



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

Подписано в печать 11.06.2024 г.
Формат 60 84/8
Тираж 500 экз.

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева, 2024

Главный научный редактор

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

Заместитель главного научного редактора:

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

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

Члены редакционного совета:

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

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

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

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

Владимир Тимофеевич Водяников, д-р экон. наук, профессор кафедры организации производства, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-7111-9437>, vtvodyannikov@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

Алексей Владимирович Журавлев, д-р техн. наук, доцент, проректор по науке и инновационному развитию РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-6776-0432>, a.zhuravlev@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 Купreenko, 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

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

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

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

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

Владимир Федорович Сторчевой, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>, v.storchevov@rgau-msha.ru

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

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

Иностранцы члены редакционного совета:

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

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

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

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

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

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

**Founder and Publisher:****Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy***Address of Founder and Publisher:*49, Timiryazevskaya str., Moscow,
127434, Russian Federation*The mass media registration certificate*

ПИ No. ФС 77-78053 of March 6, 2020

Founded in 2003**Publication Frequency:**

Bimonthly

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

Full versions are posted on the site

https://www.elibrary.ru/title_profile.asp?id=8505**EXECUTIVE EDITORS:***I.V. Melnikova**V.I. Markovskaya**A.S. Lavrova**A. Yu. Alipichev***Editors' office address:**58, Timiryazevskaya str., Moscow,
127434, Russian Federation

Tel.: +7 (499) 976-07-27;

E-mail: agroeng@rgau-msha.ru<https://agroengineering.timacad.ru/jour/index>

Printed by APC Publishing LLC

office 8, 1, 45, Dmitrovskoe Ave.,
Moscow, 127550, Russia

Tel.: +7 (499) 976-51-84, (985) 109-44-19

Passed for printing 11.06.2024

Format – 60 84/8

Circulation – 500 copies.

© Federal State Budgetary Establishment
of Higher Education – Russian State
Agrarian University – Moscow Timiryazev
Agricultural Academy, 2024

*Science Editor-in-Chief***Mikhail N. Erokhin**, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor of the Department of Resistance of Materials and Machine Parts, Russian Timiryazev State Agrarian University, (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>, n.erohin@rgau-msha.ru*Deputy Science Editor-In-Chief:***Aleksei S. Dorokhov**, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor, Director Deputy for Science and Organizational Work, Federal State Budgetary Research Institution – Federal Scientific Agroengineering Center (VIM) (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>, dorokhov.vim@yandex.ru**Petr. F. Kubrushko**, Corresponding Member of the Russian Academy of Education, DSc (Ed), Deputy Scientific Editor-in-Chief, Head of the Department of Pedagogy and Psychology of Professional Education, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-2142-1037>, kubrushko@rgau-msha.ru*Members of the Editorial Board:***Nikolay V. Aldoshin**, DSc (Eng), Professor, Federal State Budgetary Research Institution – Federal Scientific Agroengineering Center (VIM) (Moscow, (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>, aldoshin@rgau-msha.ru**Aleksei Yu. Alipichev**, PhD (Ed), Associate Professor, Department of Foreign and Russian Languages, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>, alipichev@rgau-msha.ru**Aleksei S. Apatenko**, DSc (Eng), Associate Professor, Head of the Department of Technical Service of Machinery and Equipment, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>, a.apatenko@rgau-msha.ru**Viktor I. Balabanov**, DSc (Eng), Professor, Head, Department of Irrigation and Construction Machinery, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>, vbabanov@rgau-msha.ru**Vladimir T. Vodyannikov**, DSc (Econ), Professor, Professor of the Department of Organization of Production, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0001-7111-9437>, vtvodyannikov@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**Aleksei V. Zhuravlev**, DSc (Eng), Associate Professor, Vice-Rector for Science and Innovative Development, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), azhuravlev@rgau-msha.ru**Vladimir I. Zaginailov**, DSc (Eng), Professor, Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering named after Academician I.A. Budzko, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>, vzaginailov@rgau-msha.ru**Ivan Yu. Ignatkin**, DSc (Eng), Associate Professor, Professor, Department of Strength of Materials and Machine Parts, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>, ignatkin@rgau-msha.ru**Sergey P. Kazantsev**, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Strength of Materials and Machine Parts, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), kazansev@rgau-msha.ru**Tamara P. Kobozeva**, DSc (Ag), Professor, Federal State Budgetary Research Institution – Federal Scientific Agroengineering Center (VIM) (Moscow, Russia), tkobozeva@rgau-msha.ru**Aleksei I. Kupreenko**, DSc (Eng), Professor, Department of Technological Equipment of Animal Husbandry and Processing Industries, Bryansk State Agrarian University (Kokino, Bryansk region, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-3781-9592>, kupreenkoai@mail.ru**Aleksandr G. Levshin**, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Machinery and Tractor Operation and High Technologies in Plant Cultivation, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0001-8010-4448>, alevshin@rgau-msha.ru**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**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. Storchevov**, DSc (Eng), Professor, Head of the Academician I.F. Borodin Process Automation and Robotisation Department, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>, v.storchevov@rgau-msha.ru**Yuriy Kh. Shogenov**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Senior Research Associate, Head of the "Mechanization, Electrification and Automation" Section, Department of Agricultural Sciences, Federal State Budgetary Institution – the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>, yh1961s@yandex.ru**Igor V. Yudaev**, DSc (Eng), Professor, Department of Electricity Application, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, (Krasnodar, Russia), <https://orcid.org/0000-0002-3435-4873>, etsh1965@mail.ru*International members of the Editorial Board:***Aytzhan M. Abdryov**, DSc (Ed), Professor, S. Seifullin Kazakh Agro Technical University, (Nur-Sultan, Kazakhstan), <https://orcid.org/0000-0002-6852-0235>, abdryov@rambler.ru**Pavel V. Avramenko**, PhD (Eng), Associate Professor, Head of the Department of Standardization, Metrology and Engineering Graphics, Belarusian Agrarian Technical University (Minsk, Belarus), <https://orcid.org/0000-0002-8420-3977>, pavel.auramenka@bsatu.by**Snezhana I. Bozhkov**, PhD (Eng), Professor, Institute of Soil Science, Agrotechnology and Plant Protection named after N. Pushkarov, Agricultural Academy (Sofia, Bulgaria), <https://orcid.org/0000-0002-5702-4893>, bozhkov@mail.bg**Farmon M. Mamatov**, DSc (Eng), Professor, Professor of the Agricultural Mechanization and Service Department, Karshi Institute of Engineering and Economics (Karshi, Republic of Uzbekistan), <https://orcid.org/0000-0002-8916-4225>, fmamatov_50@mail.ru**Frantisek Kumhala**, Professor, Chairman of the Agricultural Machinery and Construction Division of the Czech Academy of Agricultural Sciences, the Bureau Member of the Czech Academy of Agricultural Sciences, Head of the Department of Agricultural Machines of Czech University of Life Sciences (Prague, Czech Republic), <https://orcid.org/0000-0002-7782-6033>, Kumhala@tf-czu.cz**Quang Hoang Duc**, PhD (Chem), Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Centre (Ho Chi Minh, Vietnam), <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>, quanghoang1510@gmail.com

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин, Д.В. Старостин
Роторный сепаратор очесанного зернового вороха
в наклонной камере комбайна..... 4

А.Е. Ушаков
Разработка перфорированного элемента рабочего органа
глубокорыхлителя: топологическая оптимизация..... 11

**В.И. Старовойтов, О.А. Старовойтова,
А.А. Манохина, О.С. Хутинаев, М.И. Пехальский**
Урожайность и качество насыщенного селеном картофеля,
выращенного из клубней 10-15 мм 19

И.А. Дембовский, С.А. Родимцев
Концепция применения адаптивной штанговой
распределительной системы малогабаритного
одноопорного опрыскивателя 27

В.В. Кирсанов, Д.Ю. Павкин, С.В. Кирсанов
Левитирующая доильная платформа «Карусель»:
концептуальные подходы к созданию 37

**Ш.М. Бабаев, Н.В. Алдошин, А.Г. Меликов,
В.Л. Андреев, А.С. Васильев, В.В. Голубев**
Приготовление растворов различной концентрации 43

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

**Е.А. Никитин, М.В. Беляков, И.Ю. Ефременков,
Д.А. Благов, Р.А. Мамедова, А.С. Свиридов, А.Ю. Алипичев**
Бесконтактная оценка питательной ценности
сельскохозяйственных кормов с использованием
оптических технологий 51

Ю.А. Иванов, А.Д. Лукьянов, Д.Ю. Донской, Д.В. Рудой
Моделирование и идентификация элемента Пельтье
TEC1-12706 для применения в малообъемных
биореакторах искусственного ЖКТ рыб..... 58

В.В. Тропин, Р.Е. Кучеренко
Конденсаторная установка для сельской
распределительной сети 0,4 кВ: особенности построения 66

**С.И. Кускарбекова, А.А. Ершов,
О.Ю. Корнякова, К.В. Осинцев**
Тепловой насос и солнечная панель: эксергетический метод
термодинамического анализа..... 73

В.Е. Большеев, А.В. Виноградов, С.В. Крамской, С.И. Белов
Защита электрогенераторов объектов распределенной
генерации от аварийных режимов..... 80

CONTENTS

FARM MACHINERY AND TECHNOLOGIES

V.N. Ozherelev, V.V. Nikitin, D.V. Starostin
Rotary separator of the stripped grain pile
in the inclined chamber of the combine harvester 4

A.E. Ushakov
Designing the perforated element of a subsoiler plate:
topological optimization 11

**V.I. Starovoitov, O.A. Starovoitova,
A.A. Manokhina, O.S. Khutinaev, M.I. Pekhalskiy**
Yield and quality of selenium-rich potatoes grown
from 10-15 mm tubers 19

I.A. Dembovskiy, S.A. Rodimtsev
Application concept of an adaptive boom distribution system
for a small-size single-leg sprayer 27

V.V. Kirsanov, D.Yu. Pavkin, S.V. Kirsanov
Levitating 'Carousel' milking platform: conceptual approaches
to its designing..... 37

**Sh.M. Babaev, N.V. Aldoshin, A.G. Melikov,
V.L. Andreev, A.S. Vasiliev, V.V. Golubev**
Preparing solutions of a various concentration..... 43

POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

**E.A. Nikitin, M.V. Belyakov, I.Yu. Efremenko,
D.A. Blagov, R.A. Mamedova, A.S. Sviridov, A.Y. Alipichev**
Non-contact assessment of the nutritional value
of feed with optical technologies..... 51

Yu.A. Ivanov, A.D. Lukyanov, D.Yu. Donskoy, D.V. Rudoy
Modeling and identification of the Peltier element TEC1-12706
for use in low-volume bioreactors of the artificial gastrointestinal
tract of fish..... 58

V.V. Tropin, R.E. Kucherenko
Condenser installation for a rural distribution network
of 0.4 kV: construction features 66

**S.I. Kuskarbekova, A.A. Ershov,
O.Yu. Kornyakova, K.V. Osintsev**
Heat pump and solar panel: exergy method
of thermodynamic analysis 73

V.E. Bolshev, A.V. Vinogradov, S.V. Kramskoy, S.I. Belov
Protection of electric generators of distributed generation
objects against emergency modes..... 80

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.354.2

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-4-10>

Роторный сепаратор очесанного зернового вороха в наклонной камере комбайна

В.Н. Ожерельев¹, В.В. Никитин^{2✉}, Д.В. Старостин³^{1,2,3} Брянский государственный аграрный университет; Брянская обл., Россия¹ vicoz@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2121-3481>² viktor.nike@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1393-2731>³ dmitry501@bk.ru

Аннотация. Минимизировать травмирование свободного зерна рабочими органами молотилки при очесе растений на корню позволяет его предварительная сепарация. Для этого используется наклонная камера комбайна. С целью оценки сепарирующей способности роторного сепаратора очесанного зернового вороха в зависимости от его конструктивных параметров и режима работы устройства проведен эксперимент на озимой пшенице сорта Московская 56 влажностью 12%. Разработанная экспериментальная установка включала в себя 6 поперечных сетчатых роторов диаметром 170 мм. В первой серии опытов интенсивность сепарации определяли при расстоянии между прутковыми кольцами ротора 6, 8, 10, 12 и 14 мм. На втором этапе интенсивность сепарации устанавливали с учетом изменения окружной скорости поверхности роторов с 1 до 3 м/с, с шагом 0,5. Во всех вариантах опыта угол наклона корпуса экспериментальной установки составлял 45°, подача очесанного зернового вороха принимала значения 1 кг/с. В результате проведенных лабораторных исследований установлено, что интенсивность сепарации свободного зерна повышается с увеличением расстояния между прутковыми кольцами устройства и снижением окружной скорости роторов. В первом случае зависимость линейная, а во втором – полином второй степени. Максимальный проход свободного зерна (100%-ная сепарация) соответствует окружной скорости роторов 1 м/с и расстоянию между прутковыми кольцами 14 мм. Резервами роста производительности роторного сепаратора являются увеличение диаметра роторов до 300 мм и снижение их окружной скорости до 2...2,5 м/с. Изменение указанных параметров на 30...35% сохраняет на приемлемом уровне транспортирующую способность наклонной камеры комбайна.

Ключевые слова: роторный сепаратор, сепаратор очесанного зернового вороха, сепарация, интенсивность сепарации, наклонная камера комбайна, проход свободного зерна

Для цитирования: Ожерельев В.Н., Никитин В.В., Старостин Д.В. Роторный сепаратор очесанного зернового вороха в наклонной камере комбайна // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 3. С. 4-10. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-4-10>

ORIGINAL ARTICLE

Rotary separator of the stripped grain pile in the inclined chamber of the combine harvester

V.N. Ozherelev¹, V.V. Nikitin^{2✉}, D.V. Starostin³^{1,2,3} Bryansk State Agrarian University; Bryansk region, Russia¹ vicoz@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2121-3481>² viktor.nike@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1393-2731>³ dmitry501@bk.ru

Abstract. Preliminary separation minimizes damage of free grain by the working parts of the thresher when stripping standing crops. For this purpose, it is advisable to use the inclined chamber of a combine harvester. The purpose of this study is to evaluate the separating ability of a rotary separator depending on its design parameters and operating mode. The research included two stages. In the first series of experiments, the distance between the rod

rings was changed (6; 8; 10; 12, and 14 mm), in the second series: the peripheral speed of the rotor surface (1 to 3 m/s). Experimental studies were carried out on winter wheat of the “Moskovskaya 56” variety with a moisture content of 12%. The inclination angle of the experimental installation body in all variants of the experiment was 45°, and the supply of stripped grain heap was 1 kg/s. Based on the results of laboratory studies, it was established that the intensity of separation of free grain increases as the distance between the rod rings of the device increases and the peripheral speed of the rotors decreases. The maximum passage of loose grain (100%) corresponds to a peripheral speed of the rotors of 1 m/s and a distance between the rod rings of 14 mm. The reserves for increasing the productivity of a rotary separator are an increase in the diameter of the rotors and a decrease in their peripheral speed. When these parameters change by 30 to 35%, the transport capacity of the inclined chamber remains at an acceptable level.

Keywords: separation of the stripped grain pile, inclined chamber of the combine harvester, sieve plate of the inclined chamber of the combine harvester, rotary separator, loose grain passage

For citation: Ozherelev V.N., Nikitin V.V., Starostin D.V. Rotary separator of the stripped grain pile in the inclined chamber of the combine harvester. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2024;26(3):4-10. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-4-10>

Введение

Обострение конкуренции на мировом рынке зерна стимулирует ученых к изысканию вариантов механизации уборки, альтернативных традиционным [1, 2]. Перспективным направлением совершенствования процесса механизированной уборки зерна является его очес на корню [3-6]. Его применение позволяет уменьшить энергозатраты и обеспечить снегозадержание остающимися на поле после очеса стеблями, что является особенно значимым в зоне сухих степей – например, в Северном Казахстане [7-9].

Уборка зерновых культур очесом растений на корню широко не распространена, поскольку излишнее механическое воздействие молотильного аппарата на свободное зерно, присутствующее в очесанном ворохе до 80%, приводит к повышению степени его дробления и иным повреждениям. Также велики непроизводительные затраты энергии, не обусловленные потребностями технологического процесса.

Предварительная сепарация вороха с выделением из него свободного зерна и направление его в систему очистки комбайна минуя молотильный аппарат позволяют решить проблему дробления зерна [10-12]. В результате многолетних исследований удалось добиться приемлемых результатов по выделению свободного зерна на решетчатом днище наклонной камеры комбайна [13]. Отметим, что при данном конструктивном исполнении наклонной камеры практически исчерпаны резервы для интенсификации процесса сепарации очесанного вороха, поскольку имеет место сжатие порции вороха, перемещаемой скребком, вследствие ее трения по поверхности перемычек между отверстиями решетчатого днища.

Авторами выдвинута гипотеза: ускорить сепарацию можно вертикальным воздействием на движущийся массив вороха, как бы разрывая его и рассредоточивая

на отдельные фрагменты посредством ряда поперечных вращающихся сетчатых роторов, перемещающих ворох своими верхними частями [14].

Цель исследований: экспериментальная оценка принципиальной работоспособности предложенного устройства, выявление зависимости интенсивности сепарации от его конструктивных параметров и режима работы.

Материалы и методы

Объектом исследований является роторный сепаратор (рис. 1), выполненный в виде ряда поперечных сетчатых роторов 3 (рис. 2), смонтированных в корпусе наклонной камеры комбайна вместо скребкового транспортера. Каждый ротор включает в себя боковые диски, соединенные по образующим цилиндра зубчатыми радиальными планками 2, в радиальных прорезях которых смонтированы прутковые кольца 4, образующие вместе с планками 2 цилиндрическую сетчатую поверхность (рис. 2). Расстояние b между кольцами 4 может быть изменено путем удаления некоторых из них.

Предметом исследований является сепарирующая способность роторного сепаратора, ее зависимость от его конструктивных параметров и режима работы.

Роторный сепаратор работает следующим образом. Очесанный ворох 7 поступает на верхнюю часть нижнего ротора 3, при вращении которого он перебрасывается на верхнюю поверхность следующего ротора, на котором процесс динамического взаимодействия повторяется вновь (рис. 1). При этом в результате периодического подбрасывания ворох рассредоточивается, вследствие чего содержащееся в нем свободное зерно 8 просыпается вниз сквозь сетчатые поверхности роторов 3 на шнек 4, который подает его на транспортную доску 9 системы очистки.

Более крупные компоненты *10* очесанного вороха (недомолоченные колосья и соломины) подхватываются наружными кромками радиальных планок *6* и, пройдя поверхности всех роторов *3*, поступают на домолот в зазор между барабаном *5* и подбарабаньем.

Для реализации цели исследований была разработана экспериментальная установка, включающая в себя шесть поперечных сетчатых роторов *6* (рис. 3). Диаметр ротора по прутковым кольцам *8* составлял 170 мм, а расстояние *b* между кольцами могло принимать значения 6, 8, 10, 12 и 14 мм. Такая дифференциация расстояния между кольцами обеспечивалась путем использования сменных радиальных планок *7* с соответствующим шагом зубьев и прорезей на их наружных кромках (рис. 3).

Частота вращения роторов регулировалась за счет использования в системе электропривода частотного преобразователя Веспер Е2-8300. Окружная скорость поверхности роторов принимала значения 1; 1,5; 2; 2,5; 3 м/с. Секундная подача вороха на верхнюю часть нижнего ротора соответствовала пропускной

способности молотилки серийного комбайна КЗС-1218 с ее пересчетом на ширину экспериментальной установки и составляла 1 кг/с.

В нижней части корпуса элеватора был смонтирован пластиковый поддон, в котором концентрировался проход вороха. Его сход с верхнего ротора накапливался в соответствующей емкости.

Во всех вариантах опыта использовался очесанный ворох пшеницы сорта Московская 56 влажностью порядка 12%. Угол наклона корпуса экспериментальной установки оставался неизменным и составлял 45°. Каждый вариант опыта выполнялся в пятикратной повторности.

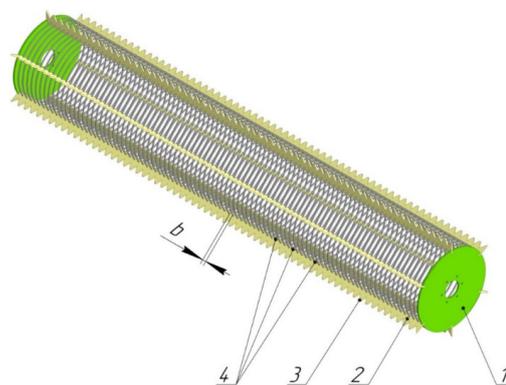


Рис. 2. Общий вид сетчатого ротора:

- 1 – боковой диск; 2 – радиальная планка;
- 3 – наружная кромка планки; 4 – кольца прутковые

Fig. 2. General view of the mesh rotor:

- 1 – side disc; 2 – radial bar;
- 3 – outer edge of the bar; 4 – bar rings

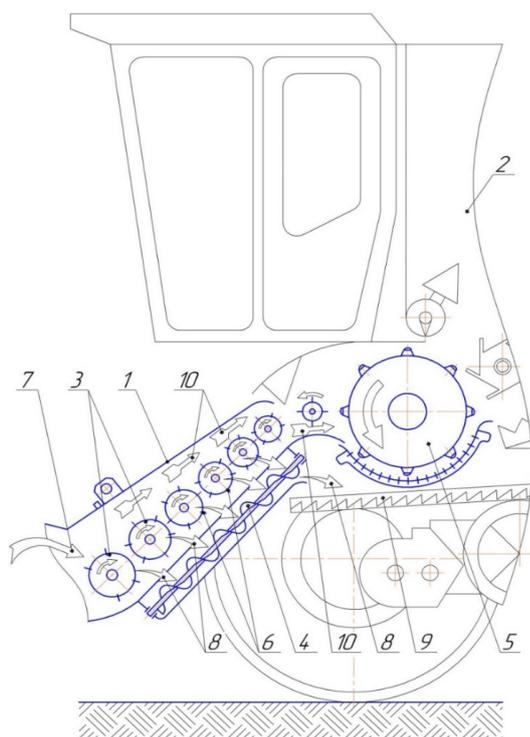


Рис. 1. Принципиальная схема сепаратора очесанного вороха ротационного типа [13]:

- 1 – наклонная камера; 2 – молотилка комбайна;
- 3 – сетчатые роторы; 4 – шнек; 5 – барабан;
- 6 – радиальная планка; 7 – очесанный ворох;
- 8 – свободное зерно; 9 – транспортная доска;
- 10 – недомолоченные колосья

Fig. 1. Schematic diagram of a rotary-type stripped heap separator:

- 1 – inclined chamber; 2 – combine thresher; 3 – mesh rotors;
- 4 – auger; 5 – drum; 6 – radial bar; 7 – stripped pile;
- 8 – loose grain; 9 – transport board; 10 – half-threshed ears

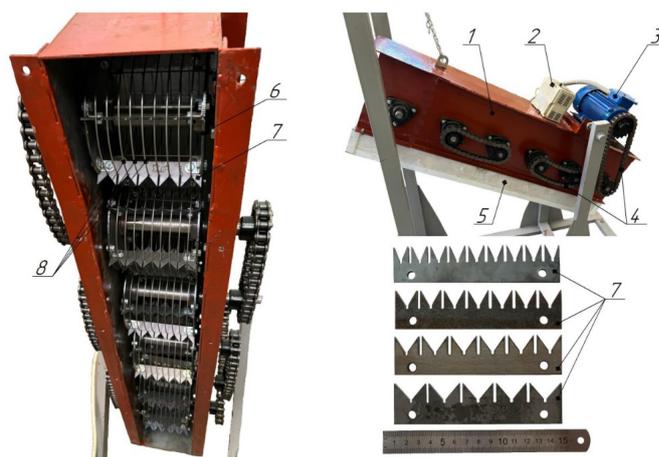


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки:

- 1 – корпус; 2 – преобразователь частоты Веспер Е2-8300;
- 3 – электродвигатель; 4 – цепная передача;
- 5 – улавливающий поддон для сбора проходовой фракции;
- 6 – ротор; 7 – радиальная планка; 8 – кольцо прутковое

Fig. 3. General view of the experimental installation:

- 1 – housing; 2 – Vesper frequency converter E2-8300;
- 3 – electric motor; 4 – chain transmission;
- 5 – trapping tray for collecting the feed fraction;
- 6 – rotor; 7 – radial bar; 8 – bar ring

Результаты и их обсуждение

В целом результаты эксперимента подтвердили работоспособность роторного сепаратора. Если сопоставить их с результатами, полученными при сепарации очесанного вороха на решетчатом днище наклонной камеры, то разница является несущественной (табл.). Это обусловлено оптимальным размером отверстий решетчатого днища наклонной камеры комбайна, обеспечивающим максимальный проход свободного зерна. У роторного сепаратора размеры барабана (шаг между прутками и диаметр) были взяты произвольно. Их дальнейшее уточнение должно обеспечить большую сепарирующую способность в сравнении с решетчатым днищем, однако для этого необходимо провести дополнительные лабораторные эксперименты.

Результаты, обработанные в программе *Excel*, свидетельствует о наличии тесной связи расстояния между кольцами ротора и прохода зерна, коэффициент детерминации $R^2 = 0,989$ (рис. 4а). При этом связь между параметрами адекватно аппроксимируется линейным уравнением регрессии $\Pi_{\text{зер}} = 1,12 \cdot b + 62$, где b – расстояние между кольцами ротора, мм.

Характер зависимости прохода зерна от ширины отверстий в днище наклонной камеры (рис. 4б) адекватно описывается полиномом второй степени¹: $\Pi_{\text{зер}} = -0,764 \cdot b_{\text{отв}}^2 + 17,489 \cdot b_{\text{отв}} - 22,413$, где $b_{\text{отв}}$ – ширина отверстий решетчатого днища, мм, тогда как рассмотренное выше уравнение регрессии для роторного сепаратора является линейным (рис. 4а). Здесь формальные математические отличия отражают качественную разницу, характерную

Величина прохода зерна сквозь сетчатые роторы и решетчатое днище наклонной камеры, %

Таблица

Table

Amount of grain flowing through the mesh rotors and the sieve plate of the inclined chamber, %

Роторы / Rotors		Решетчатое днище / Sieve plate	
Расстояние между кольцами, мм <i>Distance between rings, mm</i>	Проход зерна, % <i>Grain passage, %</i>	Ширина отверстий, мм <i>Hole width, mm</i>	Проход зерна % <i>Grain passage, %</i>
6	68,75	6	55,04
8	71,08	8	68,59
10	73,26	10	76,14
12	74,84	12	77,47
14	78,07	-	-
Среднее, % / Average value	71,98	Среднее, % / Average value	69,31

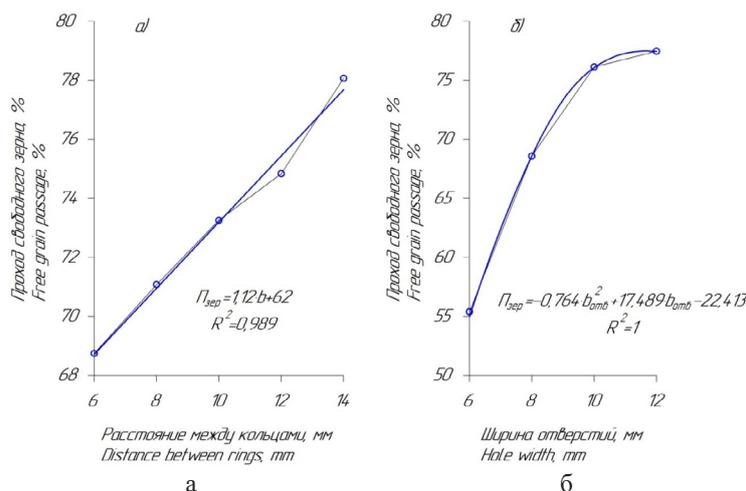


Рис. 4. Зависимость прохода зерна от расстояния между кольцами ротора (а) и ширины отверстий решетчатого днища наклонной камеры (б)

Fig. 4. Relationship between grain passage and the distance between the rotor rings (a) and the width of the holes in the sieve plate of the inclined chamber (b)

¹ Никитин В.В. Совершенствование технологической схемы зерноуборочного комбайна и параметров его рабочих органов: Дис. ... д-ра техн. наук. Брянск, 2021. 350 с.

