируемое воздействие. Цель исследований – разработать терморегулируемый водяной матрас для отдыха коров на основе адаптивного управления температурой теплоносителя. Представлены нестационарная и стационарная математические модели процесса теплообмена, позволяющие определить основные параметры нагрева и охлаждения поверхности матраса. Разработаны и изготовлены экспериментальный образец комплекта оборудования терморегулируемого матраса на одно скотоместо и лабораторный стенд для исследований параметров и режимов работы. Разработанный терморегулируемый водяной матрас для отдыха коров обеспечивает управляемое изменение температуры поверхности за счет подачи теплоносителя (воды) через трубчатый теплообменник, расположенный внутри эластичного ложа. Экспериментальные лабораторные исследования матраса проведены при температуре теплоносителя 42, 47 и 52°С и расходе 1,6; 3,2 и 7,0 кг/мин. В результате подтверждена закономерная зависимость температуры наружной поверхности водяного матраса от температуры и расхода теплоносителя при его охлаждении и нагреве. Доказана возможность использования терморегулируемого матраса в качестве элемента адаптивной системы обеспечения температурного комфорта коров. Терморегулируемый водяной матрас для отдыха коров, индивидуально воздействуя на животное, снижает риск теплового стресса, поддерживает более комфортные условия содержания и способствует уменьшению потерь молочной продуктивности в жаркий период года. В дальнейшем будет целесообразным определить режимы автоматического управления температурой водяного матраса в зависимости от физиологических показателей коров (частоты дыхания и/или пульса) в условиях животноводческой фермы.

Ключевые слова: тепловой стресс; терморегулируемый водяной матрас; матрас для отдыха коров; трубчатый теплообменник; теплообмен; управляемое изменение температуры поверхности; комфортные условия содержания

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям в рамках Федерального проекта «Платформа университетского технологического предпринимательства», договор (соглашение) № 434ГССС27/107334 от 03.10.2025.

Для цитирования: Иванов Ю.Г., Рудобашта С.П., Павлов Д.А. Исследование теплообменных процессов в терморегулируемом матрасе для коров // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 87-96. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-87-96

© Иванов Ю.Г., Рудобашта С.П., Павлов Д.А., 2026

ORIGINAL ARTICLE

Study of heat transfer processes in a temperature-controlled water mattress for dairy cows

***Yu.G. Ivanov*[1]✉, *S.P. Rudobashta*[2], *D.A. Pavlov*[3]**

[1,2,3] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

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

[2] rudobashta@mail.ru, https: orcid.org//0000-0002-3129-8562

[3] pavlovdaniil227@gmail.com

Abstract. Cows experience heat stress at cowshed air temperatures above 24°C and require supplemental heating during the winter period. Heat stress in cows is accompanied by elevated respiration and heart rates, leading to reduced milk yield. Improving cow comfort in resting stalls requires adaptive temperature control. The study aimed to develop a temperature-controlled water mattress for resting cows based on adaptive regulation of the heat transfer meduim temperature. The authors formulated both transient and steady-state mathematical models of the heat transfer process to determine the fundamental parameters governing the heating and cooling of the mattress surface. An experimental prototype of the temperature-controlled mattress system for a single stall unit and a laboratory test rig were designed and fabricated to evaluate performance parameters and operating modes. The developed temperature-controlled water mattress provides dynamic adjustment of surface temperature by circulating a heat transfer medium (water) through a tubular heat exchanger embedded within a flexible mattress body. Laboratory experiments were conducted at heat transfer medium temperatures of 42, 47, and 52°C and mass flow rates of 1.6, 3.2, and 7.0 kg/min. The results confirmed a predictable relationship between the outer surface temperature of the water mattress and the temperature and flow rate of the heat transfer medium during both cooling and heating cycles. The finding have proved the feasibility of using the temperature-controlled mattress as an active component in an adaptive system for ensuring thermal comfort in cattle. By providing individualized thermal management, the water mattress reduces heat stress risk, maintains optimal housing conditions, and mitigates milk yield losses during hot seasons. Further research will focus on establishing automated temperature control algorithms based on physiological responses of cows (respiration rate and/or heart rate) under commercial farm conditions.

Keywords: heat stress; temperature-controlled water mattress; cow resting mattress; tubular heat exchanger; heat transfer; controlled surface temperature; comfortable housing conditions for animals

Funding: The work was supported by the Innovation Promotion Foundation within the framework of the Federal project “Platform of University Technology Entrepreneurship”, Contract (Agreement) No. 434GSSS27/107334 dated 03.10.2025.

For citation: Ivanov Yu.G., Rudobashta S.P., Pavlov D.A. Study of heat transfer processes in a temperature-controlled water mattress for dairy cows. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):87-96. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-87-96

Введение

Ускорение темпов глобального потепления на планете приводит к росту температуры в помещениях для содержания крупного рогатого скота, что негативно сказывается на продуктивности и здоровье животных. В частности, при температуре воздуха в коровнике выше 24°C животные испытывают тепловой стресс, возрастает частота дыхания и пульса, что приводит к снижению молочной продуктивности коров. При повышении температуры воздуха в помещении до 30°C ежедневные потери могут составлять 7…10 л молока на корову, на ферме на 400 коров ежемесячные потери могут составить около 100 т молока[1] [1, 2].

Как отмечает A. Berman [3], для предотвращения тепловых стрессов важно в жаркий период создать условия, обеспечивающие корове дополнительную теплоотдачу в окружающую среду. Комфортные условия содержания скота при температуре воздуха выше 24°C можно обеспечить несколькими способами: во-первых, обдувом животных потоком воздуха местной принудительной вентиляции [4-6,]; во-вторых, мелкодисперсным распылением воды, в результате чего температура воздуха снижается за счет испарения влаги [7, 8]; в-третьих, для активного испарения с кожного покрова животных предложен комбинированный способ, заключающийся в распылении воды

[1] Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А., Сидоренко М.С. Автоматический мониторинг физиологических показателей животных для управления технологическими процессами на молочных фермах: Монография. М.: МЭСХ, 2019. 230 с.

на тело животного и обдуве вентилятором [9, 10]. Однако последние два способа приводят к повышению влажности воздуха в помещении и могут привести к усилению теплового стресса у животных[2]. Отметим также, что формируемое такими способами температурное поле является неравномерным внутри коровника и по-разному воздействует на всех животных. Согласно исследованиям X.A. Ortiz, K.R. Bastian и др. [11, 12] возможно кондуктивное охлаждение КРС за счет прокладки теплообменника под полом коровника с различными материалами подстилок (песок и высушенный навоз, с вариантами в сухом и увлажненном состоянии). Исследованиями Bastian [12] установлено, что применение водяных матрасов также снимает тепловой стресс у коров. Необходимо отметить, что способы охлаждения X.A. Ortiz и K.R. Bastian [11, 12] не учитывают физиологического состояния коров при тепловых стрессах.

Цель исследований: предложить способ терморегулируемого воздействия на коров для снятия тепловых стрессов и представить нестационарную и стационарную математические модели процесса теплообмена; разработать терморегулируемый водяной матрас для отдыха коров в индивидуальных боксах и провести экспериментальные исследования.

Материалы и методы

Разработанный водяной матрас оснащен эластичный лежаком *1* для размещения животного, датчиком температуры воды в матрасе *2*, насосом *3*, чиллером *4*, контроллером *5*, датчиками температуры *6* и влажности *7* окружающей среды, а также датчиками *8*, фиксирующими физиологическое состояние коров (частоту дыхания и/или частоту пульса) (рис. 1). В проектируемом терморегулируемом матрасе температура воды будет регулироваться адаптивно, в зависимости от температуры и влажности воздуха и с учетом частоты дыхания и/или частоты сердечного пульса коров, которые повышаются при возникновении теплового стресса, а при его снятии возвращаются в норму[3].

В лабораторных исследованиях реализован ручной режим задания температуры теплоносителя без обратной связи по физиологическим показателям коров, поскольку основной целью исследований

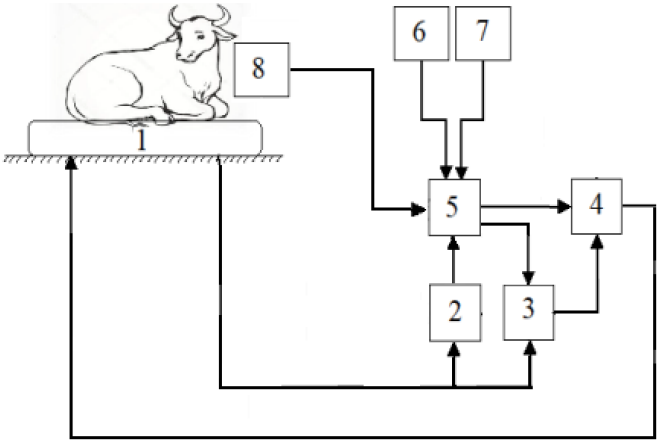


Рис. 1. Функциональная схема терморегулируемого матраса для коров

Fig. 1. Functional diagram of a temperature-controlled mattress for cows

является установление тепловых характеристик терморегулируемого матраса.

Разработанный матрас представляет собой эластичное ложе (матрас) из вспененного полиэтилена высокой плотности размерами 1,2 х 2,0 м, толщиной 10 см. Внутри матраса проходит трубчатый теплообменник, обогревающий или охлаждающий расположенную в верхней центральной части матраса водяную подушку размерами 1,2 х 0,8 м, толщиной 5 см. Сверху водяная подушка накрыта резинотканевым покрытием (матом), на которое укладывается корова. В работе исследовали терморегулируемую часть матраса – водяную подушку.

Предлагаемый эластичный водяной матрас предотвращает, помимо снижения тепловых стрессов, травмируемость конечностей коров в моменты их подъема или укладывания.

Результаты и их обсуждение

Процесс нагрева водяной подушки матраса можно разбить на две стадии: нестационарную, когда температура водяной подушки еще не достигла своего постоянного значения, и стационарную, при которой температура водяной подушки с определенной точностью достигла максимального (при ее нагреве) и минимального (при охлаждении) значений. Сформулируем математические модели для этих стадий, приняв следующие условия и допущения:

– система состоит из двух частей: водяной подушки толщиной R_1 и находящегося сверху над ним мата (резинотканевое покрытие) толщиной R_2;

– задача является одномерной: изменение температуры происходит только по вертикальной координате (координата x), то есть тепловые потери через боковые стенки системы и через ее низ пренебрежимо малы;

[2] Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А., Сидоренко М.С. Автоматический мониторинг физиологических показателей животных для управления технологическими процессами на молочных фермах: Монография. М.: МЭСХ, 2019. 230 с.

[3] Устройство обеспечения температурного комфорта коров в помещении животноводческого комплекса: Патент № 239859 / Ю.Г. Иванов, С.А. Андреев, В.И. Стяжкин, Д.А. Понизовкин, Д.А. Павлов; № 2025112228; заявл. 12.05.2025; опубл. 17.12.2025заявитель, патентообладатель ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

– все теплофизические характеристики постоянны;

– перенос теплоты через водяную подушку осуществляется путем теплопроводности с некоторым эффективным коэффициентом теплопроводности λ_1, который учитывает естественную конвекцию воды.

С учетом этих условий сформулируем нестационарную задачу теплообмена для рассматриваемой системы, поместив начало координат в нижнюю плоскость водяной подушки и направив координату x вверх. Целью расчета по нестационарной модели является определение времени выхода температуры в той или иной точке системы или среднеобъемной температуры на нужное значение. Пусть индекс «1» относится к водяной подушке, а индекс «2» – к мату. С учетом принятых условий нестационарная задача является одномерной, в которой температуры t_1 и t_2 являются функциями двух независимых параметров – координаты x и времени τ: $t_1 = f_1(x, \tau)$; $t_2 = f_2(x, \tau)$.

Нестационарная задача

Представим нестационарную задачу в виде:

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2}, \quad 0 < x < R_1, \quad \tau > 0, \tag{1}$$

$$t_1 = t_н = \text{const}, \quad 0 \le x \le R_1, \quad \tau = 0, \tag{2}$$

$$\frac{\partial t_1}{\partial x} = 0, \quad x = 0, \quad \tau > 0, \tag{3}$$

$$t_1 = t_2, \quad x = R_1, \quad \tau \ge 0, \tag{4}$$

$$\frac{\partial t_2}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2}, \quad R_1 < x < R_2, \quad \tau > 0, \tag{5}$$

$$t_2 = t_1 = t_н = \text{const}, \quad 0 \le x \le R_1, \quad \tau = 0, \tag{6}$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x}, \quad x = R_1, \quad \tau > 0, \tag{7}$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} = \alpha (t_2 - t_c), \quad x = R_1 + R_2, \tau > 0, \tag{8}$$

где λ_1, a_1 – коэффициент теплопроводности (Вт/(м К)), характеризующий способность водяного матраса проводить тепло, и коэффициент температуропроводности (м^2/с), характеризующий скорость, с которой в водяном матрасе выравнивается температура водяной подушки, соответственно; λ_2, a_2 – то же, соответственно, у мата; α – коэффициент теплоотдачи мата с внешней воздушной средой, Вт/(м^2 К).

Согласно представленной модели задача предполагает следующие условия: в момент начала процесса теплообмена температуры водяной подушки и мата постоянны и равны (уравнения (2) и (6)); плотность потока теплоты через нижнюю поверхность водяной подушки отсутствует (уравнение (3)); на стыке водяной подушки и мата имеет место граничное условие теплообмена четвертого рода (ГУ-4), выражающее равенство температур и тепловых потоков (уравнения (6) и (7)); теплообмен поверхности матраса с воздухом происходит в соответствии с уравнением теплоотдачи Ньютона – граничное условие третьего рода (ГУ-3) (уравнение (8)). Левая часть уравнения (8) выражает перенос теплоты в мате за счет теплопроводности. В режиме охлаждения производная $\frac{\partial t_2}{\partial x}$ отрицательна, в совокупности со знаком «-» левая часть уравнения (8) положительна, правая часть уравнения тоже положительна, то есть знаки соблюдаются. В режиме нагрева производная $\frac{\partial t_2}{\partial x}$ в уравнении (8) положительна, в совокупности со знаком «-» левая часть этого уравнения отрицательна, но и правя часть уравнения (8) тоже отрицательна, то есть знаки в уравнении (8) также соблюдаются.

Представленная нестационарная задача может быть решена одним из известных численных методов. Результатом будут являться функции $t_1 = f_1(x, \tau)$; $t_2 = f_2(x, \tau)$, выражающие изменение локальных температур во времени. Интегрируя эти функции по координате, можно получить изменение среднеобъемных температур водяной подушки и мата во времени:

$$\overline{t_1}(\tau) = = \frac{1}{R_1} \int_0^{R_1} t(x, \tau), \tag{9}$$

$$\overline{t_2}(\tau) = = \frac{1}{R_2 - R_1} \int_{R_1}^{R_2} t(x, \tau). \tag{10}$$

Коэффициент теплоотдачи α, входящий в уравнение (8), может быть по уравнению подобия для естественной конвекции [6], которое имеет вид:

$$Nu = C(Gr \cdot \text{Pr})^n, \tag{11}$$

где $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda_в}$ – число Нуссельта; $Gr = \frac{g l^3}{\nu^2} \beta |t_{ст} - t_в|$ – число Грасгофа; $\text{Pr} = \frac{\nu}{a}$ – число Прандтля; l – определяющий размер тела по вертикали (в данном случае $l = R_1 + R_2$ – суммарная толщина водяной подушки и мата), м; $\lambda_в = 0{,}026$ Вт/(м °С)) – коэффициент теплопроводности воздуха; $g = 9{,}81$ м/с^2 – ускорение свободного падения; $\nu = 16{,}0 \cdot 10^{-6}$ м^2/с – кинематическая вязкость воздуха; β – коэффициент объемного расширения воздуха при средней его температуре 25°С, К$^{-1}$; $\beta = 1/((t_{ст} + t_в)/2 + 273) = 1/((30+20)/2+273) = 0{,}00335$ К$^{-1}$; a – коэффициент температуропроводности воздуха. Число Прандтля для воздуха Pr = 0,71; C, n, ε – константы, значения которых зависят от формы тела, расположения его в пространстве и от режима теплообмена. Для рассматриваемого случая (горизонтальная пластина, охлаждаемая снизу) $C = 0{,}27$; $n = 0{,}25$; $\varepsilon = 1$.

Примем $l = 0{,}053$ м, тогда имеем: $Gr = \frac{9{,}81 \cdot 0{,}053^3}{(16 \cdot 10^{-6})^2} 0{,}00335 \cdot 10 = 1{,}91 \cdot 10^5$; $Nu = C(Gr \cdot \mathrm{Pr})^n = 0{,}27(1{,}91 \cdot 10^5 \cdot 0{,}71)^{0{,}25} = 5{,}18$. Следовательно, $\alpha = Nu\frac{\lambda_в}{l} = 5{,}18\frac{0{,}026}{0{,}053} = 2{,}54$ Вт / (м^2·°С).

Стационарная задача

Целью теплового расчета по стационарной модели является определение затрат теплоты, потребляемой стендом Q_1, и температуры в той или иной частях системы в установившемся режиме работы стенда. Как отмечено выше, начиная с некоторого момента от начала процесса теплообмена, температуры t_1 и t_2 с достаточной точностью приближаются к своим предельным значениям, и можно считать, что наступает стационарный процесс, при котором температуры во времени уже не изменяются. На этой стадии теплота проходит от трубчатого нагревателя через рассматриваемые слои (слой под водяной подушкой, водяная подушка и мат) транзитом. Количество теплоты, выделяемое нагревателем в единицу времени (тепловая мощность), Вт, определяется уравнением:

$$Q_1 = G_в c_в (t_{в.н} - t_{в.к}), \quad (12)$$

где $G_в$ – массовый расход воды, кг/с; $c_в = 4190$ Дж/(кг °С) – теплоемкость воды; $t_{в.н}$, $t_{в.к}$ – температура воды на входе и выходе трубчатого нагревателя, °С. Под трубчатым нагревателем установлен отражательный экран, предназначенный для предотвращения утечек теплоты через низ стенда. Примем, что он обеспечивает 90% сохранения выделяющейся в нагревателе теплоты[4] и, таким образом, в сторону водяной подушки направляется поток теплоты величиной $Q = 0{,}9Q_1$. Процесс транспорта теплоты через систему может быть описан уравнением стационарной теплопередачи через плоскую многослойную стенку[5]. Запишем это уравнение в виде:

$$Q = k(\overline{t}_{в.ср} - t_с)F, \quad (13)$$

где $k = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{R_1}{\lambda_1} + \frac{R_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha}}$ – коэффициент теплопередачи, Вт/(м^2 °С); k_1 – коэффициент теплопередачи от воды в трубчатом нагревателе к водяной подушке, Вт/(м^2 °С); $\overline{t}_{в.ср} = (t_{в.н} + t_{в.к)} / 2$ – средняя температура воды в трубчатом нагревателе, °С; F – площадь наружной поверхности мата, м^2.

Температура на нижней поверхности водяной подушки $t_{в.п.н}$ составляет:

$$t_{в.п.н} = t_{в.ср} - \frac{Q}{k_1 \cdot F}. \quad (14)$$

Температура на верхней поверхности водяной подушки $t_{в.п.в}$ (нижней поверхности мата) составляет:

$$t_{в.п.в} = t_{в.ср} - \frac{Q}{\frac{1}{(1/k_1 + R_1/\lambda_1)}F}. \quad (15)$$

Для проведения экспериментальных исследований терморегулируемого матраса разработана лабораторная установка, включающая в себя датчики температуры теплоносителя на входе и выходе, электронные весы «Физтех ВТ-Н 32» с блоком индикации для регистрации массового расхода теплоносителя (воды) с погрешностью не более 0,01%, тепловизор Guide PF210, насос для перекачивания теплоносителя GEA Farm Technologies. Исследования проведены в лаборатории кафедры механизации сельского хозяйства РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

В экспериментальных исследованиях целевым показателем является определение диапазона регулирования температуры наружной поверхности водяного матраса при различных значениях температуры и расхода теплоносителя, приближенных к реальным условиям эксплуатации терморегулируемого матраса при беспривязном содержании коров в неотапливаемых коровниках.

При проведении исследований регистрировали расход теплоносителя (воды), изменение температуры воды в трубчатом теплообменнике на входе и выходе, изменение температуры внешней поверхности водяной подушки с помощью тепловизора (рис. 2). Важными в функционале тепловизора являются возможность анализа регистрируемого температурного поля водяного матраса и автоматическое представление усредненного результата измерения, который записывается в журнал опыта.

При охлаждении матраса, предварительно нагретого до 50°С, на вход теплообменника подается теплоноситель (вода) с температурой 16°С. При нагреве подается вода с температурами 42, 47 и 52°С. Температура воздуха в лаборатории и температура водяной подушки, измеряемой в исходном состоянии, составили 18°С. Значения расхода теплоносителя составляли 1,6; 3,2; 7,0 кг/мин. Замеры усреднены после 3-кратной повторности.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунках 3-6. На рисунке 3 представлены закономерности изменения регулируемой

[4] Официальный сайт ООО Ультрастрой Пермь». [Электронный ресурс]. URL: https://urfas.ru/folga_alyuminievaya_gladkaya.php (дата обращения: 06.04.2026).