для протекания указанных процессов. На решетчатом днище наклонной камеры истечение зерна происходит из сжимаемого силами трения объема, тогда как роторы рассредоточивают поступающий на них ворох.

Существенное влияние на процесс сепарации оказывает и скорость движения вороха. Графическая интерпретация двух вариантов зависимости при одинаковых уровнях варьирования скорости 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 м/с, за исключением варианта $v = 0,5$ м/с, имевшего место только при работе с решетчатым днищем наклонной камеры, представлена на рисунке 5. В первом случае (рис. 5а) зависимость прохода зерна сквозь отверстия решетчатого днища наклонной камеры размером 160×8 мм от скорости подачи вороха имеет вид²:

$$\Pi_{\text{зер}} = -5,148 \cdot v_{\text{тр}}^2 + 4,426 \cdot v_{\text{тр}} + 99,847, \quad (1)$$

где $v_{\text{тр}}$ – скорость движения скребков наклонного транспортера, м/с.

Во втором случае (рис. 5б) зависимость прохода свободного зерна через роторный сепаратор от скорости подачи вороха (окружной скорости поверхности роторов) аппроксимирована полиномом:

$$\Pi_{\text{зер}} = -7,018 \cdot v_p^2 + 17,363 \cdot v_p + 89,5, \quad (2)$$

где v_p – окружная скорость поверхности роторов, м/с.

Структура выражений (1) и (2) в значительной степени является подобной. Это свидетельствует о том, что несмотря на принципиальные конструктивные отличия, реализуется технологический процесс, основанный на подобных физических принципах. Если предельно «огрубить» ситуацию, оставив

пока без внимания предложенную ранее гипотезу о послыном соскальзывании зерен в отверстия решетчатого днища, то за основу можно было бы принять свободное (гравитационное) падение тела в вязкой среде, то есть некий объем, сформированный в виде вертикального столба с поперечным сечением, меньшим ширины отверстий в решетчатом днище, падает вниз, притормаживаемый со всех сторон трением среды. В этом случае за период времени t он совершает вертикальное перемещение h , описываемое выражением:

$$h = \frac{g \cdot t^2}{2 \cdot \mu}, \quad (3)$$

где μ – коэффициент «вязкости» среды.

Поскольку время t перемещения по решетчатому днищу скребка обратно пропорционально его скорости v , то увеличение последнего параметра процесса приводит к соответствующему уменьшению времени сепарации, пропорционально квадрату которого уменьшается величина вертикального перемещения сепарируемого объема сквозь соответствующее отверстие. Следует понимать, что такой принцип движения характерен для части сепарируемого объема, тогда как остальная его масса соскальзывает затем в «полуворонку», сформированную гравитационным выпадением основного «столба» зерна [14].

Поскольку структуры выражений (1) и (2) в значительной степени подобны, то представляется адекватным распространить (хотя бы частично) описанный выше принцип сепарирования и на роторный сепаратор, то есть основу процесса и в этом случае должно составлять гравитационное выпадение

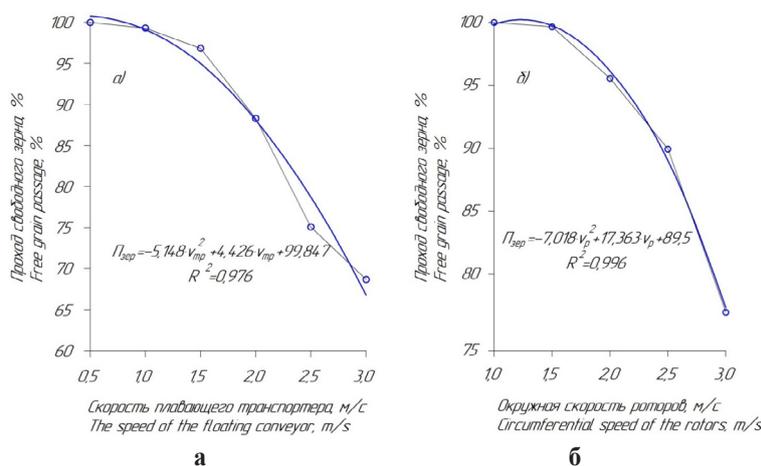


Рис. 5. Зависимость прохода зерна от скорости подачи вороха:
 а) решетчатое днище наклонной камеры; б) роторный сепаратор

Fig. 5. Relationship between grain passage and the feed speed of the heap:
 a) sieve plate of the inclined chamber; b) rotary separator

² Никитин В.В. Совершенствование технологической схемы зерноуборочного комбайна и параметров его рабочих органов: Дис. ... д-ра техн. наук. Брянск, 2021. 350 с.

вертикальных слоев зерна между прутковыми кольцами роторов (рис. 1, 2). Кроме того, при работе роторного сепаратора определенную роль играет центробежная сила, сообщаемая компонентам вороха вращающимися поверхностями роторов. Так, при диаметре ротора 170 мм и окружной скорости 3 м/с центробежная сила, возникающая на внешней кромке ρ радиальной планки δ (рис. 2), почти в 10 раз превышает силу тяжести, что вызывает значительный вертикальный отброс компонентов сепарируемого вороха. С одной стороны, это явление можно считать положительным, поскольку оно способствует вертикальному рассредоточению вороха, а с другой стороны, оно препятствует гравитационному проскальзыванию значительной части зерен между прутковыми кольцами роторов. С этой точки зрения было бы целесообразно увеличить диаметр роторов с одновременным уменьшением окружной скорости их поверхностей. Так, при уменьшении окружной скорости до 2 м/с и увеличении диаметра роторов до 0,3 м величина центробежной силы только в 2,7 раза превысит силу тяжести. Такой разницы будет достаточно для эффективного рассредоточения сепарируемого слоя вороха, но это сведет к минимуму излишний разброс компонентов.

Уменьшение окружной скорости роторов не должно отрицательно отразиться на транспортирующей способности наклонной камеры. Дело в том, что

в результате сепарации на выходе остается 15...20% исходной массы вороха, что соответствует 40...60% исходного объема. В связи с этим уменьшение окружной скорости роторов до 65...70% от максимальной сохраняет большую долю транспортирующей способности наклонной камеры по сравнению с долей остатка исходного вороха по объему на выходе из нее.

Выводы

1. При принятых конструктивно-кинематических параметрах (диаметр роторов – 170 мм, расстояние между прутковыми кольцами – 14 мм, окружная скорость – 3 м/с) ротационный сепаратор обеспечивает эффективность сепарации, сопоставимую с ее осуществлением на решетчатом днище наклонной камеры.

2. Проход зерна в роторном сепараторе зависит как от расстояния между прутковыми кольцами, так и от окружной скорости роторов. В первом случае зависимость является линейной, а во втором случае она представляет собой полином второй степени.

3. Резервами роста производительности роторного сепаратора являются увеличение диаметра роторов до 300 мм и снижение их окружной скорости до 2...2,5 м/с. При изменении указанных параметров на 30...35% транспортирующая способность наклонной камеры сохраняется на приемлемом уровне.

Список источников

1. Lachuga Yu.F., Bur'yanov A.I., Pakhomov V.I., Chervyakov I.V. Adaptation of threshing devices to physical and mechanical characteristics of harvested crops. *Russian Agricultural Sciences*. 2020;46(2):198-201. <https://doi.org/10.3103/S1068367420020111>
2. Федин М.А., Кухарев О.Н., Кухмазов К.З., Семов И.Н., Федина Т.О. Результаты лабораторных исследований по определению оптимальных конструктивных и режимных параметров ротора // *Нива Поволжья*. 2018. № 4 (49). С. 169-174. EDN: VQCIJZ
3. Бурьянов М.А., Бурьянов А.И., Червяков И.В., Горячев Ю.О. Разработка и совершенствование методов обесчуживания технологии комбайновой уборки зерновых колосовых культур очесом // *Вестник аграрной науки Дона*. 2017. № 2. С. 59-72. EDN: ZVKDAZ
4. Buryanov A.I., Chervyakov I.V. Using combines for cleaning grain crops by non-traditional technologies. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019;59(3):27-32. <https://doi.org/10.35633/INMATEH-59-03>
5. Савин В.Ю. Зависимость степени дробления зерна пшеницы от частоты вращения очесывающего устройства // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2018. № 3. С. 98-102. <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2018.3.98>
6. Савин В.Ю. Исследование очесывающего аппарата устройства для уборки зерновых культур как колебательной системы // *Инженерные технологии и системы*. 2021. Т. 31, № 3. С. 403-413. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.403-413>

References

1. Lachuga Yu.F., Buryanov A.I., Pakhomov V.I., Chervyakov I.V. Adaptation of threshing devices to physical and mechanical characteristics of harvested crops. *Russian Agricultural Sciences*. 2020;46 (2):198-201. <https://doi.org/10.3103/S1068367420020111>
2. Fedin M.A., Kuharev O.N., Kuhmazov K.Z., Semov I.N., Fedina T.O. The results of laboratory tests on the determination of the optimal constructive and operating parameters of rotor. *Niva Povolzhya*. 2018;4(49):169-174. (In Russ.)
3. Buryanov A.I., Chervyakov I.V., Goryachev Yu.O. Developing and improving the technology of combine harvesting of cereals by combing. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2017;38:59-72. (In Russ.)
4. Buryanov A.I., Chervyakov I.V. Using combines for cleaning grain crops by non-traditional technologies. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019;59(3):27-32. <https://doi.org/10.35633/INMATEH-59-03>
5. Savin V.Yu. The dependence of the degree of damaging of wheat grain on the rotational velocity of rotary-comb dresser. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2018;3:98-102. (In Russ.) <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2018.3.98>
6. Savin V.Yu. Study of a stripper header for grain harvesting as a vibrating system. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*. 2021;31(3):403-413. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.403-413>
7. Chaplygin M.E., Pekhalskiy I.A., Tronev S.V. The choice of combine harvesters and their adapters for the conditions of Northern Kazakhstan. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):74-76.

7. Chaplygin M.E., Pekhalskiy I.A., Tronev S.V. The choice of combine harvesters and their adaptors for the conditions of Northern Kazakhstan. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):74-76.

8. Жалнин Э.В. Уборка с очесом на корню: за и против // *Сельский механизатор*. 2013. № 8. С. 10-12. EDN: RCFKAZ

9. Astafyev V.L., Golikov V.A., Zhalnin E.V., Pavlov S.A., Pekhalskiy I.A. Strategy of technical support of grain harvesting operations in Republic of Kazakhstan. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):46-51. https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=202002246521566465

10. Наклонная камера зерноуборочного комбайна: SU1687078 A1 / А.В. Дементьев, В.И. Скорик, Б.К. Пастухов, Ж.С. Садыков, Б.И. Андрусенко. Заяв. № 4689013 от 12.05.1989; опубл. 30.10.1991. EDN: APWJMQ

11. Ozherelyev V.N., Nikitin V.V., Belous N.M., Torikov V.V. Perspectives of grain pile separation before it enters the thresh-ER. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2018;7(2.13):114-116. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.13.11622>

12. Ожерельев В.Н., Никитин В.В. Сепарация очесанного зернового вороха на решетчатом днище наклонной камеры комбайна // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 3. С. 35-40. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-35-40>

13. Наклонная камера зерноуборочного комбайна: Патент RU2809100 C1, A01D61/00; A01D41/12 / В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин. Заяв. № 2023105834 от 13.03.2023; опубл. 16.12.2023. EDN: CCEVZM

14. Ожерельев В.Н., Никитин В.В. Теория и практика сепарации очесанного зернового вороха на наклонной решетчатой поверхности // *Вестник НГИЭИ*. 2018. № 7 (86). С. 58-67. EDN: XRZDZJ

8. Zhalnin E.V. Cleaning with feathering on the vine: pros and cons. *Selskiy Mekhanizator*. 2013;8:10-12. (In Russ.).

9. Astafyev V.L., Golikov V.A., Zhalnin E.V., Pavlov S.A., Pekhalskiy I.A. Strategy of Technical Support of Grain Harvesting Operations in Republic of Kazakhstan. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):4651. https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=202002246521566465

10. Dementiev A.V., Skorik V.I., Pastukhov B.K., Sadykov Zh.S., Andrusenko B.I. Inclined chamber of grain combine: SU1687078 SSSR. No. 4689013/15, 1991. (In Russ.).

11. Ozherelyev V.N., Nikitin V.V., Belous N.M., Torikov V.V. Perspectives of grain pile separation before it enters the thresh-ER. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2018;7(2.13):114-116. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.13.11622>

12. Ozherelev V.N., Nikitin V.V. Grain heap separation at the grates of a combine feederhouse. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(3):35-40. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-35-40>

13. Inclined chamber of a grain combine: Pat. RU2809100 C1, A01D61/00; A01D41/12. Application No. 2023105834, 2023. (In Russ.)

14. Ozherelev V.N., Nikitin V.V. Theory and practice of separation of grain heap in an inclined slatted surface. *Bulletin NGIEI*, 2018;6(85):58-67. (In Russ.).

Информация об авторах

Виктор Николаевич Ожерельев¹, д-р с.-х. наук, профессор; vicoz@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2121-3481>

Виктор Васильевич Никитин^{2,3}, д-р техн. наук, доцент; viktor.nike@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1393-2731>

Дмитрий Владимирович Старостин³, аспирант; dmitry501@bk.ru

^{1,2,3}Брянский государственный аграрный университет; 243365, Российская Федерация, Брянская обл., Выгоничский р-н, с. Кокино, ул. Советская, 26

Вклад авторов

В.Н. Ожерельев – выполнил теоретические исследования и подготовил рукопись;

В.В. Никитин – подготовил и выполнил экспериментальные исследования и участвовал в формулировании теоретической гипотезы;

Д.В. Старостин – литературный анализ, обработка результатов исследования.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 08.01.2024, после рецензирования и доработки 28.03.2024; принята к публикации 15.04.2024

Author Information

Viktor N. Ozherelev¹, DSc (Ag), Professor vicoz@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2121-3481>

Viktor V. Nikitin^{2,3}, DSc (Eng), Associate Professor viktor.nike@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1393-2731>

Dmitriy V. Starostin³, postgraduate student dmitry501@bk.ru

^{1,2,3}Bryansk State Agrarian University; 2b Sovetskaya Str., Kokino, Vygonichi district, Bryansk region, 243365, Russian Federation

Author Contribution

V.N. Ozherelev – theoretical investigation, writing – original draft preparation;

V.V. Nikitin – experimental research, formulation of the theoretical hypothesis;

D.V. Starostin – literature review, processing the research results.

Conflict of interests

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

Received 08.01.2024, Revised 28.03.2024, Accepted 15.04.2024

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.3-1/-9

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-11-18>

Разработка перфорированного элемента рабочего органа глубокорыхлителя: топологическая оптимизация

А.Е. Ушаков

Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А.К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета; г. Новочеркасск, Россия

sashka-ushakov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3649-9945>

Аннотация. Разработка или модернизация почвообрабатывающей техники обусловлены стремлением увеличить срок ее службы, повысить ее эффективность и уменьшить негативное воздействие на почву. С целью повышения эффективности сельскохозяйственных конструкций проведена оптимизация рабочего органа глубокорыхлителя с применением топологического и параметрического моделирования. В качестве базовой модели выступала пластина глубокорыхлителя массой 1,925 кг с максимальными напряжениями 176,8 МПа. У пластины определили зоны, оказывающие наименьшее влияние на жесткость и прочность конструкции. При проектировании модернизированной пластины учитывались следующие параметры: коэффициент запаса по пределу прочности – 1,5...2; максимальное снижение массы – не более 50%, минимальное снижение – не менее 10%; пластина изготавливается методом лазерной резки из стали марки 09Г2С или 30ХГСА. Считали, что технологический процесс изготовления, прочностные и износостойкие характеристики и стоимость были не ниже базового варианта. Алгоритм, разработанный на языке системного моделирования SysML, позволил систематизировать процесс, установить функциональные и нефункциональные требования и ограничения. С использованием системы автоматического проектирования Autodesk Fusion 360 по данному алгоритму разработана рациональная геометрическая форма почвообрабатывающей пластины глубокорыхлителя массой 1,585 кг и максимальными напряжениями 169,5 МПа. Топологическая оптимизация уже на второй итерации привела к снижению массы детали на 17,67% при сохранении прочностных и износостойких характеристик. Путем определения толщины элемента установлено соответствие требованию по коэффициенту запаса прочности. Из стали 09Г2С изготовлены образцы пластин глубокорыхлителя толщиной 16 мм. Для подтверждения рассчитанных прочностных характеристик необходимо провести лабораторные и полевые испытания прототипа облегченной конструкции.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, параметрическое моделирование, почвообрабатывающая пластина, рабочий орган глубокорыхлителя, прочность конструкции, язык системного моделирования, SysML, Autodesk Fusion 360

Финансирование: Исследование проводилось при поддержке и финансировании Фонда содействия инноваций в рамках договора «Старт-1». Договор 4290ГС1/70521 от 15.11.2021 г. Вн. код 0070521, заявка (С1-106429).

Для цитирования: Ушаков А.Е. Разработка перфорированного элемента рабочего органа глубокорыхлителя: топологическая оптимизация // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, № 3. С. 11-18. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-11-18>

ORIGINAL ARTICLE

Designing the perforated element of a subsoiler plate: topological optimization

A.E. Ushakov

Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov – Branch of Don State Agrarian University; Novocherkassk, Russia

sashka-ushakov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3649-9945>

Abstract. The development or modernization of tillage machinery aims to increase its service life and efficiency and reduce the negative impact on the soil. In order to increase the efficiency of agricultural machines, the author attempted to optimize the working element of a subsoiler – its plate – through topological and parametric modeling.

The subsoiler plate with the mass of 1.925 kg with maximum stresses 176.8 MPa was used as a base model. The author determined the plate zones having the least influence on the stiffness and strength of the implement structure. When designing the modernized plate, the following parameters were taken into account: safety factor on the ultimate strength – 1.5 to 2; maximum mass reduction – less than 50%, minimum reduction – more than 10%. The plate is manufactured by laser cutting from 09G2S or 30XGSA steel. The manufacturing process, strength and wear characteristics, and cost were considered to be not lower than the base variant. The algorithm developed in the SysML system modeling language helped systematize the process and establish functional and non-functional requirements and limitations. Using Autodesk Fusion 360 automatic design system, the author developed the rational geometric shape of the soil cultivation plate of the subsoiler with a mass of 1.585 kg and a maximum stresses of 169.5 MPa according to this algorithm. Topological optimization resulted in a 17.67% reduction in the part's weight at the second iteration while maintaining strength and wear resistance characteristics. By determining the thickness of the element, the author established compliance with the safety factor requirement. Samples of subsoiler plates with thickness of 16 mm were made of 09G2S steel. To confirm the calculated strength characteristics it is necessary to carry out laboratory and field tests of the prototype of the lightweight design.

Keywords: topological optimization, parametric modeling, tillage plate, working tool of a subsoiler, strength of the structure, system modeling language, SysML, Autodesk Fusion 360

Funding: The research was supported and funded by the Innovation Promotion Fund under the Start-1 contract. Contract 4290GS1/70521 dated 15.11.2021, code 0070521, application (C1-106429).

For citation: Ushakov A.E. Designing the perforated element of a subsoiler plate: topological optimization. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2024;26(3):11-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-11-18>

Введение

В Южном федеральном округе факторам деградации подвержены свыше 22% земель сельскохозяйственного назначения, большая часть из которых – это плодородные участки¹. Снизить негативные последствия позволяет переход от традиционных технологий к минимальным (mini-till, strip-till, no-till) с помощью специальных орудий – таких, как глубокорыхлители, сеялки точного высева и др.

В российском парке 73,8% техники эксплуатируется более 10 лет, при этом оснащённость почвообрабатывающей навесной техникой за последние 20 лет снизилась в 4 раза, что привело к увеличению нагрузок и амортизации².

Одними из способов снижения частоты ремонта и повышения срока службы сельскохозяйственной навесной техники являются модернизация и разработка новых рабочих органов или отдельных почвообрабатывающих элементов. При этом для увеличения производительности и качества работы орудия, сокращения затрат и снижения энергоёмкости процесса должны применяться технологические инновации.

Топологическая оптимизация, как компонент разработки или модернизации конструкции,

является относительно новым в процедуре проектирования. Несмотря на это её применяют во множестве отраслей как один из самых инновационных способов повышения качества элементов [1-3]. Этот метод направлен на достижение оптимального распределения материала с учетом функциональных требований и ограничений, что в свою очередь приводит к снижению массы и повышению эффективности работы техники. Учитывая специфику почвообрабатывающей техники, особое внимание необходимо уделять параметрическому моделированию, играющему ключевую роль в процессе оптимизации.

В случае модернизации или разработки рабочего органа глубокорыхлителя с учетом установленных функциональных и нефункциональных требований выбирается элемент для улучшения: например, почвообрабатывающие пластины, уширители, наральник, плоскорез, защитная пластина, стойка или срезной болт (рис. 1).

При помощи топологической оптимизации авторами предложено адаптировать форму почвообрабатывающих пластин с учетом заданных параметров. На фоне современных требований к сельскохозяйственной технике данные исследования имеют практическую значимость, направленную на оптимизацию конструкции с учетом требований эффективности и прочности.

Цель исследований: оптимизация базовой модели почвообрабатывающей пластины с использованием топологического подхода.

¹ Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2020 году. М.: ФГБНУ Росинформагротех», 2021. 404 с.

² Бурак П.И., Голубев И.Г., Федоренко В.Ф., Мишуев Н.П., Гольягин В.Я. Состояние и перспективы обновления парка сельскохозяйственной техники: Научный аналитический обзор. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. 152 с.

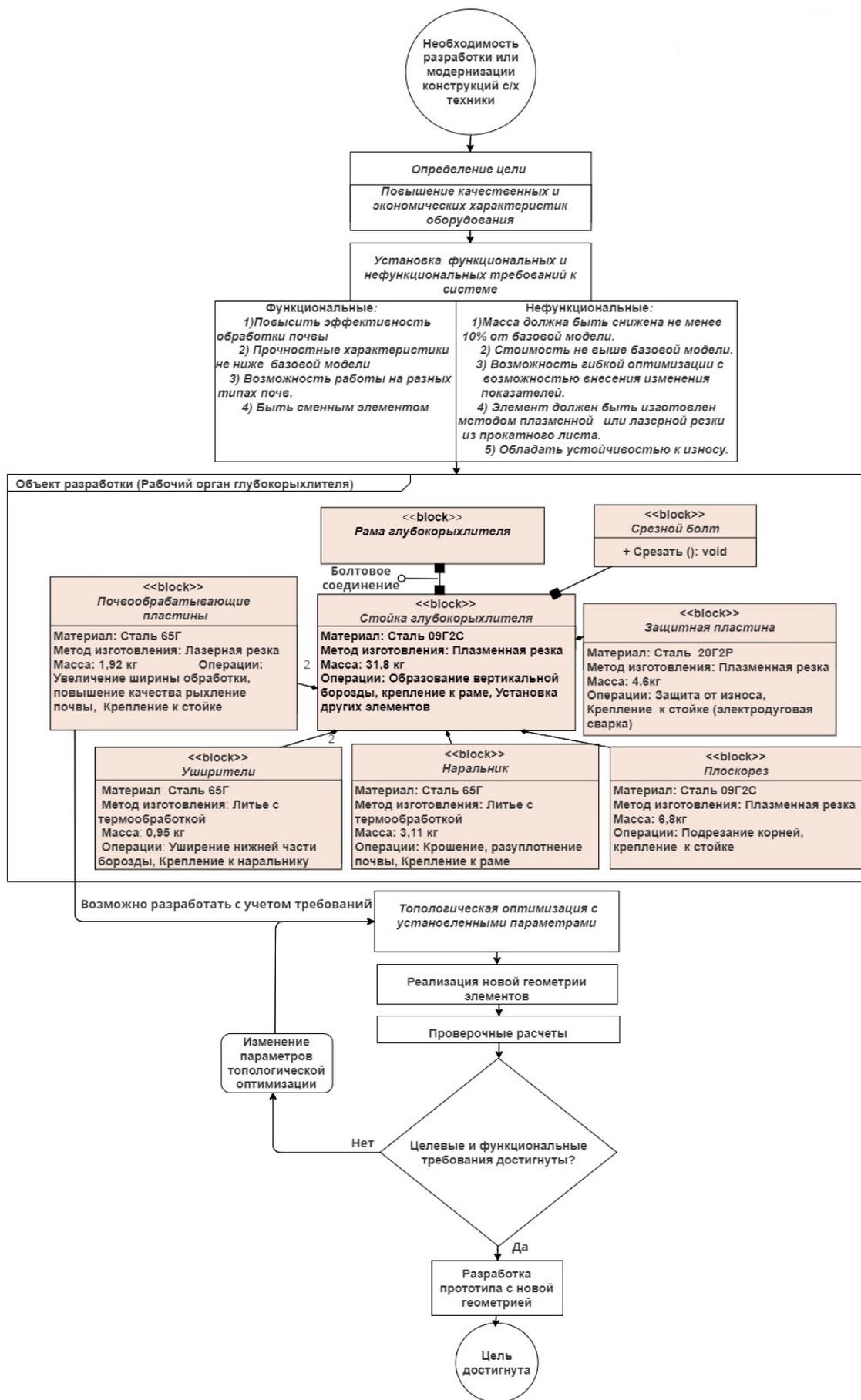


Рис. 1. Алгоритм оптимизации конструкции рабочего органа глубокорыхлителя

Fig. 1. Algorithm for optimizing the design of a subsoiler plate

Материалы и методы

Одним из возможных способов повышения эффективности обработки почвы при снижении металлоемкости конструкции может служить перфорация рабочих элементов почвообрабатывающей техники, смоделированная посредством топологической оптимизации. Качество перфорации, и как следствие – прочность конструкции, зависят от методов и способов ее реализации. Топологическая оптимизация позволяет выделить зоны в конструкции, оказывающие минимальное влияние на прочность и жесткость рабочего органа.

Алгоритм оптимизации рабочего органа глубокорыхлителя разработан на языке системного моделирования SysML, в котором для описания используются блоки (рис 1). В результате оптимизации определяется новая геометрия рабочего органа и производятся проверочные расчеты. Если требования не достигнуты, процесс возвращается к этапу топологической оптимизации для корректировки параметров. Если требования достигнуты, процесс переходит к следующему этапу – созданию и дальнейшим испытаниям прототипа.

Эффективность решения задачи по оптимизации массы и формы разработанной почвообрабатывающей пластины зависит от адекватности перехода от реальной конструкции к разработанной модели и соответствующей интерпретации полученных в результате исследования данных. Процесс создания модели предполагает принятие некоторых ограничений, которые значительно упрощают проведение исследования и при этом не оказывают значительного влияния на точность полученных результатов.

На рисунке 2 представлена базовая модель почвообрабатывающей пластины.

Согласно функциональным и нефункциональным требованиям сформулирована гипотеза проектирования: необходимо повысить качество обработки почвы элементом, уменьшив его массу не менее чем на 10% при сохранении прочностных и износостойких

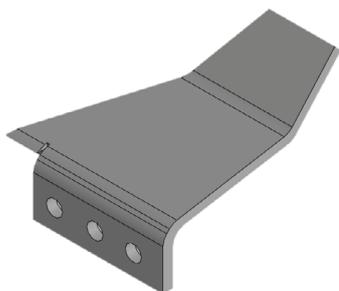


Рис. 2. Базовая модель почвообрабатывающей пластины
Fig. 2. Basic model of a subsoiler plate

характеристик, неизменном технологическом процессе изготовления и сохранении стоимости.

Почвообрабатывающие пластины и наральник проникают в почву и разрезают ее, создавая зоны рыхления и деформации³ [4-6]. При этом почва перемещается вверх по деформирующим элементам и отклоняется в стороны. В процессе обработки могут формироваться уплотнения, и в зависимости от давления, угла установки и угла внутреннего трения сдвиг стружки может проходить под другими траекториями [7]. С целью повышения эффективности отрыва и крошения пласта почвы внесем изменения в базовую конструкцию: добавим пилообразную поверхность на заднюю часть пластины и сделаем угол фронтальной части более острым (рис. 3).

Принятые ограничения:

1. Из расчета исключаются зоны болтового соединения почвообрабатывающей пластины со стойкой и ее задняя зубчатая грань (выделены зеленым цветом на рисунке 3).

2. При исследовании и испытании прототипов необходимо принимать значения коэффициента запаса по пределу прочности σ в диапазоне от 1,5 до 2^{4,5}:

$$\frac{[\sigma]}{\sigma_{max}} = 1,5 \dots 2,0. \quad (1)$$

3. Предельное значение снижения массы m_2 устанавливается не более 50%, минимальное снижение массы m_1 – не менее 10% [8-10]:

$$0,1m_1 \leq \iiint_V \rho dV \leq 0,5m_2, \quad (2)$$

где ρ – плотность; dV – бесконечно малый элемент объема.

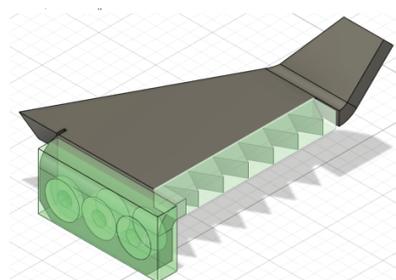


Рис. 3. Модель почвообрабатывающей пластины с исключенными зонами расчета

Fig. 3. Model of a subsoiler plate with excluded calculation zones

³ Панов И.М., Ветохин В.И. Физические основы механики почв. К.: Феникс, 2008. 266 с.

⁴ СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*: утв. приказом Минстроя России от 3 декабря 2016 г. № 891/пр.

⁵ ГОСТ Р 52857.1-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2008. 26 с.

4. Закрепление пластины в зонах болтовых соединений происходит в трех степенях свободы:

$$u|S_1 = 0, \tag{3}$$

где u – вектор перемещения; S_1 – граница закрепления.

5. Пластина изготавливается методом лазерной резки из стали марки 09Г2С или 30ХГСА и изгибается на вальцах на угол 90 и 110 град. соответственно.

6. Математическая задача с принятыми ограничениями описана формулой:

$$\left. \begin{aligned} \min_x : c(x) &= u_0^t \cdot K_0 \cdot u_0 = \sum_{g=1}^N (x_g)^p \cdot u_g^t \cdot K_g \cdot u_g \\ \frac{V(x)}{V} &= \frac{m_g}{m_0} \\ K_0 \cdot u_0 &= F \\ 0 < x_{min} &\leq x \leq 1, \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

где $c(x)$ – функция податливости; x_g – параметр псевдоплотности конечного элемента; u_0 – вектор перемещений начального элемента; u_0^t – вектор перемещений начального элемента при операции транспонирования; u_g – вектор перемещений конечного элемента; u_g^t – вектор перемещений конечного элемента при операции транспонирования; N – количество конечных элементов; K_0 – матрица жесткости начального элемента; K_g – матрица жесткости конечного элемента; p – давление; F – вектор внешних сил на единицу объема; V – объем; m_0 – начальная масса; m_g – конечная масса.

Зоны, оказывающие наименьшее влияние на прочностные характеристики конструкции, представлены на рисунке 4.

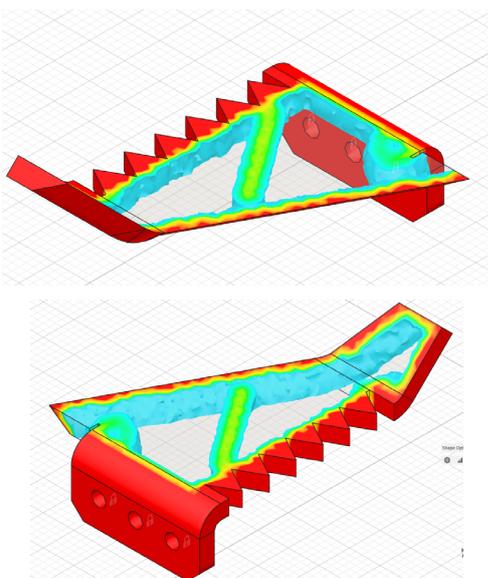


Рис. 4. Зоны наименьшего влияния на прочность и жесткость

Fig. 4. Areas of least influence on strength and rigidity

Данные топологического исследования по определению зон, оказывающих наименьшее влияние на жесткость и прочность конструкции, позволяют принять решение по местам расположения перфорированных элементов. Предложена дополнительная конструкция почвообрабатывающей пластины с круглым сечением перфорированных элементов и незначительными изменениями геометрии (рис. 5).

Откорректируем элементы согласно зонам, оказывающим наименьшее влияние на прочность (рис. 6).

На рисунке 6 прослеживаются зоны, на которых можно расширить перфорационные элементы, и после второй итерации появились значительные изменения в массе и напряжениях между базовой и новой моделью (рис. 7). Однако на стадии разработки

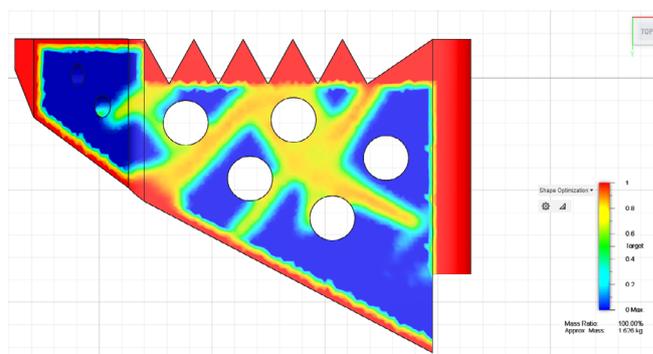


Рис. 5. Модель почвообрабатывающей пластины после первой итерации

Fig. 5. Model of a subsoiler plate after the first iteration

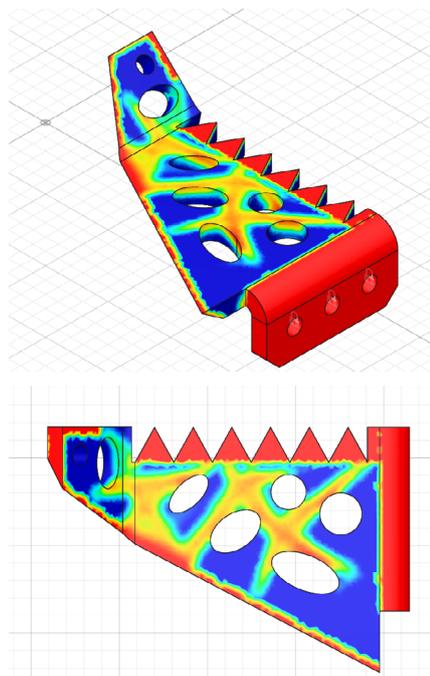


Рис. 6. Модель почвообрабатывающей пластины после второй итерации

Fig. 6. Model of a subsoiler plate after the second iteration

и производства прототипа необходимо оценить прочностные характеристики моделей.

Прочностной анализ разработанной почвообрабатывающей пластины представляет собой анализ распределения напряжений и деформаций по Мизесу

методом конечных элементов (рис. 8). Также осуществляется оценка коэффициента запаса прочности. При помощи параметрического моделирования в среде Autodesk Fusion 360 определяется рациональная толщина элементов (табл.).

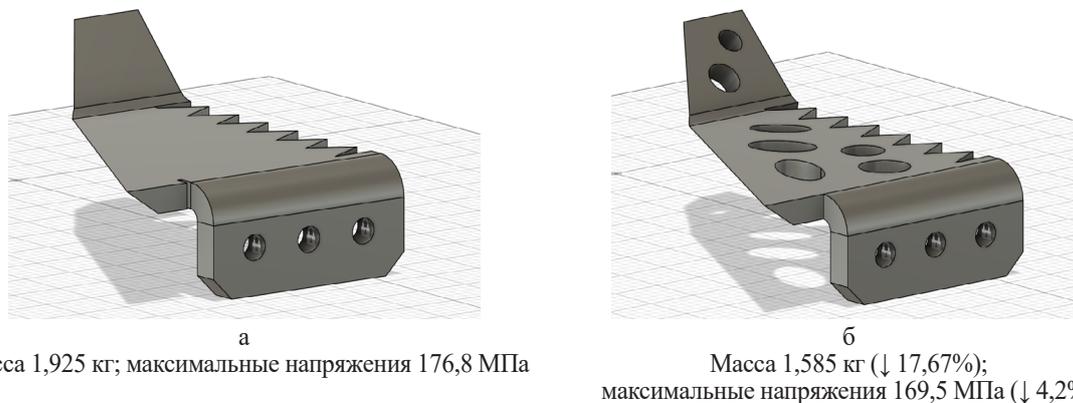


Рис. 7. Модель почвообрабатывающей пластины до топологической оптимизации (а) и после нее (б)

Fig. 7. Comparative characteristics of models before and after topological optimization

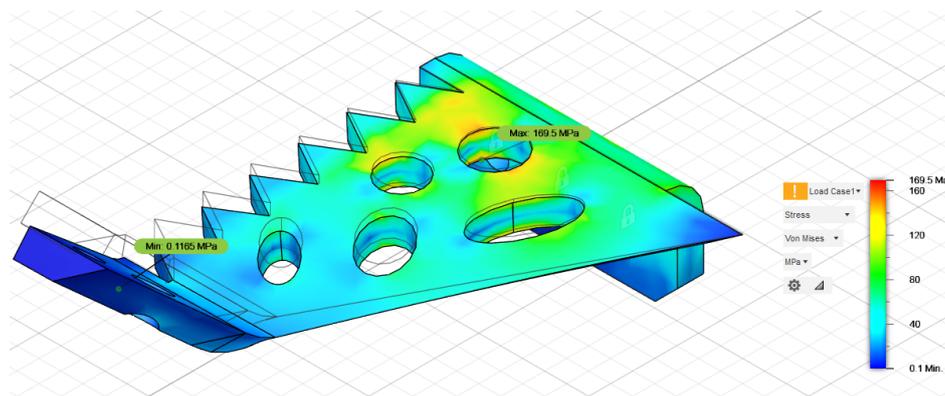


Рис. 8. Анализ распределения напряжений и деформаций

Fig. 8. Analysis of stress and strain distribution

Виртуальное исследование моделей почвообрабатывающих пластин

Таблица

Table

Summary table of the virtual studies of subsoiler plate models

Толщина, мм Thickness, mm	Базовая модель Basic model		Оптимизированная модель Optimized model
12	Коэффициент запаса прочности / Safety factor	1,049	1,225
	Напряжение, МПа / Pressure, MPa	197,3	169,5
	Перемещение, мм / Displacement, mm	1,015	1,585
16	Коэффициент запаса прочности / Safety factor	1,771	1,801
	Напряжение, МПа / Pressure, MPa	117,1	109,1
	Перемещение, мм / Displacement, mm	0,438	0,620
20	Коэффициент запаса прочности / Safety factor	2,021	2,300
	Напряжение, МПа / Pressure, MPa	102,4	89,4
	Перемещение, мм / Displacement, mm	0,239	0,395

Результаты и их обсуждение

При изготовлении почвообрабатывающей пластины лазерной резкой развертка оптимизированной конструкции вносилась в специализированное программное обеспечение. Сфокусированным лазерным лучом осуществлялась резка как самой формы объекта, так и эллиптических отверстий. С учетом применения высокоточной лазерной резки, используемой на промышленных производственных линиях, технология изготовления остается неизменной и, как следствие, удорожания продукции не происходит. Параметры гибкой оптимизации описаны при помощи математической модели (4).

Оптимизированная геометрия почвообрабатывающей пластины рыхлителя и подобранная толщина при максимально негативных сценариях соответствуют предъявляемым функциональным и нефункциональным требованиям, а также учитывают дополнительное ограничение ввиду увеличенного коэффициента запаса прочности для впервые изготавливаемой продукции $k > 1,7$ (табл.).

Анализ полученных прочностных и износостойких характеристик показал, что соответствия по коэффициенту запаса прочности удалось достичь только при увеличении толщины пластин до 16 мм и использовании стали 09Г2С. Уменьшение массы пластины относительно базовой модели составило 17,67% при сохранении прочностных и износостойких характеристик.

Изменение функциональных требований (исключение требования повышения эффективности обработки почвы) приведет к увеличению числа элементов, подходящих под данный способ (стойки, плоскорез), что может существенно сказаться на массе оборудования.

Список источников

1. Башин К.А., Торсунов Р.А., Семенов С.В. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2017. № 51. С. 51-61. <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2017.51.05>
2. Павлов С.П., Бодягина К.С. Топологическая оптимизация конструкций, состоящих из нескольких материалов с использованием модифицированного метода SIMP // Математика и математическое моделирование. 2019. № 6. С. 19-34. <https://doi.org/10.24108/mathm.0619.0000211>
3. Супотницкий Е.С., Курносков В.Е., Андреева Т.В. Топологическая оптимизация конструкций в области проектирования // Научное обозрение. Педагогические науки. 2019. № 3-2. С. 91-95. EDN: КХИТВО
4. Салахов И.М. Агротехнические аспекты применения рабочего органа для безотвальной обработки почвы // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2017. Т. 12, № 3 (45). С. 82-85. https://doi.org/10.12737/article_5a1d9aa31ec6e6.52700948
5. Камбулов С.И., Рыков В.Б., Трубилин Е.И., Колесник В.В. Технологические аспекты разуплотнения почвы

Для дальнейшего проведения лабораторных и полевых исследований по подтверждению прочностных и агротехнических характеристик нами изготовлены две пластины в металле (рис. 9).



Рис. 9. Изготовленные модернизированные почвообрабатывающие пластины глубокорыхлителя

Fig. 9. Manufactured modernized variants of subsoiler plates

Выводы

1. Алгоритм разработки и модернизации рабочего органа глубокорыхлителя на языке системного моделирования SysML позволяет учесть разнообразные факторы включая функциональные и нефункциональные требования, а также дополнительные ограничения.
2. Топологическая оптимизация и параметрическое моделирование позволяют снизить массу почвообрабатывающих рабочих органов и эффективно адаптировать их геометрию с сохранением прочностных и износостойких характеристик.
3. Использование инновационных подходов в разработке конструкции сельскохозяйственных машин способствует повышению ее качественных характеристик, снижению энергозатрат при их проектировании и эксплуатации.

References

1. Bashin K.A., Torsunov R.A., Semenov S.V. Topology optimization methods in aerospace industry. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2017;51:51-56. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2017.51.05>
2. Pavlov S.P., Bodyagina K.S. Modified SIMP method-based topological optimization of structures consisting of several materials. *Mathematics and Mathematical Modeling*. 2020;19-34. (In Russ.) <https://doi.org/10.24108/mathm.0619.0000211>
3. Supotnitsky E.S., Kurmosov V.E., Andreyeva T.V. Topological optimization of designs in the field of designing. *Nauchnoe Obzrenie. Pedagogicheskie Nauki = Scientific Review. Pedagogical science*. 2019;3-2:91-95. (In Russ.)
4. Salakhov I. Agrotechnical aspects of the working unit application for underground soil treatment. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2017;3:82-85. (In Russ.) https://doi.org/10.12737/article_5a1d9aa31ec6e6.52700948
5. Kambulov S.I., Rykov V.B., Trubilin E.I., Kolesnik V.V. Technological aspects of soil deployment. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2019;153:193-201. (In Russ.) <https://doi.org/10.21515/1990-4665-153-021>
6. Ushakov A.E. Development and testing of tillage tools for reclamation deep loosening of sloping

// Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2019. № 153. С. 193-201. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-153-021>

6. Ушаков А.Е. Разработка и испытание почвообрабатывающего орудия для проведения мелиоративного глубокого рыхления склоновых земель // Вестник НГИЭИ. 2022. № 2 (129). С. 31-40. EDN: KDHUNY <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-2-31-40>

7. Пашенко В.Ф., Сыромятников Ю.Н., Храмов Н.С. Физическая сущность процесса взаимодействия с почвой рабочего органа с гибким элементом // Сельское хозяйство. 2017. № 3. С. 33-42. EDN: YULCEZ

8. Прокопов В.С., Вдовин Д.С., Хрыков С.С. Преимущества использования метода топологической оптимизации на этапе проектирования промышленного продукта // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта: Сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2017. С. 26-29. EDN: YWDHVJ

9. Xie L., Li H., Zhang Y., Liu X., Zhao Y. Topology optimization and numerical analysis of cold plates for concentrating photovoltaic thermal management. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023;52:103713. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103713>

10. Rad M.M., Habashneh M., Lógó J. Reliability based bi-directional evolutionary topology optimization of geometric and material nonlinear analysis with imperfections. *Computers & Structures*. 2023;287:107120. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2023.107120>

Информация об авторе

Александр Евгеньевич Ушаков, канд. техн. наук, доцент, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А.К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета; 346428, Российская Федерация, Ростовская обл., г. Новочеркасск, Пушкинская ул., 111; sashka-ushakov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3649-9945>

Статья поступила 15.01.2024, после рецензирования и доработки 06.04.2024; принята к публикации 06.04.2024

lands. *Vestnik NGIEI*. 2022;2:31-40. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-2-31-40>

7. Pashchenko V.F., Syromyatnikov Yu.N., Khramov N.S. Physical processes of soil interaction with a working tool with a flexible element. *Agriculture*. 2017;3:33-42. (In Russ.)

8. Prokopov V.S., Vdovin D.S., Khrykov S.S. Advantages of using the topological optimization method at the design stage of an industrial product. *Systems of Designing, Technological Preparation of Production and Management of the Life Cycle Stages of an Industrial Product: Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference*. Moscow, RAS Institute of Management Problems named after V.A. Trapeznikov, 2017:26-29. (In Russ.)

9. Xie L., Li H., Zhang Y., Liu X., Zhao Y. Topology optimization and numerical analysis of cold plates for concentrating photovoltaic thermal management. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023;52:103713. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103713>

10. Rad M.M., Habashneh M., Lógó J. Reliability based bi-directional evolutionary topology optimization of geometric and material nonlinear analysis with imperfections. *Computers & Structures*. 2023;287:107120. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2023.107120>

Author Information

Aleksandr E. Ushakov, PhD (Eng), Associate Professor, Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov – Branch of Don State Agrarian University; 346428, Russian Federation, Rostov region, Novocherkassk, Pushkinskaya Str., 111; sashka-ushakov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3649-9945>

Received 15.01.2024, Revised 06.04.2024, Accepted 06.04.2024

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 635.21:631.5

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-19-26>

Урожайность и качество насыщенного селеном картофеля, выращенного из клубней 10-15 мм

В.И. Старовойтов¹, О.А. Старовойтова², А.А. Манохина^{3✉}, О.С. Хутинаев⁴, М.И. Пехальский⁵

^{1, 2, 4, 5} Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха; п. Красково, Московская область, Россия

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

¹ agronir1@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9365-7631>

² agronir2@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8293-6579>

³ alexman80@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9785-1164>

⁴ okosk@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1487-4038>

⁵ 5488144@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8792-3451>

Аннотация. Мелкие миниклубни до 15 мм можно использовать при выращивании продовольственного картофеля, насыщенного дефицитными микроэлементами, – например, селеном, являющимся мощным иммуномодулятором и антиоксидантом. Для этого необходимо определить оптимальную концентрацию селена, наносимого на растения. Исследования проведены с целью изучения основных показателей качества и урожайности насыщенного селеном продовольственного картофеля, выращенного из нестандартных миниклубней размером 10...15 мм. Исследования проводились в 2019-2021 гг. на сортах Гулливер, Аметист и Гранд, выращенных на дерново-подзолистой среднеокультуренной супесчаной почве. Схема опыта включала в себя 2 варианта: контроль – без обработки; опыт – листовая обработка растений селенитом натрия в дозе 3 г/га. В соответствии с существующими методиками исследовали качество выращенного урожая: изучали содержание крахмала, сухого вещества, нитратов и селена, потемнение мякоти сырых и вареных клубней, вкус клубней картофеля. Усредненная валовая урожайность по сортам составила 17,3...18,7 т/га, товарность по размеру клубней – 96,5...97,4%. В среднем за 3 года прибавка урожая товарных клубней от применения селенита натрия составила 1,1...1,8 т/га. Содержание селена в клубнях 0,11...0,24 мг/кг сырого веса не превысило предельно допустимую концентрацию в картофеле 0,5 мг/кг. Листовая обработка селенитом натрия в дозе 3 г/га не оказала значительного влияния на показатели качества клубней картофеля, но по отношению к контролю увеличила содержание селена в клубнях на 0,06...0,10 мг/кг сырого веса. Рентабельность выращивания продовольственного картофеля из мелких нестандартных мини-клубней, полученных аэрогидропонным способом и листовой обработкой растений селенитом натрия, в зависимости от сорта составила 16,1...28,6%. Для получения оптимального содержания селена в клубнях предложено увеличить концентрацию селенита натрия и продолжить исследования по повышению урожайности и улучшению качества клубнеплодов.

Ключевые слова: миниклубни картофеля, селен, листовая обработка селенитом натрия, урожайность, качество клубней

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха». Аналитическое исследование содержания селена в клубнях проводили с использованием оборудования НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА.

Для цитирования: Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Манохина А.А., Хутинаев О.С., Пехальский М.И. Урожайность и качество насыщенного селеном картофеля, выращенного из клубней 10-15 мм // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, № 3. С. 19-26. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-19-26>

ORIGINAL ARTICLE

Yield and quality of selenium-rich potatoes grown from 10-15 mm tubers

V.I. Starovoitov¹, O.A. Starovoitova², A.A. Manokhina³✉, O.S. Khutinaev⁴, M.I. Pekhalskiy^{1,2,4,5} Russian Potato Research Centre (RCPR); Kraskovo, Moscow region, Russia³ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ agronir1@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9365-7631>² agronir2@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8293-6579>³ alexman80@list.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-9785-1164>⁴ okosk@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1487-4038>⁵ 5488144@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8792-3451>

Abstract. Small mini-tubers up to 15 mm can be used for growing high-quality food potatoes saturated with scarce trace elements, for example, selenium, which is a powerful immunomodulator and antioxidant. This requires determining the optimum concentration of selenium applied to plants. The authors studied the yield and basic quality indicators of selenium-saturated food potato tubers grown in 2019-2021 from non-standard mini-tubers with a size of 10 to 15 mm. The research was conducted in 2019-2021 on varieties Gulliver, Ametist and Grand grown on sod-podzolic medium-cultivated sandy loam soil. The experiment course included two options: control – without treatment, experiment – leaf treatment of plants with sodium selenite. The studies were carried out in accordance with the existing methods. As a result of the experiment, the average gross yield was 17.3 to 18.7 t/ha, the marketability in terms of tuber size was 96.5 to 97.4%. In the experiment samples, the selenium content in tubers averaged 0.040 to 0.0375 mg/kg over three years, which does not exceed the maximum permissible concentration in potatoes of 0.5 mg/kg. When using leaf treatment with sodium selenite, the increase in the selenium content in tubers relative to the control was 0.08 to 0.10 mg/kg of raw weight. Leaf treatment with sodium selenite at a dose of 3 g/ha did not significantly affect the quality of potato tubers, but increased the selenium content in tubers to 0.06 to 0.10 mg/kg of raw weight. The profitability of growing food potatoes from small non-standard mini-tubers obtained by the aeroponic method and leaf treatment with sodium selenite, depending on the variety, is 16.1 to 28.6%. To obtain optimum selenium content in tubers, it is proposed to increase the concentration of sodium selenite and continue research on increasing yield and improving the quality of tubers.

Keywords: potato mini-tubers, selenium, leaf treatment with sodium selenite, yield, quality of tubers

Acknowledgements: The work was performed within the framework of the state assignment of the Russian Potato Research Centre; an analytical study of the selenium content in tubers was carried out using the equipment of the Kurchatov Institute Research Center – All-Union Research Institute of Chemical Reagents and Highly Pure Chemical Substances (IREA).

For citation: Starovoitov V.I., Starovoitova O.A., Manokhina A.A., Khutinaev O.S., Pekhalskiy M.I. Yield and quality of selenium-rich potatoes grown from 10-15 mm tubers. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2024;26(3):19-26. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-19-26>

Введение

Миниклубни картофеля фракций 15...25 и 25...35 мм широко применяются для получения здорового семенного материала и тиражирования сортов. Мелкие миниклубни до 15 мм в семеноводстве бракуются как не соответствующие требованиям, но их можно использовать при выращивании качественного продовольственного картофеля. Из мелких миниклубней картофеля размером менее 15 мм можно получить достойный урожай – 18,0...24,3 т/га [1, 2]. К тому же картофель можно насытить дефицитными микроэлементами.