[5] Рудобашта С.П. Теплотехника. Изд. 2-е, доп. М., 2015. 672 с

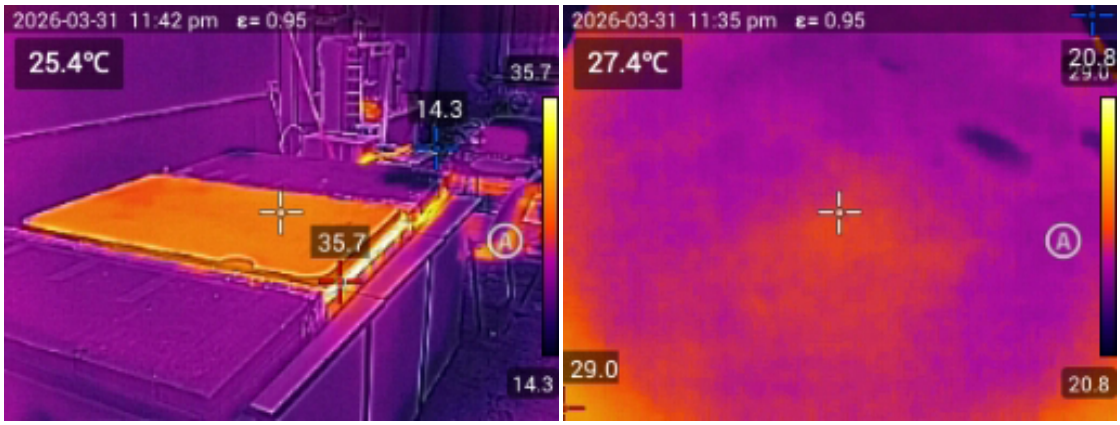


Рис. 2. Фото терморегулируемого матраса, полученное с тепловизора Guide PF210, и температурное поле поверхности водяного матраса

Fig. 2. Thermal image of the temperature-controlled mattress obtained with a Guide PF210 thermal camera, and the surface temperature field of the water mattress

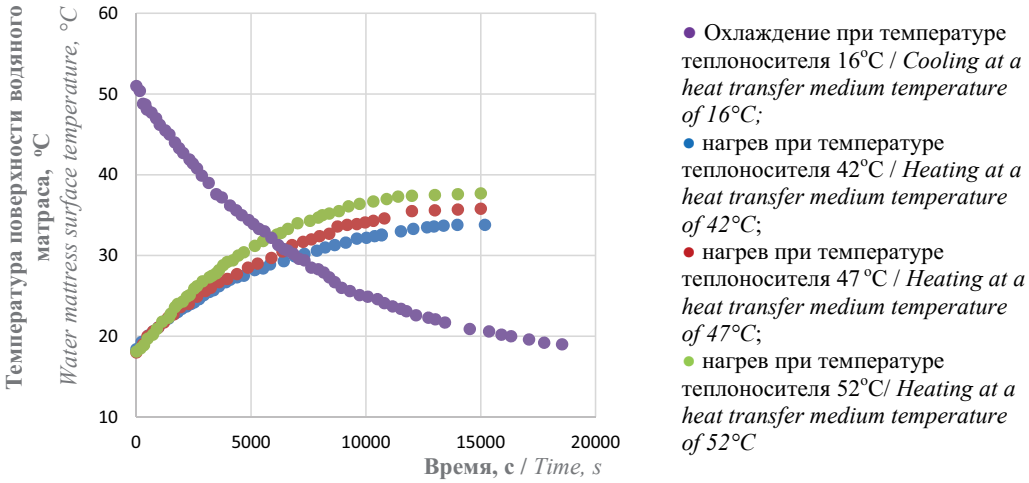


Рис. 3. Зависимость температуры поверхности водяного матраса от времени прокачивания теплоносителя при расходе 7,0 кг/мин

Fig. 3. Relationship between surface temperature of the water mattress and heat transfer medium pumping time at a flow rate of 7.0 kg/min

температуры наружной поверхности водяного матраса в диапазоне от 18 до 37,7°С при расходе теплоносителя 7,0 кг/мин. При температуре теплоносителя 42°С повышение температуры до установившегося значения 33,5°С происходит за 15000 с (250 мин). При температуре теплоносителя 47°С до установившегося значения 35,8°С время составляет 13700 с (228 мин); при температуре теплоносителя 52°С до установившегося значения 37,7°С – 12500 с (208 мин). Установка обеспечивает охлаждение наружной поверхности матраса в диапазоне 51…19°С за 18540 с (309 мин).

На рисунке 4 представлены закономерности изменения регулируемой температуры наружной поверхности водяного матраса в диапазоне от 18 до 35,9°С при расходе теплоносителя 3,2 кг/мин. При температуре теплоносителя 42°С повышение температуры до установившегося значения 32,5°С происходит за 14820 с (247 мин). Время при температуре теплоносителя 47°С до установившегося значения 34,3°С составляет 14220 с (237 мин). При температуре теплоносителя 52°С до установившегося значения 35,7°С время составляет 13000 с (217 мин).

На рисунке 5 представлены закономерности изменения регулируемой температуры наружной поверхности водяного матраса в диапазоне от 18 до 34,1°С при расходе теплоносителя 1,6 кг/мин. При температуре воды 42°С повышение температуры до установившегося значения 31,4°С происходит за 15540 с (259 мин). При температуре теплоносителя 47°С нагрев до установившегося значения 32,8°С происходит за 14900 с (248 мин). При температуре воды 52°С нагрев до установившегося значения 34°С достигается за 14160 с (236 мин).

На рисунке 6 представлены закономерности изменения разницы температур на входе и выходе

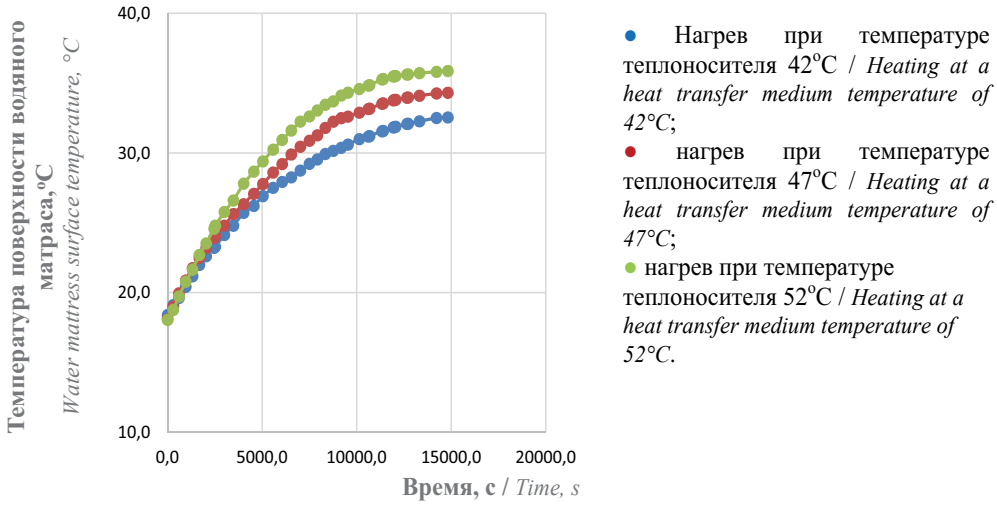


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности водяного матраса от времени прокачивания теплоносителя при расходе 3,2 кг/мин

Fig. 4. Relationship between the water mattress surface temperature and heat transfer medium pumping time at a flow rate of 3.2 kg/min

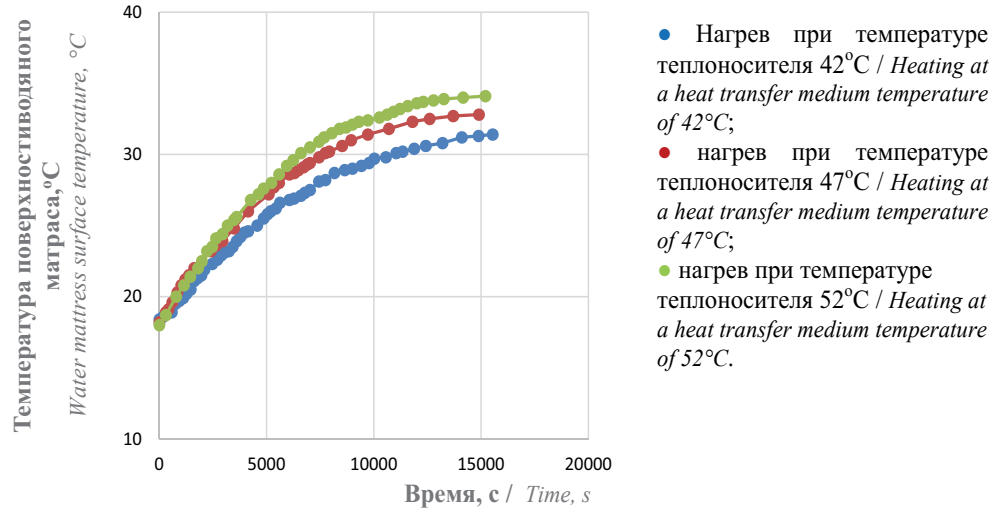


Рис. 5. Зависимость температуры поверхности водяного матраса от времени прокачивания теплоносителя при расходе 1,6 л/мин

Fig. 5. Relationship between the water mattress surface temperature and heat transfer medium pumping time at a flow rate of 1.6 L/min

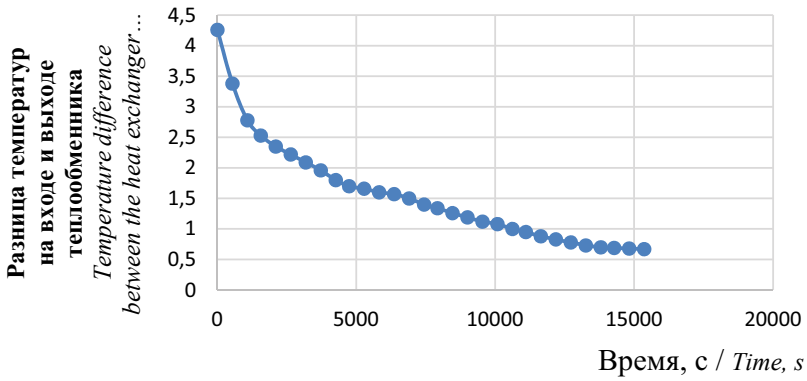


Рис. 6. Усредненная кривая разницы температур на входе и выходе теплообменника при температуре теплоносителя 47°С

Fig. 6. Averaged curve of the temperature difference between the heat exchanger inlet and outlet at a heat transfer medium temperature of 47°C

теплообменника при нагреве водяного матраса с учетом стационарной математической модели для расчетов теплопередачи от теплообменника к водяному матрасу.

Для количественной оценки соответствия расчетной кривой охлаждения экспериментальным данным выполнена проверка адекватности по критерию Фишера (рис. 7). Расчет проводили по шести контрольным точкам при 3-кратной повторности эксперимента. Температура поверхности водяного матраса в расчетной модели определялась по зависимости:

$$t_{расч}(\tau) = 16 + (51 - 16) \cdot \exp(-\tau / 7546{,}6),$$

где $t_{расч}(\tau)$ – расчетная температура поверхности водяного матраса, °С; τ – время охлаждения, с; 16°С – температура охлаждающего теплоносителя; 51°С – начальная температура поверхности матраса.

Результаты расчета дисперсии адекватности, дисперсии воспроизводимости и критерия Фишера представлены в таблице.

Поскольку расчетное значение критерия Фишера меньше критического значения (Fp = 1,84 < Fкр = = 3,106), расчетная модель охлаждения поверхности водяного матраса может быть признана адекватной экспериментальным данным на 5%-ном уровне значимости.

Установленные закономерности позволяют настраивать необходимые значения температуры наружной поверхности водяного матраса в зависимости от температуры теплоносителя при его нагреве или охлаждении и различных расходах теплоносителя. Поученные лабораторные данные могут быть применены в математических моделях при проектировании прототипа терморегулируемого водяного матраса для охлаждения или обогрева коров.

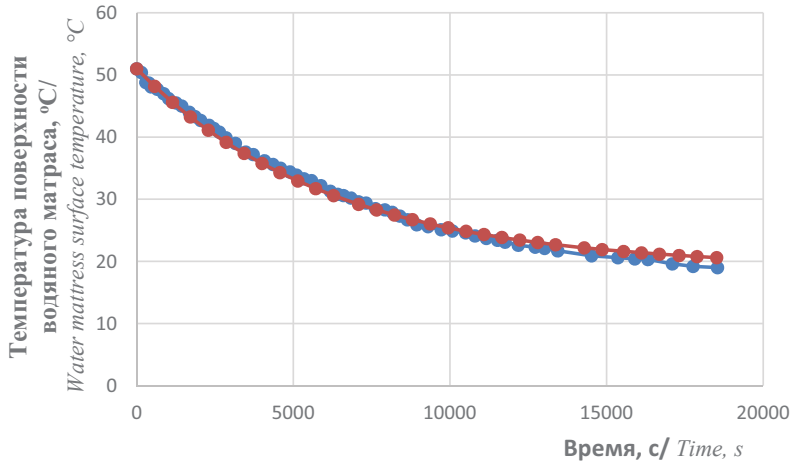


Рис. 7. Сопоставление теоретической и экспериментальной кривых охлаждения поверхности водяного матраса:
● – экспериментальная кривая; ● – теоретическая кривая

Fig. 7. Comparison of theoretical and experimental cooling curves for the water mattress surface:
● – experimental curve; ● – theoretical curve

Таблица

Результаты проверки адекватности расчетной модели охлаждения поверхности водяного матраса по критерию Фишера

Table

Results of testing the adequacy of the calculated cooling model of the water mattress surface using Fisher's criterion

Время τ, с	0	3600	7200	10800	14400	18540
Температура $t_{расч}$, °С	51	37,72	29,48	24,37	21,19	19
t1	50,2	36,5	28,5	23,6	20,3	18,5
t2	51,2	37,7	29,7	24,8	21,3	19,2
t3	51,6	37	30	23,9	21,1	19,3
tcp	51	37,2	29,4	24,1	20,9	19
s^2_i	0,52	0,39	0,63	0,39	0,28	0,19
S^2ад	0,2603					
S^2в	0,48					
Fp	1,84					

Выводы

1. Разработанный терморегулируемый водяной матрас для коров предназначен для снижения теплового стресса в летний период и возможного обогрева животных в холодное время года. Предложенная конструкция обеспечивает управляемое изменение температуры поверхности матраса за счет подачи теплоносителя через трубчатый теплообменник, расположенный внутри эластичного ложа.

2. Разработанные нестационарная и стационарная математические модели позволяют описать процесс теплообмена в системе «Теплоноситель – водяной матрас – мат – окружающая среда» и определить основные параметры нагрева и охлаждения поверхности матраса.

3. Экспериментальные исследования подтвердили закономерную зависимость температуры наружной поверхности водяного матраса от температуры и расхода теплоносителя. При повышении температуры теплоносителя до 42, 47 и 52°С наблюдается постепенный рост температуры поверхности матраса, а при подаче охлажденной воды происходит ее снижение. Увеличение расхода теплоносителя способствует более интенсивному изменению температуры поверхности, что подтверждает возможность регулирования теплового режима матраса.

4. Полученные результаты показывают, что терморегулируемый матрас может быть использован как элемент адаптивной системы обеспечения температурного комфорта для коров. Его применение позволит индивидуально воздействовать на животное в зоне отдыха, снижать риск теплового стресса, поддерживать более комфортные условия содержания и потенциально уменьшать потери молочной продуктивности в жаркий период года.

5. Дальнейшие исследования по установлению режимов автоматического управления температурой водяного матраса в зависимости от физиологических показателей коров (частоты дыхания и/или пульса) целесообразно провести в условиях животноводческой фермы.

Список источников

1. Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А. Влияние параметров среды коровника на физиологические показатели животных // Механизация электрификация сельского хозяйства. 2015. № 4. С. 18-21. EDN: UXPZNN

2. Вторый В.Ф., Вторый С.В. Информационная модель влияния теплового стресса на молочную продуктивность коров // Аграрный научный журнал. 2022. № 2. С. 69-72. https://doi.org/10.28983/asj.y2022i2pp69-72

3. Berman A. Effects of body surface area estimates on predicted energy requirements and heat stress. Journal of Dairy Science. 2003;86(11):3605-3610. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73966-6

4. Иванов Ю.Г., Борулько В.Г., Понизовкин Д.А. Влияние параметров принудительной вентиляции на физиологические показатели коров при высоких значениях температуры и влажности воздуха в помещении // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2015. № 4 (20). С. 192-194. EDN: VBWKSH

5. Довлатов И.М., Комков И.В. Обоснование режимов работы автоматизированной системы для снижения теплового стресса КРС // Техника и технологии в животноводстве. 2025. Т. 15, № 1. С. 14-23. EDN: QPRGWE

6. Довлатов И.М., Комков И.В. Математическое имитационное моделирование автоматизированной системы для снижения теплового стресса и сходимость с теоретическими значениями // Аграрная наука. 2025. № 1. С. 114-120. EDN: CYTSOU

7. Berman A. Estimates of heat stress relief needs for Holstein dairy cows. Journal of Animal Science. 2005;83(6):1377-1384. https://doi.org/10.2527/2005.8361377x

8. Новиков Н.Н. Технические решения для обеспечения комфортных условий содержания животных в жаркое время // Техника и технологии в животноводстве. 2022. № 3 (47). С. 28-35. EDN: HCKTKX

9. Berman A. An overview of heat stress relief with global warming in perspective. International Journal of Biometeorology. 2019;63:493-498. https://doi.org/10.1007/s00484-019-01680-7

Reference

1. Ivanov Yu.G., Ponizovkin D.A. Influence of parameters of air pollution on the physiological indicators of barn animals. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2015;4:18-21. (In Russ.)

2. Vtorvy V.F., Vtorvy S.V. Information model of heat stress effect on lactation performance of cows. *Agrarian Scientific Journal*. 2022;2:69-72. (In Russ.) https://doi.org/10.28983/asj.y2022i2pp69-72

3. Berman A. Effects of body surface area estimates on predicted energy requirements and heat stress. *Journal of Dairy Science*. 2003;86(11):3605-3610. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73966-6

4. Ivanov Yu.G., Borul'ko V.G., Ponizovkin D.A. Effect of mechanical ventilation parameters on the physiological responses of cows under high indoor air temperature and humidity. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatelskogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*. 2015;4:192-194. (In Russ.)

5. Dovlatov I.M., Komkov I.V. Justification of cattle thermal stress reducing at automated systems' regimes operating. *Machinery and Technologies in Livestock***.** 2025;15(1):14-23. (In Russ.)

6. Dovlatov I.M., Komkov I.V. Mathematical simulation modeling of an automated system to reduce heat stress and convergence to theoretical values. *Agrarian Science***.** 2025;1:114-120. (In Russ.)

7. Berman A. Estimates of heat stress relief needs for Holstein dairy cows. Journal of Animal Science. 2005;83(6):1377-1384. https://doi.org/10.2527/2005.8361377x

8. Novikov N.N. Technical solutions for animals keeping comfortable conditions in hot weather ensuring. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2022;3:28-35. (In Russ.)

9. Berman A. An overview of heat stress relief with global warming in perspective. *International Journal of Biometeorology*. 2019;63:493-498. https://doi.org/10.1007/s00484-019-01680-7

10. Kolchik I.E., Novikov N.N. Engineering solutions for maintaining comfortable livestock housing conditions in hot weather. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2022;1(45):32-38. (In Russ.)

10. Кольчик И.Е., Новиков Н.Н. Усовершенствование технических решений водоиспарительных систем кондиционирования воздуха животноводческих помещений // Техника и технологии в животноводстве. 2022. № 1 (45). С. 32-38. EDN: DMCOXZ

11. Ortiz X.A. et al. Evaluation of conductive cooling of lactating dairy cows under controlled environmental conditions. Journal of Dairy Science. 2015;98(3):1759-1771. https://doi.org/10.3168/jds.2014-8583

12. Bastian K.R., Gebremedhin K.G., Scottet N.R. A finite difference model to determine conduction heat loss to a water-filled mattress for dairy cows. Transactions of the ASAE. 2003;46(3):773-780. https://doi.org/10.13031/2013.13592

11. Ortiz X.A. et al. Evaluation of conductive cooling of lactating dairy cows under controlled environmental conditions. *Journal of Dairy Science*. 2015;98(3):1759-1771. https://doi.org/10.3168/jds.2014-8583

12. Bastian K.R., Gebremedhin K.G., Scottet N.R. A finite difference model to determine conduction heat loss to a water-filled mattress for dairy cows. *Transactions of the ASAE*. 2003;46(3):773-780. https://doi.org/10.13031/2013.13592

Информация об авторах

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

[2] **Рудобашта Станислав Павлович,** д-р техн. наук, профессор; rudobashta@mail.ru; https: orcid.org//0000-0002-3129-8562; SPIN-код: 4121-5567

[3] **Павлов Даниил Александрович,** аспирант; pavlovdaniil227@gmail.com

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

Author Information

Yuri G. Ivanov[1], DSc (Eng), Professor; iy.electro@mail.ru; https: orcid.org//0000-0002-4766-9532

Stanislav P. Rudobashta[2], DSc (Eng), Professor; rudobashta@mail.ru; https: orcid.org//0000-0002-3129-8562

Daniil A. Pavlov[3], PhD student; pavlovdaniil227@gmail.com

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

Вклад авторов

Иванов Ю.Г. – концептуализация, методология, программное обеспечение, формальный анализ, ресурсы создание черновика рукописи, получение финансирования;
Рудобашта С.П. – верификация данных, формальный анализ, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
Павлов Д.А. – проведение экспериментальных исследований, ресурсы

Author Contribution

Yu.G. Ivanov – conceptualization, methodology, software, formal analysis, resources, writing – original draft, funding acquisition;
S.P. Rudobashta – validation, formal analysis, writing – review and editing of the manuscript;
D.A. Pavlov – investigation, resources.

Статья поступила 15.05.2026, после рецензирования и доработки 16.06.2026, принята к публикации 20.08.2026

Received 15.05.2026; Revised 16.06.2026; Accepted 20.08.2026

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 621.436
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-97-102

Стендовые испытания на износ плунжерных пар на биодизельном топливе с различным содержанием рапсового и соевого масел

***И.И. Руденко*[1]✉, *А.С. Апатенко*[2], *О.А. Ступин*[3]**

[1, 2, 3] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

[1] vanya.rudenko.82@mail.ru✉; https://orcid.org/0009-0008-4769-7171

[2] a.apatenko@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-2492-9274

[3] stupin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-1466-572X

Аннотация. Ресурс плунжерных пар топливного насоса высокого давления (ТНВД) зависит от качества дизельного топлива. Добавки растительных масел – например, рапсового и соевого, позволяют улучшить качество товарного дизельного топлива. В частности, полярные молекулы растительных масел, формируя пограничный смазочный слой, способны сдерживать изнашивание сопряжения «Плунжер-втулка». Целесообразно подобрать оптимальный состав биодизельного топлива, способного снизить скорость трибологического изнашивания и увеличить ресурс плунжерных пар ТНВД без конструктивной модернизации элементов системы питания. Для оценки эффективности использования биодизельного топлива определили износ плунжерных пар 4УТНМ топливного насоса высокого давления в среде биодизельного топлива при различных концентрациях рапсового и соевого масел. Сравнительные испытания на износ плунжерных пар 4УТНМ-1111410-01 провели на стенде КИ-1640. Исследование плунжерных пар ТНВД с контролем изменения их гидравлической плотности провели в среде чистого дизельного топлива и смесевого топлива, включающего в себя рапсовое или соевое масла в количестве 25, 50 и 75%. Установлено, что биодизельное топливо, содержащее 25 и 50% масла, в сравнении с товарным дизельным топливом позволяет сохранить работоспособность прецизионных сопряжений и увеличить ресурс плунжерных пар более чем на 1000 мото-часов (на 30%). Более высокая концентрация растительных добавок (75%) нецелесообразна, так как высокая плотность и вязкость смеси требуют дополнительных затрат на установку систем подогрева топлива. В дальнейшем необходимо провести полевые эксплуатационные испытания автотракторной техники на биодизельном топливе, включающем в себя рапсовое или соевое масло в количестве 25 и 50%. Эксплуатация дизельных двигателей на биодизельном топливе будет способствовать снижению расходов, связанных с капитальным ремонтом топливной аппаратуры.