У части населения планеты, в том числе России, выявлен дефицит семи элементов: Fe, Ca, Mg, I, Se,

Zn, Cu [3]. Селен – это мощный иммуномодулятор, природный антиоксидант. У многих жителей России уровень селена в сыворотке крови составляет менее 75 мкг/л при норме 115...120 мкг/л¹.

Для увеличения эффективности защиты людей и животных от разных стрессовых состояний в США, Китае и многих странах Западной Европы выполняются государственные программы, направленные на производство пищевых добавок (селена) [4]. К 2030 г. мировая потребность в селене может вырасти до 8...9 тыс. т/год [5].

¹ Голубкина Н.А., Соколов Я.А. Биоритмы селена: монография. М.: Изд-во ВНИИССОК, 2012. 65 с.

Пониженное содержание селена в почве отмечено в Китае, Швеции, Финляндии, России (Бурятия и Читинская обл.) [6]. Некоторые страны (Финляндия, Новая Зеландия, Китай и США) в качестве решения проблемы селенодефицита видят применение селеносодержащих удобрений для получения недостающего живым организмам селена в пищевой цепи [7] или добавление селена в корм животным [8].

Обогащение растений селеном осложнено ввиду малой устойчивости многих растений к высоким концентрациям микроэлемента. Еще не изучены оптимальные концентрации Se для различных видов растений и, в частности, конкретных сортов. Поэтому актуальным является проведение в полевых условиях исследований по выращиванию картофеля из мелких мини-клубней фракции 10...15 мм с листовой обработкой селеносодержащими препаратами и определение пригодности полученного урожая в продовольственных целях.

Цель исследований: определение урожайности и основных показателей качества насыщенного селеном продовольственного картофеля из нестандартных мини-клубней размером 10...15 мм.

Материалы и методы

Миниклубни раннего сорта Гулливер и средне-ранних сортов Аметист и Гранд выращены в лаборатории ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха» на аэрогидропонных устройствах с комбинированной системой питания [1, 9]. Сбор мини-клубней начинали через 60 дней после высадки растений. За период вегетации общий сбор миниклубней (10...15 мм) составлял более 100 шт. на 1 растение. Собранные миниклубни просушивали, озеленяли и хранили с сентября до мая в холодильной камере по традиционной технологии.

Посадку миниклубней осуществляли в п. Красково Московской области на опытном поле с дерново-подзолистой среднеоккультуренной супесчаной почвой в 2019-2021 гг. Опыт выполнен согласно схеме в соответствии с методиками^{2,3,4}; площадь учетной делянки составляла 21 м²; размещение делянок – систематиче-

ское; густота посадки – 44,4 тыс. кустов/га; ширина междурядий – 75 см [1].

Осенью для подготовки опытного поля выполнили зяблевую вспашку. После зимы проводили дискование тяжелой бороной и нарезку гребней. Опыт выполняли на фоне дробно-локального внесения минеральных удобрений в дозах N₄₀P₄₀K₇₀ (перед посадкой) и N₄₀P₄₀K₄₀ (при уходе за посадками).

Посадку опытного участка выполняли картофелесажалкой с ручной подачей пророщенных семенных миниклубней размером 10...15 мм и массой 3...5 г. Схема опыта включала в себя два варианта: 1 (контроль) – без обработки; 2 (опыт) – с листовой обработкой селеносодержащим препаратом. В качестве селеносодержащего препарата выбран селенит натрия Na₂SeO₃ НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА (массовая доля натрия селенистокислого – не менее 98,7%; массовая доля нерастворимых в воде веществ, сульфатов, хлоридов, железа, азота, теллура – не более 0,003...0,03%) в дозе 0,01 г/л. Расход воды – из расчета 300 л/га.

В течение вегетации применяли средства защиты растений согласно общепринятой схеме [1].

Периоды вегетации растений картофеля (с 1 мая по 31 августа) были благоприятными по метеословиям: 2019 г. – влажный год (гидротермический коэффициент ГТК = 1,38), 2020 г. – очень влажный год (ГТК = 2,1), 2021 г. – слабо-засушливый год (ГТК = 1,096) [1].

Валовую и товарную урожайность выращенного картофеля определяли в третьей декаде августа. Изучали показатели качества клубней: содержание крахмала и сухого вещества (весовым методом); содержание нитратов (ионометрически) и селена в клубнях по применяемой в ИРЕА методике о селеносодержащих препаратах (пробоподготовка: клубни мыли, перетирали до кашеобразного состояния, переносили в автоклавы для микроволнового вскрытия и растворяли в концентрированной азотной кислоте при температуре 170°C); потемнение мякоти сырых и вареных клубней и вкус клубней картофеля оценивался по шкале от 1 до 9.

Результаты и их обсуждение

Урожайность зависит от метеословий в течение года, сортовых особенностей культуры и применяемых технологических приемов [10, 11]. Три периода вегетации оказались благоприятными для выращивания картофеля, и в среднем по всем испытываемым сортам валовая урожайность составила 17,3...18,7 т/га [1], урожайность товарных по размеру клубней – 16,6...18,0 т/га (рис. 1), или 96,5...97,4% от валовой урожайности (табл. 1).

² Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований): Учебное пособие. 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

³ Методика исследований по культуре картофеля. М.: НИИКХ, 1967. 263 с.

⁴ Жевора С.В., Федотова Л.С., Старовойтов В.И., Зейрук В.Н., Коршунов А.В., Пшеченков К.А., Тимошина Н.А., Мальцев С.В., Старовойтова О.А., Васильева С.В., Васильева С.В., Шабанов А.Э., Деревягина М.К., Белов Г.Л., Киселев А.И., Князева Е.В. Методика проведения агротехнических опытов, учетов, наблюдений и анализов на картофеле. М., 2019. 120 с.

Средняя потенциальная товарная урожайность картофеля, выращиваемого из зрелых клубней класса Элита, соответствует данным селекционеров (табл. 1, рис. 1) [1].

Самая высокая урожайность наблюдалась у раннего сорта Гулливер: валовая – 18,6...20,3 т/га, товарная – 18,1...19,7 т/га (табл. 1, рис. 1). Среднеранний сорт Аметист имеет наименьшую урожайность (валовая – 15,1...16,3 т/га, товарная – 14,7...15,8 т/га). Средняя товарная урожайность по сортам в 2019 г. составила 17,6 т/га; в 2020 г. – 18,0 т/га; в 2021 г. – 16,6 т/га. НСР₀₅ – соответственно 1,65; 2,24 и 1,69 т/га.

В среднем за 3 года прибавка урожая товарных клубней от применения селенита натрия составила 1,1...1,8 т/га.

Валовая урожайность контрольных вариантов составила 66...89% от возможной потенциальной урожайности данных сортов [1]. Следовательно,

при благоприятных условиях посадкой мелких нестандартных миниклубней, выращенных аэродропным способом, можно получить более 70% от возможной потенциальной урожайности.

Пригодность продовольственной продукции определялась по качественным показателям [12]. Крахмалистость клубней сорта Аметист составила 14,2...14,3% при потенциально возможных для данного сорта 15,0...16,0%, у сорта Гулливер – 11,9...12,4% при сортовых особенностях 14,1...15,4% (рис. 2). У сорта Гранд содержание крахмала составило 17,0...17,2%, оказавшись на уровне потенциально возможных значений 13,4...18,0% [1], что говорит о полной физиологической зрелости клубней для употребления их в продовольственных целях. НСР₀₅ за годы исследований составила 1,63% (2019 г.); 1,45% (2020 г.); 0,92% (2021 г.).

Таблица 1

Показатели продуктивности картофеля в зависимости от сорта и применения селеносодержащего препарата, т/га

Table 1

Potato productivity indicators depending on the variety and application of selenium-containing preparation, t/ha

Сорт Variety	Валовая урожайность, т/га / Gross yield, t/ha				Товарность, % Marketability, %	Потенциально возможная урожайность сорта, т/га Yield prospects of the variety, t/ha	± к потенциально возможной урожайности ± to yield prospects	
	2019 г.	2020 г.	2021 г.	Среднее за 2019-2021 гг.			т/га / t/ha	%
Аметист, контроль	15,2	15,3	14,8	15,1	97,2	22,5	7,4	67,1
Аметист, опыт	16,5	17,3	15,1	16,3	97,3		6,2	72,4
Гранд, контроль	18,2	17,1	17,6	17,6	96,5	25,1	7,5	70,3
Гранд, опыт	18,5	21,9	19,4	19,9	96,7		5,2	79,4
Гулливер, контроль	18,4	19,8	17,6	18,6	97,1	22,3	3,7	83,4
Гулливер, опыт	20,7	21,0	19,2	20,3	97,4		2,0	91,0
Среднее	17,9	18,7	17,3	18,0	97,0	23,3	-	-
НСР ₀₅	1,72	2,34	1,79	-	-	1,28	-	-



Рис. 1. Урожайность клубней картофеля в зависимости от сорта и применения селеносодержащего препарата, т/га (усредненная за 2019-2021 гг.)

Fig. 1. Potato tuber yield depending on the variety and application of selenium-containing preparation, t/ha (averaged for 2019-2021)

Клубни сортов Аметист и Гулливер в обоих вариантах содержали менее 20% сухого вещества, у сорта Гранд содержание сухого вещества выше – 23,1...23,5% [1].

Во всех вариантах содержание нитратов не превышало предельно допустимую концентрацию (ПДК) 250 мг/кг [1]. Применение селенита натрия в среднем за 3 года не оказало значительного влияния на содержание нитратов в клубнях. В опытных образцах этот показатель имел значение 199...226 мг/кг, в контрольных – 183...219 мг/кг.

Потемнение сырой и вареной мякоти оценивалось по шкале: 1 – темнеет очень сильно; 3 – темнеет сильно по всей поверхности; 5 – темнеет умеренно; 7 – темнеет слабо; 9 – не темнеет. Данный показатель для клубней сорта Гулливер составил 7,8...8,3 балла, поэтому можно рекомендовать использовать его при вакуумировании, заморозке в очищенном виде. Клубни сорта Гранд оказались умеренно потемневшими – 5,8...6,8 балла (рис. 3). Мякоть вареных клубней сортов Гулливер и Гранд во всех вариантах получила высокие оценки – выше 8 баллов. В 2019 г. НСР₀₅ составила 0,97 (сырая мякоть) и 0,96 (вареная мякоть);

в 2020 г. – 1,05 (сырая мякоть) и 0,29 (вареная мякоть); в 2021 г. – 0,77 (сырая мякоть) и 0,33 (вареная мякоть).

Вкус клубней картофеля оценивался по шкале: 1 – плохой (неприятный, горький); 3 – пресный; 5 – удовлетворительный; 7 – хороший; 9 – отличный. Более вкусными оказались клубни сорта Гулливер (7,5 балла), сорт Гранд оценен на 6,5...7,0 баллов, Аметист – на 6,0...6,2 балла (рис. 4). Применение селенита натрия не оказало значительного влияния на потемнение мякоти и вкусовые качества клубней. В 2019 г. НСР₀₅ составила 0,11; в 2020 г. – 0,25; в 2021 г. – 0,41.

Содержание селена в клубнях при применении листовой обработки селенитом натрия в среднем за 3 года колебалось в пределах 0,11...0,24 мг/кг и не превышало предельно допустимой концентрации в картофеле 0,5 мг/кг. По отношению к контролю содержание селена в клубнях увеличилось на 0,06...0,10 мг/кг сырого веса (рис. 5).

Себестоимость миникулубней стандартной фракции составила 4,00...8,00 руб/шт. Для определения экономической эффективности себестоимость нестандартных мелких миникулубней принята за 4,00 руб/шт. Себестоимость выращенного в полевых условиях

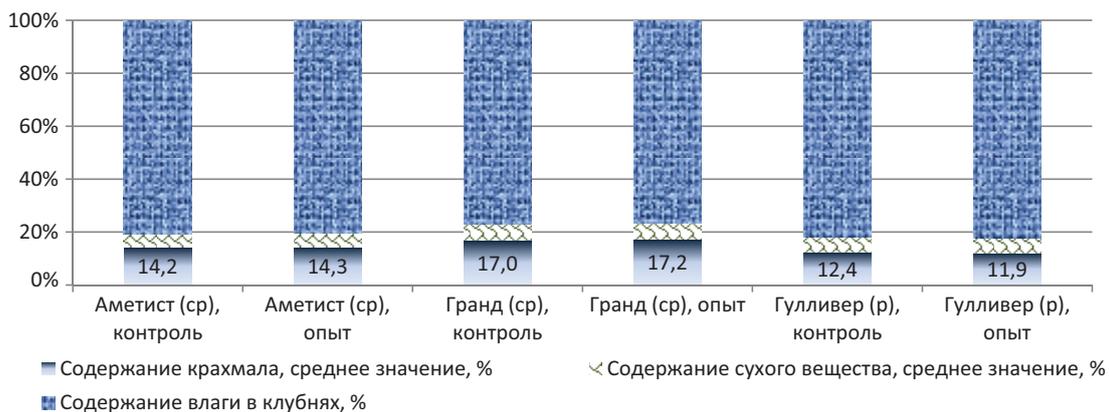


Рис. 2. Содержание крахмала, сухого вещества и влаги в клубнях картофеля в зависимости от сорта и применения селеносодержащего препарата (усредненное за 2019-2021 гг.)

Fig. 2. Starch, dry matter, and moisture content of potato tubers depending on the variety and application of selenium-containing preparation (averaged for 2019-2021)

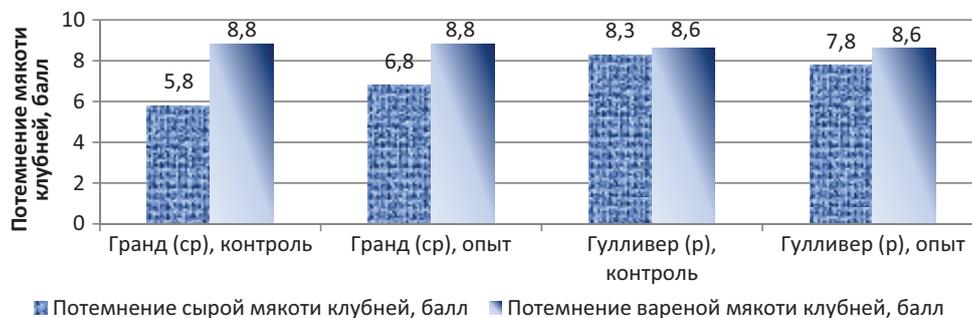


Рис. 3. Потемнение мякоти клубней в зависимости от применения селеносодержащего препарата (усредненное за 2019-2021 гг.)

Fig. 3. Darkening of tuber flesh depending on the application of selenium-containing preparation (averaged over 2019-2021)

картофеля составила 11,7...15,5 руб/кг. При расчетной цене реализации 17 руб/кг доход от выращивания картофеля составил 21,7...104,0 тыс. руб/га (в зависимости от сорта и варианта), рентабельность – соответственно 16,1...28,6% (рис. 6).

Результаты исследований показывают, что производство картофеля, выращенного из мелких

миниклубней фракции 10...15 мм с листовой обработкой селеносодержащими препаратами, является экономически целесообразным. Применение селенита натрия не ухудшило качество клубней опытных образцов. Для получения оптимального содержания селена в клубнях необходимо увеличение концентрации вносимого селена на растения [13].

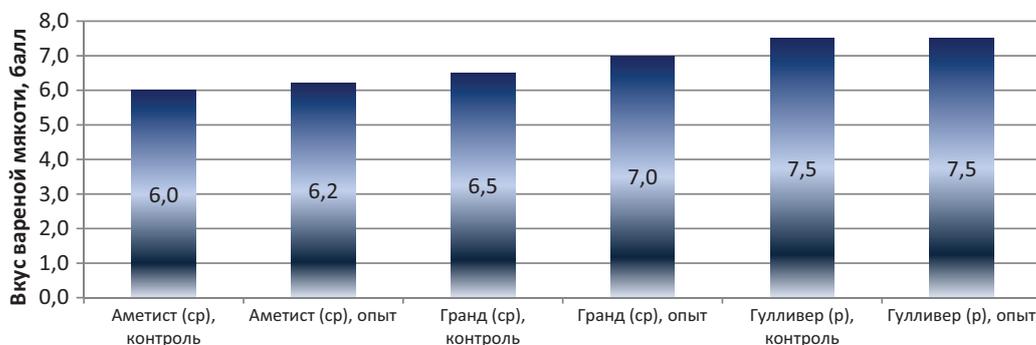


Рис. 4. Вкус вареной мякоти в зависимости от сорта и применения селеносодержащего препарата (среднее за 2019-2021 гг.)

Fig. 4. Flavor of cooked pulp depending on the variety and application of selenium-containing preparation (averaged over 2019-2021)

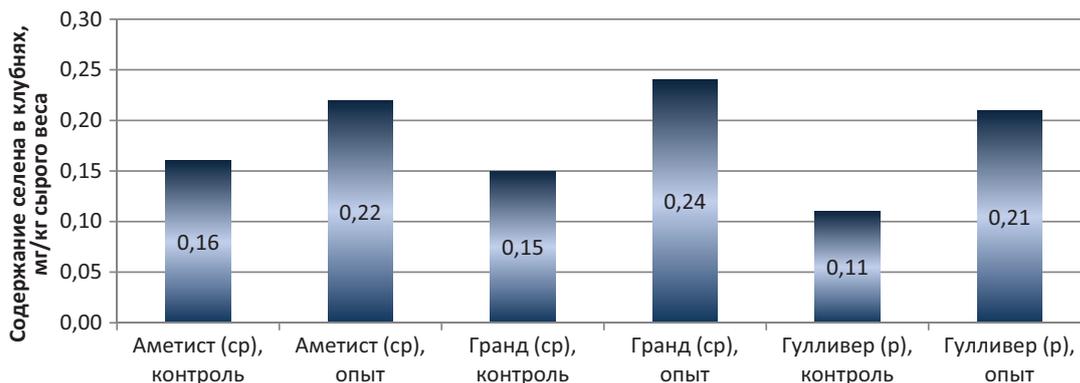


Рис. 5. Содержание селена в клубнях контрольных и опытных образцов, мг/кг сырого веса

Fig. 5. Selenium content in tubers of the control and experiment samples, mg/kg of raw weight

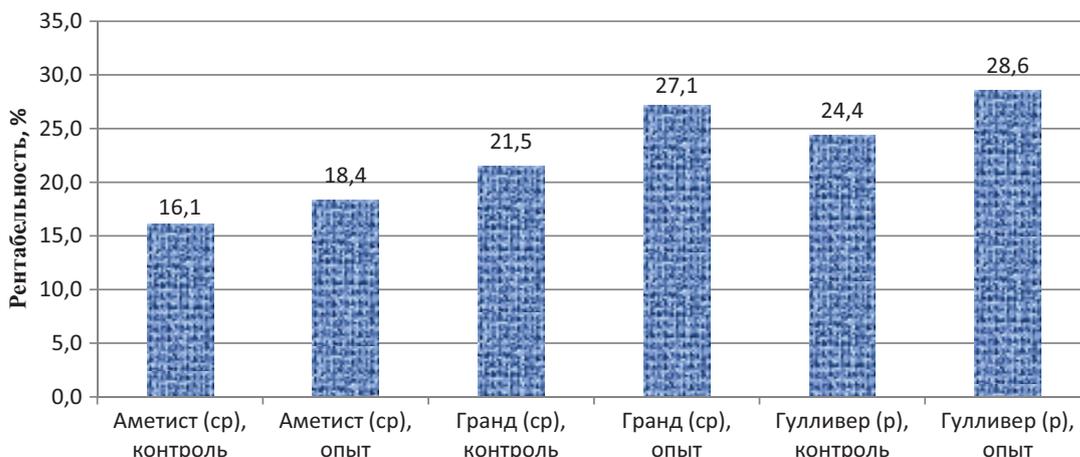


Рис. 6. Экономическая эффективность производства картофеля из миниклубней в зависимости от сорта и применения селеносодержащего препарата (среднее за 2019-2021 гг.)

Fig. 6. Economic efficiency of potato production from minitubers depending on the variety and application of selenium-containing preparation (average for 2019-2021)

Выводы

1. Посадочные клубни картофеля размером 10...15 мм при благоприятных условиях в среднем могут обеспечить валовую урожайность до 18,7 т/га и товарную урожайность до 18,0 т/га. Прибавка урожая товарных клубней от применения селенита натрия может превышать 2 т/га (13%).

2. Применение селенита натрия в дозе 3 г/га не оказывает значительного влияния на показатели качества клубней. Листовая обработка селенитом натрия позволяет увеличить содержание селена в клубнях до 0,08...0,10 мг/кг сырого веса. Для получения

оптимального содержания селена в клубнях необходимо увеличение концентрации вносимого селена на растения.

3. Экономически целесообразно выращивать продовольственный картофель из мелких нестандартных мини-клубней, полученных аэрогидропонным способом и с выполнением листовой обработки селенитом натрия; рентабельность в зависимости от сорта составляет 16,1...28,6%.

4. Необходимо расширить направление исследований по насыщению клубней селеном, повышению урожайности и улучшению качества клубнеплодов.

Список источников

1. Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Манохина А.А., Шабанов Н.Э., Филиппова С.В. Выращивание продовольственного картофеля из мини-клубней мелкой фракции, полученных в условиях водно-воздушной культуры // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2022. Т. 15, № 4 (75). С. 38-51. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_4_38

2. Анисимов Б.В., Зебрин С.Н., Карданова И.С., Логинов С.И., Кузьмичев А.А. Особенности выращивания мини-клубней в тоннельных укрытиях и проверка их качества методом грунтоконтроля // Картофелеводство: Материалы Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии селекции и семеноводства картофеля» (Москва, 29-30 июня 2017 г.). М.: ФГБНУ ВНИИКХ, 2017. С. 230-240. EDN: YTDFUD

3. White P.J., Broadley M.R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytologist*. 2009;182(1):49-84. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02738.x>

4. Zimmermann M.B., Köhrle J. The impact of iron and selenium deficiencies on iodine and thyroid metabolism: biochemistry and relevance to public health. *Thyroid*. 2002;12(10):867-878. <https://doi.org/10.1089/105072502761016494>

5. Кульчицкий Н.А., Наумов А.В. Современное состояние рынков селена и соединений на его основе // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2015. № 3. С. 40-48. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2015-3-40-48>

6. Аристархов А.Н., Бусыгин А.С., Яковлева Т.А. Дефицит селена в почвах и растениях Северо-Восточного Нечерноземья как индикатор необходимости применения селеновых удобрений // Международный сельскохозяйственный журнал. 2018. № 1. С. 31-36. EDN: LKEBGS

7. Голубкина Н.А., Кекина Е.Г., Надежкин С.М. Перспективы обогащения сельскохозяйственных растений йодом и селеном (обзор) // Микроэлементы в медицине. 2015. Т. 16, № 3. С. 12-19. EDN: UZNFCJ

8. Brown T.J., Idoine N., Raycraft E.R., Shaw R.A., Deady E.A., Rippingale J., Bide T., Wrighton C.E., Rodley J. *World Mineral Production 2008-2012. Centenary Edition*. Nottingham, UK: British Geological Survey, 2014. 126 p.

9. Хутинаев О.С., Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Манохина А.А., Шабанов Н.Э., Колесова О.С. Выращивание мини-клубней картофеля и топинамбура в условиях водно-воздушной культуры с использованием искусственного освещения // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2018. № 4 (86). С. 7-14. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-4-7-14>

10. Жевора С.В., Федотова Л.С., Тимошина Н.А., Князева Е.В., Шабанов А.Э., Киселев А.И. Урожайность и качество

References

1. Starovoitov V.I., Starovoitova O.A., Manokhina A.A., Shabanov N.E., Filippova S.V. Food potato growing from mini-tubers of small fraction obtained under conditions of water-air culture. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2022;15(4):38-51. (In Russ.) https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_4_38

2. Anisimov B.V., Zebrin S.N., Kardanova I.S., Loginov S.I., Kuzmichev A.A. Peculiarities of growing mini-tubers in tunnels and checking their quality with the soil control method. *Potato Growing: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Innovative technologies for selection and seed production of potatoes"* (Moscow, June 29-30, 2017). Moscow, FGBNU VNIKKh, 2017. Pp. 230-240. (In Russ.)

3. White P.J., Broadley M.R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytologist*. 2009;182(1):49-84. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02738.x>

4. Zimmermann M.B., Köhrle J. The impact of iron and selenium deficiencies on iodine and thyroid metabolism: biochemistry and relevance to public health. *Thyroid*. 2002;12(10):867-878. <https://doi.org/10.1089/105072502761016494>

5. Kul'chitskii N.A., Naumov A.V. Modern State of Markets of Selenium and Selenium-Based Compounds. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2015;(3):40-48. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2015-3-40-48>

6. Aristarkhov A.N., Busygin A.S., Yakovleva T.A. Selenium deficiency in soils and plants of the North-Eastern Non-Black Earth Region as an indicator of the need to use selenium fertilizers. *Mezhdunarodnyi Sel'skokhozyaistvennyi Zhurnal*. 2018;1:31-36. (In Russ.)

7. Golubkina N.A., Kekina E.G., Nadezhkin S.M. Prospects for enriching agricultural plants with iodine and selenium (review). *Trace Elements in Medicine (Moscow)*. 2015;16(3):12-19. (In Russ.)

8. Brown T.J., Idoine N., Raycraft E.R., Shaw R.A., Deady E.A., Rippingale J., Bide T., Wrighton C.E., Rodley J. *World Mineral Production 2008-2012. Centenary Edition*. Nottingham, UK: British Geological Survey, 2014. 126 p.

9. Khutinaev O.S., Starovoitov V.I., Starovoitova O.A., Manokhina A.A., Kolesova O.S. Growing minitubers of potato and Jerusalem artichoke in a water-air environment under artificial lighting. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2018;4:7-14. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-4-7-14>

10. Zhevara S.V., Fedotova L.S., Timoshina N.A. Knyazeva E.V., Shabanov A.E., Kiselev A.I. Productivity and quality of promising potato varieties depending on biological characteristics and climatic conditions. *AgroInnovatsii*. 2020;1-2:20-37 (In Russ.)

11. Starovoitova O.A., Starovoitov V.I., Manokhina A.A., Boyko Yu.P., Masyuk Yu.A. Influence of environmental

перспективных сортов картофеля в зависимости от биологических особенностей и климатических условий // Агро-инновации. 2020. № 1-2 (3-4). С. 20-37. EDN: TCQRHD

11. Старовойтова О.А., Старовойтов В.И., Манохина А.А., Бойко Ю.П., Масюк Ю.А. Влияние средовых факторов со снижением пестицидной нагрузки на формирование урожая картофеля // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2019. № 2 (90). С. 30-34. EDN: ZDPQUX

12. Шабанов А.Э., Киселев А.И., Федотова Л.С., Тимошина Н.А., Князева Е.В. Продуктивность и качество сортов картофеля нового поколения // Картофель и овощи. 2019. № 3. С. 25-27. <https://doi.org/10.25630/PAV.2019.21.36.005>

13. Сычев В.Г., Аристархов В.Г., Яковлева Т.А., Панасин В.И., Бусыгин А.С. Проблема селена и ее решение агрохимическими средствами состояние исследований по проблеме селена в агроэкосистемах // Плодородие. 2015. № 4. С. 2-5. EDN: UAXISZ

Информация об авторах

Виктор Иванович Старовойтов¹, д-р техн. наук, профессор; agronir1@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9365-7631>

Оксана Анатольевна Старовойтова², д-р с.-х. наук; agronir2@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8293-6579>

Александра Анатольевна Манохина³, д-р с.-х. наук, доцент; alexman80@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9785-1164>

Олег Сосланбекович Хутинаев⁴, канд. с.-х. наук; okosk@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1487-4038>

Максим Игоревич Пехальский⁵, аспирант; 5488144@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8792-3451>

^{1,2,4,5} Федеральний исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха; 140051, Российская Федерация, Московская область, Люберецкий район, п. Красково, ул. Лорха, 23, литер В

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

Вклад авторов

В.И. Старовойтов – научное руководство исследованием, формулирование основных направлений исследования, цели и задач, формулирование общих выводов;

О.А. Старовойтова – методология проекта, проведение исследований, формальный анализ, формулирование общих выводов, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

А.А. Манохина – анализ литературных источников для постановки цели, создание черновика рукописи, формулирование общих выводов, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

О.С. Хутинаев – проведение исследований, формальный анализ, создание черновика рукописи, формулирование общих выводов;

М.И. Пехальский – проведение исследований, визуализация.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 21.01.2024, после рецензирования и доработки 08.04.2024; принята к публикации 09.04.2024

factors on the decrease of pesticide effect on potato yield. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2019;2:30-34. (In Russ.)

12. Shabanov A.E., Kiselev A.I., Fedotova L.S., Timoshina N.A., Knyazeva E.V. Productivity and quality of the new generation of potato varieties. *Potato and Vegetables*. 2019;3:25-27. (In Russ.) <https://doi.org/10.25630/PAV.2019.21.36.005>

13. Sychev V.G., Aristarkhov A.N., Yakovleva T.A., Panasin V.I., Busygin A.S. Problem of selenium and its solution by agrochemical means the current state of research on the problem of selenium in agroecosystems. *Plodородие*. 2015;4:2-5. (In Russ.)

Author Information

Viktor I. Starovoitov¹, DSc (Eng) agronir1@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9365-7631>

Oksana A. Starovoitova², DSc (Ag) agronir2@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8293-6579>

Aleksandra A. Manokhina³, DSc (Ag) alexman80@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9785-1164>

Oleg S. Khutinaev⁴, PhD of agricultural Sciences okosk@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1487-4038>

Maksim I. Pekhalskiy⁵, postgraduate student; 5488144@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8792-3451>

^{1,2,4,5} Russian Potato Research Centre (RCPR), Lorkh str., 23, liter V, Kraskovo, Lyubertsy district, Moscow region, 140051, Russian Federation

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

Author Contribution

V.I. Starovoitov – research supervision, formulation of the main goal and objectives of the research, general conclusions;

O.A. Starovoitova – project methodology, research, formal analysis, formulation of general conclusions, finalizing (reviewing and editing) of the manuscript;

A.A. Manokhina – literary review for goal setting, writing – original draft preparation, formulation of general conclusions, finalizing (reviewing and editing) of the manuscript;

O.S. Khutinaev – investigation, formal analysis, writing – original draft preparation, formulation of general conclusions;

M.I. Pekhalskiy – investigation, visualization.

Conflict of interests

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

Received 21.01.2024, Revised 08.04.2024, Accepted 09.04.2024

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК: 631.348.45

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-27-36>**Концепция применения адаптивной штанговой распределительной системы малогабаритного одноопорного опрыскивателя***И.А. Дембовский¹, С.А. Родимцев²*¹ Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина; Орел, Россия² Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева; Орел, Россия¹ emilyenn@rambler.ru; <https://orcid.org/0009-0006-6975-7708>² rodimcew@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1849-4224>

Аннотация. Малогабаритный опрыскиватель при вертикальных колебаниях распределительной штанги без сложных копирующих и компенсационных устройств не обеспечивает качественное опрыскивание. Для первичного семеноводства требуется разработка новых подходов к обеспечению равномерности распределения средств защиты растений (СЗР). С этой целью предложена и теоретически обоснована концепция применения адаптивной распределительной системы малогабаритного штангового опрыскивателя. Представлены полевые эксперименты с использованием одноопорного штангового опрыскивателя тачечного типа. Приведено теоретическое описание условий выполнения операции опрыскивания применительно к нарушению схемы распределения рабочей жидкости. Произведена оптимизация значений текущих фронтальных углов факела распыла. Установлено, что средний размах вертикальных колебаний штанги одноопорного опрыскивателя тачечного типа составляет от 16 до 29°. Выдвинута гипотеза о повышении равномерности распределения СЗР путем управления геометрией факела распыла и предложена конструкция мультирежимного дефлекторного распылителя. Найдены аналитические зависимости влияния геометрических параметров опрыскивателя и угла его поперечного наклона на формируемую распылителем ширину обрабатываемой полосы и требуемый угол факела распыла. Разработаны номограмма и операционный график режимов работы распылителей адаптивной распределительной системы опрыскивателя. При базовом угле распыла 110° допустимые пределы ширины полосы обработки одним распылителем при нижнем наклоне штанги обеспечиваются углом распыла 85°, при верхнем – углом 135...145°. Использование оригинального уравнивающего устройства позволяет снизить размах вертикальных колебаний штанги до 14°. Разность значений коэффициента вариации поперечного распределения рабочей жидкости при типовом и адаптивном ориентировании плоскостей факела распыла в модельном эксперименте составила 9,5%. Выдвинутая гипотеза подтверждена.

Ключевые слова: опрыскиватель, малогабаритный опрыскиватель, распределительная штанга, факел распыла, угол факела распыла, распылитель

Для цитирования: Дембовский И.А., Родимцев С.А. Концепция применения адаптивной штанговой распределительной системы малогабаритного селекционного опрыскивателя // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, № 3. С. 27-36. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-27-36>

ORIGINAL PAPER

Application concept of an adaptive boom distribution system for a small-size single-leg sprayer*I.A. Dembovskiy¹, S.A. Rodimtsev²*¹ Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin; Orel, Russia² Orel State University named after I.S. Turgenev; Orel, Russia¹ emilyenn@rambler.ru; <https://orcid.org/0009-0006-6975-7708>² rodimcew@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1849-4224>

Abstract. A small-size sprayer with vertical oscillations of the distributor boom without complex copying and compensating devices does not provide quality spraying. Primary seed production requires the development of new approaches to ensure the spreading accuracy of plant protection products (PPP). For this purpose the concept of application of adaptive distribution system of a small-size boom sprayer is proposed and theoretically

substantiated. Field experiments with the use of a single-axis boom sprayer of the wheelbarrow type were carried out. The theoretical description of conditions of fulfillment of the spraying operation in relation to violation of the scheme of distribution of working liquid is given. Optimization of values of current frontal angles of the spraying torch is carried out. It has been established that the average range of vertical vibrations of the boom of a single-legged sprayer, like a wheelbarrow, ranges from 16° to 29° . A hypothesis has been proposed to increase the uniformity of distribution of liquid preparations. This is achieved by controlling the geometry of the spray pattern. Analytical dependences of the influence of the geometric parameters of the sprayer and the angle of its transverse inclination on the formed width of the processed strip and the required spray pattern angle were found. A nomogram and operational schedule of sprayer operating modes for the adaptive sprayer distribution system have been developed. With a base spray angle of 110° , the permissible limits for the width of the processing strip; with a lower tilt of the boom, a spray angle of 85° is provided, and with an upper tilt, 135 to 145° . The use of the original balancing device reduces the vertical boom oscillation range up to 14° . The difference in the values of the coefficient of variation of the transverse distribution of the working fluid, at typical and adaptive orientation of the planes of the spray-cone angle in the model experiment was 9.5%. The proposed hypothesis is confirmed.

Keywords: field sprayer, small-size sprayer, distribution boom, spray cone, spray-cone angle, sprayer

For citation: Dembovskiy I.A., Rodimtsev S.A. Application concept of an adaptive boom distribution system for a small-size single-leg sprayer. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2024;26(3):27-36. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-27-36>

Введение

Повышение урожайности, сокращение затрат на производство сельхозпродукции и снижение ее потерь во многом обеспечиваются использованием средств защиты растений (СЗР), различных стимуляторов роста и удобрений. Борьба с возбудителями и болезнями растений способствует увеличению урожайности культур в 1,5...2,0 раза [1]. Мировой рынок химических препаратов для защиты растений будет расти, к 2027 г. достигнет 94,4 млрд долл.¹, и в обозримой перспективе преимущественное использование пестицидов и удобрений останется безальтернативным.

При операции опрыскивания лишь 10...80% препарата попадает на объект² защиты [2], до 40% СЗР распределяется по обрабатываемой поверхности крайне неравномерно [2]. В реальных производственных условиях коэффициент вариации распределения рабочей жидкости по ширине захвата штанги даже при правильно подобранных распылителях, отсутствии износа и технически исправных базовых узлах опрыскивателя способен превышать более 50% [3] (при нормативе до 25% для малообъемного и обычного опрыскивания³).

¹ Global chemical distribution market forecast 2024-2032. Information from the Inkwoodresearch service. URL: <https://inkwoodresearch.com/reports/chemical-distribution-market/> (дата обращения: 08.04.2024).

² Опрыскиватели. Основные тенденции развития опрыскивателей. URL: https://itexn.com/1548_opryskivateli-osnovnyetendencii-razvitija-opryskivatelej.html (дата обращения: 08.04.2024).

³ Зинченко В.А. Агроекотоксикологические основы применения пестицидов: Учебное пособие. М.: Изд-во МСХА, 2000. 180 с.

Нарушение процесса внесения СЗР и удобрений приводит к негативным последствиям: сносу частиц рабочей жидкости и отрицательному воздействию на соседние посевы; усилению экологической нагрузки на расстоянии до 20 км от места обработки⁴; снижению нормы внесения препарата, провоцирующему резистентность вредителей к препарату [4], и снижению его токсикологического воздействия на возбудителей болезней [5]; увеличению концентрации действующего вещества, вызывающего ожоги листьев растений [6], и увеличению риска остаточного содержания в продуктах питания [7]; к экономическим потерям хозяйств, составляющим до 50% средств на закупку СЗР⁵, и т.д. Отметим негативное влияние снижения качества распределения препаратов при выполнении полевых работ в селекции и в первичном семеноводстве, где должны соблюдаться требования агротехники возделывания линий и сортов и идентичные условия вегетации опытных посевов (принцип единственного различия).

Одной из причин ухудшения качества технологической операции опрыскивания является отклонение распределяющей штанги от первоначального положения вследствие внешних возмущений [8, 9]. Амплитуда вертикальных колебаний может составлять

⁴ Маркевич А.Е., Немировец Ю.Н. Основы эффективного применения пестицидов: Справочник в вопросах и ответах по механизации и контролю качества применения пестицидов в сельском хозяйстве. Горки: Учреждение образования «Могилевский государственный учебный центр подготовки, повышения квалификации, переподготовки кадров, консультирования и аграрной реформы», 2004. 60 с.

⁵ Гринь Н. Как подобрать форсунки для опрыскивания // Аграрный сектор. 2021. № 4 (46). С. 10.

до 300 мм и выше, вызывая соответствующее изменение ширины полосы обработки каждым распылителем до 38% и более [10].

Повышение равномерности опрыскивания достигается оснащением опрыскивателей системами стабилизации штанги в горизонтальной и вертикальной плоскостях (маятниковые и шарнирно-рычажные системы стабилизации с механическими, пневматическими, гидравлическими и иными демпферными устройствами)⁶; наличием гасителей колебаний полевой штанги⁷, устройств подавления вибрации распределительной штанги и сочетанием ее различных поперечных сечений [11]; применением новейших систем и устройств стабилизации и предотвращения раскачивания штанги фирм-разработчиков John Deere (США), Jacoby (Германия), Kverneland Groupe, Hardi⁵ и др.

Перечисленные технические решения, относящиеся к самоходным, прицепным и навесным опрыскивателям, вследствие сложности и массивности конструкции неприменимы в селекционно-семеноводческом процессе. В связи с этим актуальными являются разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий и средств механизации производственных операций, реализующих качественно новые, высокоэффективные и наиболее адаптированные к внешним воздействиям подходы, способные решать задачи как в основном производстве, так и в специфических процессах создания новых сортов.

Цель исследований: разработка и теоретическое обоснование концепции применения отзывчивой к внешним возмущениям распределительной системы малогабаритного штангового опрыскивателя, компенсирующей риски снижения равномерности внесения СЗР из-за вертикальных колебаний.

Материалы и методы

В исследованиях использовались общие методы получения и анализа информации, геометрическое и математическое моделирование, теоретический анализ качественных и агротехнических параметров опрыскивания, обоснование закономерностей технологического процесса опрыскивания на основе известных законов физики и классической математики, метод номограммирования функций нескольких переменных. Математическая обработка опытных

⁶ Ревякин Е.Л., Краховецкий Н.Н. Машины для химической защиты растений в инновационных технологиях: Научный аналитический обзор. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. 124 с.

⁷ Крук И.С., Карпович С.К., Маркевич А.Е., Болванович В.В., Чешун П.В. Проектирование несущих конструкций, схем подвесок и систем стабилизации штанг полевых опрыскивателей: Рекомендации. Минск: БГАТУ, 2018. 172 с.

данных выполнялась в среде Microsoft Excel. Исследование полученных аналитических зависимостей проводилось в среде системы математических расчетов Mathcad 14,0 (русская версия). С целью принципиального подтверждения выдвигаемой гипотезы проведен полевой эксперимент на базе опытного поля Орловского ГАУ. Культура – озимая пшеница. Почва серая лесная, среднесуглинистая. Предварительная обработка – культивация. Предшественник – ячмень.

В качестве опытного образца опрыскивателя использовался малогабаритный одноопорный штанговый опрыскиватель тачечного типа, разработанный в Орловском ГАУ. Испытания распределительной системы осуществлялись в соответствии с требованиями ГОСТ Р 53053-2008⁸. Оригинальность методики полевого эксперимента заключалась в установке в каждом из опытных проходов стандартных щелевых распылителей Lechler ST 110-03 (Синий) так, чтобы фронтальная проекция угла факела распыла каждого распылителя соответствовала требуемой ширине полосы обработки при задаваемом угле наклона штанги опрыскивателя. Равномерность покрытия оценивалась коэффициентом вариации путем подсчета количества капель на учетных карточках. Повторность проведения опытов – 3-кратная; погрешность измерений – не более 5%. Математическая обработка результатов измерений производилась в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011⁹.

Результаты и их обсуждение

В селекционно-семеноводческом процессе находят применение малогабаритные штанговые опрыскиватели тачечного типа, которые характеризуются мобильностью, универсальностью, возможностью равномерной обработки значительных площадей опытных посевов, а также простотой эксплуатации и доступностью^{10,11} [12]. Опрыскиватель данного типа дает возможность большей маневренности на участках малой площади и селекционных деланках, игнорируя различия ширины междурядий

⁸ ГОСТ Р 53053-2008. Национальный стандарт Российской Федерации. Машины для защиты растений. Опрыскиватели. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2009. 45 с.

⁹ ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200089016> (дата обращения: 14.09.2022).

¹⁰ Павлов Л.В., Павлов С.А., Дринча В.М., Родимцев С.А. Машины для механизации селекционно-семеноводческих работ в овощеводстве: Справочное пособие. М., 2005. С. 95-97.

¹¹ Sprayers. Euro-pulve. URL: <https://www.euro-pulve.com/en/> (дата обращения: 08.04.2024).

опытных посевов. Однако удержание боковой штанги в горизонтальном положении требует определенных физических усилий и навыков оператора. Установлено, что размах средних значений вертикальных колебаний штанги одноопорного тачечного опрыскивателя может достигать 16...29° [13]. Снабжение конструкции уравновешивающим устройством позволяет уменьшить вероятность возникновения отрицательного угла наклона штанги, вызываемого ее моментом инерции [14]. В этом случае средние значения отрицательных (наклон вниз) и положительных (наклон вверх) отклонений боковой штанги будут иметь равную величину $\pm 7^\circ$ при общем размахе колебаний 14° .

Компенсация равномерности распределения СЗР при вертикальных колебаниях штанги малогабаритного опрыскивателя может быть достигнута изменением геометрии текущего угла факела распыла (ФР) распыливающих устройств. С учетом поворота распылителя вокруг своей оси ширина обрабатываемой полосы B_ϕ и угол ϕ поворота ФР относительно движения агрегата связаны отношением [15]:

$$B_\phi = 2R \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\phi, \quad (1)$$

где R – расстояние установки распылителя над обрабатываемой полосой, м; α – угол распыла факела, град.

Зависимость фронтального угла β ФР от угла ϕ поворота распылителя запишется как

$$\beta = \alpha (\cos \phi). \quad (2)$$

Ранними нашими исследованиями показано, что изменение геометрии фронтальной проекции распыла является наиболее универсальным и не требует применения сложных и массивных рычажных копирующих устройств [13, 16].

Технически данный способ воплощен в штанговом опрыскивателе, включающем в себя рабочий орган в виде горизонтальной штанги с установленными распылителями жидкости, имеющими возможность поворота вокруг своих продольных осей и датчиками положения распылителей относительно обрабатываемой поверхности [17]. Управление величиной фронтального угла ФР при колебаниях рабочего органа в поперечно-вертикальной плоскости позволяет сохранить ширину обрабатываемой полосы каждого распылителя независимо от их положения относительно поверхности земли. Также известен распылитель, имеющий корпус с выходным каналом и дефлектор, выполненный в виде набора подвижных пластин с отверстиями и ограничительными буртиками для регулирования угла ФР [18], однако вышеуказанные предложения имеют недостатки.

Так, в первом [17] индивидуально для каждого распылителя требуется применение сложного и многокомпонентного устройства контроля и привода. Кроме того, если уменьшение фронтального угла β распыла осевым поворотом на угол ϕ распылителя не представляет сложности ($\beta = f(\cos \phi)$, $\phi \in \{10^\circ, 90^\circ\}$), то увеличение β возможно лишь на $1...2^\circ$ за счет устранения технологического угла установки распылителей ($7...10^\circ$), предотвращающего слияние смежных потоков. Недостатками второго устройства [18] являются необходимость ручной перестановки пластин дефлектора и невозможность автоматического управления геометрией факела распыла при колебаниях штанги опрыскивателя.

Результаты критического анализа известных способов и технических решений компенсации равномерности распределения СЗР при вертикальных колебаниях штанги опрыскивателя позволили сформулировать следующую рабочую гипотезу: «*Равномерное распределение опрыскивателем рабочей жидкости по ширине захвата штанги, колеблющейся в поперечно-вертикальной плоскости, обеспечивается управлением текущей фронтальной проекции угла факела распыла, формируемого адаптивным подключением секционных дефлекторов распылителей*».

Предлагаемая нами концепция равномерного распределения СЗР независимо от вертикальных колебаний штанги опрыскивателя основана на применении комплекта мультирежимных распылителей, функционально связанных с цифровыми системами контроля и управления.

Общий вид мультирежимного распылителя дефлекторного типа [19] представлен на рисунке 1. В исходном положении распылителя шаровой регулирующий клапан *11* закрыт, а шаровой клапан *10* открыт для прохода рабочей жидкости. При этом рабочая жидкость поступает во входной канал *3*, и далее – в секционный канал *4*. Выходя через отверстие *7*, часть потока поступает на дефлектор *18* и посредством его боковых направляющих буртиков *21* приобретает при диспергировании угол α_{\min} распыла, например, на $1/3$ меньший угла $\alpha_{\text{ном}}$ распыла, установленного картой-заданием на внесение средства защиты или удобрения. Другая часть потока рабочей жидкости поступает в секционный канал *5*, откуда через отверстие *8* распределяется на секторный дефлектор *19*, где благодаря направляющим буртикам *22* и центральному ребру *24* формируется в секторный факел распыла с внешним углом $\alpha_{\text{ном}}$ при вершине, установленным картой-заданием на обработку, и внутренним углом γ_{\min} симметричного оси распыла незаполненного сектора, равным углу α_{\min} распыла, сформированного предыдущим дефлектором *18*.

При уменьшении расстояния от распылителя до обрабатываемой поверхности, фиксируемого установленными на штанге опрыскивателя датчиками расположения, бортовой компьютер опрыскивателя подает управляющий электрический сигнал на электромагнитный привод 17. В результате происходит поворот вала 15 на угол 90°, открывая нормально закрытый шаровой клапан 11. При этом часть рабочей жидкости из секционного канала 5 поступает в секционный канал 6, откуда, минуя выходное отверстие 9, распределяется на секторный дефлектор 20. Благодаря направляющим буртикам 23 и центральному

ребру 25 жидкость диспергируется секторным факелом распыла с внешним углом α_{max} при вершине, например, на 1/3 большим угла α_{nom} распыла, и внутренним углом γ_{nom} симметричного оси распыла незаполненного сектора, равным внешнему углу α_{nom} распыла, сформированного предыдущим дефлектором 19. Таким образом, ширина полосы внесения средства защиты или удобрения увеличивается, компенсируя уменьшение высоты расположения распылителя над обрабатываемой поверхностью.

При увеличении расстояния от распылителя до обрабатываемой поверхности, фиксируемого датчиками расположения, бортовой компьютер опрыскивателя подает управляющий электрический сигнал на электромагнитный привод 16, в результате чего происходит поворот вала 14 на угол 90°, закрывая нормально открытый шаровой клапан 10. При этом прекращается доступ потока к секторным дефлекторам 19 и 20, а диспергирование рабочей жидкости факелом распыла с углом α_{min} при вершине реализуется лишь дефлектором 18, оснащенным боковыми направляющими буртиками 21. В этом случае ширина полосы внесения средства защиты или удобрения уменьшается, компенсируя увеличение высоты расположения распылителя над обрабатываемой поверхностью.

Совместная «умная» работа всего комплекта мультирежимных распылителей формирует оригинальный принцип адаптивного распределения рабочей жидкости штанговым опрыскивателем, обеспечивая высокое качество технологической операции.

Общий вид и схема к расчету оптимальных углов фронтальной проекции ФР распылителей одноопорного штангового опрыскивателя представлены на рисунке 2. Циклы работы и режимы переключения отдельных распылителей одноопорного штангового

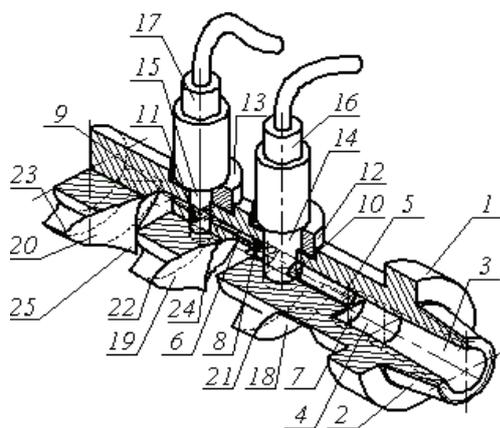


Рис. 1. Мультирежимный распылитель дефлекторного типа [19]:

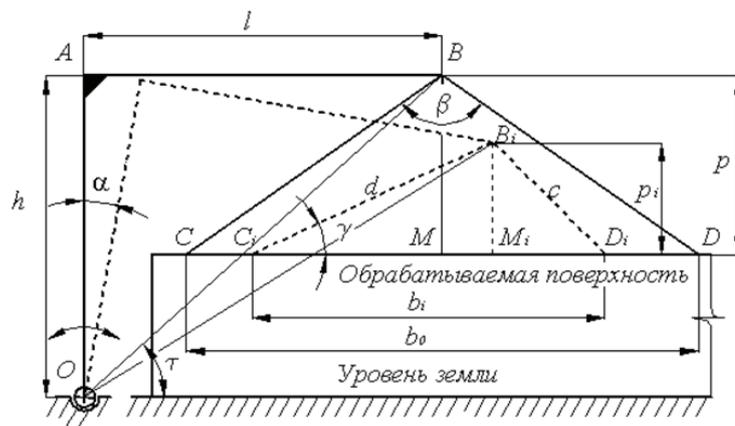
- 1 – корпус; 2 – конический хвостовик; 3 – входной канал;
- 4, 5, 6 – секционные каналы; 7, 8, 9 – выходные отверстия;
- 10, 11 – регулирующие клапаны; 18, 19, 20 – дефлекторы;
- 21, 22, 23 – направляющие буртики;
- 24, 25 – центральное ребро

Fig. 1. Multi-mode deflector type sprayer [19]:

- 1 – body; 2 – conical shank; 3 – input channel;
- 4, 5, 6 – sectional channels; 7, 8, 9 – outlet openings;
- 10, 11 – control valves; 18, 19, 20 – deflectors;
- 21, 22, 23 – guide collars;
- 24, 25 – central rib



а



б

Рис. 2. Опытный образец одноопорного штангового мотоопрыскивателя (а) и схема к расчету оптимальных углов фронтальной проекции ФР распылителей при колебаниях штанги в поперечно-вертикальной плоскости (б)

Fig. 2. Prototype of a single-support boom motorized sprayer (a) and a diagram for calculating the optimal angles of the front projection of the sprayer when the boom oscillates in the transverse-vertical plane (b)

опрыскивателя определяются рядом параметров: углом $\beta_{нач}$ факела распыла по условиям выполнения технологической операции; местом расположения распылителя на штанге (расстояние относительно оси колебаний), l ; высотой установки над обрабатываемой площадью распределяющей штанги опрыскивателя, p ; углом α наклона штанги в поперечно-вертикальной плоскости.

Ширина полосы обработки одной форсункой b_i , учитывающей геометрические параметры опрыскивателя и угол поперечного наклона штанги α , определяется по формуле [13, 16]:

$$b_i = \sqrt{\left(p - (h - \sqrt{h^2 + l^2}) \cdot \sin\left(\arctg \frac{h}{l} - \alpha\right) \right) \left[\frac{1}{\sin\left(90^\circ - \frac{\beta}{2} - \alpha\right)} \right]^2 + \left[\frac{1}{\cos\left(\frac{\beta}{2} - \alpha\right)} \right]^2 - 2 \left(\frac{1}{\sin\left(90^\circ - \frac{\beta}{2} - \alpha\right)} \right) \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\beta}{2} - \alpha\right)} \right) \cdot \cos\beta } \quad (3)$$

где h – высота установки штанги относительно земли, м.

Уравнение влияния угла α положения распределяющей штанги на требуемый угол β распыла с учетом дистанции l вылета распылителя относительно оси симметрии опрыскивателя записывается как

$$\beta = 2 \arcsin \frac{b_0}{2 \sqrt{\left(p - \left((h - \sqrt{h^2 + l^2}) \times \sin\left(\arctg \frac{h}{l} - \alpha\right) \right) \right)^2 + \left(\frac{b_0}{2} \right)^2 }} \quad (4)$$

где b_0 – расчетная ширина полосы обработки одним распылителем, м.