Ключевые слова: ресурс плунжерных пар; износ; износные испытания плунжерных пар; дизельное топливо; биодизельное топливо; рапсовое масло; соевое масло

Для цитирования: Руденко И.И., Апатенко А.С., Ступин О.А. Стендовые испытания на износ плунжерных пар на биодизельном топливе с различным содержанием рапсового и соевого масел // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 97-102. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-97-102

© Руденко И.И., Апатенко А.С., Ступин О.А., 2026

ORIGINAL ARTICLE

Bench wear tests of plunger pairs using biodiesel fuel with various contents of rapeseed and soybean oils

I.I. Rudenko[1]✉***, A.S. Apatenko***[2]***, O.A. Stupin***[3]

[1, 2, 3] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

[1] vanya.rudenko.82@mail.ru; https://orcid.org/0009-0008-4769-7171

[2] a.apatenko@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-2492-9274

[3] stupin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-1466-572X

Abstract. The service life of fuel injection pump (FIP) plunger pairs depends directly on the quality of diesel fuel. Adding vegetable oils, such as rapeseed and soybean oils, can enhance the performance of commercial diesel fuel. Specifically, the polar molecules present in vegetable oils form a boundary lubrication layer capable of mitigating wear at the plunger-bushing interface. Determining the optimal biodiesel composition is essential for reducing tribological wear rates and extending the service life of FIP plunger pairs without requiring structural modifications to existing fuel system components. To evaluate the effectiveness of biodiesel blends, wear tests were conducted on 4UTNM FIP plunger pairs exposed to varying concentrations of rapeseed and soybean oils. Comparative wear testing of 4UTNM-1111410-01 plunger pairs was performed using a KI-1640 test bench. The investigation involved monitoring changes in the hydraulic tightness of the plunger pairs across pure diesel fuel and blended fuels containing 25%, 50%, and 75% rapeseed or soybean oil. The findings indicate that biodiesel blends containing 25% and 50% vegetable oil maintain the operational integrity of precision-matched components and extend the service life of the plunger pairs by over 1,000 engine hours (approximately a 30% increase) compared to standard commercial diesel. Conversely, a higher concentration of vegetable oil additives (75%) is impractical due to the increased density and viscosity of the mixture, which would require additional costs to install supplementary fuel-heating systems. Further research will focus on conducting field operational tests of agricultural and automotive machinery using biodiesel fuel blends containing 25% and 50% rapeseed or soybean oil. Utilizing biodiesel in diesel engines will ultimately help reduce maintenance and overhaul expenses associated with fuel injection equipment.

Keywords: plunger pair service life; wear; plunger pair wear tests; diesel fuel; biodiesel fuel; rapeseed oil; soybean oil

For citation: Rudenko I.I., Apatenko A.S., Stupin O.A. Bench wear tests of plunger pairs using biodiesel fuel with various contents of rapeseed and soybean oils. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):97-102. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-97-102

Введение

Эксплуатация дизельных двигателей в АПК осложняется снижением качества дизельного топлива. С целью повышения качества дизельного топлива и удаления из него сернистых соединений проводят глубокую гидроочистку. Однако такое топливо отличается недостаточной смазывающей способностью деталей топливной аппаратуры, что является одной из причин уменьшения ресурса плунжерных пар топливного насоса высокого давления (ТНВД) [1]. Помимо этого, плунжерные пары работают с микронным зазором (1…3 мкм) и в среде высокого давления выходят из строя в первую очередь [2-4].

Для увеличения ресурса плунжерных пар применяют биодизельное топливо [5], в котором в качестве биодобавок выступают неэтерифицированные растительные масла. Как отмечает P.S. Ranjit и др. [6], интенсивность изнашивания прецизионных пар топливных насосов зависит от продолжительности работы двигателя на биодизеле и концентрации растительных компонентов в смеси. Более того, D. Zhuravel [7] и D.N. Tziourtzioumis [8] доказали прямое влияние высококонцентрированных биодобавок на снижение надежности сопряжения «Плунжер-втулка» в связи с изменением кинематической вязкости горючего и ростом отложения нерастворимых осадков.

В России наиболее распространены рапсовое и соевое масла. Растительные масла хорошо смешиваются с товарным дизельным топливом [9].

Для обоснованного применения биодизельного топлива необходимо провести испытания на износ плунжерных пар топливного насоса высокого давления и оценить влияние добавок масла на их ресурс. Необходимо подобрать оптимальный состав биодизельного топлива, способного снизить скорость трибологического изнашивания и увеличить ресурс плунжерных пар ТНВД без конструктивной модернизации элементов системы питания [10, 11].

Цель исследований: определить интенсивность износа плунжерных пар ТНВД 4УТНМ в среде биодизельного топлива при различных концентрациях рапсового и соевого масел в сравнении с товарным дизельным топливом.

Материалы и методы

Износ плунжерных пар ТНВД определяли на стенде КИ-1640 (рис. 1). Исследовали плунжерные пары топливного насоса высокого давления 4УТНМ-1111410-01 из стали марки 25Х5М (рис. 2) одной партии и одинаковой гидравлической плотности, изготовленные на Ногинском заводе топливной аппаратуры (НЗТА).

Проведен полный цикл испытаний на износ плунжерной пары ТНВД 4УТНМ в среде товарного дизельного топлива и смесевого топлива, включающих в себя добавки как рапсового, так и соевого масла в количестве 25, 50 и 75% [12, 13]. Сначала на стенде КИ-1640 определяли гидравлическую плотность плунжерной пары в дизельном и смесевом топливах по стандартной методике (ГОСТ 10578-2020)[1]. Далее проводили износные испытания плунжерных пар в течение 4000 ч на стенде (рис. 1) в соответствии с разработанным способом[2]. Количество оборотов электродвигателя соответствовало 1000 об/мин. Значение гидравлической плотности плунжерной пары измеряли через каждые 500 ч. Полученные значения сравнивали с допускаемым руководством по эксплуатации[3] стенда КИ-1640 значением гидроплотности плунжерной пары 15 с.

Результаты и их обсуждение

Результаты испытаний плунжерных пар ТНВД 4УТНМ на стенде КИ-1640 представлены в таблицах 1, 2. Динамика изменения гидроплотности плунжерных пар ТНВД при различном содержании рапсового и соевого масел в дизельном топливе и в чистом дизельном топливе отражена на рисунках 3, 4.

Согласно данным, представленным в таблицах 1 и 2, значение гидравлической плотности плунжерной пары увеличивается с ростом концентрации масла, что согласуется с данными зарубежных исследователей [6]. После испытаний в течение 4000 ч наибольший износ наблюдали на чистом дизельном топливе (20…30%). В частности, в чистом дизельном топливе значение гидравлической плотности составило 5 с, при добавлении 25% рапсового

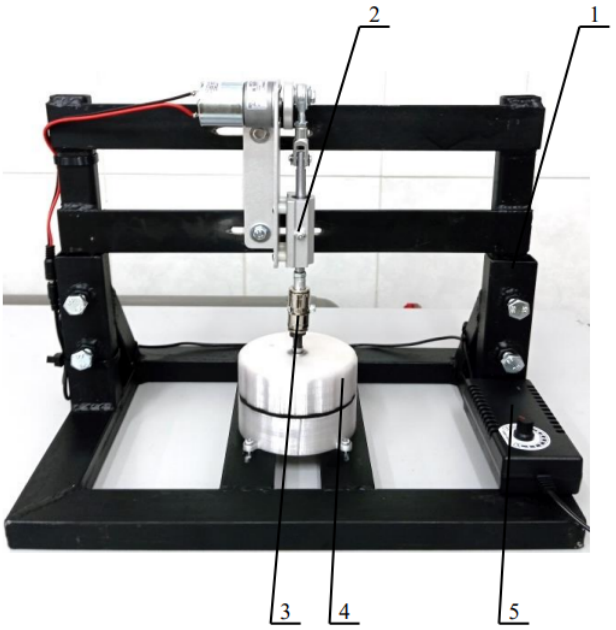


Рис. 1. Стенд для испытаний плунжерной пары на износ:
1 – рама; 2 – возвратно-поступательный механизм; 3 – переходник, соединяющий шток возвратно-поступательного механизма и поршень плунжерной пары; 4 – емкость для топлива; 5 – регулятор напряжения

Fig. 1. Test bench for plunger pair wear testing:
1 – frame; 2 – reciprocating mechanism; 3 – adapter connecting the reciprocating mechanism rod and the plunger pair piston; 4 – fuel tank; 5 – voltage regulator



Рис. 2. Плунжерная пара ТНВД 4УТНМ:
1 – поршень плунжерной пары; 2 – втулка плунжерной пары

Fig. 2. 4UTNM fuel injection pump plunger pair:
1 – plunger pair piston; 2 – plunger pair bushing

[1] ГОСТ 10578-2020. Насосы топливные дизелей. Технические требования и методы испытаний. https://files.stroyinf.ru/Index/74/74087.htm (дата обращения: 07.06.2026).

[2] Патент № 2866422 C1 Российская Федерация, МПК F02M 65/00. Способ испытаний плунжерной пары на износ: заявл. 28.12.2025: опубл. 20.07.2026 / И.И. Руденко, Д.А. Болясов. EDN: XODSSB.

[3] Проверка прецизионных элементов ТНВД. Общие сведения. URL.: https://studfile.net/preview/9968496/page:3/ (дата обращения: 07.06.2026).

Таблица 1

Гидроплотность плунжерной пары в зависимости от содержания рапсового масла (РМ)

Table 1

Hydraulic tightness of the plunger pair depending on the rapeseed oil (RO) content

Вид топлива	Время проведения испытаний плунжерной пары, ч								
	0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
	Гидравлическая плотность плунжерной пары, с								
ДТ	63	59	47	40	33	25	16	9	5
75% ДТ 25% РМ	69	65	57	45	38	33	25	21	17
50% ДТ 50% РМ	74	67	60	54	45	37	30	25	19
25% ДТ 75% РМ	81	77	66	56	48	38	32	26	20

Таблица 2

Гидроплотность плунжерной пары в зависимости от содержания соевого масла (СМ)

Table 2

Hydraulic tightness of the plunger pair depending on the soybean oil (SO) content

Вид топлива	Время проведения испытаний плунжерной пары, ч								
	0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
	Гидравлическая плотность плунжерной пары, с								
ДТ	63	59	47	40	33	25	16	9	5
75% ДТ 25% СМ	66	65	54	44	36	28	24	19	17
50% ДТ 50% СМ	71	69	57	47	39	31	27	24	19
25% ДТ 75% СМ	84	71	64	52	45	34	32	26	22

масла – 17 с, при 50% РМ – 19 с, при 75% РМ – 20 с (рис. 3). Результаты испытаний плунжерных пар ТНВД с добавлением соевого масла представлены на рисунке 4.

Отметим, что расхождения в значениях гидравлической плотности плунжерных пар в определенный период испытаний у двух масел незначительны. Так, после 400 ч испытаний гидравлическая плотность плунжерных пар при содержании соевого масла в биодизельном топливе в количестве 25% составила 17 с, при 50% СМ – 19 с, при 75% СМ – 22 с. Отметим также, что по сравнению с чистым дизельным топливом добавление рапсового и соевого масла в количестве 25 и 50% увеличивает ресурс плунжерных пар ТНВД с 3000 до 4000 мото-часов (на 20…30%). Однако использование рапсового масла в количестве 75% биодобавки является нецелесообразным ввиду повышения плотности и вязкости смеси, что требует

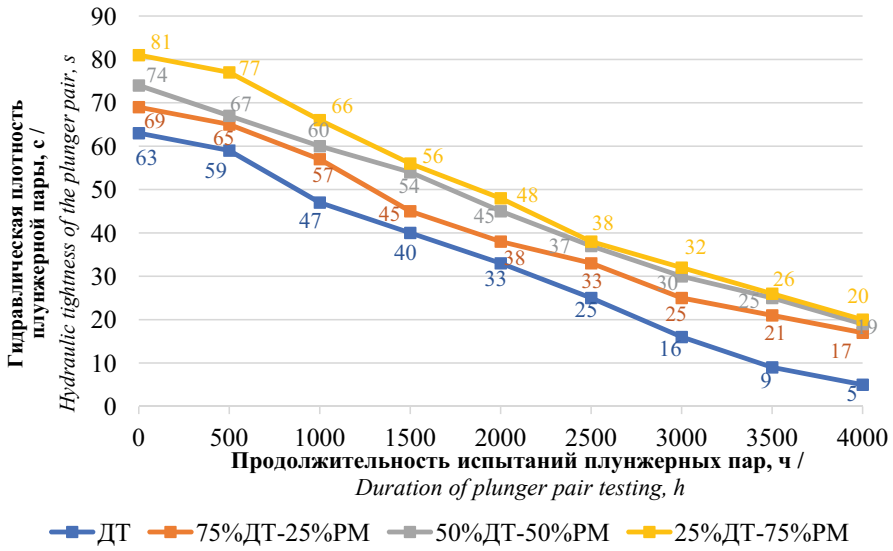


Рис. 3. Гидравлическая плотность плунжерной пары в зависимости от концентрации рапсового масла

Fig. 3. Hydraulic tightness of the plunger pair depending on rapeseed oil concentration

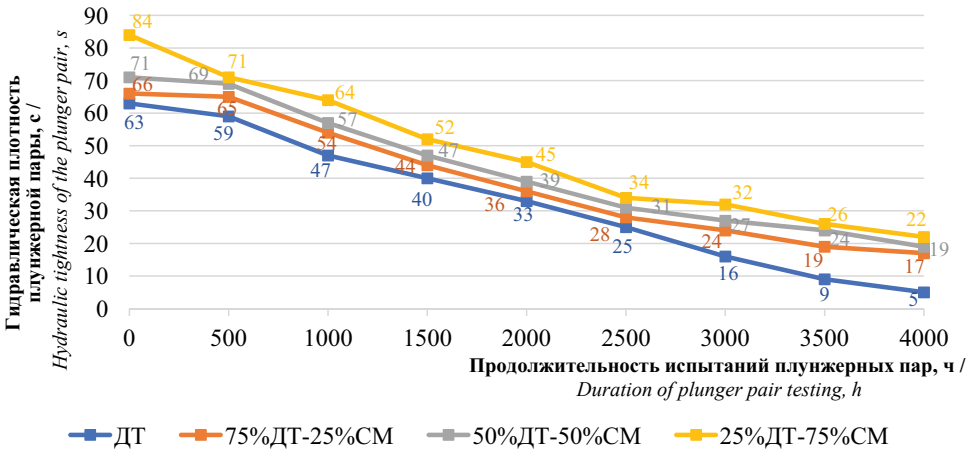


Рис. 4. Гидравлическая плотность плунжерной пары в зависимости от концентрации соевого масла

Fig. 4. Hydraulic tightness of the plunger pair depending on soybean oil concentration

дополнительных затрат на установку систем подогрева топлива. Полученные наблюдения согласуются с результатами исследований [7, 8].

Результаты стендовых исследований подтверждают увеличение ресурса плунжерных пар ТНВД при оптимальных концентрациях рапсового и соевого масел в количестве 25 и 50%.

Для верификации оптимального состава биодизельного топлива и увеличения ресурса плунжерных пар ТНВД без конструктивной модернизации элементов системы питания в дальнейшем целесообразно провести полевые эксплуатационные испытания автотракторной техники на биодизельном топливе с включением 25 и 50% рапсового или соевого масел.

Выводы

Интенсивность изнашивания деталей плунжерных пар ТНВД 4УТНМ снижается при использовании биодизельного топлива. После 4000 ч стендовых испытаний гидравлическая плотность плунжерных пар ТНВД на биодизельном топливе в сравнении с товарным дизельным топливом увеличивается на 20…30%.

Применение рапсового и соевого масел в количестве 25 и 50% сохраняет работоспособность прецизионных сопряжений и увеличивает ресурс плунжерных пар более чем на 1000 мото-часов, что позволяет продлить период эксплуатации топливной аппаратуры на 30% без ее конструктивной модернизации.

Применение растительных добавок в количестве 75% является нецелесообразным, так как высокие плотность и вязкость высококонцентрированной смеси требуют дополнительных затрат на установку систем подогрева топлива.

Список источников

1. Уханов А.П., Володько О.С., Ротанов Е.Г. Сравнительные ускоренные испытания ТНВД на износ плунжерных пар при работе на нефтяном и бионефтяном топливах // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. Т. 9, № 2. С. 28-33. EDN: IERPCF

2. Уханов А.П., Уханов Д.А., Ротанов Е.Г. и др. Испытание секций ТНВД на различных видах топлива // Сельский механизатор. 2018. № 9. С. 34-35. EDN: HVEXJW

3. Уколова Н.В., Новикова Н.А. Направления государственной поддержки развития рынка биотоплива в России // Аграрный научный журнал. 2015. № 6. С. 97-100. EDN: TXGHMH

4. Голубев И.Г., Руденко И.И. Испытание дизелей на топливе с биодобавками // Труды ГОСНИТИ. 2014. Т. 114, № 1. С. 66-68. EDN: RYHUZV

5. Apatenko A.S., Sevryugina N.S., Mironov A.V., Stupin O.A. Information bank of parametric data for controlling the resource loading of elements of technical systems of technological machines. Steel in Translation. 2023;53(3):238-242. https://doi.org/10.3103/s0967091223030026

6. Ranjit P.S., Ahmed Z., Bhurat S.S. et al. Comprehensive comparative study of the durability wear

References

1. Ukhanov A.P., Volodko O.S., Rotanov E.G. Comparative accelerated wear testing of fuel injectors plunger pairs in operation with oil and bio-oil fuels. *Bulletin Samara State Agricultural Academy*. 2024;9(2):28-33. (In Russ.)

2. Ukhanov A.P., Ukhanov D.A., Rotanov E.G., et al. Testing of fuel pump sections on various types of fuel. *Selskiy mekhanizator*. 2018;9:34-35. (In Russ.)

3. Ukolova N.V., Novikova N.A. Directions of the state support for the biofuel market development in Russia. *The Agrarian Scientific Journal*. 2015;6:97-100. (In Russ.)

4. Golubev I.G., Rudenko I.I. Testing diesel engines on fuel with bioadditives. *Trudy GOSNITI*. 2014;114(1):66-68. (In Russ.)

5. Apatenko A.S., Sevryugina N.S., Mironov A.V., Stupin O.A. Information bank of parametric data for controlling the resource loading of elements of technical systems of technological machines. *Steel in Translation*. 2023;53(3):238-242. https://doi.org/10.3103/s0967091223030026

6. Ranjit P.S., Ahmed Z., Bhurat S.S. et al. Comprehensive comparative study of the durability wear assessment of a diesel engine fuelled with Jatropha seed oil and diesel fuel and its troubleshooting

assessment of a diesel engine fuelled with Jatropha seed oil and diesel fuel and its troubleshooting and scheduled maintenance. ACS Omega. 2024;9(43):43331-43352. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00204

7. Zhuravel D., Samoichuk K., Petrychenko S. et al. Modeling of diesel engine fuel systems reliability when operating on biofuels. Energies. 2022;15(5):1795. https://doi.org/10.3390/en15051795

8. Tziourtzioumis D.N., Stamatelos A.M. Diesel-injection equipment parts deterioration after prolonged use of biodiesel. Energies. 2019;12(10):1953. https://doi.org/10.3390/en12101953

9. Апатенко А.С., Руденко И.И., Севрюгина Н.С. Сопоставление согласованности характеристик типовых фильтрующих элементов с работой в биотопливе из рапсового масла // Естественные и технические науки. 2022. № 1 (164). С. 223-229. EDN: AGZHZS

10. Глазков Ю.Е., Глазкова М.М. Анализ особенностей эксплуатации двигателей транспортных средств на различных видах биотоплива // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 67-2. С. 27-30. EDN: RVFUIU

11. Нагорнов С.А., Марков В.А., Мещерякова Ю.В. и др. Исследование топливоподачи дизеля, работающего на биотопливе // Автомобильная промышленность. 2023. № 4. С. 7-11. EDN: YXZYAM

12. Марков В.А., Девянин С.Н., Слепцов О.Н. и др. Физико-химические и моторные свойства смесевых биотоплив с добавками растительных масел // Транспорт на альтернативном топливе. 2023. № 6 (96). С. 54-70. EDN: CGSZSJ

13. Шамарин Ю.А., Руденко И.И., Титов В.А. Организация рационального использования моторного топлива на АТП // Аграрный научный журнал. 2023. № 11. С. 205-211. EDN: QPRVPY

Информация об авторах

[1] **Руденко Иван Иванович,** канд. техн. наук, старший преподаватель; rudenko@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0009-0008-4769-7171; SPIN-код: 2469-1792

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

[3] **Ступин Олег Александрович,** старший преподаватель; stupin@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-1466-572X; SPIN-код 8620-2870

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

Вклад авторов

И.И. Руденко – методолония, проведение исследований, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование

А.С. Апатенко – руководство исследованиями, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование

О.А. Ступин – ресурсы, визуализация

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 09.06.2026, после рецензирования и доработки 16.10.2026, принята к публикации 19.10.2026

and scheduled maintenance. *ACS Omega*. 2024;9(43):43331-43352. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00204

7. Zhuravel D., Samoichuk K., Petrychenko S. et al. Modeling of diesel engine fuel systems reliability when operating on biofuels. *Energies*. 2022;15(5):1795. https://doi.org/10.3390/en15051795

8. Tziourtzioumis D.N., Stamatelos A.M. Diesel-injection equipment parts deterioration after prolonged use of biodiesel. *Energies*. 2019;12(10):1953. https://doi.org/10.3390/en12101953

9. Apatenko A.S., Rudenko I.I., Sevryugina N.S. Comparison of the consistency of the characteristics of typical filter elements with work in biofuels from rapeseed oil. *Natural and Technical Sciences*. 2022;1:223-229. (In Russ.)

10. Glazkov Yu.E., Glazkova M.M. Analysis of the operational features of vehicle engines using various types of biofuels. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2020;67-2:27-30. (In Russ.)

11. Nagornov S.A., Markov V.A., Meshcheryakova Yu.V. et al. Investigation of diesel engine fuel supply, powered by biodiesel fuel. *Avtomobilnaya promyshlennost.* 2023;4:7-11. (In Russ.)

12. Markov V.A., Devyanin S.N., Sleptsov O.N. et al. Physico-chemical and motor properties of mixed biofuels with vegetable oil additives. *Alternative Fuel Transport.* 2023;6(96):54-70. (In Russ.)

13. Shamarin Yu.A., Rudenko I.I., Titov V.A. Organization of rational use of motor fuel at the ATP. *The Agrarian Scientific Journal*. 2023;11:205-211. (In Russ.)

Author Information

Ivan I. Rudenko[1], CSc (Eng), Senior Lecturer; rudenko@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0009-0008-4769-7171

Aleksei S. Apatenko[2], DSc (Eng), Professor; a.apatenko@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-2492-9274; Scopus Author ID: 57216908465

Oleg A. Stupin[3], Senior Lecturer; stupin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-1466-572X

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

Author Contribution

I.I. Rudenko – methodology, investigation, writing – original draft, review and editing of the manuscript;

A.S. Apatenko – research supervision, writing – review and editing of the manuscript;

O.A. Stupin – resources, visualization.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests regarding the publication.