Графическая интерпретация выражений (3 и 4) использована для построения оптимизационной номограммы (рис 3). Номограмма дает возможность при любом положении штанги опрыскивателя получить значения текущих фронтальных углов распыла, отвечающих допустимой ширине полосы обработки.

При малообъемном и обычном опрыскивании неравномерность распределения (коэффициент вариации) рабочей жидкости допускается не более 25%, при ультрамалообъемном опрыскивании – не более 40%¹². Тогда при фронтальном угле распыла 110° и допустимой неравномерности внесения жидкого препарата 25% пределы отклонения ширины полосы обработки одной форсункой составят от 1,07 до 1,78 м (рис. 3). Как следует из верхнего сектора номограммы, в указанный промежуток укладываются параметры распределения жидкости,

¹² Зинченко В.А. Агроекотоксикологические основы применения пестицидов: Учебное пособие. М.: Изд-во МСХА, 2000. 180 с.

полученные распылом форсунок, находящихся на расстоянии $l = 2,5$ м от центра качения (при углах положения штанги $\pm 2^\circ$); $l = 2,0$ м ($\pm 3^\circ$); $l = 1,5$ м ($\pm 4^\circ$); $l = 1,0$ м ($-6^\circ \dots +7^\circ$). Факел распыла форсунки, ближайшей к центру качения штанги, обеспечивает допустимые параметры распределения жидкости при уклонах штанги от -11° до $+13^\circ$. Верхний сектор номограммы демонстрирует зависимость ширины зоны распыла от угла наклона к горизонту распределительной системы (штанги) при соответствующем удалении форсунки от центра качения. На нижнем секторе представлена графическая формализация функции влияния угла наклона штанги на требуемый фронтальный угол распыла, обеспечивающий оптимальную ширину обработки соответствующей форсункой.

Из примера распылителя, установленного на расстоянии $l = 1,0$ м от центра качения распределяющей системы, следует, что при поперечном наклоне штанги менее -7° и более $+7^\circ$ ширина полосы обработки выходит за пределы, допускаемые агротехническими

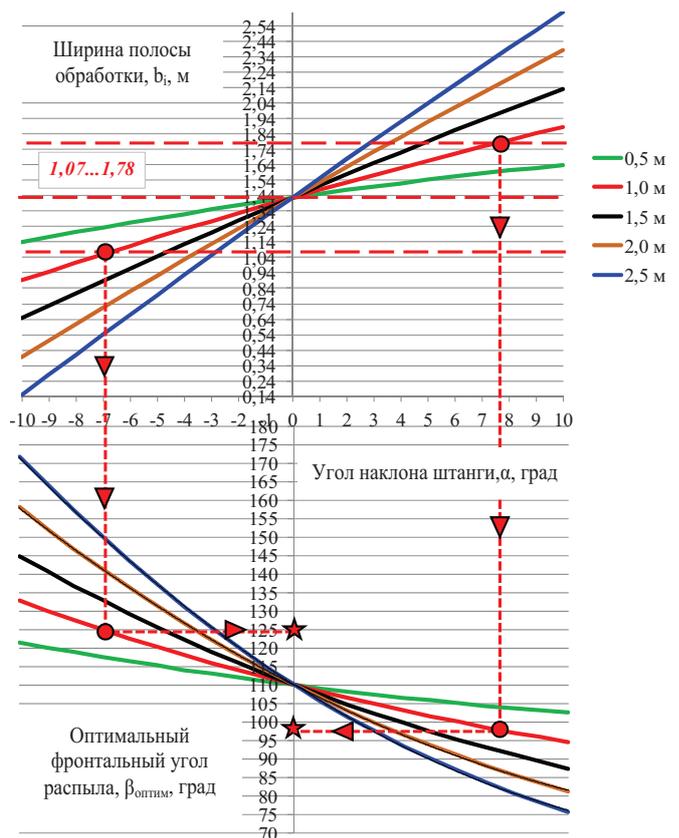


Рис. 3. Номограмма для определения оптимальных текущих значений фронтальных углов факела распыла форсунок опрыскивателя при вертикальных колебаниях распределяющей системы (для корневого угла распыла 110°)

Fig. 3. Nomogram for determining the optimal current values of the front angles of the spray pattern of sprayer nozzles during vertical vibrations of the distribution system (for a spray cone angle of 110°)

требованиями на операцию опрыскивания. Находим точки пересечения кривой функции $b_i^{1,0} = f(\alpha)$ с верхней и нижней границами допустимых пределов ширины полосы обработки. Далее проецируем найденные точки на соответствующую кривую функции $\beta^{1,0}_{оптим} = f(\alpha)$ в нижнем секторе номограммы. Проекция полученных точек пересечения на ось ординат сектора (отмечены звездочками) покажут оптимальные углы распыла данной форсунки, требуемые при данном положении распределяющей системы.

Найденные теоретические зависимости (3, 4) позволяют получить оптимальные конструктивно-режимные параметры распылителей адаптивной штанговой распределительной системы опрыскивателя. Режимы переключения распылителей представлены в таблице 1, операционный график функционирования адаптивной штанговой распределительной системы при ее отклонениях в поперечно-вертикальной плоскости – на рисунке 4. Полученные оптимальные

режимы функционирования распылителей предназначены для номинального угла ФР 110°, обеспечивающего расчетную ширину полосы обработки 1,428 м при высоте расположения распылителя над поверхностью обработки 0,5 м (1).

Работа распылителя, ближайшего к точке опоры (центру качения) одноопорного опрыскивателя, обеспечивает допустимые пределы ширины полосы обработки при отклонениях опрыскивателя до 10° и более в любом направлении поперечно-вертикальной плоскости без изменения геометрии ФР ($\beta = 110^\circ$) (рис. 3, 4).

Номинальный угол распыла $\beta = 110^\circ$ распылителя, устанавливаемого на расстоянии 1,0 м от оси симметрии опрыскивателя (удаление от центра качения в горизонтальной проекции), отвечает допустимому условию распределения жидкости (ширина полосы обработки – 1,07...1,78 м) в пределах от -5° до $+6^\circ$ колебаний штанги относительно горизонтали.

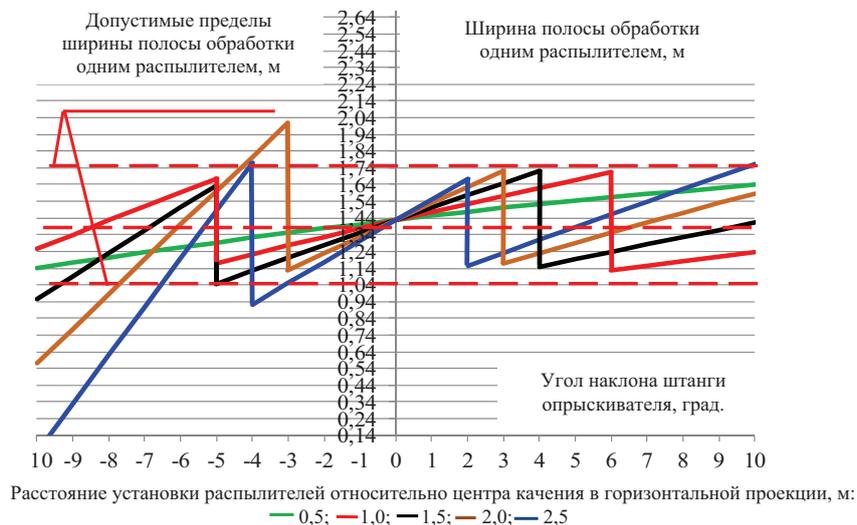


Рис. 4. Операционный график режимов работы адаптивной штанговой распределительной системы малогабаритного опрыскивателя

Fig. 4. Operational schedule of operating modes of the adaptive boom distribution system of a small-size sprayer

Алгоритм переключения режимов работы распылителей адаптивной распределительной системы опрыскивателя

Таблица 1

Table 1

Algorithm for switching the operating mode of sprayers of the adaptive distribution system

Расстояние установки распылителя относительно центра качения в горизонтальной проекции, м <i>Installation distance of the sprayer relative to the rolling center in horizontal projection, m</i>	Оптимальные углы, град., ФР распылителей, при углах, град., отклонения штанги в поперечно-вертикальной плоскости <i>Optimal angles (degrees) of spray cones, at angles (degrees) of boom deflection in the transverse-vertical plane</i>							
	0	±1	±2	±3	±4	±5	±6	±7
0,5	110	110	110	110	110	110	110	110
1,0	110	110	110	110	110	110/130	85/130	85/130
1,5	110	110	110	110	85/110	85/135	85/135	85/135
2,0	110	110	110	85/142	85/142	85/142	85/142	85/142
2,5	110	110	85/110	85/110	85/145	85/145	85/145	85/145

Соответственно данный распылитель нуждается в переключении режима распыла при достижении наклона распределительной штанги от -5° и менее на угол ФР $\beta = 130^\circ$, при $+6^\circ$ и более – на угол ФР $\beta = 85^\circ$. Аналогичным будет алгоритм переключения режимов распыла для остальных распылителей комплекта. Очевидно, что достижение условий равномерности распределения СЗР для отрицательных значений α (наклон штанги вниз) обусловлено необходимостью использования больших углов распыла. Это приводит к чрезмерным изменениям ширины полосы обработки (левая часть операционного графика на рисунке 4), что существенно снижает возможность подбора единого оптимального угла ФР даже в пределах небольшого ряда значений отклонения штанги. С увеличением дистанции удаления распылителя от центра качения данное ограничение ужесточается. В этой связи стоит обратить внимание на незначительный выход за допустимые пределы ширины полосы обработки, формируемой распылителем, устанавливаемым на расстоянии 2,5 м, функционирующего в режиме номинального угла распыла $\beta = 110^\circ$. Простым решением было бы перевести данный распылитель в режим угла распыла $\beta = 145^\circ$ уже при угле наклона опрыскивателя $\alpha = -3^\circ$. Однако в данном случае сокращается компенсируемый предел отрицательного угла наклона штанги. Более предпочтительным здесь является компенсация уменьшения ширины полосы обработки данным распылителем, увеличением допустимой ширины полосы обработки смежным распылителем, установленным на расстоянии 2,0 м относительно центра качения в горизонтальной проекции.

С целью эмпирического подтверждения выдвинутой научной гипотезы реализован полевой модельный эксперимент, в котором предусматривалась оценка принципиальной возможности достижения равномерного распределения рабочей жидкости по ширине захвата штанги при различных углах наклона одноопорного опрыскивателя. Моделирование изменения

угла ФР отдельных распылителей осуществлялось их осевым поворотом на требуемый угол. Использование стандартных распылителей (условие исключения слияния ближайших потоков) и выполненная ранее оптимизация значений конкретного ряда фронтальных проекций углов распыла предусматривали изменение положения штанги в пределах $0...+7^\circ$.

Результаты эксперимента показывают, что в пределах рассматриваемого диапазона поперечных уклонов изменение фронтальных проекций углов распыла, соответствующее расчетной ширине полосы обработки каждым распылителем, обеспечивает общую равномерность распределения рабочей жидкости по ширине захвата штанги независимо от положения последней в поперечно-вертикальной плоскости (табл. 2). Так, если с изменением угла положения штанги от 0 до 7° при типовой установке распылителей коэффициент v изменялся от 4,1 до 15,8% (или на 11,7%), то при адаптивном способе – от 4,2 до 6,4% (2,2%). Увеличение v при больших углах поперечного наклона распределительной системы во многом объясняется сносом более мелких капель. Количество последних повышалось при увеличении расстояния до поверхности обработки. Тем не менее реализуемое адаптивной системой устранение фактора, связанного с нарушением схемы перекрытия смежных потоков (при изменении положения штанги относительно обрабатываемой поверхности), увеличивает качество выполняемой технологической операции.

Предлагаемая концепция гарантирует повышение качества выполнения технологических операций по уходу за посевами: обеспечивает повышение равномерности распределения препаратов, снижение непроизводительных потерь, экономию средств производства, а также снижение экологической нагрузки на окружающую среду. Реализация предлагаемых решений в селекции растениеводства за счет снижения влияния неучитываемых факторов позволит улучшить условия опытной работы селекционного процесса.

Таблица 2

Равномерность распределения рабочей жидкости по ширине захвата штанги одноопорного опрыскивателя при типовом и адаптивном способах ориентирования плоскостей ФР

Table 2

Distribution uniformity of the working fluid across the working width of the boom of a single-support sprayer, with standard and adaptive methods of orienting the spray cone planes

Ориентирование плоскостей ФР распылителей относительно штанги <i>Orientation of the spray cone planes relative to the boom</i>	Коэффициент вариации, v , %, при угле наклона штанги в поперечно-вертикальной плоскости, град. <i>Coefficient of variation, v, %, at the angle of inclination of the boom in the transverse-vertical plane, degrees</i>							
	0	1	2	3	4	5	6	7
Типовое (8°) / <i>Typical (8°)</i>	4,1	4,2	5,7	9,4	9,6	10,4	13,3	15,8
Согласно указаниям (рис. 3) / <i>According to the instructions, Fig. 3</i>	4,2	4,2	4,4	4,7	5,0	5,3	5,8	6,4

Выводы

1. Использование оригинального уравновешивающего устройства одноопорного штангового опрыскивателя тачечного типа позволяет снизить размах средних значений вертикальных колебаний распределительной боковой штанги при работе с $16...29^\circ$ до 14° .
2. Предложенная конструкция мультирежимного дефлекторного распылителя обеспечивает равномерное распределение средств защиты растений при вертикальных колебаниях штанги опрыскивателя. При базовом угле распыла 110° допустимые пределы ширины полосы обработки одним распылителем при нижнем наклоне штанги обеспечиваются углом

распыла 85° , при верхнем – $135...145^\circ$ (в зависимости от места установки распылителя).

3. Теоретически и экспериментально подтверждена гипотеза о принципиальной возможности равномерного распределения рабочей жидкости по ширине захвата штанги при ее вертикальных колебаниях за счет управления текущей фронтальной проекции углов факела распыла отдельных распылителей. Разность значений коэффициента вариации поперечного распределения рабочей жидкости при типовом и адаптивном ориентировании плоскостей факела распыла в модельном эксперименте составила 9,5%.

Список источников

1. Диесперова Н.А., Диесперов К.В. Проблема импортозависимости в агрохимической отрасли России и пути ее решения // Вестник Челябинского государственного университета. 2023. № 11 (481). С. 155-166. <https://doi.org/10.47475/1994-2796-2023-481-11-155-166>
2. Мильченко Н.Ю. Усовершенствованная технология внесения средств химизации с поливной водой // Известия Нижегородского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2009. № 4 (16). С. 121-123. EDN: KYCPHL
3. Маркевич А.Е., Крук И.С., Бекбосынов С.Б., Болат У., Анищенко А.И. Оценка потерь пестицидов в растениеводстве // Современные тенденции развития сельскохозяйственного машиностроения, оснащения и технического сервиса в АПК: Сборник докладов Международной научно-практической конференции. Минск: Белорусский государственный аграрный технический университет, 2023. С. 144-150. EDN: ROTNUM
4. Коваленков В.Г., Тюрина Н.М., Павлова Л.И. Резистентность рапсового цветоеда как показатель перестройки генетической структуры популяций вредных видов под влиянием инсектицидов // Агрохимия. 2018. № 5. С. 54-62. <https://doi.org/10.7868/S0002188118050083>
5. Побединская М.А., Плуталов П.Н., Романова С.С., Кокаева Л.Ю., Николаев А.В., Александрова А.В., Еланский С.Н. Устойчивость возбудителей альтернариоза картофеля и томата к фунгицидам // Микология и фитопатология. 2012. Т. 46, № 6. С. 401-408. EDN: PILZBT
6. Попов Ю.В. Защита зерновых культур от болезней должна быть обоснованной // Защита и карантин растений. 2009. № 7. С. 42-45. EDN: KYBEVT
7. Куликова О.И., Федорова Т.Н., Кузнецов В.И., Орлова В.С. Экзогенные факторы риска возникновения болезни Паркинсона // Экология человека. 2019. № 1. С. 34-39. EDN: VZLNUZ
8. Труфляк Е.В., Хуснетдинов В.Е. Модель перемещения опрыскивателя для обработки тростника рисовой оросительной системы // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 2. С. 154-174. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.154-174>
9. Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В., Курбанов Р.К. Технические средства для химической защиты растений: состояние и перспективы развития // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 3. С. 12-18. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-12-18>
10. Мезникова М.В. Исследование проблем защиты растений от химически опасных воздействий в условиях чрезвычайных ситуаций // Вестник НЦБЖД. 2019. № 2 (40). С. 98-104. EDN: HRLMDU

References

1. Diesperova N.A., Diesperov K.V. Russian import dependency problem of the agrochemical industry and ways to solve it. *Bulletin of Chelyabinsk State University*. 2023;11:155-166. (In Russ.) <https://doi.org/10.47475/1994-2796-2023-481-11-155-166>
2. Milchenko N.Yu. Improved technology for introducing chemicals with irrigation water. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science And Higher Education*. 2009;4:121-123. (In Russ.)
3. Markevich A.E., Kruk I.S., Bekbosynov S.B., Bolat U., Anishchenko A.I. Assessment of pesticide losses in crop production. *In: Modern development trends of agricultural engineering, equipment and technical service in the agroindustrial sector: Proceedings of the International scientific and practical conference. Minsk: Belarusian State Agrarian Technical University*. 2023:144-150. (In Russ.)
4. Kovalenkov V.G., Tyurina N.M., Pavlova L.I. Resistance of rape beetle as an index of the restructuring of the genetic structure of pest populations as affected by insecticides. *Agrokhimia = Agrochemistry*. 2018;5:54-62. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0002188118050083>
5. Pobedinskaya M.A., Plutalov P.N., Romanova S.S., Kokayeva L.Yu., Nikolaev A.V., Aleksandrova A.V., Elansky S.N. Resistance of potato and tomato early blight pathogens to fungicides. *Mycology and Phytopathology*. 2012;46:6:401-408. (In Russ.)
6. Popov Yu.V. Protection of grain crops against disease should be valid. *Plant Protection and Quarantine*. 2009;7:42-45. (In Russ.)
7. Kulikova O.I., Fedorova T.N., Kuznetsov V.I., Orlova V.S. Exogenous factors of Parkinson's disease development. *Human Ecology*. 2019;1:34-39. (In Russ.)
8. Truflyak E.V., Khusnetdinov V.E. A sprayer movement model for treating reeds in rice irrigation system. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(2):154-174. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.154-174>
9. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eschin A.V., Kurbanov R.K. Technical means for chemical protection of plants: current state and development prospects. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022;24(3):12-18. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-12-18>
10. Meznikova M.V. Research on problems of plants protection against hazardous chemical impact in case of emergency situations. *Vestnik NTsBZhD = Bulletin of the Scientific Center of Belarusian Railways*. 2019;2:98-1047. (In Russ.)
11. Yan J., Xue X., Cui L., Ding S., Gu W., Le F. Analysis of dynamic behavior of spray boom under step excitation. *Applied Sciences*. 2021;11:10129. <https://doi.org/10.3390/app112110129>
12. Kozlov I.B., Stepanov B.E., Mochkova T.V., Maltsev N.V. Small-sized bicycle sprayer for selection plots. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2013;2:49-50. (In Russ.)

11. Yan J., Xue X., Cui L., Ding S., Gu W., Le F. Analysis of dynamic behavior of spray boom under step excitation. *Applied Sciences*. 2021;11:10129. <https://doi.org/10.3390/app112110129>

12. Козлов И.Б., Степанов Б.Е., Мочкова Т.В., Мальцев Н.В. Малогабаритный веолопрыскиватель для селекционных участков // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. № 2. С. 49-50. EDN: PYYRCH

13. Дембовский И.А., Родимцев С.А. Определение величины колебаний штанги тачечного опрыскивателя в поперечно-вертикальной плоскости // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса: Юбилейный сборник научных трудов XV Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону: ООО ДГТУ-ПРИНТ, 2022. С. 169-173. EDN: EJNWGF

14. Родимцев С.А., Шапенкова А.А., Тимохин О.В., Патрин Е.И. Обоснование эргономических характеристик малогабаритного штангового опрыскивателя тачечного типа // Безопасность жизнедеятельности. 2014. № 12 (168). С. 17-23. EDN: TBZKOP

15. Омаров А.Н., Каиргалиев Е.К., Бакыткалиев А.А. Теоретическое обоснование применения форсунок с щелевым распылением // Инновационная техника и технологии. 2019. № 1 (18) С. 32-37. EDN: ZELWMH

16. Родимцев С.А., Дембовский И.А., Панин Е.Н. Разработка и обоснование параметров мобильного опрыскивателя для садово-паркового и ландшафтного строительства // Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 2 (81). С. 26-34. EDN: HEMKNL

17. Штанговый опрыскиватель: а.с. SU1308307 A1, МПК A01M7/00(1987.05) / В.В. Ченцов, В.Л. Фрумович, А.В. Лагутин, Я.Ю. Сергеев; заявл. 06.28.1985; опубл. 05.07.1987, Бюл. № 17. EDN: RMJKGB

18. Распылитель: а.с. SU650589 A1, МПК A01M7/00(1979.07) / А.И. Билык, И.П. Масло, П.Г. Судак; заявл. 22.11.1977; опубл. 05.03.1979, Бюл. № 9. EDN: WUNQPA

19. Регулируемый дефлекторный распылитель: Патент RU224484 U1, МПК A01M7/00(2023.12) / С.А. Родимцев, И.А. Дембовский, А.Ю. Родичев, А.В. Кулев, М.В. Кулев, Д.О. Ломакин; заявл. 20.12.2023; опубл. 27.03.2024, Бюл. № 9. EDN: ZHBKPU

Информация об авторах

Илья Андреевич Дембовский, аспирант, преподаватель многопрофильного колледжа; Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина; 302019, Российская Федерация, г. Орел, ул. Генерала Родина, 69; <https://orcid.org/0009-0006-6975-7708>; emilyenn@rambler.ru

Сергей Александрович Родимцев, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры сервиса и ремонта машин; Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева; 302030, г. Орел, ул. Московская, 77; <https://orcid.org/0000-0003-1849-4224>; rodimcew@yandex.ru

Вклад авторов

С.А. Родимцев – руководство исследованием, концептуализация, методология;

И.А. Дембовский – концептуализация, формальный анализ, проведение исследования, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 08.04.2024, после рецензирования и доработки 27.04.2024; принята к публикации 04.05.2024

13. Dembovskiy I.A., Rodimtsev S.A. Determination of the value of oscillations of a room sprayer in the transversal-vertical plane *In: Current state and development prospects of the agro-industrial sector: Proceedings of XV Anniversary International Scientific and Practical Conference. Rostov-on-Don: DSTU-PRINT Ltd., 2022:169-173. (In Russ.)*

14. Rodimtsev S.A., Shapenkova A.A., Timokhin O.V., Patrin E.I. Ground of ergonomic descriptions of small barbell sprinkler of wheelbarrow type. *Life Safety*. 2014;12:17-23. (In Russ.)

15. Omarov A.N., Kairgaliev E.K., Bakytkaiev A.A. Theoretical justification of application of forces with spinnish spray. *Innovative Machinery and Technology*. 2019;1:32-37. (In Russ.)

16. Rodimtsev S.A., Dembovsky I.A., Panin E.N. Development and substantiation of the parameters of a mobile sprayer for garden and park and landscape construction. *World of Transport and Technological Machines*. 2023;2:26-34. (In Russ.)

17. Chentsov V.V., Frumovich V.L., Lagutin A.V., Sergeev Ya. Yu. Boom sprayer: Author's certificate No. 1308307 USSR, IPC A01M7/00(1987.05), 1987. (In Russ.)

18. Bilyk A.I., Maslo I.P., Zander P.G. Pulverizing jet: Author's certificate No. 650589 USSR, IPC A01M7/00(1979.07), 1979. (In Russ.)

19. Rodimtsev S.A., Dembovsky I.A., Rodichev A.Yu., Kulev A.V., Kulev M.V., Lomakin D.O. Adjustable deflector spray: Patent RU224484 U1, IPC A01M7/00(2023.12)

Author Information

Ilya A. Dembovskiy, postgraduate student, lecturer at Multidisciplinary College, Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin; 302019, Russian Federation, Orel, st. Generala Rodina, 69; <https://orcid.org/0009-0006-6975-7708>; emilyenn@rambler.ru

Sergey A. Rodimtsev, DSc (Eng), Associate Professor, Professor of the Department of Service and Repair of Machines; Orel State University named after I.S. Turgenev; 302030, Orel, Moskovskaya street, 77; <https://orcid.org/0000-0003-1849-4224>; rodimcew@yandex.ru

Author Contribution

S.A. Rodimtsev – research supervision, conceptualization, methodology;

I.A. Dembovskiy – conceptualization, formal analysis, research, writing – original draft preparation, finalizing (reviewing and editing) of the manuscript.

Conflict of interests

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

Received 08.04.2024, Revised 27.04.2024, Accepted 04.05.2024

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 637.115:637.11

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-37-42>

Левитирующая доильная платформа «Карусель»: концептуальные подходы к созданию

В.В. Кирсанов¹, Д.Ю. Павкин², С.В. Кирсанов³^{1,2,3} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия¹ kirvv2014@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2549-4070>² dimqaqa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8769-8365>³ sergejkirsanovv@gmail.com

Аннотация. Крупные животноводческие комплексы работают в основном на импортном технологическом оборудовании в автоматизированных роторных доильных залах, которые обеспечивают максимальную пропускную способность – от 100 до 500 гол/ч. Наиболее капиталоемкой составной частью роторной доильной установки «Карусель» является вращающаяся платформа, несущая на себе основную нагрузку (собственный вес и массу перемещаемых животных). Практически круглосуточный режим работы предопределяет значительный расход электроэнергии и износ приводных, опорных, направляющих колес и рельсов, замена которых является трудоемким процессом. Остро стоит вопрос об импортозамещении оборудования. С целью повышения эксплуатационной надежности работы доильной установки «Карусель», снижения капитальных затрат при монтаже, текущих затрат на техническое обслуживание и ремонт авторами предложено разработать ресурсосберегающую конструкцию вращающейся доильной платформы. Предложены технологическая схема левитирующей доильной платформы «Карусель» с использованием движителей, построенных на принципах магнитной левитации (безопорного вывешивания) на постоянных магнитах (магнитная сборка Хальбаха), и структурно-логическая модель магнитного подвеса доильной платформы. К преимуществам такой системы относится практическое отсутствие силы трения на перемещение грузовой платформы с животными, что потребует значительно меньшей мощности привода. При этом обеспечиваются бесшумность передвижения, существенно меньшие эксплуатационные затраты, связанные с необходимостью замены опорных катков, смазывания подшипников, обслуживания 2-3-тяговых электроприводов и др. Инновационная привлекательность разработки заключается в возможности создания кольцевого и линейного магнито-планирующего электрического транспорта в технологических установках для передвижения и обслуживания животных в доильных залах, перемещения роботизированных кормовагонов в кормоцехах, складских помещениях и на ферме.

Ключевые слова: доильная платформа «Карусель», левитирующая доильная платформа, схема левитирующей доильной платформы, модель магнитного подвеса доильной платформы, магнитные сборки, магнитная сборка Хальбаха

Для цитирования: Кирсанов В.В., Павкин Д.Ю., Кирсанов С.В. Левитирующая доильная платформа «Карусель»: концептуальные подходы к созданию // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 3. С. 37-42. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-37-42>

ORIGINAL ARTICLE

Levitating 'Carousel' milking platform: conceptual approaches to its designing

V.V. Kirsanov¹, D. Yu. Pavkin², S.V. Kirsanov³^{1,2,3} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia¹ kirvv2014@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2549-4070>² dimqaqa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8769-8365>³ sergejkirsanovv@gmail.com

Abstract. Large dairy farms use mainly imported technological equipment in automated rotary milking parlors, which provide the maximum throughput capacity of 100 to 500 animals per hour. The most capital-intensive component of the rotary 'Carousel' milking parlor is a rotating platform carrying the main load (its own weight and the weight of the animals being moved). The nearly round-the-clock operation mode predetermines significant power consumption and wear of the drive, support, guide rollers and rails making it rather labor-intensive to replace

these parts. Therefore, an urgent issue is the import substitution of equipment. In order to increase the operational reliability of the rotary 'Carousel' milking parlor, to reduce capital costs during installation, and current costs for maintenance and repair, the authors proposed to develop a resource-saving design of the rotary milking platform. The paper presents the technological design of levitating milking platform of the 'Carousel' type with the use of movers operating on permanent magnets (Halbach array) on the magnetic levitation principle (unsupported suspension), and the structural and logical model of a magnetic suspension of the milking platform. The advantages of such a system include the practical absence of friction force to rotate the load-carrying platform with animals, which will require significantly lower drive power. In addition, we obtain quiet movement, significantly lower operating costs associated with the need to replace the support rollers, lubricate bearings, and maintain two or three electric traction drives, etc. The innovative attractiveness of the development lies in the possibility of designing circular and linear magneto-planning electric transport in technological installations to move and manage animals in milking parlors, and move robotic feed cars in feed shops, storage facilities, and around the farm.

Keywords: 'Carousel' milking parlor, levitating milking platform, scheme of levitating milking platform, magnetic suspension model of milking platform, magnetic assemblies, Halbach array

For citation: Kirsanov V.V., Pavkin D.Yu., Kirsanov S.V. Levitating 'Carousel' milking platform: conceptual approaches to its designing. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2024;26(3):37-42. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-37-42>

Введение

Производство молока в России в 2023 г. незначительно увеличилось по сравнению с 2022 г. и составило 33,5 млн т, тогда как общий парк доильного оборудования снизился с 20,6 до 19,8 тыс. шт., что свидетельствует о снижении технической оснащенности сельхозтоваропроизводителей. Похожая ситуация наблюдается и в машинно-тракторном парке. Эту тенденцию можно характеризовать преимущественным ростом и укреплением крупных молочных хозяйств и комплексов численностью поголовья более 1200 гол. (ГК «ЭкоНива», Агрокомплекс им. Н.И. Ткачева, ГК «Агропромкомплектация» и др.), работающих в основном на импортном технологическом оборудовании фирм Де Лаваль (Швеция), ГЕА ФАРМ (Германия), Лели (Голландия) и др.¹. Крупные комплексы используют более высокопроизводительное доильное оборудование (установки «Параллель» и «Карусель»), что приводит к сокращению численности парка с одновременным ростом единичной мощности (производительности) технологического оборудования для обслуживания животных [1]. Данную тенденцию подтверждает и рост импортозависимости по оборудованию, которое для крупных ферм и комплексов составляет от 75 до 90% (доильные установки «Карусель», доильные роботы, кормомиксеры, оборудование для микроклимата и др.).

На фермах с поголовьем свыше 1000 гол. наибольшее распространение получили роторно-конвейерные доильные установки типа «Карусель»

вместимостью от 40 до 100 доильных мест. К достоинствам данных установок относится высокая производительность (от 120 до 500 гол/ч), рациональная рабочая поза операторов и малая зона их обслуживания, удобная логистика перемещения животных (вход и выход с одной стороны)².

Наиболее капиталоемкой составной частью роторной доильной установки «Карусель» является вращающаяся платформа, которая несет на себе основную нагрузку: собственный вес и массу перемещаемых животных. При этом в сумме масса одного скотоместа достигает 1200 кг и более, что предопределяет повышенный износ колесных движителей (рельс-колесо) и ведущих колес фрикционных передач электроприводов платформы³. Поэтому актуальной является разработка ресурсосберегающей конструкции самой платформы с использованием движителей, построенных на принципах магнитной левитации (безопорного вывешивания) на постоянных магнитах⁴.

Цель исследований: разработка методов построения ресурсосберегающей конструкции вращающейся доильной платформы «Карусель» на принципах магнитной левитации.

² Кузьмина Т.Н., Мишуров Н.П., Федоренко В.Ф., Гольяпин В.Я. и др. Сельскохозяйственная техника. Машины и оборудование для животноводства: Каталог. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2023. 172 с.

³ Доильная карусель AutoRotor PerFormer. URL: <https://agritech.ru/catalog/item/1471/> (дата обращения: 01.02.2024).

⁴ Андрей Повный. Магнитная левитация на транспорте – маглев, системы Хальбаха и Inductrack // Школа для электрика. URL: <https://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/2565-magnitnaya-levitaciya-na-transporte.html> (дата обращения: 01.02.2024).

¹ Измайлов А.Ю., Цой Ю.А., Кирсанов В.В. Технологические основы алгоритмизации и цифрового управления процессами молочных ферм: Монография. М.: ИНФРА-М, 2019. 208 с.

Материалы и методы

Несмотря на многообразие форм расположения животных и предложенных технологических схем, современные доильные установки «Карусель» различаются в основном по способу расположения животных и расположению оператора (внутри платформы или снаружи) (рис. 1). Для хорошо подобранного поголовья большой численности рекомендуются «Карусели» с внешним доением, которые являются более компактными и производительными. К недостаткам их использования можно отнести быстрый выход животных из зоны видимости оператора, в то время как внутри платформы оператор всегда их контролирует и при необходимости может вмешаться в процесс доения (подключить заново доильный аппарат в случае его спадания и др.) [2].

Рассмотрим некоторые конструктивные особенности доильных платформ «Карусель» различных производителей (рис. 2-4). Наиболее известным является доильное оборудование фирм Де Лаваль, ГЕА ФАРМ, Боу Матик, Вайкато и др.

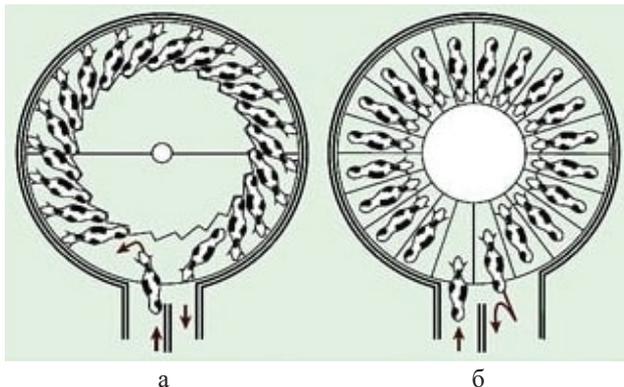


Рис. 1. Технологические схемы доильного зала «Карусель» с расположением оператора внутри платформы типа «Елочка» (а) и снаружи типа «Параллель» (б)

Fig. 1. Technological plans of the 'Carousel' milking parlor with the operator's location inside the 'Herringbone' type platform (a) and outside of the 'Parallel' type platform (b)

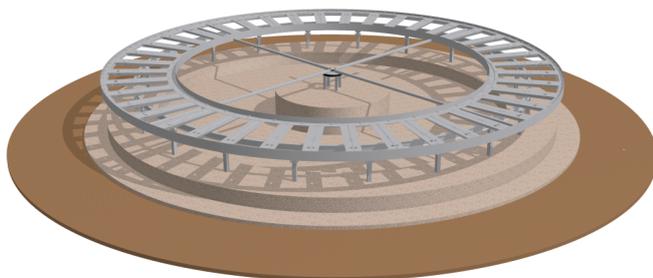


Рис. 2. Доильная платформа «Карусель» без стойл. Общий вид

Fig. 2. 'Carousel' milking platform without stalls. General view

Результаты и их обсуждение

Все вращающиеся доильные залы содержат типовую вращающуюся платформу, вмещающую от 30 до 100 коров. При создании такой конструкции могут возникать определенные сложности, связанные с большими размерами самой «Карусели» и высокой нагрузкой на движители [3]. Анализ существующих технологий показывает, что типичная «Карусель» состоит из бетонного основания, на котором устанавливают неподвижную часть и затем собирают вращающуюся платформу. Доильная «Карусель» опирается на конструкцию из нескольких изогнутых по окружности двутавровых балок. Между подвижным и неподвижным рельсами располагаются сцепленные с шагом 600 мм опорные Н-образные нейлоновые или полиуретановые колеса. Материал колес выбирают, исходя из максимального снижения шума при движении платформы и долговечности (рис. 3, 4). После сборки платформы на нее устанавливают опалубку и заливают бетоном для получения жесткой монолитной конструкции.

Данный способ проектирования, монтажа и эксплуатации доильной платформы имеет определенные проблемы и недостатки, связанные с точностью изготовления собираемой конструкции, а именно



Рис. 3. Движители доильной платформы – опорные колеса с рельсами (верхний рельс подвижный, нижний – неподвижный)

Fig. 3. Milking platform propulsors – support rollers with rails (the upper rail is movable, the lower rail is stationary)



Рис. 4. Боковые направляющие и опорные колеса (вид изнутри)

Fig. 4. Side rails and support rollers (inside view)

с точностью изгиба и сборки опорных двутавровых балок, которые должны точно копировать окружность для исключения возможных проблем при движении опорных колес. Кривизна балок может нарушаться при транспортировке их от места изготовления к месту монтажа, в процессе монтажа и др. К другим недостаткам данной конструкции можно отнести также регулировку расположения опорных колес, которые не движутся по идеальной траектории в виде окружности, могут сплющиваться в процессе эксплуатации, и их оси не направлены к центру «Карусели», что приводит к возрастанию механического сопротивления при перемещении и преждевременному их износу [4]. При этом происходит повышенная нагрузка на электропривод платформы, возникает нежелательный шум при движении, негативно влияющий на животных и обслуживающих их персонал. При выходе из строя одного или нескольких колес возрастает нагрузка на другие, что усугубляет проблему износа. Изнашиваются не только приводные, опорные и направляющие колеса, но и рельсы, которые также периодически подлежат достаточно трудоемкой замене.

Проблема износа значительно повышает частоту и трудоемкость проведения технического обслуживания и ремонтно-восстановительных работ, так как регулировка и техническое обслуживание движущихся колесных систем являются сложной и трудоемкой операцией. Для уменьшения материалоемкости, трудоемкости монтажных и ремонтно-восстановительных работ фирма Waikato предлагает вместо оцинкованной стали при изготовлении элементов доильной платформы применять композитные материалы – например, кевлар⁵.

С целью снижения указанных негативных явлений и недостатков следует изучить возможные альтернативные варианты разработки движителей платформы с использованием систем магнитной левитации [5]. Одним из возможных вариантов решения данной проблемы может служить технология магнитного подвеса на постоянных магнитах [6]. Предпосылки для создания такой конструкции и построения подвеса на силах отталкивания постоянных магнитов были проанализированы С.А. Брюхановым [7] при создании магнито-левитирующих высокоскоростных транспортных средств в качестве альтернативы использования колесно-рельсовых движителей [8]. Особенностью создания левитирующей доильной платформы является

низкая скорость ее перемещения (4...10 м/мин), что, казалось бы, нивелирует актуальность использования технологии магнитного подвеса. Однако ограниченный срок службы движителей, обусловленный износом полиуретановых и нейлоновых опорных и боковых направляющих колес, рельсов (двутавровых балок), вызванный высокой загрузкой оборудования (20 ч в сутки) требует сложной замены, остановки «Карусели» на длительный период, наличия квалифицированного технического персонала и специального оборудования для проведения технического обслуживания и ремонта. Это актуализирует вопрос о повышении надежности движителей платформы на основе систем магнитного подвеса, который позволит также создать более равномерную нагрузку на платформу, исключить механический износ за счет ликвидации самой колесной системы «Рельс-колесо», значительно снизить требуемую мощность на привод платформы.

Технологическая схема магнитного подвеса представлена на рисунке 5.

Горизонтальные магнитные сборки Хальбаха 4, 5 обеспечивают левитацию (вывешивание платформы) за счет возникающих в них вертикальных сил отталкивания постоянных магнитов, боковая стабилизация платформы обеспечивается вертикальными магнитными сборками 1, 2 за счет возникающих в них горизонтальных сил отталкивания.

Используя элементы алгебры логики⁶, структурно-логическую модель магнитного подвеса доильной платформы «Карусель» можно записать как

$$Z_{мп2} = f [ВМП_{мпс} : (X^{мпв}_{1г} \dots X^{мпв}_{нг}) \wedge ВМП_{мпс} : (X^{мпв}_{1г} \dots X^{мпв}_{нг})] \wedge f [ГМП_{мпс} : (X^{мпг}_{1б} \dots X^{мпг}_{нб}) \wedge ГМП_{мпс} : (X^{мпг}_{1б} \dots X^{мпг}_{нб})] \wedge УЭП_{в} [(X_{уп1} \dots X_{упn})], \quad (1)$$

где ВМП_{мпс} – неподвижная система вертикального магнитного подвеса платформы; (X^{мпв}_{1г}...X^{мпв}_{нг}) – горизонтальные магнитные сборки неподвижной системы вертикального магнитного подвеса платформы; ВМП_{мпс} – верхняя подвижная система вертикального магнитного подвеса платформы; (X^{мпв}_{1г}...X^{мпв}_{нг}) – горизонтальные магнитные сборки верхней подвижной системы вертикального магнитного подвеса платформы; ГМП_{мпс} – неподвижная магнитная система горизонтальной боковой стабилизации платформы; (X^{мпг}_{1б}...X^{мпг}_{нб}) – вертикальные магнитные сборки неподвижной системы горизонтальной боковой стабилизации платформы; ГМП_{мпс} – подвижная магнитная

⁵ Дорощев А. Платформа для «карусели» // Сельскохозяйственные вести. 2020. № 2. URL: https://agri-news.ru/zhurnal/2020/22020/platforma-dlya-karuseli/?sphrase_id=2742 (дата обращения 10.01.2024)

⁶ Гуров С.И. Булевы алгебры, упорядоченные множества, решетки: Определения, свойства, примеры. Серия «Основы защиты информации»: Монография. М.: Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2013. 352 с.

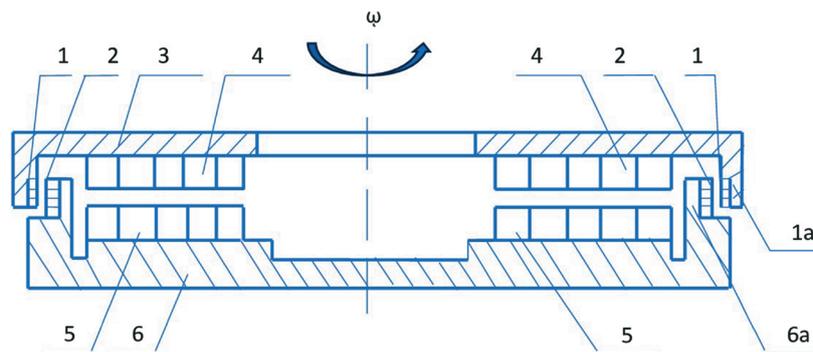


Рис. 5. Технологическая схема левитирующей доильной платформы «Карусель»:

- 1, 2 – вертикальная магнитная сборка Хальбаха подвижной и неподвижной системы горизонтальной боковой стабилизации платформы;
 1а – подвижная магнитная система горизонтальной боковой стабилизации платформы;
 3 – верхняя подвижная система вертикального магнитного подвеса платформы;
 4, 5 – горизонтальная магнитная сборка Хальбаха верхней подвижной и неподвижной системы вертикального магнитного подвеса платформы;
 6 – неподвижная система вертикального магнитного подвеса платформы;
 6а – неподвижная магнитная система горизонтальной боковой стабилизации платформы

Fig. 5. Technological plan of the levitating ‘Carousel’ milking platform:

- 1, 2 – vertical Halbach array of the movable and fixed system of horizontal lateral stabilization of the platform;
 1а – movable magnetic system of horizontal lateral stabilization of the platform;
 3 – upper movable system of vertical magnetic suspension (levitation) of the platform;
 4, 5 – horizontal Halbach array of the upper movable and fixed system of vertical magnetic suspension (levitation) of the platform;
 6 – fixed system of vertical magnetic suspension (levitation) of the platform;
 6а – fixed magnetic system of horizontal lateral stabilization of the platform

система горизонтальной боковой стабилизации платформы; ($X_{1в}^{мпг} \dots X_{пв}^{мпг}$) – вертикальные магнитные сборки подвижной системы горизонтальной боковой стабилизации платформы; УЭП_в – управляемый электропривод вращения платформы; ($X_{уп1} \dots X_{упп}$) – элементы управляемого электропривода вращения платформы.

Таким образом, реализация предложенной технологической схемы и структурно-логической модели позволит создать новую ресурсосберегающую конструкцию доильной платформы «Карусель» с использованием принципов магнитной левитации, обеспечить существенное снижение энергозатрат на привод и издержек на техническое обслуживание и ремонт платформы, обеспечить комфортное бесшумное передвижение животных.

Выводы

1. С учетом перспективности использования крупных форм хозяйствования в отрасли молочного животноводства актуальной проблемой при модернизации существующих и строительстве новых

ферм (1000 гол. и более) является создание высокопроизводительных отечественных доильных установок типа «Карусель» с повышенными эксплуатационными свойствами.

2. Анализ конструктивных решений доильных установок «Карусель» показывает, что наиболее капиталоемким, высоконагруженным и материалоемким узлом данного типа оборудования является вращающаяся доильная платформа, работающая практически в круглосуточном режиме. Это вызывает износ опорных и направляющих колес и рельсов, требующих периодической замены и постоянного проведения трудоемкого технического обслуживания и ремонта.

3. Для повышения эксплуатационной надежности работы доильной установки «Карусель», снижения капитальных затрат при монтаже, текущих затрат на техническое обслуживание и ремонт целесообразно разработать ресурсосберегающую конструкцию вращающейся доильной платформы, построенную на принципах магнитной левитации.

Список источников

1. Морозов Н.М., Кирсанов В.В., Ценч Ю.С. Историко-аналитическая оценка развития процессов автоматизации и роботизации в молочном животноводстве // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17, № 1. С. 11-18. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-11-18>
2. Тареева О.А. Анализ способов оптимизации работы доильных установок типа «Карусель» // Вестник НГИЭИ. 2013. № 4 (23). С. 122-130. EDN: QBJDWX
3. Вращающаяся доильная станция, комплект для ее монтажа и способы ее монтажа и эксплуатации: Патент RU2551565 C2 / А. Куртеманш; заяв. № 2012128038/13; опублик. 27.05.2015. Бюл. № 15. EDN: WHGXHW
4. Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Миронова А.В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17, № 1. С. 41-50. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50>
5. Зайцев А.А. Грузовая транспортная платформа на магнитолевитационной основе: опыт создания // Транспортные системы и технологии. 2015. Т. 1, № 2. С. 5-15. EDN: VKWIAH
6. Транспортная система: Патент RU2643900 C1 / Ю.Ф. Антонов, А.А. Зайцев; заяв. № 2016138885; опублик. 06.02.2018. Бюл. № 4. EDN: KVNBNZ
7. Устройство магнитной левитации на постоянных магнитах: Патент RU2743104 C1 / С.А. Брюханов; заяв. № 2020106525; опублик. 15.02.2021. Бюлл. № 5. EDN: DLKZTJ
8. Магнитолевитационное транспортное средство: Патент RU2724030 C1 / Т.С. Зименкова, С.А. Казначеев, А.С. Краснов; заяв. № 2019125403; опублик. 18.06.2020. Бюл. № 17. EDN: YCJNTW

Информация об авторах

- Владимир Вячеславович Кирсанов**¹, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор; kirvv2014@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2549-4070>
- Дмитрий Юрьевич Павкин**², канд. техн. наук; dimqaqa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8769-8365>
- Сергей Владимирович Кирсанов**³, sergejkirsanovv@gmail.com
^{1,2,3} Федеральное научное агроинженерное учреждение ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Вклад авторов

В.В. Кирсанов – общая концепция написания, план подготовки и просмотра материалов по статье, предложил использовать технологию магнитного подвеса;
 Д.Ю. Павкин – выполнил анализ конструктивных особенностей доильной платформы «Карусель», возникающих проблем и отказов при эксплуатации;
 С.В. Кирсанов – обосновал технологическую схему и предложил структурно-логическую модель доильной платформы «Карусель» на принципах магнитной левитации.
 Статья поступила 06.02.2024, после рецензирования и доработки 27.04.2024; принята к публикации 29.04.2024

References

1. Morozov N.M., Kirsanov V.V., Tsench Yu.S. Historical and analytical assessment of automation and robotization for milking processes. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(1):11-18. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-11-18>
2. Tareeva O.A. Analysis of optimization of milking units “Carousel”. *Vestnik NGIEI*. 2013;4:122-130. (In Russ.)
3. Courtemanche A. Rotary milking station, kit for its mounting and methods of its mounting and operation: patent, RU2551565 C2, 2015. (In Russ.)
4. Lobachevskiy Ya.P., Mironov D.A., Mironova A.V. Increasing the operating lifetime of wearable working bodies of agricultural machines. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(1):41-50. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50>
5. Zaitsev A.A. Cargo-carrying transport platform based on magnetic levitation: experience of creation. *Transportation Systems and Technology*. 2015;1(2):5-15. (In Russ.)
6. Antonov Yu.F., Zaitsev A.A. Transport system: patent RU2643900 C1, 2018. (In Russ.)
7. Bryukhanov S.A. Magnetic levitation device on permanent magnets: patent RU2743104 C1, 2021. (In Russ.)
8. Zimenkova T.S., Kaznacheev S.A., Krasnov A.S. Magnetic-levatory vehicle: patent RU2724030 C1, 2020. (In Russ.)

Author Information

- Vladimir V. Kirsanov**¹, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor; kirvv2014@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2549-4070>
- Dmitriy Yu. Pavkin**², PhD (Eng); dimqaqa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8769-8365>
- Sergey V. Kirsanov**³, sergejkirsanovv@gmail.com
^{1,2,3} Federal Scientific Agroengineering Centre VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutskiy Proezd Str., 5.

Author Contribution

V.V. Kirsanov – conceptualization, literature review, planning investigation of the use of magnetic suspension (levitation) technology;
 D.Yu. Pavkin – study of the design features of the ‘Carousel’ milking platform, problems and failures during its operation;
 S.V. Kirsanov – justification of the technological scheme; structural and logical modeling of the milking platform ‘Carousel’ operating on the principles of magnetic levitation.

Received 06.02.2024, Revised 27.04.2024, Accepted 29.04.2024

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.348.4

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-43-50>

Приготовление растворов различной концентрации

Ш.М. Бабаев¹, Н.В. Алдошин², А.Г. Меликов³, В.Л. Андреев⁴, А.С. Васильев⁵, В.В. Голубев⁶^{1,3} Азербайджанский государственный аграрный университет, г. Гянджа, Азербайджан² Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия⁴ Нижегородский государственный инженерно-экономический университет; г. Княгинино, Россия^{5,6} Тверская государственная сельскохозяйственная академия; г. Тверь, Россия¹ babashaxlar@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-4032-8665>² naldoshin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>³ melikaxmed61@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-5443-8819>⁴ andreev.vas@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2829-3074>⁵ vasilevtgsha@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0936-2011>⁶ slavasddg@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6421-6658>

Аннотация. Подготовка рабочих растворов удобрений и пестицидов для производственных технологических процессов подразумевает смешивание жидкостей с соблюдением точной дозировки компонентов. Существующие конструкции дозирующих и смешивающих устройств не обеспечивают качественное дозирование, к тому же при резком увеличении количества фракции наблюдается гидроудар. С целью устранения этих недостатков на основании аналитических исследований имеющихся разработок и материалов патентного поиска создано смешивающее устройство для приготовления растворов различной концентрации с возможностью регулирования соотношения их компонентов в процессе работы устройства. Устройство обеспечивает плавное изменение концентрации препаратов за счет конструкции дозирующих заслонок, формирующих окна квадратной формы с меняющейся конфигурацией, за счет перемещения относительно друг друга образующих их пластин как по горизонтальной, так и по вертикальной осям. Предложенное устройство плавно изменяет концентрацию раствора, тем самым более точно осуществляя дозирование. Экспериментально установили, что более плавное изменение расхода рабочей жидкости соответственно концентрации раствора наблюдается при расстоянии от осей симметрии дисков дозирующего устройства до оси вращения распределительных окон, равном 0,04...0,1 м. Отклонение фактического расхода рабочей жидкости от расчетного не превышает 5%. Интеграция разработанного смесителя в системы растворных узлов, опрыскивателей и других специализированных машин будет способствовать повышению качества выполнения мелкодисперсного орошения растений, семян и почвы.

Ключевые слова: препарат, раствор, дозирующее устройство, концентрация раствора, смешивание жидкостей

Для цитирования: Бабаев Ш.М., Алдошин Н.В., Меликов А.Г., Андреев В.Л., Васильев А.С., Голубев В.В. Приготовление растворов различной концентрации // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 3. С. 43-50. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-43-50>

ORIGINAL ARTICLE

Preparing solutions of a various concentration

Sh.M. Babaev¹, N.V. Aldoshin², A.G. Melikov³, V.L. Andreev⁴, A.S. Vasiliev⁵, V.V. Golubev⁶^{1,3} Azerbaijan State Agrarian University, Ganja, Azerbaijan² Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia⁴ Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics; Knyaginino, Russia^{5,6} Tver State Agricultural Academy; Tver, Russia¹ babashaxlar@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-4032-8665>² naldoshin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>³ melikaxmed61@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-5443-8819>⁴ andreev.vas@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2829-3074>⁵ vasilevtgsha@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0936-2011>⁶ slavasddg@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6421-6658>

Abstract. When preparing treatment solutions of fertilizers and pesticides for technological processes, one should mix liquids taking into account the precise dosing of components. However, the existing designs of dosing

and mixing devices do not provide qualitative dosing. Moreover, a sharp increase of fraction quantity may result in a hydraulic impact. To eliminate these disadvantages, based on analytical research of available designs and patent search results, the authors worked out a mixer for preparing solutions of various concentrations. The device is also capable of changing the ratio of components in the process of operation. The device provides smooth change of preparation concentrations due to the design of dosing valves forming square-shaped ports with a changing configuration. The port plates move relative to each other both horizontally and vertically. The proposed device smoothly changes the concentration of the solution, thereby providing for more accurate dosing. It was experimentally found that a smoother change in the flow rate of treatment liquid according to the solution concentration is observed at a distance from the axes of symmetry of the dosing device disks to the rotation axis of the distribution ports, equal to 0.04 to 0.1 m. The deviation of the actual treatment liquid flow rate from the calculated one does not exceed 5%. The integration of the developed mixer into the systems of fertigation units, sprayers and other specialized machines will ensure better quality of the fine irrigation of plants, seeds, and soil.