Received 09.06.2026; Revised 16.10.2026; Accepted 19.10.2026

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.3:631.171:634:632.51
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-103-114

Агробиоэлектротехнология борьбы с нежелательной и сорной растительностью в садах и виноградниках: обоснование и принципы технической реализации

***И.В. Юдаев*[1]✉, *Ю.В. Даус*[2], *И.В. Шаров*[3], *Е.А. Рожков*[4], *Е.Е. Рудь*[5]**

[1, 2, 3, 4, 5] Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина; г. Краснодар, Россия

[1] etsh1965@mail.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-3435-4873

[2] zirochka3011@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-9120-7637

[3] ivanshar98@gmail.com

[4] zhenyacool31@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0003-8607-0252

[5] eugene.rud@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0000-9779-5564

Аннотация. Реализация принципов органического сельского хозяйства в виноградарстве и садоводстве требует поиска новых технологически обоснованных и экологически безопасных операций. В качестве альтернативы традиционно используемым способам борьбы с нежелательной растительностью – механическому и химическому – целесообразно применять агробиоэлектротехнологию. Исследования проведены с целью определения параметров режима воздействия на сорную растительность, необратимо повреждающего их ткани, и обоснования конструкции мобильного малогабаритного электротехнологического устройства для борьбы с сорняками в садах, питомниках и виноградниках. В ходе многолетних лабораторных и полевых исследований изучили электропроводные свойства растительной ткани разных видов сорняков и сопротивление цепей протекания тока обработки, чувствительность растительной ткани сорняков к электроимпульсному необратимому повреждению. Для оценки необратимого повреждения внутриклеточных компонентов ткани сорняков исследовали степень повреждения растительной ткани. Воздействие на сорняки осуществляли электрическими импульсами высокого напряжения амплитудой 10…15 кВ, длительностью 20-60 мкс и частотой 1…5 Гц. Энергия одного импульса составляла 1,5…2,0 Дж. Установлено, что предельная доза электрической энергии импульсного воздействия для необратимого повреждения внутриклеточных компонентов однолетних и многолетних сорняков находится в пределах 110…740 Дж. Несмотря на необратимое повреждение растительной ткани сорняков электроимпульсная обработка сохраняет полезную почвенную фауну и местообитание полезных микробов. Для реализации агробиоэлектротехнологии предложен малогабаритный передвижной агрегат на основе мотоблока, в прицепном модуле которого размещается электротехническая часть установки, а на раме смонтирована электродная система с двумя типами электродов. В целях повышения агротехнологической эффективности и согласованной работы с минитрактором планируется дальнейшая модернизация представленной конструкции.

Ключевые слова: агробиоэлектротехнология; виноградник; сад; электроимпульсная обработка; электроимпульс; сорняк; степень повреждения растительной ткани

Финансирование. Исследования выполнены в рамках научного проекта РНФ № 25-29-01005 «Электроимпульсная, энергомалозатратная, экологически чистая агробиоэлектротехнология борьбы с сорной и нежелательной растительностью для систем ведения органического садоводства и виноградарства». https://rscf.ru/project/25-29-01005/.

Для цитирования: Юдаев И.В., Даус Ю.В., Шаров И.В., Рожков Е.А., Рудь Е.Е. Агробиоэлектротехнология борьбы с нежелательной и сорной растительностью в садах и виноградниках: обоснование и принципы технической реализации // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 103-114. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-103-114

© Юдаев И.В., Даус Ю.В., Шаров И.В., Рожков Е.А., Рудь Е.Е., 2026

ORIGINAL ARTICLE

Agrobioelectrotechnology for weed control in orchards and vineyards: rationale and principles of technical implementation

***I.V. Yudaev*[1]✉, *Y.V. Daus*[2], *I.V. Sharov*[3], *E.A. Rozhkov*[4], *E.E. Rud*[5]**

[1, 2, 3, 4, 5] Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin; Krasnodar, Russia

[1] etsh1965@mail.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-3435-4873

[2] zirochka3011@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-9120-7637

[3] ivanshar98@gmail.com

[4] zhenyacool31@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0003-8607-0252

[5] eugene.rud@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0000-9779-5564

Abstract. The integration of organic farming principles into viticulture and horticulture demands novel, technologically viable, and environmentally safe practices. Agrobioelectrotechnology offers a promising alternative to traditional mechanical and chemical weed control. The study aims to determine the electrical parameters required to cause irreversible tissue damage in weeds and to justify the design of a compact, mobile electrotechnological device for weed control in orchards, nurseries, and vineyards. Long-term laboratory and field investigations analyzed the electrical conductivity of various weed species, circuit resistance during treatment current flow, and the sensitivity of weed tissues to irreversible electro-pulse damage. To evaluate cellular-level impact, the degree of intracellular and tissue damage was assessed. Weeds were subjected to high-voltage electric pulses (amplitude: 10-15 kV; duration: 20-60 μs; frequency: 1-5 Hz) with a single-pulse energy of 1.5-2.0 J. The threshold electrical energy dose required to cause irreversible intracellular damage in annual and perennial weeds ranged from 110 to 740 J. Notably, while effectively destroying weed tissues, electro-pulse treatment preserves beneficial soil fauna and microbial habitats. To implement this technology, the authors propose a compact mobile unit based on a walk-behind tractor. The unit's trailer module houses the electrical components, while a dual-type electrode system is mounted on the frame. Further design optimization is necessary to enhance agronomic efficiency and ensure seamless integration with mini-tractors.

Keywords: agrobiobioelectrotechnology; vineyard; orchard; electric-pulse treatment; electric pulse; weed; degree of plant tissue damage

Funding. The research was supported by the Russian Science Foundation (RSF), Project No. 25-29-01005, titled "Electric-pulse, low-energy, environmentally friendly agrobioelectrotechnology for weed and unwanted vegetation control for organic gardening and viticulture systems" (https://rscf.ru/project/25-29-01005/).

For citation: Yudaev I.V., Daus Y.V., Sharov I.V., Rozhkov E.A., Rud E.E. Agrobioelectrotechnology for weed control in orchards and vineyards: rationale and principles of technical implementation. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):103-114. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-103-114

Введение

Садоводство и виноградарство развиваются в России активно. Реализация комплекса агротехнологических операций по уходу за почвенным покровом в органическом плодоводстве и виноградарстве с применением принципов регенеративного сельского хозяйства выявила необходимость поиска технологически эффективных и экологически безопасных способов борьбы с трудноискоренимыми многолетними и инвазивными сорными растениями [1, 2].

Существующие методы борьбы с сорняками – например, применение химически синтезированных ядохимикатов и механическое удаление сорняков, зачастую оказываются малоэффективными, трудоемкими, требуют многократных повторных обработок и оказывают негативное антропогенное воздействие на окружающую среду. Так, гербицид сплошного действия с основным действующим веществом глифосатом представляет потенциальный риск для здоровья человека, токсично воздействует на микрофлору почвы, снижает плодородие почвы и др. В связи с этим H.J. Beckie и др. [3] отмечают необходимость ограничения использования химически небезопасных ядохимикатов в пользу альтернативных и безвредных технологий.

Альтернативные методы – такие, как огневая, паровая или нетрадиционная механическая обработка (например, вычесывающими щетками), далеки от оптимальной замены ими применения гербицидов ввиду высокой стоимости их реализации и отсутствия системности в решении проблемы эффективного уничтожения сорняков и очагов их

распространения. По оценке G.R.Y. Coleman и др. [4], энергозатраты на обработку огнем и инфракрасное облучение сорных трав достигают, соответственно, 1008…4334 и 2000…3887 МДж/га. При использовании бороны с гибкими зубьями расходуется от 4,2 до 5,5 МДж/га, при эксплуатации культиватора – от 13 до 14 МДж/га, роторной мотыги – от 12 до 17 МДж/га. Энергозатраты традиционной химической прополки составляют 15 МДж/га.

Согласно оценке D.J. Bloomer и др. [5] альтернативная электротехнологическая обработка почвы отличается низкими затратами совокупной энергии. По заявлению R.G. Wilson [6] и M.F. Diprose [7] электрофизическое воздействие представляет собой единственную нехимическую альтернативу, оказывающую системное действие и, как отмечает M.J. Slaven [8], сопоставимую по технологической эффективности с применением гербицидов. Электропрополка реализуется за счет протекания повреждающей плотности тока по тканям растений при их контакте с электродами электротехнологической установки [9, 10]. При этом возникают необратимые нарушения нормального функционирования внутриклеточных структур, приводящие к гибели растения [11], а в отдельных случаях – к максимальному подавлению роста и развитию сорных трав [12]. Затраты совокупной энергии на электропрополку составляют от 15 до 19 МДж/га, в случае альтернативного варианта лазерной прополки – от 15 до 249 МДж/га [4, 9].

За рубежом электротехнологические установки применяются для борьбы с нежелательными растениями на территориях со сплошной засоренностью почвенных площадей [5, 7], в междурядьях посевов сельскохозяйственных культур [6, 7], в садах и виноградниках [13, 14], а также на плантациях [15], по обочинам дорог и тротуаров, по мощенным камнем и тротуарной плиткой площадям и др. [10]. Так, установка XPS Zasso (рис. 1а, б) (табл.) осуществляет прополку в междурядьях и вокруг ствола плодовых



а б в г д е

Рис. 1. Электротехнологические установки для борьбы с сорняками:
прополочная XPS[1] Zasso (а, б); специализированная RootWave eWeeder[2] (в, г); малогабаритная ZAP Weeder[3] (д, е)

Fig. 1. Electrotechnological weed control units:
XPS Zasso weeding[1] unit (a, b); specialized RootWave eWeeder[2] (c, d); compact ZAP Weeder[3] (e, f)

[1] https://www.agrosklad.com.pl/agxtend-xpower/.
[2] https://rootwave.com/.
[3] https://zasso.com/portfolio/zap_weeder/.

Таблица

Основные характеристики выпускаемых электротехнологических машин и установок для борьбы с нежелательной растительностью в садах и на виноградниках

Table

Main specifications of commercially available electrotechnological machines and units for weed and unwanted vegetation control in orchards and vineyards

Марка установки (компания, страна-производитель)	Основные характеристики
XPS Zasso (Zasso, Швейцария-Бразилия)	Мощность движителя (колесного трактора) – 75 л.с. Рабочая скорость – до 4 км/ч Наличие сочленения вала генератора с ВОМ трактора Мощность генератора – 24 или 36 кВт Напряжение питания – трехфазное промышленной частоты Напряжение обработки – от 5 до 12 кВ Масса установки – 1200 кг Электродная система: – полная ширина захвата – 1,8…4,0 м – рабочая ширина охвата электродов с обеих сторон – 500 мм (250 мм – статическая, 300 мм – качающаяся) Эффективность: на 84…87% снижение биомассы сорняков Наличие сертификата CE о соответствии стандартам безопасности
eWeeder (RootWave, Великобритания)	Мощность движителя (колесного трактора) – 120 л.с. Рабочая скорость – до 5 км/ч Наличие сочленения вала генератора с ВОМ трактора Мощность генератора – 60 кВт Напряжение питания – переменное трехфазное 415 В промышленной частоты, преобразованное в высокочастотное 18 кГц Напряжение обработки – от 5 до 15 кВ Масса установки – 1500 кг Электродная система: – ширина захвата – от 2,0 до 6,0 м – рабочая ширина охвата с каждой стороны – от 0,3 м до 0,65 м Эффективность: уничтожение сорняков до 99% Высокая частота тока обработки (18 кГц) повышает электробезопасность установки
ZAP Weeder (Zasso, Швейцария-Бразилия)	Аккумуляторное питание – 2 литий-ионных аккумулятора, прополка возможна в течение 3-4 ч на одной зарядке Рабочая скорость – 1,5-3 км/ч Аккумуляторная батарея Pellenc ULIB1500: – емкость – 34,5 А · ч – напряжение – 43,6 В – время зарядки – 5 ч (90%) с ускоренной зарядкой на токе 7,6 А Мощность (максимальная) силовых модулей – 2 кВт Напряжение на электродной системе – 10 кВ Ток обработки – от 0 до 2 А Масса установки (без аккумуляторных батарей) – 69 кг Электродная система: – гибкие потенциальные и заземленные электроды из нержавеющей стали – рабочая ширина захвата – 60 см – наличие бокового смещения системы до 5 см Размеры (в сложенном виде, с батареями): 67 × 119 × 86 см Установка обеспечена средствами повышенной электробезопасности

деревьев и виноградной лозы неподвижными и подвижными электродами, подводя электричество непосредственно к сорнякам, тем самым необратимо повреждая внутренние структуры их тканей. Апробация XPS Zasso показала, что ее применение сопоставимо с использованием гербицидов типа глифосата (*Crucial*®) и амитрола с тиоцианатом аммония (*Amitrole T*) и дает больший эффект в сравнении со скашиванием, имитирующим выпас скота [8]. Другая электрическая машина eWeeder (рис. 1в, г) (табл.), используя систему электродов – аппликаторов на гидравлических манипуляторах – беспрепятственно работает в садах, виноградниках и на фруктовых плантациях с различной шириной рядов, создавая свободную от сорняков и травы полосу шириной 30…50 см. Применение такой установки обходится дешевле по сравнению с механической и химической прополкой. Уничтожение сорняков на высоких частотах позволяет снизить вероятность возникновения остановки сердца при неконтролируемом

попадании человека или некрупного животного в цепь протекания тока в 10000 раз по сравнению с частотой 50 Гц, в 2500 раз – по сравнению с постоянным током [8]. На небольших почвенных участках, труднодоступных для работы традиционной техники, например, на небольших фруктовых плантациях, садах и виноградниках, для борьбы с сорной и нежелательной растительностью используют малогабаритный мобильный электропрополочник ZAP Weeder (рис. 1д, е) (табл.) [13].

В России отсутствуют установки для электрической борьбы с нежелательной растительностью в садах, виноградниках и для сплошной прополки сельскохозяйственных угодий, в то время как еще в 90-е гг. прошлого столетия А.В. Тверитин и др[4]. описали и дали подробную оценку проведенным в стране исследованиям, а А.А. Спирин, ученые ЧГАУ и В.Н. Топорков[5] разработали опытные установки для электропрополки паров, посевов и посадок культурных растений.

Разработка современной установки для органического земледелия, изготовленной из отечественных комплектующих элементов и узлов, удовлетворяющих потребности отечественного рынка, обусловливает необходимость выявления условий эффективной электроимпульсной прополки, поиска вариантов контакта электродной системы с растениями и эффективного режима воздействия электрической энергии на растительную ткань сорняков, проведения исследований электропроводных свойств объектов обработки, установления летальных доз повреждения сорняков.

Цель исследований: экспериментально определить параметры режима необратимого повреждения внутриклеточных компонентов тканей сорняков и обосновать конструкцию мобильного малогабаритного электротехнологического устройства для борьбы с сорняками в садах, питомниках и виноградниках.

Материалы и методы

В плодовых садах и виноградниках ЮФО и СКФО представлены в основном следующие виды сорной растительности: амброзия полынолистная (*Ambrosia artemisiifolia L.*), марь белая (*Chenopodium album L.*), молочай лозный (*Euphorbia virgata L.*), осот полевой (*Sonchus arvensis L.*), осот розовый (*Cirsium arvense L.*), пырей ползучий (*Elytrigia repens L.*), щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus L.*). Их доля в общем засорении почвенных площадей достигает 80…90%.

Применимость агробиоэлектротехнологии в борьбе с нежелательной и сорной растительностью исследовали в лабораторных и полевых условиях в периоды 1998-2012 гг. и с 2021 г. по настоящее время с использованием общих и частных методик проведения экспериментов. Основывались на результатах исследований по выявлению наиболее эффективного вида повреждающего электрического воздействия [16], летальных доз электроимпульсной обработки [17], электропроводных свойств растительных тканей сорняков [18], основных факторов электроимпульсного воздействия, повреждающих внутриклеточные структуры растительной ткани [19], отклика почвенной биоты на электроимпульсную обработку[6].

Электропроводные свойства растительной ткани сорняков и сопротивление цепей протекания тока обработки исследовали на измерительных комплексах, включающих в себя генератор звуковых сигналов, цифровые мультиметры, стрелочные приборы и авторский измерительный мост сравнения для фиксации полного сопротивления растительной ткани или его активной составляющей.

Чувствительность растительной ткани сорняков к электроимпульсному необратимому повреждению изучали на лабораторном комплексе (рис. 2а). Установка включает в себя регулируемый источник высокого постоянного напряжения, генератор импульсов высокого напряжения, схему формирования сигналов управления для разрядника, систему контроля за параметрами обработки и их фиксации.

Определение повреждающих доз электроимпульсного воздействия осуществляли в полевых условиях с помощью передвижного высоковольтного комплекса (рис. 2б), работающего от инверторного бензинового генератора. С выхода разрядного блока генератора импульсного напряжения напряжение обработки подводилось к обрабатываемым сорнякам при помощи навесной или выносной системы электродов. Сопротивление цепей протекания тока обработки фиксировали электронным омметром, цифровым RLC-метром, портативным осциллографом.

Воздействие на растения осуществляли электрическими импульсами высокого напряжения

[4] Тверитин А.В., Трофимова Н.Б. Уничтожение сорняков током высокого напряжения // Электронная обработка материалов. 1986. № 3. С. 52-56.

[5] Топорков В.Н., Королев В.А. Электроимпульсная установка для борьбы с сорняками. М.: ФНАЦ ВИМ, 2017. 132 с.

[6] Юдаев И.В., Бренина Т.П., Прокофьев П.В. Влияние процесса электроимпульсной прополки на почвенную микрофлору и микроорганизмы // Экологические и экономические составляющие устойчивого развития региона: Материалы круглого стола, г. Волгоград, 27 марта 2008 г. Волгоград: Волгоградский государственный университет, 2008. С. 181-186. EDN: NQFFAE.



а б

Рис. 2. Фотографии комплексов для изучения параметров и режима электроимпульсной обработки нежелательных трав:
а – стационарный: 1 – блок подключения к сетевому напряжению с аппаратами коммутации и защиты; 2 – блок управления аппаратом СКАТ-70; 3 – высоковольтный блок аппарата СКАТ-70; 4 – блок формирования высоковольтных импульсов и задатчик частоты их следования; 5 – платформа для фиксации образцов; 6 – делитель напряжения для измерения высокого напряжения; 7 – киловольтметр СКВ; **б** – передвижной: 1 – регулятор сетевого напряжения; 2 – повысительный трансформатор; 3 – блок выпрямления переменного напряжения; 4 – блок формирования высоковольтных импульсов и задатчик частоты их следования; 5 – воздушный трехполюсный переключатель; 6 – арматура для крепления навесных электродов

Fig. 2. Experimental units for investigating the parameters and modes of electric-pulse treatment of unwanted vegetation (photos):
a – stationary unit: 1 – grid voltage connection unit with switching and protection devices, 2 –SKAT-70 control unit, 3 – SKAT-70 high-voltage unit, 4 – high-voltage pulse generation unit and pulse repetition rate controller, 5 – sample fixing platform, 6 – high-voltage divider, 7 – SKV kilovoltmeter; **b** –mobile unit: 1 – line voltage regulator, 2 – step-up transformer, 3 – AC-to-DC rectification unit, 4 – high-voltage pulse generation unit and pulse repetition rate controller, 5 – three-pole air switch, 6 – mounting hardware for attached electrodes

амплитудой 10…15 кВ, длительностью 20-60 мкс и частотой 1…5 Гц. Энергия одного импульса составляла 1,5…2,0 Дж.

Для обеспечения безопасного проведения лабораторных и полевых исследований разработаны и утверждены мероприятия по электробезопасности.

Результаты и их обсуждение

В основе технологии электроимпульсного необратимого повреждения клеточных структур реализуется явление электропорации биологических клеток, подразумевающее протекание повреждающего импульса тока высокого напряжения. Для теоретического описания необратимого повреждения внутриклеточных компонентов ткани сорняков в качестве аргумента логистической функции целесообразно использовать удельную энергию, поглощенную этой тканью, поскольку именно она определяет суммарный эффект от воздействия электрического поля во времени. Доля необратимо поврежденных клеток (степень повреждения), определяемая отношением сопротивления обрабатываемой ткани в процессе обработки к сопротивлению этой же ткани до обработки $S(W_{уд})$, о.е., и количественно равной значению от 1,0 и выше, может быть представлена выражением:

$$S(W_{уд}) = \frac{1}{1 + e^{-K_W \cdot (W_{уд} - W_{уд.пор})}}, \quad (1)$$

где $S(W_{уд})$ – степень повреждения растительной ткани, о.е.; $W_{уд}$ – удельная энергия, подведенная (или поглощенная) к единице объема растительной ткани, Дж/см^3; $W_{уд.пор}$ – пороговое значение удельной электрической энергии или полулетальная удельная энергия, при которой необратимо повреждается 50% внутриклеточных компонентов и до достижения которой ткань может гарантированно восстановиться, Дж/см^3; K_W – коэффициент крутизны сигмоидальной зависимости (S-образной кривой), характеризующий степень гетерогенности ткани по чувствительности к энергии обработки или чувствительности растительной ткани к электрическому воздействию, см^3/Дж.

При поглощении растительной тканью удельной электрической энергии в количестве $W_{уд} \geq W_{уд.пор}$ в ее внутренних структурах начинаются процессы

необратимой электропорации. При этом количество необратимо поврежденных внутриклеточных компонентов резко увеличивается, и растение гибнет. Если повреждающий ток протекает через корневую часть растения, то необратимо повреждается и она, что позволяет однозначно зафиксировать гибель сорняка.

Применимость электрических импульсов высокого напряжения микросекундной длительности для необратимого повреждения внутриклеточных компонентов растительной ткани сорных трав подтверждена результатами многолетних исследований.

Многолетними лабораторными исследованиями выявлены значения удельных затрат электрической энергии, способной необратимо повреждать ткани надземной и корневой систем сорных трав в разные периоды их физиологического развития: от фаз бутонизации и цветения до фаз плодоношения и созревания [17]:

молочай лозный (*Euphorbia waldsteinii L.*) – 4,9…24,7 и 5,1…15,2 Дж/см^3;

щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus L.*) – 3,4…8,2 и 3,9…7,8 Дж/см^3;

осот розовый (*Cirsium arvense L.*) – 2,4…8,1 и 2,9…14,3 Дж/см^3;

осот полевой (*Sonchus arvensis L.*) – 3,3…15,2 и 4,1…16,4 Дж/см^3;

молокан татарский (*Lactuca tatarica L.*) – 3,8…6,8 и 2,6…8,7 Дж/см^3.

Степень повреждения растительной ткани возрастает с повышением напряженности электрического поля в ней и достигает предельного значения при 3,5…3,85 кВ/см. Поэтому для надежного повреждения перечисленных сорняков необходимо в корневой системе создать напряженность не менее 3,85 кВ/см, а для надземной (листостебельной) части – 3,68 кВ/см [17, 19]. Отметим, что значения удельной энергии и напряженности электрического поля у изученных растений различаются в разные годы исследований и в зависимости от периода их физиологического развития, состава и плодородия почвенных участков.

Экспериментально установлены следующие закономерности: сопротивление корневых систем больше сопротивления надземной части (стебля); сопротивление растительных тканей сорняков увеличивается по мере их развития и роста; электрическое сопротивление покровных тканей больше сопротивления внутренних тканей. Так, удельное сопротивление растительной ткани стебля и корневой системы различных сорняков для фазы развития «Стеблевание» составило 3,59…11,02 и 8,21…15,66 Ом·м соответственно, а для фазы «Начало плодоношения» – 5,20…11,82 и 9,40…31,24 Ом·м соответственно [18]. Сопротивление тканей эпидермиса у исследуемых сорных растений больше в 1,1…1,4 раза, чем сопротивление внутренних тканей стебля, а у тканей экзодермиса (корневой системы) – в 1,2…1,6 раза соответственно. Значения сопротивлений изученных сорных трав перемежаются между собой, не позволяя подразделить сорняки по биологическим видам: на многолетние, трудноискоренимые и однолетние, легко повреждающиеся электрическими разрядами [18].

Несмотря на необратимое повреждение растительной ткани, электроимпульсная обработка сохраняет полезную почвенную фауну и местообитание полезных микробов, например: 1) увеличивается количество азотфиксирующих бактерий, влияющих на превращение устойчивых форм органического вещества почвы, и накопление аммонийного азота; 2) увеличивается содержание нитратов в почве; 3) численность насекомых-герпетобионтов (жужелицы – *Calosoma furopunctatum*, *Poecilus puncticollis, Pseudoophonus rufipes*; долгоносики – *Ptochus porcellus, Lixus sp.*; чернотелки – *Opatrum sabulosum, Cripticus quisquilius* и др.) на опытных участках восстанавливается до уровня контроля спустя двое суток; 4) оказывается стимулирующее влияние на ризосферные микроорганизмы; 5) восстанавливается обилие микроорганизмов до уровня контроля, стабилизируется микрофлора[7].

Для обоснования конструкции мобильного малогабаритного электротехнологического устройства для борьбы с сорняками в садах, питомниках и виноградниках рассмотрим технологию обработки.

Обработка засоренных почвенных участков организуется за счет непосредственного контакта электродной системы с растениями. Наиболее эффективным является вариант обработки, при котором повреждающий ток протекает только по корневой системе растений. Такая обработка невозможна без использования хотя бы одного заглубленного в почву электрода, так как элементы корневой системы должны подвергаться продольному воздействию тока. Однако перемещение заглубленного в почву электрода создаст дополнительное тяговое сопротивление, и с точки зрения снижения общих затрат энергии на обработку засоренного массива электродную систему следует изготовить в виде навесных, разнопотенциальных электродов или комбинированно (из электродов,

[7] Юдаев И.В., Бренина Т.П., Прокофьев П.В. Влияние процесса электроимпульсной прополки на почвенную микрофлору и микроорганизмы // Экологические и экономические составляющие устойчивого развития региона: Материалы круглого стола, г. Волгоград, 27 марта 2008 г. Волгоград: Волгоградский государственный университет, 2008. С. 181-186. EDN: NQFFAE

расположенных над поверхностью, и одного или двух электродов, заглубленных в почву). В этих случаях организуется один из вариантов цепи протекания тока обработки: 1) «Навесной электрод – надземная часть растения – корневая система этого же растения – почва – корневая система другого растения – надземная часть другого растения – второй навесной электрод»; 2) «Навесной электрод – надземная часть растения – корневая система растения – почва – заглубленный электрод» [17, 20].

Отметим, что электроимпульсную прополку наиболее эффективно проводить в периоды ведения полевых работ при влажности почвы 20…25%, отличающейся минимальным значением удельного электрического сопротивления. При этом электрический контакт со стеблями сорняков следует осуществлять на минимальной высоте над землей, не допуская электрического пробоя на почву или контакта с ней (например, организуя обработку с высотой подвеса навесных электродов на уровне 3…5 см) [18].

Полевые исследования двух вариантов обработки показали закономерность: электрическое сопротивление цепей протекания тока линейно возрастает с увеличением расстояния между обрабатываемыми растениями и с увеличением высоты подвеса электродной системы и уменьшается по степенной зависимости с повышением влажности почвы.

В соответствии с исследованиями [17, 20] предельные затраты при импульсном воздействии электрической энергии, приводящем к гибели сорного растения, должны достигать следующих значений:

осот розовый (*Cirsium arvense L.*) – 125 Дж ($3{,}47 \cdot 10^{-5}$ кВт·ч);

осот полевой (*Sonchus arvensis L.*) – 190 Дж ($5{,}27 \cdot 10^{-5}$ кВт·ч);

молочай лозный (*Euphorbia waldsteinii L.*) – 740 Дж ($20{,}6 \cdot 10^{-5}$ кВт·ч);

молокан татарский (*Lactuca tatarica L.*) – 105 Дж ($2{,}92 \cdot 10^{-5}$ кВт·ч);

вьюнок полевой (*Convolvulus arvensis L.*) – 215 Дж ($5{,}97 \cdot 10^{-5}$ кВт·ч);

щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus L.*) – 110 Дж ($3{,}06 \cdot 10^{-5}$ кВт·ч);

дурнишник обыкновенный (*Xanthium strumarium L.*) – 215 Дж ($5{,}97 \cdot 10^{-5}$ кВт·ч);

конопля сорнополевая (*Cannabis ruderalis L.*) – 140 Дж ($3{,}89 \cdot 10^{-5}$ кВт·ч);

марь городская (*Oxybasis urbica L.*) и марь белая (*Chenopodium album L.*) – 125 и 140 Дж ($3{,}47 \cdot 10^{-5}$ кВт·ч).

Электроимпульсная прополка почвенных участков в садах, виноградниках и плантациях должна проводиться в условиях малой ширины междурядий, выборочности воздействия, высоких экологических стандартов и запроса на автономность. Основываясь на экспериментально выявленных параметрах режима электроимпульсного высоковольтного уничтожения сорных трав, а также на результатах анализа конструктивных особенностей технического решения для мобильной установки, навешиваемой на колесный, промышленно выпускаемый трактор [20], и с учетом результатов исследований других ученых [21, 22] в первом приближении предложена компоновка малогабаритной, высокоманевренной электротехнологической установки для электроимпульсной прополки почвенных площадей (рис. 3) в виноградниках, садах и плантациях.

Предлагаемая электротехнологическая установка спроектирована на основе серийного мотоблока, способного маневрировать в узких междурядьях, на ограниченных почвенных площадях и склонах. Установка может оснащаться системой экспресс-контроля состояния обрабатываемой растительной ткани с обратной связью для оценки степени ее повреждения. Энергопотребление обеспечивается за счет



а б

Рис. 3. 3D-визуализация электротехнологической малогабаритной установки с электродной системой в виде стержней (а) и гибких пластин (б)

Fig. 3. 3D visualization of a compact electrotechnological unit featuring a rod-type electrode system (a) and flexible plate-type electrode system (b)

применения автономного генератора соответствующей мощности или аккумуляторов с возможностью длительного цикла работы без подзарядки. Несущая конструкция установки изготавливается как ремонтопригодная, адаптированная к отечественной компонентной и элементной базе. Электробезопасность установки обеспечивается надежной двойной изоляцией токопроводящих частей, постоянным контролем состояния изоляции, автоматическим отключением при разрыве цепи и защитой оператора от высоковольтного контакта, наличием световой сигнализации-оповещения и источника звуковых сигналов [23].

В прицепном устройстве установки прочно зафиксированы электротехнические компоненты: источник электрической энергии (фотоэлектрические модули и аккумуляторные батареи с системой управления их заряда и контроля его уровня); модуль повышения напряжения до технологически обоснованного уровня; модуль формирования высоковольтных импульсов и управления частотой их следования. Последние модули размещаются под крышкой прицепа либо в специальных диэлектрических коробах, либо с дополнительными разделительными диэлектрическими экранами между ними. На верхней части крышки размещаются проблесковый маячок и система звуковой сигнализации для предупреждения окружающих о том, что проводится электрообработка почвенного участка.

Электродная система представляет собой как отдельные навесные электроды, так и их комбинацию (навесные электроды и электрод, заглубляемый в почву). Применение конкретного компонентного состава электродной системы определяется степенью засоренности участка конкретными видами сорных растений. Заглубляемый электрод, изготовленный в виде диска с заостренными кромками или в виде черенкового ножа из нержавеющей стали, рекомендуется применять на почвенных участках с корнеотпрысковыми сорняками. Навесная система (рис. 4б) представляет собой несколько секций из отдельных цилиндрических электродов из нержавеющей стали с режущими кромками-проточками по их активной длине (рис. 3а и 4а) или в виде гибких нержавеющих пластин (рис. 3б). В первом случае навесные электроды применяются при обработке прямостоящих растений и растений с огрубевшей поверхностной тканью стебля для снижения переходного электрического сопротивления в месте контакта. Во втором случае электроды навесной системы, скользя по поверхности почвы, организуют замкнутую электрическую цепь между отдельными секциями и заглубленным в почву электродом, в которую оказываются включенными все низкорослые и стелющиеся виды сорных и нежелательных трав.

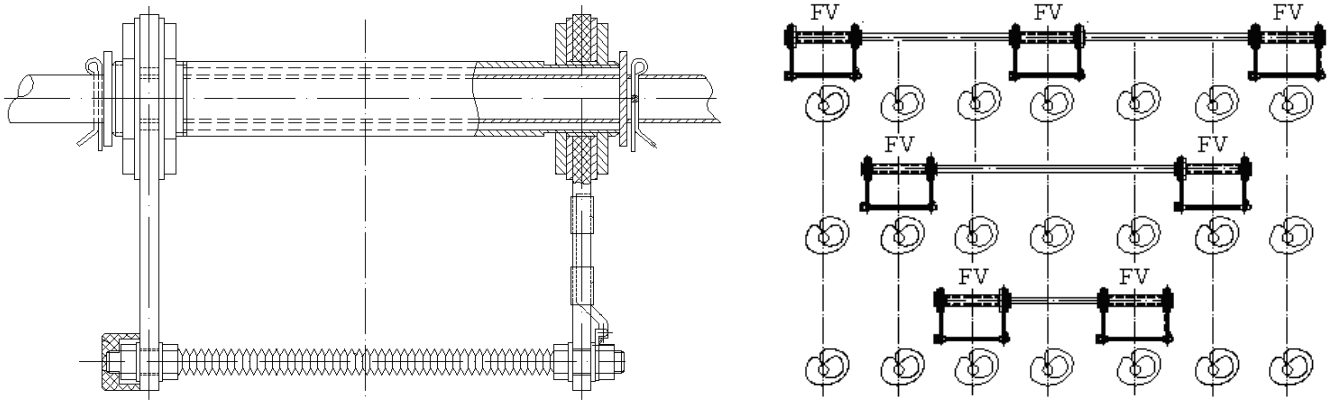
Для необратимого повреждения внутриклеточных компонентов растительной ткани сорняков со средней засоренностью почвенного массива 3…6 шт/м^2 к электродной системе шириной захвата 0,92 и 1,62 м должно подводиться соответствующее количество энергии:

осот розовый (*Cirsium arvense L.*) – 0,291 и 0,441 Вт·ч;

осот полевой (*Sonchus arvensis L.*) – 0,204 и 0,293 Вт·ч;

молочай лозный (*Euphorbia waldsteinii L.*) – 1,172 и 1,565 Вт·ч;

молокан татарский (*Lactuca tatarica L.*) – 0,214 и 0,329 Вт·ч;



а б

Рис. 4. Конструкция электродов:
а – нержавеющие стержни с острийными проточками по активной длине электрода;
б – размещение секционных электродов (FV) в электродной системе (эскиз)

Fig. 4. Electrode design:
a – stainless steel rods with pointed grooves along the active length of the electrode;
b – arrangement of sectional electrodes (FV) within the electrode system (sketch)

вьюнок полевой (*Convolvulus arvensis L.*) – 0,522 и 0,844 Вт·ч;

щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus L.*) – 0,092 и 0,131 Вт·ч;

дурнишник обыкновенный (*Xanthium strumarium L.*) – 0,247 и 0,364 Вт·ч;

конопля сорнополевая (*Cannabis ruderalis L.*) – 0,196 и 0,309 Вт·ч;

марь городская (*Oxybasis urbica L.*) и марь белая (*Chenopodium album L.*) – 0,097…0,153 и 0,128…0,184 Вт·ч [22].

Основные параметры электротехнологической установки по прополке засоренных почвенных массивов. Согласно экспериментальным данным для необратимого повреждения внутриклеточных структур обрабатываемых сорных растений напряжение на электродах $U_{ЭС}$ мобильной электротехнологической установки составляет не менее 10…15 кВ.

Напряжение на выходном блоке установки $U_{РК}$ (в исследуемом варианте – на разрядном контуре генератора) должно превышать напряжение на электродах $U_{ЭС}$ на величину падения напряжения $\Delta U_{РК\text{-}Э}$ в цепи «Разрядная емкость – система электродов»:

$$U_{РК} \geq U_{ЭС} + \Delta U_{РК–Э}$$
$$\text{или } U_{РК} = K_U(U_{ЭС} + \Delta U_{РК–Э}), \quad (2)$$

где K_U – коэффициент, учитывающий неполноту разрядки выходной емкости.

К каждому сорному растению необходимо подвести количество энергии, достаточное для надежного повреждения внутриклеточных компонентов его растительной ткани. Это количество электрической энергии, можно определить, например, произведением удельной повреждающей энергии $W_{уд}$ на единицу объема $V_{рт}$ растительной ткани и на число N одновременно обрабатываемых сорных трав. Кроме того, необходимо учесть суммарные потери электрической энергии в переходных контактах цепи обработки и в почве ΔW:

$$W = (W_{уд} \cdot V_{рт} + \Delta W) \cdot N. \quad (3)$$

Электрическая энергия разрядного контура $W_К$ должна превышать энергию W, подводимую к разрядной цепи, на величину энергии $W_о$, остающейся в разрядном конденсаторе ввиду неполной разрядки последнего:

$$W_K = W + W_о = (W_{уд} \cdot V_{рт} + \Delta W) \cdot N + W_о. \quad (4)$$

Зная рабочее напряжение установки, можно оценить значение разрядного конденсатора выходного контура $C_К$:

$$C_К = \frac{2 \cdot \left[(W_{уд} \cdot V_{рт} + \Delta W) \cdot N + W_о \right]}{K_U^2 \cdot (U_{ЭС} + \Delta U_{РК–Э})^2}. \quad (5)$$

Для выполнения требований по технике электробезопасности [22] на рукоятках рулевой колонки мотоблока планируется разместить коммутационные аппараты с ручным управлением. В поле зрения оператора необходимо расположить сенсорную панель контроля за процессом обработки, на которую должна выводиться цифровая индикация, показывающая заряд аккумуляторных батарей, наличие напряжения питания блоков (повышающего напряжение до технологически обоснованного значения и формирующего импульсы), значение тока утечки и другую информацию. Под сидением водителя-оператора необходимо смонтировать кнопочную станцию с замыкающим контактом, не позволяющим начать обработку, если оператор-водитель не займет свое место. Дополнительной рекомендацией для оператора является использование диэлектрических бот и перчаток во время проведения полевых работ.

Таким образом, агробиоэлектротехнология обеспечивает селективное уничтожение сорных трав, воздействуя на сорняки строго дозированными микросекундными импульсами и необратимо повреждая внутриклеточную структуру их тканей. При непроизвольном касании электрода с покровными тканями деревьев, кустарников и виноградных лоз последние не повреждаются благодаря подпружиненной конструкции крепления электродной системы.

Выводы

1. Разрабатываемая агробиоэлектротехнологическая операция позволяет эффективно, с минимальным негативным антропогенным влиянием и высокой технологической эффективностью бороться с сорными и нежелательными растениями на почвенных площадях виноградников, плантаций и садов. Для необратимого повреждения внутриклеточных компонентов тканей однолетних и многолетних сорняков должна затрачиваться энергия 110…215 и 125…740 Дж/растение соответственно. При этом амплитуда импульса должна достигать 10…15 кВ, длительность импульса – 20…60 мкс, частота следования импульсов – 1…5 Гц, минимальная энергия воздействующего импульса – 1,5…2,0 Дж.

2. Необходимо продолжить испытания и поиск схемного решения электрической части установки. В целях повышения агротехнологической эффективности следует модернизировать представленную конструкцию для ее согласованной работы с минитрактором.

3. Результаты исследований послужат основой для конструкторского проекта и опытного (пилотного) варианта установки.

Список источников

1. Колбасин А.В., Баранов А.Г., Баранова Е.В., Батракова О.А. Состояние и тенденции развития виноградарства в Российской Федерации // Финансовая экономика. 2024. № 12. С. 309-315. EDN: TVRCJJ

2. Закшевский В.Г., Аскеров П.Ф., Павлов А.Ю. и др. Состояние и приоритетные направления развития садоводства России // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2024. № 9. С. 131-139. https://doi.org/10.33938/249-131

3. Beckie H.J., Flower K.C., Ashworth M.B. Farming without Glyphosate? Plants. 2020;9(1):96. https://doi.org/10.3390/plants9010096

4. Coleman G.R.Y., Stead A., Rigter M.P. et al. Using energy requirements to compare the suitability of alternative methods for broadcast and site-specific weed control – CORRIGENDUM. Weed Technology. 2020;34(1):153-154. https://doi.org/10.1017/wet.2019.131

5. Bloomer D.J., Harrington K.C., Ghanizadeh H., James T.K. Pots to plots: Microshock weed control is an effective and energy efficient option in the field. Sustainability. 2024;16(11):4324. https://doi.org/10.3390/su161143246.

6. Wilson R.G., Anderson F.N. Control of three weed species in Sugarbeets (Beta Vulgaris) with an electrical discharge system. Weed Science. 1981;29(1):93-98. https://doi.org/10.1017/S004317450002590X

7. Diprose M.F., Benson F.A. Electrical methods of killing plants. Journal of Agricultural Engineering Research. 1984;30:197-209. https://doi.org/10.1016/S0021-8634(84)80021-9

8. Slaven M.J., Koch M., Borger C.P.D. Exploring the potential of electric weed control: A review. Weed Science. 2023;71(5):403-421 https://doi.org/10.1017/wsc.2023.38

9. Rask A.M., Kristoffersen P. A review of non-chemical weed control on hard surfaces. Weed Research. 2007;47(5):370-380. https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2007.00579.x

10. Lehnhoff E.A., Neher P., Indacochea A., Beck L. Electricity as an effective weed control tool in non-crop areas. Weed Research. 2022;62(2):149-159. https://doi.org/10.1111/wre.12523

11. Клочков А.В. Механические и физические методы борьбы с сорняками // Наше сельское хозяйство. 2020. № 15. С. 80-87. EDN: YPXXRG

12. Юдаев И.В. Технологически эффективная и экологически безопасная борьба с сорными растениями // Сельский механизатор. 2020. № 8. С. 2-3. EDN: VDWPEN

13. Borger C.P.D., Slaven M.J. Electric weed control-how does it compare to conventional weed control methods? Weed Science. 2025;73(1):e46. https://doi.org/10.1017/wsc.2025.18

14. Slaven M.J., Borge C.P. Electric weed control for the management of annual ryegrass and herbicide resistance, 23rd Australasian Weeds Conference – Breaking the Cycle: Towards Sustainable Weed Mangement, Brisbane. 2024. Pp. 141-145. https://library.dpird.wa.gov.au/conf_papers/300

15. Baccin L.C., Moretti M.L. Electrical weed control in organic highbush blueberry: influence of operational speed and number of applications on weed control. Frontiers in Agronomy. 2025;7:1688961. https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1688961

16. Baev V.I., Yudaev I.V. Efficiency estimation of type of the electrical exposure on plants at their processing. Ad Alta. 2018;8(1):252-257. EDN: ZCVUOL

17. Judaev I.V., Brenina T.P. The definition of electro impulses used in weed control. Journal of agricultural sciences, Belgrade. 2008;53(1):37-44. https://doi.org/10.2298/JAS0801037J

18. Юдаев И.В., Даус Ю.Д. Электропроводные свойства сорных растений – объектов высоковольтного импульсного воздействия // Электронная обработка материалов. 2020. Т. 56, № 2. С. 41-48. EDN: LVYYYI https://doi.org/10.5281/zenodo.3747843

References

1. Kolbasin A.V., Baranov A.G., Baranova E.V., Batrakova O.A. State and trends of vitigrowing development in the Russian Federation. *Finansovaya ekonomika*. 2024;12:309-315. (In Russ.)

2. Zakshevsky V.G., Askerov P.F., Pavlov A.Yu. et al. Status and priority areas of development gardening in Russia. *Economics, Labor, Management in Agriculture*. 2024;9(115):131-139. (In Russ.)

3. Beckie H.J., Flower K.C., Ashworth M.B. Farming without Glyphosate? *Plants*. 2020;9(1):96. https://doi.org/10.3390/plants9010096

4. Coleman G.R.Y., Stead A., Rigter M.P. et al. Using energy requirements to compare the suitability of alternative methods for broadcast and site-specific weed control – CORRIGENDUM. *Weed Technology*. 2020;34(1):153-154. https://doi.org/10.1017/wet.2019.131

5. Bloomer D.J., Harrington K.C., Ghanizadeh H., James T.K. Pots to plots: Microshock weed control is an effective and energy efficient option in the field. *Sustainability*. 2024;16(11):4324. https://doi.org/10.3390/su16114324

6. Wilson R.G., Anderson F.N. Control of three weed species in Sugarbeets (Beta Vulgaris) with an electrical discharge system. *Weed Science*. 1981;29(1):93-98. https://doi.org/10.1017/S004317450002590X

7. Diprose M.F., Benson F.A. Electrical methods of killing plants. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1984;30:197-209. https://doi.org/10.1016/S0021-8634(84)80021-9

8. Slaven M.J., Koch M., Borger C.P.D. Exploring the potential of electric weed control: A review. *Weed Science*. 2023;71(5):403-421 https://doi.org/10.1017/wsc.2023.38

9. Rask A.M., Kristoffersen P. A review of non-chemical weed control on hard surfaces. *Weed Research*. 2007;47(5):370-380. https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2007.00579.x

10. Lehnhoff E.A., Neher P., Indacochea A., Beck L. Electricity as an effective weed control tool in non-crop areas. *Weed Research*. 2022;62(2):149-159. https://doi.org/10.1111/wre.12523

11. Klochkov A.V. Mechanical and physical methods of weed control. *Nash selskoe khozyaystvo*. 2020;15:80-87. (In Russ.)

12. Yudaev I.V. Technologically effective and environmentally safe weed control. *Selskiy mekhanizator*. 2020;8:2-3. (In Russ.)

13. Borger C.P.D., Slaven M.J. Electric weed control–how does it compare to conventional weed control methods? *Weed Science*. 2025;73(1):e46. https://doi.org/10.1017/wsc.2025.18

14. Slaven M.J., Borge C.P. Electric weed control for the management of annual ryegrass and herbicide resistance, *23rd Australasian Weeds Conference – Breaking the Cycle*: *Towards Sustainable Weed Mangement, Brisbane*. 2024. Pp.141-145. https://library.dpird.wa.gov.au/conf_papers/300

15. Baccin L.C., Moretti M.L. Electrical weed control in organic highbush blueberry: influence of operational speed and number of applications on weed control. *Frontiers in Agronomy*. 2025;7:1688961. https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1688961

16. Baev V.I., Yudaev I.V. Efficiency estimation of type of the electrical exposure on plants at their processing. *Ad Alta*. 2018;8(1):252-257. EDN: ZCVUOL

17. Judaev I.V., Brenina T.P. The definition of electro impulses used in weed control. *Journal of Agricultural Sciences, Belgrade*. 2008;53(1):37-44. https://doi.org/10.2298/JAS0801037J

18. Yudaev I.V., Daus Yu.D. Electrical conductive properties of weeds subjected to high-voltage pulse treatment. *Electronic processing of materials*. 2020;56(2):41-48. (In Russ.)

19. Yudaev I.V., Daus Yu.V., Panchenko V.A., Bolshev V.E. Influence of factors determining weeds' plant tissue reaction to the electric pulse damage impact. *Agriculture*. 2023;13(5):1099. https://doi.org/10.3390/agriculture13051099

19. Yudaev I.V., Daus Yu.V., Panchenko V.A., Bolshev V.E. Influence of factors determining weeds' plant tissuereaction to the electric pulse damage impact. Agriculture. 2023;13(5):1099. https://doi.org/10.3390/agriculture13051099

20. Yudaev I.V., Daus Yu.V., Sharov I.V. Electropulse weed control as an element of organic farming in sustainable agriculture. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2025;61(6):925-936. https://doi.org/10.3103/S1068375525701005

21. Ляпин В.Г., Загинайлов В.И., Андреев С.А. Моделирование электрофизических свойств растительных объектов при электротехнологическом воздействии // Вестник АПК Верхневолжья. 2025. № 4(72). С. 147-159. https://doi.org/10.35694/YARCX.2025.72.4.022

22. Ляпин В.Г., Лобачевский Я.П., Загинайлов В.И., Селезнева Д.М. Концепция развития мобильных электротехнологических установок в защите растений от сорняков // Российская сельскохозяйственная наука. 2025. № 6. С. 28-39. https://doi.org/10.7868/S3034582025060066

23. Yudaev I., Daus Y., Prokofiev P., Baev I., Panchenko V. On the issue on automation of the security system of mobile electrotechnological installations. *Intelligent Computing and Optimization. ICO 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2024;874:195-202. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50887-5_20

20. Yudaev I.V., Daus Yu.V., Sharov I.V. Electropulse weed control as an element of organic farming in sustainable agriculture. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2025;61(6):925-936. https://doi.org/10.3103/S1068375525701005

21. Lyapin V.G., Zaginaylov V.I., Andreev S.A. Modeling the electrophysical properties of plant objects under electrotechnological impact. *Vestnik APK Verkhnevolzhya*. 2025;4:147-159. (In Russ.) https://doi.org/10.35694/YARCX.2025.72.4.022

22. Lyapin V.G., Lobachevsky Ya.P., Zaginailov V.I., Selezneva D.M. Concept of development of mobile electrotechnological installations in plant protection from weeds. *Russian Agricultural Science*. 2025;6:28-39. (In Russ.) https://doi.org/10.7868/S3034582025060066

23. Yudaev I., Daus Y., Prokofiev P., Baev I., Panchenko V. On the issue on automation of the security system of mobile electrotechnological installations. *Intelligent Computing and Optimization. ICO 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2024;874:195-202. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50887-5_20

Информация об авторах

[1] **Юдаев Игорь Викторович,** д-р техн. наук, профессор; etsh1965@mail.ru; etsh1965@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-3435-4873; SPIN-код: 6836-5529
[2] **Даус Юлия Владимировна,** д-р техн. наук, доцент; zirochka3011@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-9120-7637; SPIN-код: 6048-0509
[3] **Шаров Иван Васильевич,** магистрант-соискатель; ivanshar98@gmail.com; SPIN-код: 5430-2439
[4] **Рожков Евгений Александрович,** канд. техн. наук, доцент; zhenyacool31@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0003-8607-0252; SPIN-код: 5789-8341
[5] **Рудь Евгений Евгеньевич,** аспирант; eugene.rud@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0000-9779-5564; SPIN-код: 3270-4101
[1, 2, 3, 4, 5] Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина; 350044, Российская Федерация, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Калинина, 13

Author Information

Igor V. Yudaev[1], DSc (Eng), Professor, etsh1965@mail.ru; etsh1965@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-3435-4873
Yulia V. Daus[2], DSc (Eng), Associate Professor; zirochka3011@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-9120-7637
Ivan V. Sharov[3], Master student; ivanshar98@gmail.com;
Evgeniy A. Rozhkov[4], CSc (Eng), Associate Professor; zhenyacool31@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0003-8607-0252
Evgeniy E. Rud[5], postgraduate student; eugene.rud@yandex.ru; https://orcid.org/0009-0000-9779-5564
[1, 2, 3, 4, 5] Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin; 13, st. Kalinina, Krasnodar, 350044, Russian Federation

Вклад авторов

И.В. Юдаев – концептуализация;
Ю.В. Даус – методология;
И.В. Шаров – формальный анализ, создание черновика рукописи;
Е.А. Рожков – формальный анализ, визуализация;
Е.Е. Рудь – проведение исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Author Contribution

I.V. Yudaev – conceptualization;
Yu.V. Daus – methodology;
I.V. Sharov – data curation; validation; writing – original draft;
E.A. Rozhkov – formal analysis; validation; visualization;
E.E. Rud – investigation; data curation; formal analysis.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests regarding the publication.

Статья поступила 02.04.2026, после рецензирования и доработки 14.05.2026, принята к публикации 05.06.2026

Received 02.04.2026; Revised 14.05.2026; Accepted 05.06.2026

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 621.311
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-115-126

Качество электрической энергии в распределительных электрических сетях низкого напряжения Республики Камерун

***И.В. Наумов*[1]✉, *Н.Н.Б. Жосселин*[2], *И.В. Ямщикова*[3]**

[1, 2] Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского; г. Иркутск, Россия

[3] Иркутский национальный исследовательский технический университет; г. Иркутск, Россия

[1] professornaumov@list.ru✉; https://orcid.org/0000-0003-4767-0127

[2] dimitryntsama8@gmail.com

[3] yamsirina@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-6183-3255

Аннотация. Распределительные электрические сети низкого напряжения характеризуются несбалансированным электропотреблением, обусловленным несимметрично-несинусоидальными режимами работы, что приводит к ухудшению качества электрической энергии, росту дополнительных потерь активной мощности и электрической энергии (ЭЭ). Измерения и расчеты несбалансированных режимов осуществлены в распределительных электрических сетях низкого напряжения Республики Камерун города Дуала в связи с отсутствием в республике исследований несбалансированных режимов. В статье использованы методы теории электрических цепей, имитационного и численного анализа, а также технологии MATLAB и Excel. Произведена модернизация существующего специализированного балансирующего устройства (БУ) и предложено новое техническое средство балансирования, имитационная модель которого исследована в программном комплексе MATLAB/Simulink. Основой предлагаемого устройства является микроконтроллер, управляющий потоками симметричных составляющих основной частоты напряжения электропитания и дополнительными потоками, обусловленными гармоническими искажениями. На основе измерений параметров электрической энергии в действующих электрических сетях низкого напряжения г. Дуала рассчитаны показатели небаланса при отсутствии разработанной модели БУ и при имитационном моделировании интеграции этого устройства в исследуемую электрическую сеть. Показано, что в этой сети показатель качества ЭЭ по дополнительной прямой последовательности от гармонических искажений превышает допустимое значение в 2,6 раза, а показатель, характеризующий дополнительные потери мощности, – почти в 3 раза. Установлено, что при имитационном подключении балансирующего устройства качество электрической энергии повышается более чем на 97%, а ее потери снижаются на 65%. Годовая экономия при имитационном внедрении БУ в исследуемой сети может достигать более $378852. Полученные результаты могут представлять интерес для руководства сетевой компании г. Дуала, а также научных работников, занимающихся исследованиями в области качества ЭЭ.

Ключевые слова: показатели небаланса; небаланс; несинусоидальность; электропотребление; качество электрической энергии; балансирующее устройство

Благодарности. Авторы выражают признательность руководству Центральных районных электрических сетей г. Дуала за предоставленные данные измерений параметров электрической энергии в действующих электрических сетях низкого напряжения.

Для цитирования: Наумов И.В., Жосселин Н.Н.Б., Ямщикова И.В. Качество электрической энергии в распределительных электрических сетях низкого напряжения Республики Камерун // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 115-126. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-115-126

© Наумов И.В., Жосселин Н.Н.Б., Ямщикова И.В., 2026

ORIGINAL ARTICLE

Power quality assessment and mitigation of unbalanced loads in low-voltage distribution grids: Case study of Douala, Cameroon

***I.V. Naumov*[1]✉, *N.N.B. Josselin*[2], *I.V. Yamshchikova*[3]**

[1,2] Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Yezhevsky; Irkutsk, Russia

[3] Irkutsk National Research Technical University; Irkutsk, Russia

[1] professornaumov@list.ru✉; https://orcid.org/0000-0003-4767-0127

[2] dimitryntsama8@gmail.com

[3] yamsirina@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-6183-3255

Abstract. Low-voltage distribution grids are highly susceptible to load unbalance caused by asymmetric and non-sinusoidal operating conditions. This unbalance degrades power quality and significantly increases active power and energy losses. To address the critical lack of empirical research on load unbalance in the region, the authors conducted field measurements and calculations in the operational low-voltage power distribution grids of Douala, Republic of Cameroon. This study employs electrical circuit theory, simulation, and numerical analysis, using MATLAB/Simulink and Excel spreadsheet-based modeling. A novel technical balancing device (BD) was developed by upgrading an existing design, and its performance was investigated using a MATLAB/Simulink simulation model. The proposed BD features a microcontroller-based control system that regulates the symmetrical components of the fundamental supply voltage and mitigates harmonic distortion. Based on power parameters measured in the operational low-voltage distribution grids of Douala, the authors evaluated load unbalance indicators for both the baseline scenario (without the proposed balancing device) and the simulated integration of this device into the grid. Baseline analysis revealed that the positive-sequence harmonic distortion exceeded permissible power quality limits by a factor of 2.6, while additional power losses were nearly threefold higher than standard levels. Conversely, the simulated integration of the proposed BD improved power quality indices by over 97% and reduced active power losses by 65%. Economic analysis indicates that implementing this control system could yield annual savings exceeding $378,852. The findings provide valuable practical insights for local utility operators in Douala and contribute to the broader research on power quality optimization in developing distribution networks

Keywords: load unbalance indicators; load unbalance; anharmonicity (harmonic distortion); power consumption; power quality; balancing device

Acknowledgments. The authors gratefully acknowledge the management of the Central District Electric Networks of Douala for providing the field measurement data on operational low-voltage distribution grids.

For citation: Naumov I.V., Josselin N.N.B., Yamshchikova I.V. Power quality assessment and mitigation of unbalanced loads in low-voltage distribution grids: Case study of Douala, Cameroon. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):115-126. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-115-126

Введение

Производство электрической энергии (ЭЭ) в мире растет в соответствии с ростом ее потребления. По данным 2024 г., лидерами по производству ЭЭ являются: Китай – 10161,50 ТВт·ч. (+7,15% к 2023 г.); США – 4392,55 ТВт·ч (+3,19%); Индия – 2051,78 ТВт·ч. (+3,49%).

В Республике Камерун производство ЭЭ на конец 2024 г. достигло 7,269 ТВт·ч (0,024% мирового производства ЭЭ), производство ЭЭ на душу населения составило 2,49 МВт/чел[1].

Производство ЭЭ в Республике осуществляется достаточно интенсивными темпами. Рынок электроэнергии вступает в фазу высоких темпов роста, обусловленных индустриализацией и электрификацией, что определяется наличием гибкой генерации и устойчивостью к климатическим рискам.

По уровню потребления ЭЭ[2] Республика занимает 126-е место в мире. На конец 2024 г. этот показатель составил 5,5291 ТВт·ч, что на 9,51% выше, чем в 2023 г. Основным потребителем ЭЭ в Республике является промышленность (60%). Домохозяйства

[1] Statbase. Навигатор данных. Производство электроэнергии. Камерун. [Электронный ресурс]. URL: https://statbase.org/data/cmr-electricity-generation/ (дата обращения: 19.05.2026).

[2] Statbase. Навигатор данных. Потребление электроэнергии. Камерун. [Электронный ресурс]. URL: https://statbase.ru/data/cmr-electricity-consumption/ (дата обращения: 20.05.2026).

потребляют до 20% произведенной ЭЭ, сфера услуг – 8%, сельское хозяйство – 1% (прочее – 11%). Домашние хозяйства и сельские населенные пункты нуждаются в повышении уровня электрификации [1].

Режимы нарушения качества ЭЭ, обусловленные несимметрично-несинусоидальным электропотреблением, происходят в низковольтных, многоамперных компонентах систем электроснабжения – в наиболее протяженном сегменте энергетических систем [2, 3]. Наряду с массовым подключением однофазных потребителей, распределенных случайным образом [4], использование фотоэлектрических панелей и зарядных станций для электромобилей усугубляет нарушения уровней напряжения и профили дисбаланса [5-7]. Несбалансированность конфигурации приводит к динамической и структурной нестабильности [8-10]: значительным падениям напряжения [11, 12], увеличению потерь активной мощности (ΔP) в элементах ЭС (линиях и силовых трансформаторах). При этом протекание токов нулевой последовательности вызывает чрезмерный нагрев нейтрального проводника, повышая риск возгораний [13, 14], в то время как токи обратной последовательности ускоряют преждевременное старение изоляции асинхронных двигателей [15].

Поиск публикаций по исследованию качества электрической энергии электрических сетей Камеруна не привел к результатам. Вместе с тем в статье J.G. Tamba [16] отмечается, что только 20% населения имеют доступ к национальной электрической сети. Помимо этого, в силу изношенности электрических сетей часто имеют место продолжительные аварийные отключения ЭЭ[3]. В работе M.M. Inoussah [17] определены средние значения энергетической эффективности для электростанций, работающих на сжиженном мазуте, мазуте, биотопливе и газе. Средние показатели устойчивости варьируются от 1,56 для электростанций, работающих на сжиженном мазуте, до 2,12 для электростанций, работающих на биотопливе. В статье Pendieu Kwaye [18] оценивается потенциал возобновляемых источников ЭЭ Республики. Утверждается, что при средней солнечной радиации по стране 4,9 кВт·ч/м^2/день и средней скорости ветра 6 м/с использование солнечной и ветровой энергии будет способствовать развитию Камеруна и всего Центральноафриканского региона. В статье Konchou [19] отмечается, что замена устаревших и неэффективных устройств электропотребления на современные эффективные устройства может повысить устойчивость жилищного сектора. Аналогично в работе Talla [20] установлено, что энергоэффективность жилого сектора Камеруна выше, чем в Саудовской Аравии и Норвегии, но ниже, чем в Малайзии и Турции. При этом полученные в ходе исследований значения энергетической и эксергетической эффективности (58,74 и 22,63% соответственно) могут быть использованы в качестве основы для расчета анализа затрат при реализации новых возобновляемых источников для производства в Камеруне. В исследовании Ngousssandou [21] экспериментально определен уровень искажений, вызванный гармоническими искажениями, и в результате установлено, что стоимость электроэнергии может быть снижена с $0,097/кВт·ч до $0,085 /кВт·ч, при этом общий экономический эффект достигает $0,54 млн. В работе Onanena [22] предлагается использовать метод «loop-back» (обратной связи) для учета узлов с большими падениями напряжения и сетевых ограничений, улучшения плана напряжения в сети, разгрузке трансформаторов, снижения потерь мощности и оптимизации теплового режима.

Анализируя источники литературы, можно сделать вывод об актуальности минимизации последствий несимметрично-несинусоидального электропотребления и малой изученности этой проблемы в электрических сетях Камеруна.

Цель исследований: анализ качества ЭЭ в действующих электрических сетях Республики Камерун.

Материалы и методы

Исследования качества электроэнергии осуществлялись в марте 2025 г. на шинах четырех силовых трансформаторов 0,4 кВ, питающих различные потребители. Электрическая распределительная сеть Дуалы питается от опорной подстанции LOGBABA (90/30/10 кВ, 2×36 МВА + 2×20 МВА), управляемой концессионной компанией ENEO Cameroun. Четыре исследуемые зоны получают питание от четырех отдельных фидеров СН: 10 кВ этой подстанции.

На основе существующей модели специализированного балансирующего устройства (БУ) предложено новое техническое средство, имитационная модель которого разработана в программном комплексе MATLAB Simulink. Основой предлагаемого устройства является современный микроконтроллер, управляющий потоками симметричных составляющих основной частоты напряжения электропитания и дополнительными потоками, обусловленными гармоническими искажениями. На основе реальных измерений параметров электрической энергии

[3] Больше половины Камеруна осталось без электроэнергии. [Электронный ресурс]. URL: https://dzen.ru/a/ZxTopXI3kiEDnauP (дата обращения: 20.05.2026).

в действующих электрических сетях низкого напряжения г. Дуала в Камеруне произведен расчет показателей небаланса при отсутствии разработанной модели балансирующего устройства и при имитационном моделировании интеграции этого устройства в исследуемую электрическую сеть.

Результаты и их обсуждение

Несбалансированные режимы работы электрических сетей обусловлены несимметрично-несинусоидальным электропотреблением. Стандартами разных стран, регламентирующими нормы качества ЭЭ, устанавливаются значения показателей, характеризующих несимметрию и несинусоидальность трехфазной системы напряжения[4-5]. Вместе с тем современные электроприемники в процессе электропотребления обусловливают возникновение несбалансированных режимов, объединяющих показатели качества действующего значения фундаментальной частоты напряжения электропитания (50…60 Гц), и показатели, характеризуемые воздействием напряжений гармонических компонентов, кратных основной частоте. Характеристика несбалансированных режимов представлена в работах [23-25], в соответствии с которыми определены следующие показатели небаланса [25]:

– коэффициенты небаланса напряжения по прямой, обратной и нулевой последовательностям:

$$K_{1UNB}=\frac{\left(\sum_4^{13}U_{APS}\right)}{U_1}\cdot 100\%;\ K_{2UNB}=\frac{\left(U_2+\sum_2^{11}U_{ANS}\right)}{U_1}\cdot 100\%;$$

$$K_{0UNB}=\frac{\left(U_0+\sum_3^{15}U_{AZS}\right)}{U_1}\cdot 100\%; \quad (1)$$

– суммарный коэффициент небаланса напряжения:

$$K_{UNB}=\frac{\sqrt{\left\{(U_2)^2+(U_0)^2\right\}+\sum_4^{40}(U_{APS})^2+\sum_2^{38}(U_{ANS})^2+\sum_3^{39}(U_{AZS})^2}}{U_1}\times$$

$$\times 100\%; \quad (2)$$

– коэффициент потерь мощности:

$$K_{P(HPP)}=1+(K_{APS})^2+K_{2i}^2+(K_{ANS})^2+\left\{K_{0i}^2+(K_{AZS})^2\right\}\cdot K_R. \quad (3)$$

В выражениях (1-3): $K_{2i}=\frac{I_2}{I_1}$, $K_{0i}=\frac{I_0}{I_1}$ – коэффициенты, обусловленные протеканием токов обратной и нулевой последовательностей основной частоты, определяемых либо по показаниям средств измерения, либо расчетным путем в соответствии с данными монографии Ф.Д. Косоухова[6]: $K_R = r_0 / r_1$ – коэффициент активного сопротивления ЛЭП; $r_1 = r_Ф$ – активное сопротивление прямой последовательности, равное фазному сопротивлению линии электропередачи; $r_0 = r_Ф + 3r_N$ – активное сопротивление нулевой последовательности; r_N – активное сопротивление нейтрального проводника; $K_{APS} = K_{I(4)} + K_{I(7)} + K_{I(13)}$ – суммарный коэффициент дополнительных гармоник напряжения электропитания по прямой последовательности[7]; $K_{ANS} = K_{I(2)} + K_{I(5)} + K_{I(11)}$ – суммарный коэффициент дополнительных гармоник напряжения электропитания по обратной последовательности[8]; $K_{AZS} = K_{I(3)} + K_{I(9)} + K_{I(15)}$ – суммарный коэффициент дополнительных гармоник напряжения электропитания по нулевой последовательности[9,10].

Многолетние исследования несимметрично-несинусоидальных режимов позволили установить, что наиболее эффективным средством повышения качества и снижения потерь мощности и энергии является использование специализированных, симметрирующих, фильтрокомпенсирующих и балансирующих устройств [25]. Для минимизации последствий несимметрично-несинусоидального электропотребления разработано устройство[11], параметры которого (комплексные проводимости прямой, обратной

[4] ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: введ. 2014.07.01. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200104301 (дата обращения: 20.05.2026).

[5] Standard for Power Quality and Reliability in Electric Power Systems. [Electronic resource]. URL: https://urcabahamas.bs/wp-content/uploads/2023/09/URCA-ES-06_2023-Standard-for-Power-Quality-and-Reliability-in-Electric-Power-Systems-Consultation-Document.pdf (дата обращения: 16.04.2026).

[6] Косоухов Ф.Д., Криштопа Н.Ю., Горбунов А.О. Критерии потерь мощности от несимметричных, несинусоидальных и реактивных токов в трехфазных трансформаторах и четырехпроводных линиях в низковольтных электрических сетях: Монография. Санкт-Петербург: Летопись, 2025. 180 с.

[7] APS – additional positive sequence – дополнительная прямая последовательность.

[8] ANS – additional negative sequence – дополнительная прямая последовательность.

[9] AZS – additional zero sequence – дополнительная нулевая последовательность.

[10] Стандарты на качество ЭЭ регламентируют учитывать гармонические составляющие до 40-го порядка включительно. Многочисленными измерениями, произведенными в действующих электрических сетях, установлено, что наибольшие значения имеют именно указанные составляющие по прямой, обратной и нулевой последовательностям.

[11] Наумов И.В., Подъячих С.В., Ермолаев Д.С. Комплектное балансирующее устройство для четырехпроводных электрических сетей: Патент на изобретение (19) RU (11) 2860456(13) C1. Опубл. 21.04.2026; Бюл. № 12.

и нулевой последовательностей) в соответствии с методом, представленным в работе [25], определяются выражениями:

$$\underline{Y}_{1\text{БУНРР}}\left(\left\{\underline{U}_1+\sum_4^{40}\underline{U}_{APS}\right\},\left\{\underline{I}_1+\sum_4^{40}\underline{I}_{APS}\right\},t_0,\overline{t_i}\right)=$$
$$=\frac{1}{14{,}1428\cdot\left(\overline{t_i}-t_0\right)}\cdot\int_{t_0}^{\overline{t_i}}\frac{\left\{\underline{I}_1+\sum_4^{40}\underline{I}_{APS}\right\}(t)}{\left\{\underline{U}_1+\sum_4^{40}\underline{U}_{APS}\right\}(t)}dt;$$

$$\underline{Y}_{2\text{БУНРР}}\left(\left\{\underline{U}_2+\sum_2^{38}\underline{U}_{ANS}\right\},\left\{\underline{I}_2+\sum_2^{38}\underline{I}_{ANS}\right\},t_0,\overline{t_i}\right)=$$
$$=\frac{1}{14{,}1428\cdot\left(\overline{t_i}-t_0\right)}\cdot\int_{t_0}^{\overline{t_i}}\frac{\left\{\underline{I}_2+\sum_2^{38}\underline{I}_{ANS}\right\}(t)}{\left\{\underline{U}_1+\sum_2^{38}\underline{U}_{ANS}\right\}(t)}dt; \quad (4)$$

$$\underline{Y}_{0\text{БУНРР}}\left(\left\{\underline{U}_0+\sum_3^{39}\underline{U}_{AZS}\right\},\left\{\underline{I}_0+\sum_3^{39}\underline{I}_{AZS}\right\},t_0,\overline{t_i}\right)=$$
$$=\frac{6}{\left(\overline{t_i}-t_0\right)}\cdot\int_{t_0}^{\overline{t_i}}\frac{\left\{\underline{I}_0+\sum_3^{39}\underline{I}_{AZS}\right\}(t)}{\left\{\underline{U}_0+\sum_3^{39}\underline{U}_{AZS}\right\}(t)}dt$$

где $\sum_4^{40}\underline{I}_{APS}$, $\sum_2^{38}\underline{I}_{ANS}$, $\sum_3^{39}\underline{I}_{AZS}$ и $\sum_4^{40}\underline{U}_{APS}$, $\sum_2^{38}\underline{U}_{ANS}$, $\sum_3^{39}\underline{U}_{AZS}$ – суммарные комплексные гармонические составляющие токов и напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей соответственно.

Балансирующее устройство легло в основу имитационной представленной модели, разработанной в MATLAB Simulink на основе использования микроконтроллера STM32H743VIT6. Архитектура имитационной модели электрической сети с БУ представлена на рисунке 1.

Блок 1 представляет собой электромагнитное устройство (ЭМУ), имеющее верхнее и нижнее ярмо (разрывной сердечник) в единой трехфазной обмотке, соединенной по схеме встречного зигзага с выведенным нейтральным проводом. Отличительная особенность ЭМУ – минимальный импеданс для токов нулевой последовательности. Автоматически изменяет проводимость нулевой последовательности в функции изменяющейся несбалансированной нагрузки. Выводы ЭМУ присоединены к блокам 1 и 2.

Блок 2 представляет собой фильтр тока обратной последовательности (ФТОП) (рис. 2). Фильтр использует фазовый сдвиг между фазами для выделения составляющей обратного тока последовательности I_2:

$$V_{\text{фильтр}}=k_1\cdot\left(\underline{I_A}+\underline{a}\cdot\underline{I_B}+\underline{a^2}\cdot\underline{I_C}\right);$$
$$\underline{a}=-0{,}5+j0{,}866=e^{j2\pi/3}$$

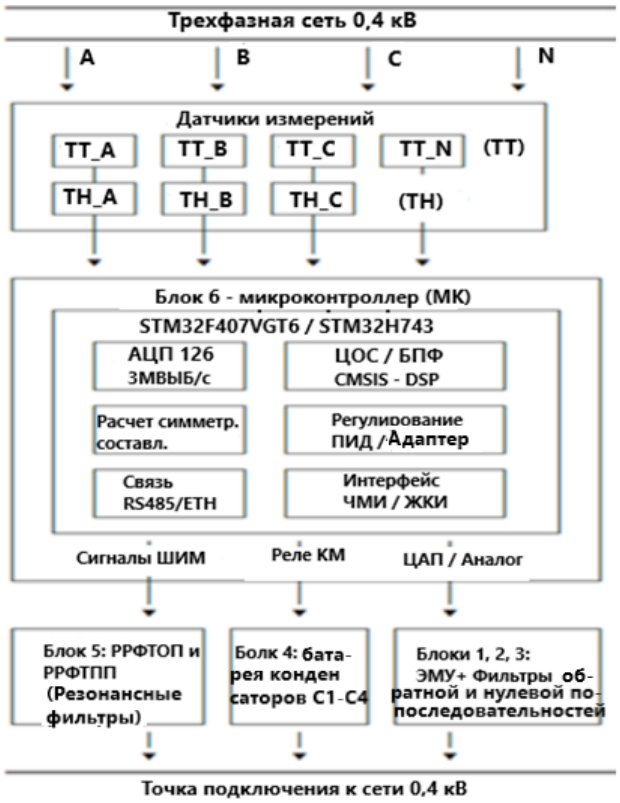


Рис. 1. Архитектура модели симуляции электрической сети 0,4 кВ с балансирующим устройством

Fig. 1. Simulation model architecture of the 0.4 kV distribution grid with the integrated balancing device

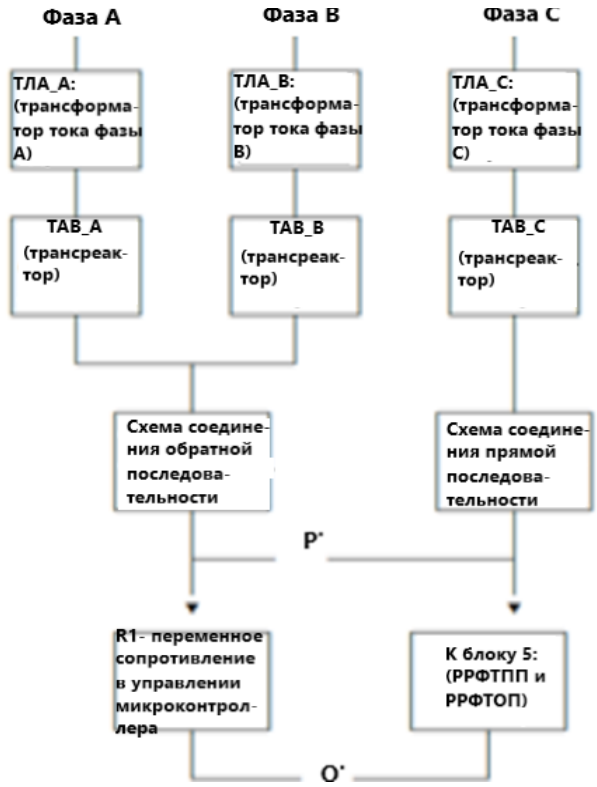


Рис. 2. Топологическая схема функционирования фильтра токов обратной последовательности

Fig. 2. Schematic diagram of the negative-sequence current filter configuration

Такая комбинация подавляет I_1 и I_0, оставляя только I_2. Трансреактор (ТАВ) вносит фазовый сдвиг 90° относительно ТТ (ТЛА). При правильном комбинировании выходов: сигнал ТЛА_А (пропорционален I_A, синфазный), сигнал ТАВ_А (пропорционален dI_A/dt, сдвинут на 90°).

Переменное сопротивление R1, управляемое микроконтроллером – (МК-блок 6), представлено фрагментарно на рисунке 3.

Альтернативой этому решению с точки зрения повышения надежности управления является использование матрицы постоянных резисторов, коммутируемых ТТР (SSR). Она представляет собой 8 резисторов в двоичной комбинации с разрешением 256 шагов: $R_{ОБЩ.} = R_0 + b_0 \cdot R + b_1 \cdot 2R + b_2 \cdot 4R + \ldots + b_7 \cdot 128R$. Управление предусмотрено от восьми GPIO[12] микроконтроллера.

Блок 3 представляет собой фильтр тока прямой последовательности (ФТПП). Структура фильтра идентична блоку 2, но с «иным» соединением вторичных обмоток для выделения тока прямой последовательности I_1: $V_{_фильтр} = k_1 \cdot \left(\underline{I_A} + \underline{a^2} \cdot \underline{I_B} + \underline{a} \cdot \underline{I_C} \right)$. В данном случае производится перестановка оператора поворота a и a^2 по сравнению с ФТОП. Сопротивление R2 управляется аналогично R1.

Блок 4 – батарея конденсаторов (БК); изображен рисунке 4 и представляет собой регулируемое устройство компенсации реактивной мощности (РУКРМ) [23].

БК подключена по схеме «Δ» к выходным клеммам ЭМУ (фазы А, В и С).

Контакторы для коммутации. $I_{NOM.} = 1{,}5 \cdot I_C$, где I_C – пусковой ток, регулируемый встроенными резисторами предвключения, ограничивающими пусковой ток. Катушка индуктивности, рассчитанная на 24 В, управляется МК через промежуточное реле.

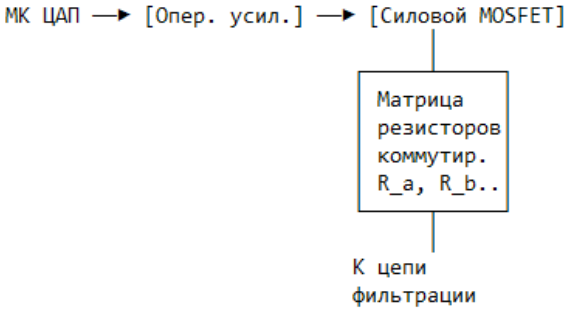


Рис. 3. Топология управляемого активного сопротивления

Fig. 3. Circuit topology of the controlled active resistance

Механический ресурс контактной группы – более 1000000 операций в соответствии со стандартом[13] МЭК 60947-4-1.

Блоки 5 – регулируемые резонансные фильтры токов прямой (обратной) последовательностей (*РРФТОП/РРФТПП*). Для РРФТПП (прямой-положительной) последовательности архитектура будет аналогичной, за исключением того, что фильтруемыми гармониками будут 7-я (350 Гц), 13-я (650 Гц), 19-я (950 Гц). Для каждой подавляемой гармоники на резонансной частоте $f_n = \mathrm{n} \cdot 50$ Гц выполняется условие:

$$x_L = x_C \rightarrow \omega_n \cdot L_n = 1 / (\omega_n \cdot C_n)$$

$$\text{или } L_n \cdot C_n = 1 / (\omega_n)^2 = 1 / (2\pi \cdot n \cdot 50)^2. \qquad (5)$$

При этом гармоники 3-я (150 Гц), 9-я (450 Гц), 15-я (750 Гц) и 21-я (1000 Гц) фильтруются блоком 1 (ЭМУ).

Архитектура РРФТОП представлена на рисунке 5.

Регулируемость фильтров является принципиально важной, поскольку уровни гармоник изменяются во времени. Если на схеме [25] это осуществляется

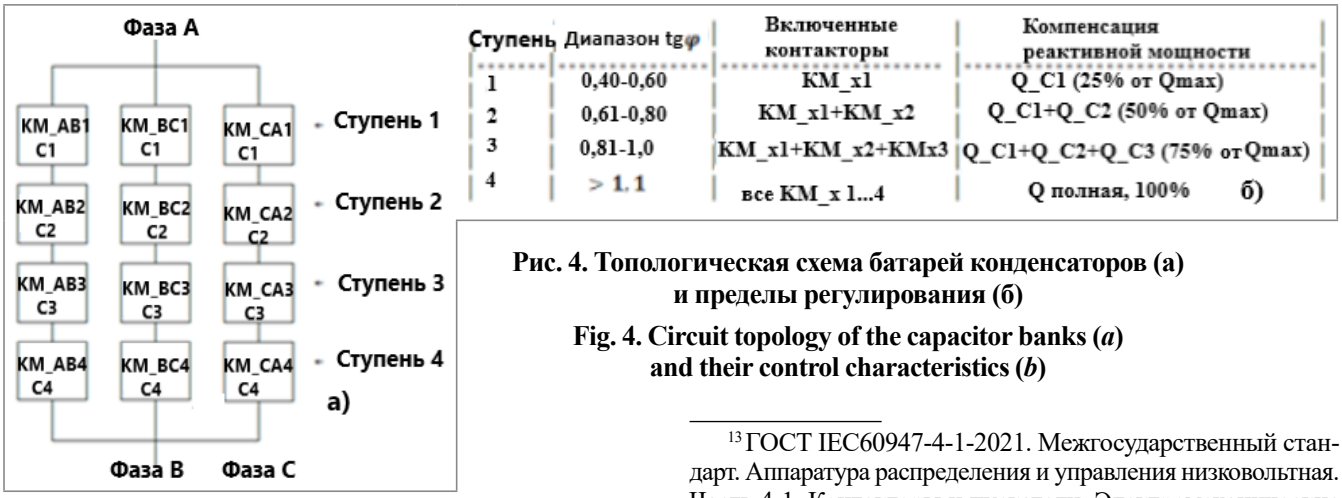


Рис. 4. Топологическая схема батарей конденсаторов (а) и пределы регулирования (б)

Fig. 4. Circuit topology of the capacitor banks (*a*) and their control characteristics (*b*)

[12] GPIO (general-purpose input/output) – интерфейс для связи между компонентами компьютерной системы.

[13] ГОСТ IEC60947-4-1-2021. Межгосударственный стандарт. Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 4-1. Контакторы и пускатели. Электромеханические контакторы и пускатели. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200181366 (дата обращения: 21.05.2026).

посредством пружинного сердечника, насыщение которого обеспечивается его положением внутри индуктивности в зависимости от уровня генерируемых гармоник, то в предлагаемой модели симуляции работы РРФТОП и РРФТПП регулирование может осуществляться двумя подходами.

Подход 1. Коммутация конденсаторов (рис. 6). Реализуется 16 уровней емкости, обеспечивающей настройку резонансной частоты. При этом твердотельное реле (ТТР) реализуется посредством реле SSR, управляемым GPI0 микроконтроллера (блок 6).

Подход 2. Переменная индуктивность (насыщаемый сердечник) (рис. 7). Постоянный ток в обмотке подмагничивания изменяет проницаемость сердечника, изменяя, соответственно, его индуктивность и настраивая резонансную частоту f_n.

Блок 6. Система управления на микроконтроллере (МК). Для выбора МК более предпочтительно использовать семейство STM 32. Сравним два типа МК: STM32F407VGT6[14] и STM32H743VIT6[15] (табл.).

Несмотря на несколько большую стоимость второго МК (дороже на 6€) и равенство характеристик ЦАП (цифроаналогового преобразователя), все остальные параметры у МК STM32H743VIT6 превосходят аналогичные параметры первого: в частности, FPU (Floating Point Unit – блок вычислений с плавающей точкой) – вдвое; ОЗУ у «H743» более чем в 5 раз превышает ОЗУ у «F407»; Флэш у второго МК вдвое превышает память у первого; ЦОС у второго также выше, так как CMSIS-DSP – библиотека алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС) – имеет дополнительную базу данных. Плата управления МК представлена на рисунке 8.

Более подробно работа выбранного микроконтроллера, включая схему согласования аналоговых сигналов (тракт изменения токов, схема их согласования, тракт изменения напряжения), антиалиасингового фильтра[16], синхронизацию с сетью, питание

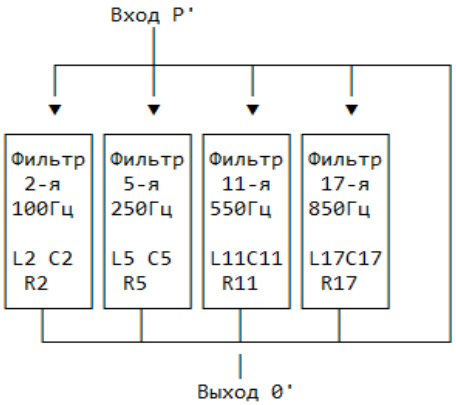


Рис. 5. Топология регулируемого резонансного фильтра токов обратной последовательности

Fig. 5. Circuit topology of the adjustable resonant negative-sequence current filter

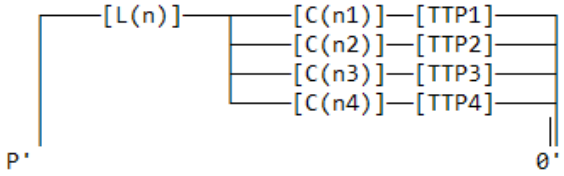


Рис. 6. Реализация первого подхода

$C_{n1} = C, C_{n2} = 2C, C_{n3} = 4C, C_{n4} = 8C$

Fig. 6. Implementation of the first design approach:

$C_{n1} = C, C_{n2} = 2C, C_{n3} = 4C, C_{n4} = 8C$

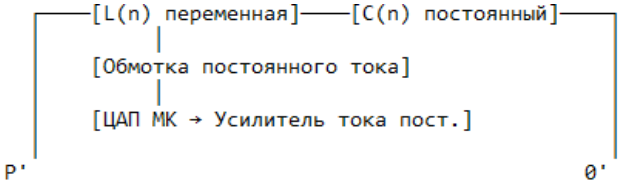


Рис. 7. Реализация второго подхода

Fig. 7. Implementation of the second design approach

Таблица

Характеристики сравниваемых микроконтроллеров

Table

Characteristics of the evaluated microcontrollers

Критерий	STM32F407VGT6	STM32H743VIT6
Ядро	Cortex-M4F, 168 МГц	Cortex-M7, 480 МГц
FPU	Одинарная точность	Двойная точность
АЦП	3×12 бит, 2,4 МВЫБ/с[17]	3×16 бит, 3,6 МВЫБ/с
ОЗУ	192 КБ	1 МБ
Флэш	1 МБ	2 МБ
ЦОС	CMSIS-DSP	CMSIS-DSP + кэш
ЦАП	2×12 бит	2×12 бит
GPIO	140	168
Цена	~12€	~18€

[14] Каталог. STM32H743VIT6. [Электронный ресурс]. URL: https://www.chipdip.ru/product/stm32h743vit6-mikrokontroller-32-bit-st-microelectronics-9000503897?ysclid=mpsdaw5i3a729493492 (дата обращения: 31.05.2026).

[15] STM32H742xI/G STM32H743xI/G. Техническая документация. [Электронный ресурс]. URL: Datasheet – STM32H742xI/G STM32H743xI/G – 32-bit Arm® Cortex®-M7480MHz MCUs, up to 2MB Flash, up to 1MB RAM, 46 com. and analog interfaces (дата обращения: 31.05.2026).

[16] Фильтр низкой частоты (ФНЧ), который применяется на входе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) для повышения качества оцифровки сигнала. Его основная задача – подавлять спектральные компоненты сигнала, частота которых превышает половину частоты дискретизации АЦП. Это предотвращает явление алиасинга (наложения спектров), при котором высокочастотные компоненты сигнала «накладываются» на низкочастотные, искажая исходный сигнал (примеч. авт.).

[17] МВЫБ/с (характеристика аналого-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера) означает мегавыбор в секунду – единицу измерения скорости преобразования аналогового сигнала в цифровой (примеч. авт.).

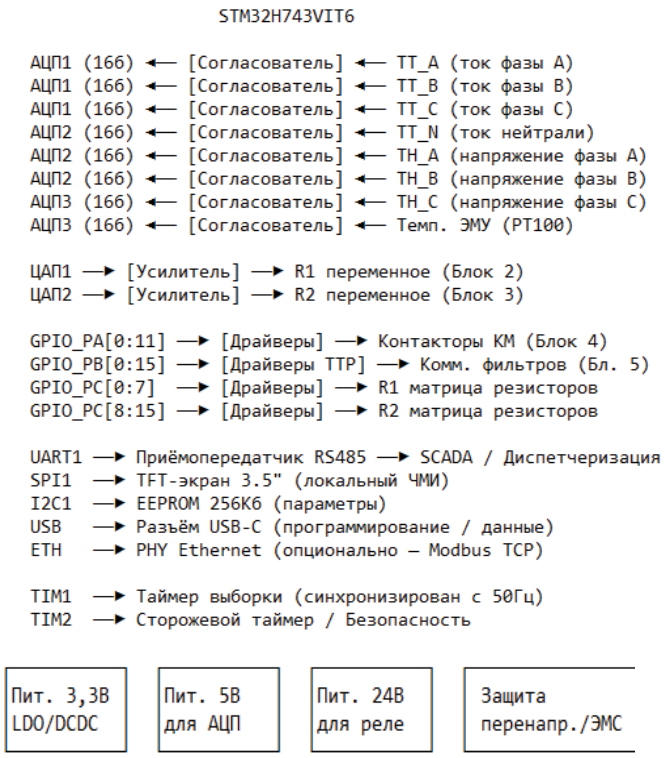


Рис. 8. Плата управления микроконтроллером STM32H743VIT6

Fig. 8. Control board based on the STM32H743VIT6 microcontroller

платы МК, расчет и проектирование, изложена в материалах заявки на изобретение в бюро патентов РФ. В основе расчета исследуемых показателей небаланса (1-4) лежат программные комплексы[18,19].

Рассмотрим качество ЭЭ в действующей электрической сети 0,4 кВ г. Дуала. Дуала – крупнейший экономический и промышленный центр Республики Камерун. По данным[20] на 2023 г., население Дуалы с пригородами достигает более 5 млн чел.

Рассмотрим электрическую сеть 0,4 кВ с подстанцией KTP-IND-BASSA-04, которая питает промышленную зону Басса. Сеть СН (10 кВ) является полностью подземной (4,2 км, 3×1×150 мм^2. Алюминий СПЭ), что гарантирует хорошую стабильность. Трансформатор мощностью 630 кВА (схема соединения – Dyn11, Uкз = 6%) питает ГРЩ на 1000 А, который распределяет электроэнергию по цехам через медные кабели большого сечения (4×240 мм^2) (рис. 10). Нагрузкой данной сети являются три цеха: в двух расположено станочное оборудование, в третьем – компрессорная. От шин силового трансформатора также получает питание и линия освещения объекта (рис. 9).

Рассмотрим, как изменяются параметры электрической энергии, характеризующие уровень несбалансированности электропотребления в исследуемой электрической сети. На рисунке 10 представлены временные диаграммы изменения фазных токов, симметричных составляющих токов обратной и нулевой последовательностей, а также суммарных гармонических токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Анализ данных рисунка 10 показал, что уровень несимметричной составляющей в составе фазных токов невелик. Токи в фазах отличаются незначительно по величине (рис. 10а): усредненные значения за период измерения составили, соответственно, I_A = 97,5 А; I_B = 97,9 А; I_C = 96,5 А. При этом среднее значение тока в нейтральном проводе составляет I_N = 13,3 А. Вместе с тем суммарные гармонические составляющие[21] прямой, обратной и нулевой последовательностей составили, соответственно, 11,9; 115,2; 112,6 А (рис. 10б). Это обусловлено наличием в производственных цехах большого количества силовой электроники, элементы которой значительно искажают гармонический состав токов за счет нелинейной вольт-амперной характеристики.

Усредненные значения коэффициентов небаланса напряжения по прямой, обратной и нулевой последовательностям, а также суммарный коэффициент небаланса напряжения (рис. 10в) составили, соответственно, 23,2; 5,4; 1,83; 4,9%. При этом коэффициент потерь мощности K_P (рис. 10г) в среднем составляет 2,9.

Таким образом, значения показателей небаланса напряжения по обратной и нулевой последовательностям, а также суммарный коэффициент небаланса напряжения не превышают установленных допустимых значений (13,5; 8,8; 12%). Но значение коэффициента небаланса напряжения по прямой последовательности (K_{1UNB}) превышает допустимое значение (9%) на 61,1% (в 2,6 раза). Значение коэффициента K_P, равное 2,9, свидетельствует о том, что реальные потери активной мощности (и электрической энергии) почти в 3 раза превышают аналогичные потери, которые могли бы иметь место только от токов прямой последовательности основной частоты.

[18] Наумов И.В. «Unbalance-3». Программа расчета несбалансированных режимов работы низковольтных электрических сетей. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684122 от 13.11.2023 г.

[19] Наумов И.В., Подъячих С.В., Ермолаев Д.С. «Unbalance-4». Программа по расчету несбалансированных режимов работы в эл. сетях 0,4 кВ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: RU2023686894 от 11.12.2023 г. Бюл. № 12.

[20] Население Камеруна. [Электронный ресурс]. URL: https://countrymeters.info/ru/Cameroon (дата обращения: 20.05.2026).

[21] Здесь и далее средние значения показателей соответствуют их усреднению за период измерения в 10-минутном временном промежутке (примеч. авт.).

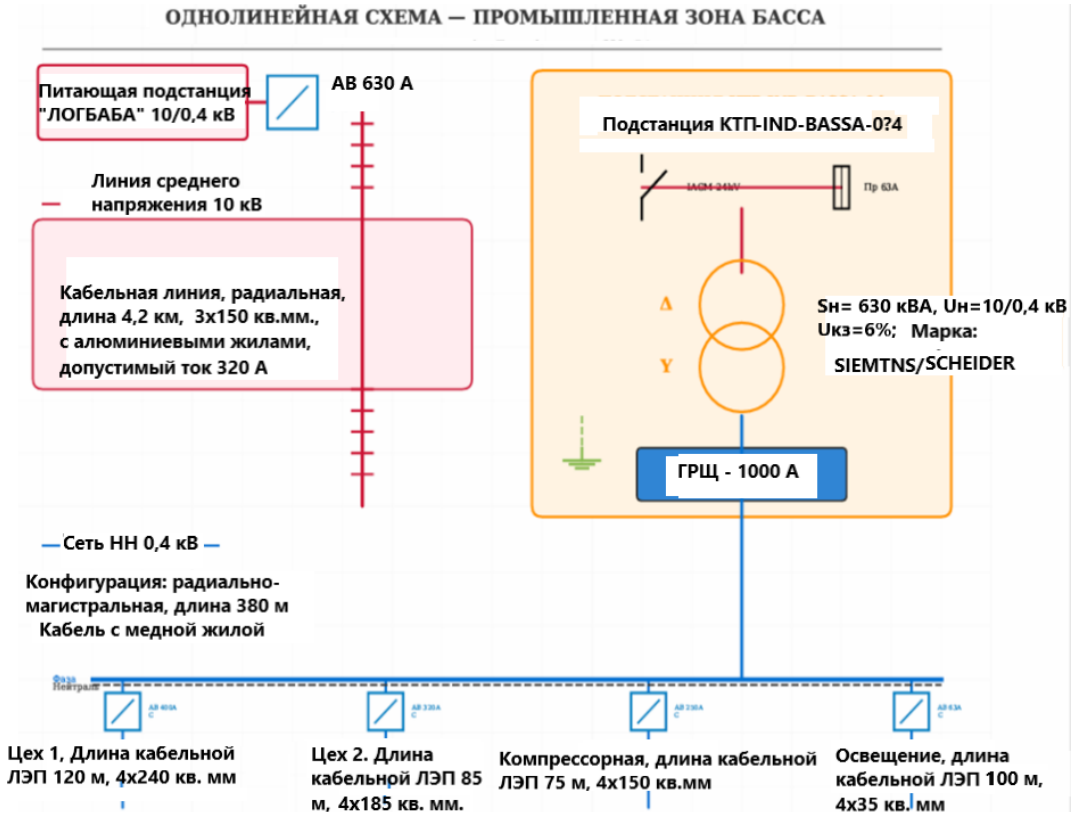


Рис. 9. Однолинейная схема электрической сети 0,4 кВ, питающей нагрузку промышленных объектов в г. Дуала

Fig. 9. Single-line diagram of the 0.4 kV distribution grid supplying industrial loads in Douala

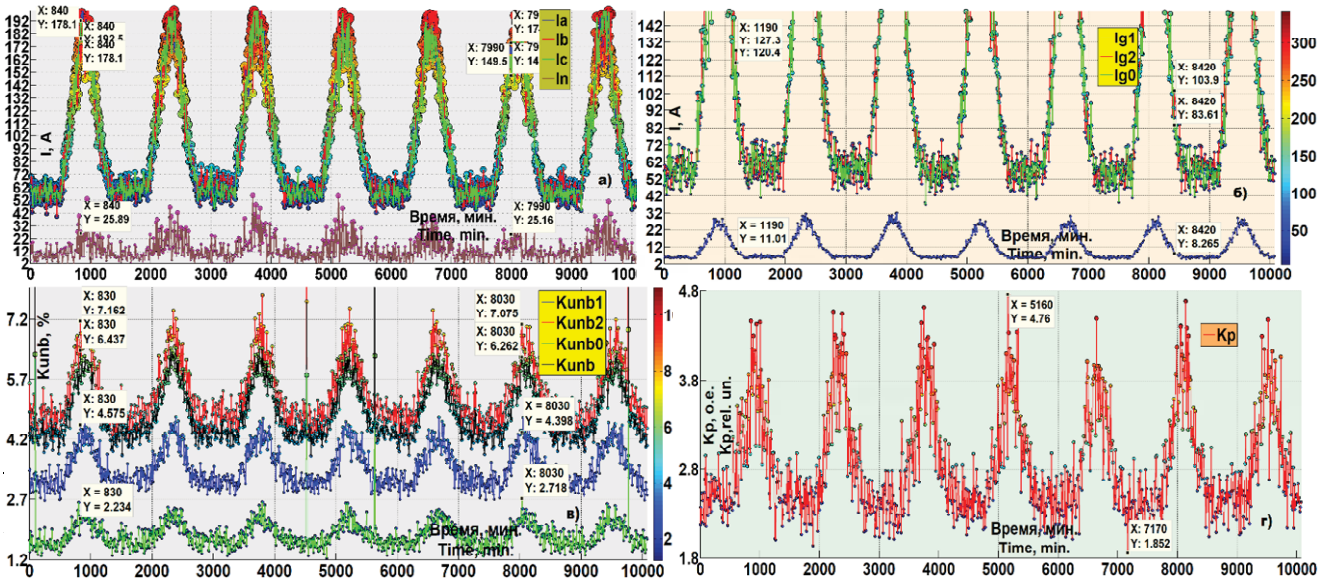


Рис. 10. Диаграммы изменения параметров ЭЭ и показателей небаланса в исследуемой электрической сети без балансирующего устройства

Fig. 10. Variation profiles of power quality parameters and unbalance indicators in the studied distribution grid without the balancing device

Рассмотрим, как показатели небаланса будут изменяться при интеграции БУ в исследуемую сеть. Проведенными исследованиями [23, 25] с использованием программного обеспечения[22] установлено, что наиболее целесообразным местом установки в исследуемых электрических сетях средств

[22] Наумов И.В., Подъячих С.В., Ермолаев Д.С., Суслов К.В. «Unbalance-5». Программа имитационного моделирования несбалансированных режимов низковольтных электрических сетей. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025611445 Российская Федерация; Опубл. 20.01.2025 г.

симметрирования и балансирования является ближайший к шинам 0,4 кВ силового трансформатора узел нагрузки. Поэтому в качестве места имитационного подключения БУ на основе разработанного микроконтроллера приняты шины распределительного устройства (РУ), находящегося на расстоянии 380 м от шин 0,4 кВ силового трансформатора ТП, от которого запитаны 3 производственных цеха и линия освещения.

В соответствии с диаграммами изменения исследуемых показателей небаланса при подключении БУ (рис. 11а) исследуемые показатели приняли следующие значения: $K_{1UNB} = 0{,}55\%$; $K_{2UNB} = 1{,}74\%$; $K_{0UNB} = 0{,}02\%$; $K_{UNB} = 0{,}84\%$. Таким образом, снижение этих показателей при включении БУ составило, соответственно, 97,6; 67,5; 98,7; 82,5%. Значение коэффициента потерь мощности (K_P) (рис. 11б) при интеграции в сеть БУ составило в среднем 1,002 (снизилось на 65%).

Рассмотрим также изменение потерь активной мощности в исследуемой электрической сети до и после включения балансирующего устройства (рис. 12).

Как следует из данных рисунка 12, до подключения БУ усредненные значения потерь активной и реактивной мощности в сети (линия и силовой трансформатор) составили, соответственно, 77,2 кВт и 62,3 квар. При подключении БУ эти значения снизились до 24,3 кВт и 23,2 квар.

Таким образом, рассматривая активные потери мощности, отметим, что их снижение в 10-минутном промежутке времени измерения в одну неделю составило 53 кВт.

Учитывая, что измерения производились круглые сутки, включая нерабочее время и выходные дни, и предполагая, что представленный уровень несбалансированного электропотребления на исследуемом объекте сохранится неизменным в течение года, определим годовую экономию электрической энергии за счет внедрения в сеть балансирующего устройства.

Экономия энергии в 1 ч составляет: $W = \Delta P \cdot \tau = 53 \cdot 6 = 318$ (кВт·ч); годовая экономия ЭЭ – $W = \Delta P \cdot \tau = 318 \cdot 8760 = 2\,785\,680$ (кВт·ч). При стоимости 1 кВт·ч, равной \$0,136 за 1 кВт·ч [23], годовая экономия ЭЭ за счет использования БУ составит \$378852,5.

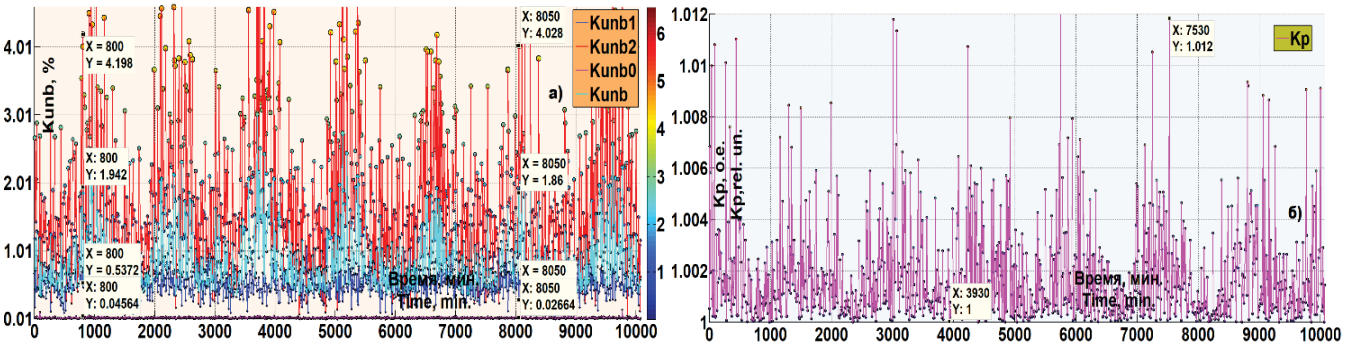


Рис. 11. Диаграммы изменения исследуемых показателей небаланса после подключения БУ

Fig. 11. Variation profiles of the analyzed unbalance indicators after connecting the balancing device

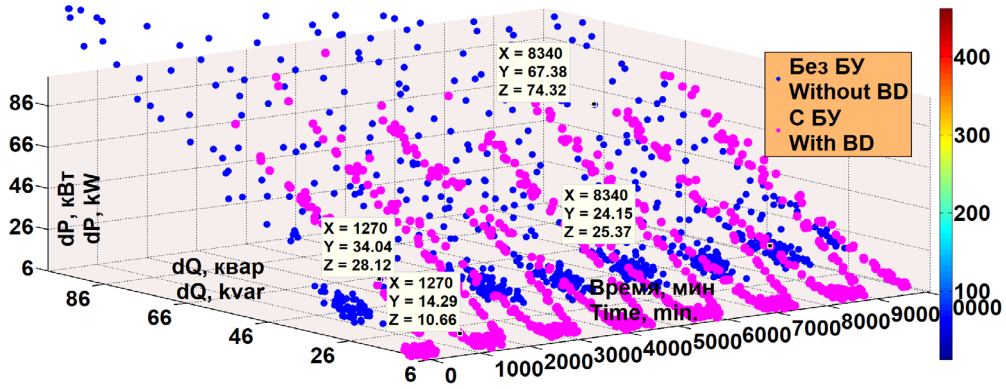


Рис. 12. Диаграммы изменения потерь активной и реактивной мощности до и после подключения БУ в исследуемой электрической сети

Fig. 12. Active and reactive power losses in the studied distribution grid before and after connecting the balancing device

[23] Цены на электроэнергию в странах мира. [Электронный ресурс]. URL: https://svspb.net/danmark/stoimost-elektroenergija.php (данные на 2025 г.)

Выводы

1. Несбалансированное электропотребление в электрических сетях низкого напряжения необходимо контролировать на различных объектах хозяйственной деятельности. Исследование этих режимов в Республике Камерун находится в начальной стадии.

2. На основе использования известной модели балансирующего устройства в системе MATLAB Simulink разработана имитационная модель нового БУ, основой которого является микроконтроллер последнего поколения, осуществляющий управление компенсацией симметричных составляющих токов обратной и нулевой последовательностей, обусловленных основной частотой напряжения электропитания, а также дополнительными прямой, обратной и нулевой последовательностями, обусловленными эмиссией гармонических составляющих, частота которых кратна основной частоте.

3. Исследования несбалансированных режимов в действующей низковольтной электрической сети в г. Дуала Республики Камерун, питающей объекты промышленного производства, показали превышение допустимой величины показателя, характеризующего дополнительную прямую последовательность напряжения электропитания, в 2,6 раза.

4. Коэффициент дополнительных потерь активной мощности в исследуемой электрической сети в реальном несбалансированном режиме почти в 3 раза превышает аналогичные потери, обусловленные только током прямой последовательности основной частоты.

5. Имитационное подключение разработанной модели балансирующего устройства на основе предлагаемого микроконтроллера позволяет снизить коэффициент небаланса напряжения по прямой последовательности более чем на 97%, а коэффициент потерь активной мощности – на 65%.

6. Расчетным путем определено, что при сохранении установленного уровня несбалансированного электропотребления в течение года и при постоянном подключении разработанного балансирующего устройства в исследуемой электрической сети годовая экономия электрической энергии может составить 2 785 680 кВт·ч, что в ценах 2025 г. привело бы к экономии $378852,5.

В качестве обсуждения. Предлагаемая статья отражает первое исследование несбалансированных режимов в электрических сетях Республики Камеруна. В ближайшее время аналогичные исследования будут проведены для сетей низкого напряжения, питающих административные объекты – таких, как университет, торговый центр, жилые массивы г. Дуала.

Список источников / References

1. Плюснина О.М. Экономический потенциал Республики Камерун в мировой экономике и в отношениях с Россией // Russian Journal of Management. 2024. Т. 12, № . 4. С. 188-202. https://doi.org/10.29039/2500-1469-2024-12-4-188-202

Plyusnina O.M. The economic potential of the Republic of Cameroon in the global economy and in relations with Russia. *Russian Journal of Management.* 2024;12(4):188-202. (In Russ.) https://doi.org/10.29039/2500-1469-2024-12-4-188-202

2. Ibrahim I.A., Hossain M.J. Low voltage distribution networks modeling and unbalanced (optimal) power flow: A comprehensive review. *IEEE Access*. 2021;9:143026-143084. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120803

3. Golobart M.L. et al. Upgrading low-voltage network models for power quality investigations with a focus on voltage unbalance. Hybride conference CIRED Porto Workshop 2022: E-mobility and power distribution. 2022. Pp. 124-128. https://doi.org/10.1049/icp.2022.0718

4. Naumov I.V. et al. Analysis of unbalanced load low-voltage electrical networks operating modes. *E3S Web of Conferences, WFSDI 2021.* 2021;295:02005. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129502005 EDN: FTGQEC

5. Новиков А.В., Злобин А.И., Хорошинина Е.Н. Физическое моделирование аномальных режимов в электрических сетях напряжением 6-35 КВ // Энергетические системы. 2024. № 1. С. 41-56. https://doi.org/10.34031/es.2024.1.005

Novikov A.V., Zlobin A.I., Khoroshinina E.N. Physical modeling of abnormal modes in electrical networks with voltage 6-35 kV. *Energy Systems*. 2024:1:41-56. https://doi.org/10.34031/es.2024.1.005

6. Naumov I.V., Podyachikh S.V., Tretyakov S.V. About electric energy additional losses reduction at the phase currents unbalancing in the 0.38 kV operating networks. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science.* 2022;979:012137. https://doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012137

7. Dai Z. et al. Intelligent prediction of transformer loss for low voltage recovery in distribution network with unbalanced load. *Energies*. 2023;16(11):4432. https://doi.org/10.3390/en16114432

8. Cuong N.V., Kovernikova L. Analysis of the influence of non-sinusoidal and unbalanced network modes on induction motors. *Energy Systems Research. E3S Web of Conferences*. 2021;289:01002. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128901002 EDN: QOMSJU

9. Peng Y. et al. Performance improvement of the unbalanced voltage compensation in islanded microgrid based on small-signal analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019;67(7):5531-5542. https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2934021

10. Naumov I.V. et al. Methodological bases of the fire hazard reduction in internal and external 0.38 kv electrical networks with unbalancing power consumption. *IOP Conference Series*: *Earth and Environmental Science*. 2022;1045:012145. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012145

11. Mahmoodi M. et al. A comparison on power flow models for optimal power flow studies in integrated medium-low voltage unbalanced distribution systems. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2024;38:101339. https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101339

12. Heidari-Ahijani A. et al. A linear AC power flow model for unbalanced multi-phase distribution networks based on current injection equations. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2021;36(4):3806-3809. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3073839

13. Claeys S. et al. Optimal power flow in four-wire distribution networks: Formulation and benchmarking. *Electric Power Systems Research*. 2022;213:108522. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108522

14. Vanin M. et al. Comparison of linear and conic power flow formulations for unbalanced low voltage networks optimization. *Electric Power Systems Research*. 2020;189:106699. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106699

15. Claeys S. et al. Voltage-dependent load models in unbalanced optimal power flow using power cones. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2021;12(4):2890-2902. https://doi.org/10.1109/TSG.2021.3052576

16. Tamba J.G. et al. An overview of electricity in Cameroon: Current Status, Influential Factors and Government Actions. *International Journal of Energy Economics and Policy.* 2022;12(4):470-481. https://doi.org/10.32479/ijeep.13024

17. Inoussah M.M., Adolpho M.I. Assessment of sustainability indicators of thermoelectric power generation in Cameroon using exergetic analysis tools. *Energy and Power Engineering.* 2017;9(1). https://doi/org/10.4236/epe.2017.91003

18. Pendieu Kwaye M., Bendfeld J., Anglani N. Assessment of renewable energy resources in Cameroon and special regards on energy supply. *2015 5th International Youth Conference on Energy* (*IYCE*), Pisa, Italy. 2015. Pp. 1-7. https://doi/org/10.1109/IYCE.2015.7180807

19. Konchou F.A.T., Koholé Y.W., Tchuen G & Tchinda R. Energy, exergy and sustainability assessment of Cameroon residential sector. *Environment, Development and Sustainability.* 2023;25:12439-12465. https://doi.org/10.1007/s10668-022-02574-2

20. Talla K.F.A., Aloyem K.C.V., Tchinda R. Energy Analysis and Exergy Utilization in the Residential Sector of Cameroon. *Energy and Power Engineering*. 2015;7:93-104. http://dx.doi.org/10.4236/epe.2015.73009

21. Ngousssandou B.-P. et al. Optimal energy scheduling method for the North Cameroonian interconnected grid in response to load shedding. *Sustainable Energy Research*. 2023;10:14. https://doi.org/10.1186/s40807-023-00084-x

22. Onanena R. et al. Improvement of the voltage quality in an electrical network via the loopback: Case of the southern interconnected grid (sig) of Cameroon. *Journal of Power and Energy Engineering.* 2021;9(3):25-41. EDN: MNTPOQ

23. Наумов И.В. и др. Имитационное моделирование несбалансированных режимов работы в низковольтных компонентах систем электроснабжения. Электрические станции. 2026. № 3. С. 9-19. https://doi.org/10.71841/ES.elst.2026.1136.03.02

Naumov I.V. et al. Simulation modeling of unbalanced operating modes in low-voltage components of power supply systems. *Elektricheskie stantsii.* 2026;3:9-19. (In Russ.) https://doi.org/10.71841/ES.elst.2026.1136.03.02

24. Наумов И.В. и др. Оценка устойчивости несбалансированных режимов работы компонентов систем электроснабжения низкого напряжения // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии». 2026. Т. 19, № 2. С. 238-259. EDN: XEVRSC

Naumov I.V. et al. Assessment of the unbalanced operating modes stability of low voltage power supply system components. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2026;19(2):238-259. (In Russ.)

25. Наумов И.В. Несбалансированные режимы работы распределительных электрических сетей низкого напряжения: Монография. Т. 1. Методологические основы системного подхода к оценке несбалансированных режимов. М.: Колос-с, 2025. 226 с. EDN: TGANAG

Naumov I.V. Unbalanced modes of operation of low-voltage distribution grids: Monograph. Vol. 1. Methodological foundations of a systematic approach to the assessment of unbalanced modes. Moscow, Kolos-s, 2025. 258 p. (In Russ.)

Сведения об авторах

[1] **Наумов Игорь Владимирович,** заслуженный работник ВО РФ, д-р техн. наук, профессор; professornaumov@list.ru; SPIN-код: 3954-3292

[2] **Нтсама Нди Бернард Жосселин,** аспирант; dimitryntsama8@gmail.com

[3] **Ямщикова Ирина Валентиновна,** канд. экон. наук, доцент; yamsirina@yandex.ru; SPIN-код: 6777-4865

[1, 2] Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского; 664038, Российская Федерация, Иркутская обл., п. Молодежный, д. 1/1

[3] Иркутский национальный исследовательский технический университет; 664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Author Information

Igor V. Naumov [1], Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, DSc (Eng), Professor

Ntsama Ndi Bernard Josselin [2], postgraduate student

Irina V. Yamshchikova [3], CSc (Econ), Associate Professor

[1, 2] Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky; 1/1 Molodezhny, Irkutsk Region, 664038, Russian Federation

[3] Irkutsk National Research Technical University; 83 Lermontova Str. Irkutsk, 664074, Russian Federation

Вклад авторов

И.В. Наумов – концептуализация, методология, программное обеспечение, анализ и создание окончательной версии (доработка) рукописи, ее редактирование, руководство исследованиями; Н.Н.Б. Жосселин – проведение исследований, анализ возможности применения типов микроконтроллеров, визуализация; И.В. Ямщикова – формальный анализ, программное обеспечение, верификация данных

Author Contribution

I.V. Naumov – conceptualization; methodology; software; writing – review and editing of the manuscript; research supervision; N.N.B. Josselin – investigation; validation; visualization; I.V. Yamshchikova – formal analysis, software, data curation; validation.

Конфликт интересов

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

Conflict of Interest

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

Статья поступила 26.05.2026, после рецензирования и доработки 02.10.2026, принята к публикации 08.10.2026

Received 26.05.2026; Revised 02.10.2026; Accepted 08.10.2026