Key words: preparation, solution, dosing device, solution concentration, mixing of liquids

For citation: Babaev Sh.M., Aldoshin N.V., Melikov A.G., Andreev V.L., Vasiliev A.S., Golubev V.V. Preparing solutions of a various concentration. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2024;26(3):43-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-43-50>

Введение

Фолиарные обработки вегетирующих растений позволяют наиболее эффективно использовать ограниченные ресурсы макроудобрений, рострегулирующих веществ и средств защиты от вредных биологических объектов [1-4]. При приготовлении растворов удобрений и средств защиты растений различных концентраций применяется широкий спектр рабочих органов и сельскохозяйственной техники [1, 5-7]. В растениеводстве основными видамиготавливаемых растворов являются маточный и рабочий растворы. Маточный раствор представляет собой высококонцентрированную смесь компонентов, препаративная форма которых не позволяет осуществлять их прямое введение в рабочий раствор без специальной подготовки. Из маточных растворов готовят рабочие растворы для последующей прямой обработки, ими обогащают поливную жидкость в оросительных системах. Рабочие растворы имеют меньшую концентрацию действующих веществ и не требуют дополнительной подготовки к применению.

Основным способом приготовления растворов является смешивание с водой действующих веществ (удобрений, средств защиты растений, рострегулирующих веществ) непосредственно в опрыскивателях или при помощи специальных растворных узлов^{1,2} [6, 7]. При этом введение препаратов в растворы в необходимых количествах осуществляется

¹ Шаповал О.А., Можарова И.П., Веревкина Т.М., Мухина М.Т., Кононова Т.В. Методическое руководство по классификации смесевых агрохимикатов для целей государственной регистрации в части оценки биологической эффективности и регламентов применения на территории Российской Федерации. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. 44 с.

² ГОСТ 21507-2013. Защита растений. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2020. 32 с.

полной дозой на основании сопроводительных рекомендаций по применению. Часто наблюдаются перерасход дорогостоящих действующих веществ и несоответствие применяемых концентраций рабочих растворов фазам развития вредных объектов, возникает сложность при производстве ограниченных доз растворов – например, при ультрамалообъемном опрыскивании. Кроме того, имеющиеся дозирующие устройства имеют сложные и материалоемкие конструкции, эксплуатация и обслуживание которых требуют высококвалифицированного персонала [8-11]. Перечисленные недостатки обуславливают необходимость разработки новых эффективных конструкций смесителей, позволяющих выполнять оперативное бесступенчатое изменение концентрации растворов.

Цель исследований: разработка смешивающего устройства для приготовления растворов различной концентрации с возможностью регулирования соотношения смешиваемых жидких компонентов в процессе работы устройства.

Материалы и методы

На основании аналитических исследований имеющихся разработок и материалов патентного поиска разработано устройство, обеспечивающее плавное изменение концентрации препаратов при выполнении технологического процесса смешивания [8] (рис. 1).

Открывающиеся в корпусе и заслонке окна, имеющие квадратную форму, для удобства дозирования могут перемещаться относительно друг друга как по горизонтальной (на расстояние M от центра выходного окна заслонки), так и по вертикальной осям (на расстояние N от центра выходного окна корпуса) (рис. 2). Площадь поперечного сечения S , m^2 ,

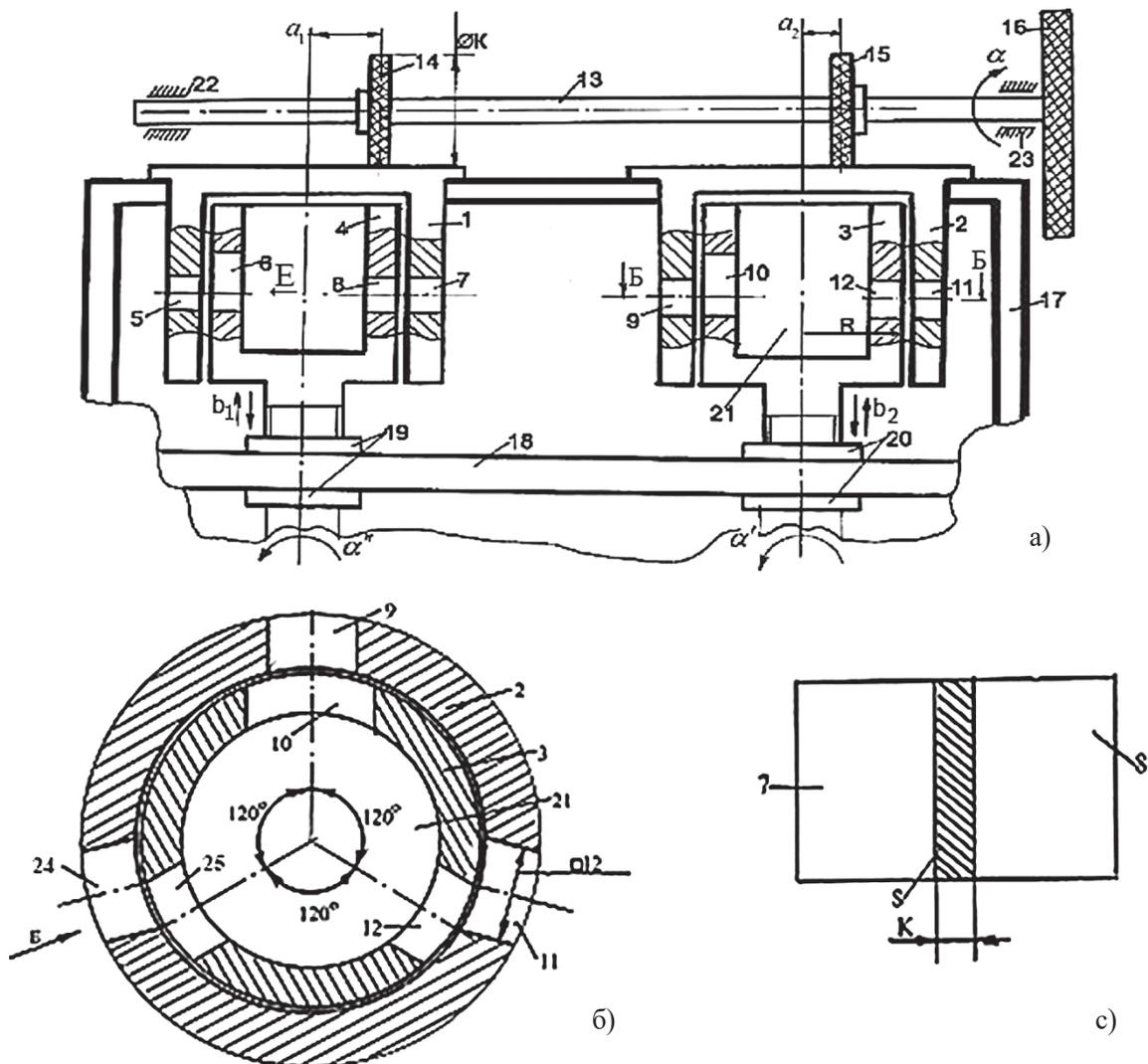


Рис. 1. Конструкция смесителя для дозирования растворов различной концентрации:
 а – кинематическая схема; б – вращающийся распределитель жидкостей (вид Б-Б); с – выходное окно (вид Е):

- 1, 2 – корпус жидкостного смесителя; 3, 4 – заслонки; 5, 9 – входные окна корпуса;
- 6, 10 – входные окна заслонки; 7, 11 – выходные окна корпуса; 8, 12 – выходные окна заслонки; 13 – вал;
- 14, 15, 16 – диск; 17 – неподвижная пластина; 18 – подвижная пластина; 19, 20 – пара гаек и болтов;
- 21 – разрыв в заслонке; 22, 23 – опоры; 24, 25 – выходные окна в корпусе и заслонке смесителя жидкости

Fig. 1. Design of a mixer for dosing solutions of various concentrations:

а – kinematic scheme; б – rotating liquid distributor (type B-B); с – exit port (type E):

- 1; 2 – liquid mixer housing; 3; 4 – flaps; 5; 9 – intake ports of the mixer housing;
- 6; 10 – intake ports of the flap; 7; 11 – exit ports of the housing; 8; 12 – exit ports of the flap; 13 – shaft;
- 14; 15; 16 – disk; 17 – fixed plate; 18 – movable plate; 19; 20 – a pair of nuts and bolts;
- 21 – flap gap; 22, 23 – support; 24, 25 – exit ports in the housing and the flap of the liquid mixer

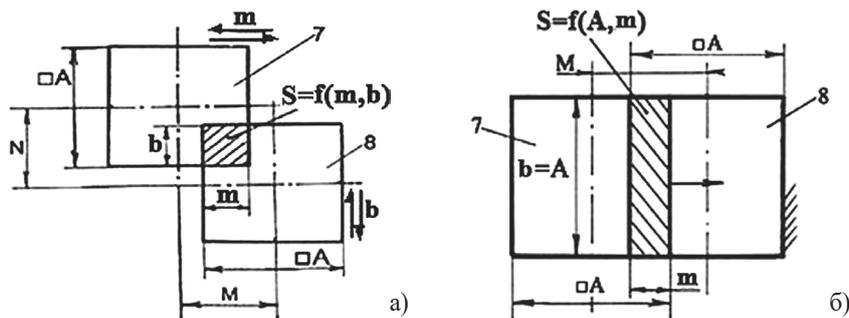


Рис. 2. Схема смещения выходного окна, образуемого корпусом (7) и заслонкой (8) смесителя

Fig. 2. Scheme of the displacement of the exit port formed by the housing (7) and the valve (8) of the mixer

образующегося в результате встречи окон, зависит от стороны квадрата, полученного смещением окна по горизонтальной и вертикальной осям на b и m , то есть $S = f(b, m)$ [9].

Концентрация растворов рабочей жидкости может плавно регулироваться посредством изменения показателей b и m в диапазоне от начала формирования живого сечения наименьшей площади до величины $S = A^2$, когда окна полностью перекрываются.

Вычисление нормы расхода рабочей жидкости при различных конструктивных параметрах и режимах работы производилось согласно схеме расчета, представленной на рисунке 3.

Отдельные расчеты норм расхода рабочей жидкости дозирующим устройством были обоснованы в рамках предварительных работ [10, 11].

Используя данные предварительных расчетов [11] и различные конструктивные параметры и режимы работы устройства, определяли расход рабочей жидкости Q , проходящей за время t через площадь живого сечения ($S = f(m, b)$) со стороны совпадения окон квадратной формы, открытых в заслонках корпуса устройства.

Исходная концентрация раствора препарата ω , %, определяется с помощью выражения

$$\omega_1 = \frac{m_{\text{препар.}}}{m_{\text{препар.}} + m_{\text{вода}}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

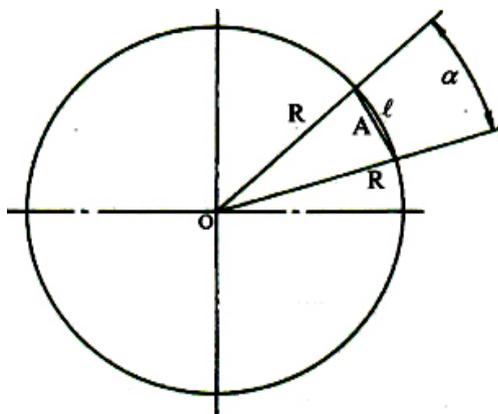


Рис. 3. Схема для расчета нормы расхода смешивающего устройства:

- A – длина стороны выходных окон квадратной формы в корпусе и заслонке;
- α – угол поворота корпуса делителя относительно его заслонки;
- R – радиус отверстия выходного окна;
- l – длина дуги при смещении окон

Fig. 3. Scheme for calculating the flow rate of the mixer:

- A – length of the side of the square-shaped exit ports in the housing and the flap;
- α – angle of rotation of the divider housing relative to its flap;
- R – radius of the opening of the exit port;
- l – length of the arc when the ports are displaced

Для получения раствора с меньшей концентрацией ω_2 необходимо рассчитать расход воды:

$$Q_1 \cdot \omega_1 = (Q_1 + Q_{\text{вода}}) \cdot \omega_2. \quad (2)$$

Поскольку Q_1 , ω_2 известны в выражении (2), то значение $Q_{\text{вода}}$ можно определить с помощью следующего выражения:

$$Q_{\text{вода}} = \frac{Q_1 \cdot \omega_1 - Q_1 \cdot \omega_2}{\omega_2} = \frac{Q_1 (\omega_1 - \omega_2)}{\omega_2}. \quad (3)$$

Ориентируясь на данные наших ранних исследований [10] и учитывая одинаковое время дозирования растворов, запишем систему:

$$\begin{cases} Q_{\text{препар.}} = \mu_{\text{препар.}} \cdot \gamma_{\text{препар.}} \cdot S_{\text{препар.}} \cdot \sqrt{2gp_{\text{препар.}}} \\ Q_{\text{вода}} = \mu_{\text{вода}} \cdot \gamma_{\text{вода}} \cdot S_{\text{вода}} \cdot \sqrt{2gp_{\text{вода}}}, \end{cases} \quad (4)$$

где μ – коэффициент расхода (безразмерный); γ – удельный вес, кг/м^3 ; S – площадь окна, м^2 ; p – давление в системе, мм вод. ст. ; g – ускорение выпуска, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Учитывая (4) в (3), можно записать:

$$\frac{\mu_{\text{вода}} \cdot \gamma_{\text{вода}} \cdot S_{\text{вода}} \cdot \sqrt{2gp_{\text{вода}}}}{\mu_{\text{препар.}} \cdot \gamma_{\text{препар.}} \cdot S_{\text{препар.}} \cdot \sqrt{2gp_{\text{препар.}}}} \cdot (\omega_1 - \omega_2) = \omega_2. \quad (5)$$

Учитывая, что значения $\mu_{\text{вода}}$, $\gamma_{\text{вода}}$, $p_{\text{вода}}$, μ_{ω_1} , γ_{ω_1} , p_{ω_1} и g являются постоянной величиной и определяются из условия конструктивной возможности, запишем:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{вода}} \cdot \gamma_{\text{вода}} \cdot \sqrt{2gp_{\text{вода}}} &= A_1; \\ \mu_{\text{препар.}} \cdot \gamma_{\text{препар.}} \cdot \sqrt{2gp_{\text{препар.}}} &= B_1, \end{aligned} \quad (6)$$

откуда получим:

$$A_1 \cdot S_{\text{вода}} = \frac{S_{\text{препар.}} \cdot B_1 \cdot (\omega_1 - \omega_2)}{\omega_2}. \quad (7)$$

При этом для разных значений ω_1 и ω_2 (раствор нужной концентрации из раствора исходной концентрации) получим зависимость:

$$\frac{S_{\text{вода}}}{S_{\text{препар.}}} = \frac{B_1 (\omega_1 - \omega_2)}{A_1 \cdot \omega_2}. \quad (8)$$

Если провести упрощение в (8), то можно записать:

$$\frac{B_1}{A_1} = K_1. \quad (9)$$

Учитывая также (9) в (8), получим:

$$\frac{S_{\text{вода}}}{S_{\text{препар.}}} = K_1 \cdot \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{\omega_2}, \quad (10)$$

где K – диаметр фрикционного диска, м.

В зависимостях (1), (4)...(8) и (10) регулируется концентрация рабочего раствора (удобрения или пестицида).

Получить раствор рабочей жидкости десятикратной концентрации относительно исходного позволяет следующее выражение:

$$\begin{cases} \omega_1 > \omega_2 \text{ для случая } + \left| \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_2} \right| \\ \omega_1 < \omega_2 \text{ для случая } - \left| \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_2} \right|. \end{cases} \quad (11)$$

В системе (11) первое выражение заключается в увеличении процентного содержания воды в растворе рабочей жидкости, а второе выражение – в его снижении. Другими словами, случай со знаком «+» в (11) указывает, во сколько раз в раствор добавлено больше воды, а случай со знаком «-» указывает, во сколько раз следует уменьшить массу раствора (снижение количества воды в растворе рабочей жидкости).

Соотношение для оценки концентрации раствора рабочей жидкости на основании теоретических исследований можно записать как

$$m_1 \cdot \omega_1 = m_2 \cdot \omega_2. \quad (12)$$

Используя выражение (12), можно рассчитать количество воды, требуемой за установленный промежуток времени для получения процентного раствора рабочей жидкости ω_2 :

$$m_2 = m_1 + m_{\text{вода}}. \quad (13)$$

Учитывая выражение (13), получим:

$$m_1 \cdot \omega_1 = (m_1 + m_{\text{вода}}) \cdot \omega_2. \quad (14)$$

Для получения раствора необходимой концентрации ω_2 следует учесть значение массы получаемого раствора рабочей жидкости:

$$m_1 + m_{\text{вода}} = \frac{m_1 \cdot \omega_1}{\omega_2}. \quad (15)$$

Массу воды для получения раствора требуемой концентрации ω_2 можно определить с помощью следующего выражения:

$$m_{\text{вода}} = \frac{m_1 \cdot \omega_1}{\omega_2} - m_1. \quad (16)$$

В то время как массовый раствор с концентрацией ω_1 дозируется из одной емкости m_1 одновременно, обычная вода массой $m_{\text{вода}} = \frac{m_1 \cdot \omega_1}{\omega_2} - m_1$ дозируется из другой.

Чтобы получить раствор рабочей жидкости с меньшей концентрацией, рассмотрим выражения (16) и (11) вместе:

$$m_{\text{вода}} = + \left| \frac{m_1 \cdot \omega_1}{\omega_2} - m_1 \right|. \quad (17)$$

Для случая $\omega_1 > \omega_2$ значение выражения под знаком модуля в выражении (17) будет положительным. Учитывая плотность растворов, коэффициент расхода и другие показатели, влияющие на процесс дозирования раствора рабочей жидкости, получаем выражение для соотношения площадей живого сечения, где они перемешиваются:

$$\begin{aligned} \frac{m_{\text{вода}}}{m_1} &= \frac{\frac{m_1 \cdot \omega_1}{\omega_2} - m_1}{m_1} = \frac{\frac{m_1 \cdot \omega_1 - m_1 \cdot \omega_2}{\omega_2}}{m_1} = \\ &= \frac{m_1(\omega_1 - \omega_2)}{m_1 \cdot \omega_1} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_2}. \end{aligned} \quad (18)$$

По результатам аналитических исследований отметим, что независимо от значений концентраций ω_1 и ω_2 исходного препарата для обеспечения качественного технологического процесса к требуемой концентрации раствора рабочей жидкости в естественных условиях за требуемый период дозируемая масса воды будет отличаться от массы дозируемого раствора $\left| \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_2} \right| \cdot m_1$. При $\omega_1 > \omega_2$ масса расходуемой в единицу времени воды будет существенно больше $\frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_2}$

массы раствора, а при $\omega_1 < \omega_2$ – существенно меньше.

Учитывая расход рабочей жидкости [10] как основной показатель качества работы смесителя с поворотной заслонкой и выражение для массового расхода раствора рабочей жидкости, получим:

$$\begin{cases} m_1 = \mu_1 \cdot \gamma_1 \cdot S_1 \cdot \sqrt{2gp} \cdot t \\ m_{\text{вода}} = \mu_{\text{вода}} \cdot \gamma_{\text{вода}} \cdot S_{\text{вода}} \cdot \sqrt{2gp} \cdot t. \end{cases} \quad (19)$$

С учетом регулировок дозатора можно плавно изменять концентрацию конечного материала в широких пределах и значений плотности.

Отдельные расчеты бесступенчатой регулировки концентрации рабочих растворов были выполнены в ходе реализации ранних экспериментальных исследований данного процесса [11].

Результаты и их обсуждение

Предлагаемое устройство смесителя реализовано в виде экспериментального образца, включающего в себя стойку с расположенными емкостями, дозирующее устройство, соединительные шланги для транспортировки и подачи рабочей жидкости (рис. 4).

Предложенное устройство смесителя позволяет изменять концентрацию рабочей жидкости в процессе его работы. При этом исключаются недостатки, присущие известным дозирующим устройствам. Вращающийся распределитель жидкостей предотвращает гидравлический удар в системе. Механизм смесителя имеет одинаковое количество поворотных



Рис. 4. Устройство смесителя для приготовления растворов различной концентрации

Fig. 4. Mixer for preparing solutions of a various concentration

заслоночных делителей жидкости, управляемых одним и тем же валом в устройстве, что обеспечивает быстрое и простое регулирование соотношения компонентов раствора. При этом осуществляется плавное изменение концентрации и возможно более точное дозирование компонентов разной плотности (рис. 5).

Проведено сравнение теоретических и экспериментальных значений расхода раствора при изменении расстояния a (рис. 6). При этом a представляет собой расстояние от осей симметрии дисков 14 и 15 до оси вращения распределительных окон. Тем самым изменение расстояния a характеризует плавность изменения концентрации рабочего раствора, подаваемого на обрабатываемый материал.

Анализ полученных зависимостей позволил сделать вывод о том, что более плавное изменение расхода, обуславливающее качество смешивания, наблюдается при значениях расстояния a , соответствующего диапазону от 0,04 до 0,1 м. Отклонение фактического расхода жидкости от расчетного не превышает более 5%, что находится в допустимых пределах.

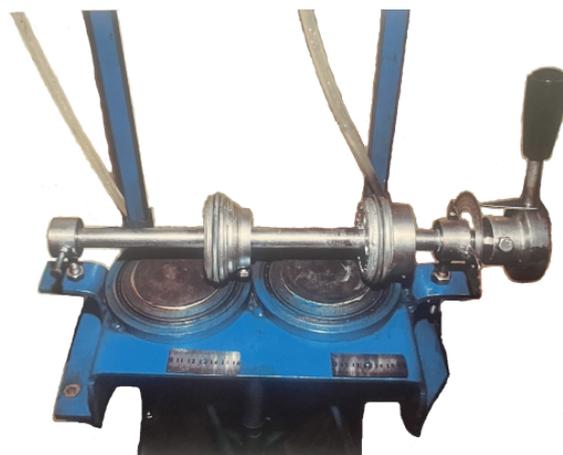


Рис. 5. Механизм дозирующего устройства смесителя

Fig. 5. Dosing mechanism of the mixer

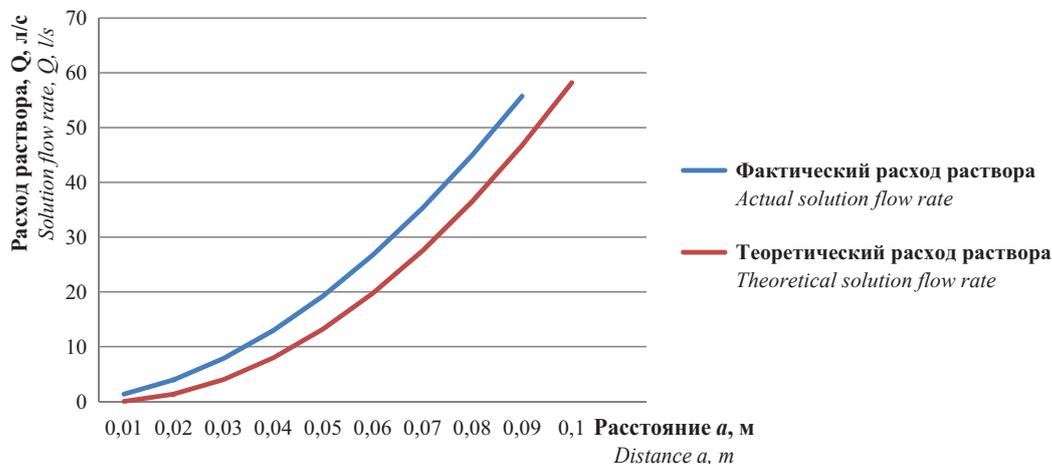


Рис. 6. Зависимости расхода Q от расстояния a при последовательном изменении переменных величин

Fig. 6. Relationship between the flow rate Q and the distance a with consecutive changes in variables

Выводы

1. Разработанное устройство для смешивания жидкостей различной консистенции за счет конструкции дозирующих заслонок обеспечивает плавное изменение концентрации препаратов.

2. Созданное дозирующее устройство позволяет быстро и бесступенчато регулировать необходимый уровень концентрации того или иного компонента и предотвращать перерасход действующих веществ в процессе приготовления раствора.

Список источников

1. Милоткин В.А., Шахов В.А., Асманкин Е.М., Ушаков Ю.А., Комарова Н.К., Смелик В.А. Исследование инновационных технологий, техники и жидких минеральных удобрений на основе карбамидно-аммиачной смеси при возделывании сельхозкультур // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2022. № 4 (96). С. 104-111. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-96-4-104-111>
2. Алдошин Н.В., Бабаев Ш.М., Васильев А.С., Кудрявцев А.В., Голубев В.В. Результаты применения модифицированного наконечника распылителя опрыскивателя при фолитарной обработке посевов кормовых культур // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2020. № 24 (187). С. 51-66. EDN: HVKUDL
3. Vasiliev A.S., Farinyuk Y.T., Yakovleva S.V., Kudryavtsev N.A. Phytopathological condition of flax crops during treatment with hightech preparations. *Annals of Biology*. 2022;38(1):71-76. EDN: RKVCSK
4. Смелик В.А., Иванов А.И., Цыганова Н.А. Экологические аспекты дифференцированного применения удобрений в точном земледелии // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2014. № 34. С. 147-149. EDN: SBYTMZ
5. Машина для дифференцированного внесения пестицидов, жидких минеральных удобрений и других агрохимикатов: Патент RU2748996 C1, МПК A01C23/00, A01M 7/00, A01G 25/09 / А.Ю. Измайлов, Л.А. Марченко, И.Г. Смирнов, А.Ю. Спиридонов; Заяв. № 2020131413, 24.09.2020, опубл. 02.06.2021. Бюл. № 16. EDN: VYCVSZ
6. Калинин А.Б., Теплинский И.З., Смелик В.А., Теплинская О.Н., Немцев И.С. 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>
7. Бабаев Ш.М. Разработка технологии и технических средств для локально-принудительного осаждения жидких пестицидов // Бюллетень науки и практики. 2022. Т. 8, № 3. С. 93-106. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/76/11>
8. Устройство для приготовления раствора соли разной концентрации: Патент AZ № а 2011 0004 / Ш.М. Бабаев, А.А. Аскерова. Баку, 2011.
9. Искендерзаде Э.Б., Бабаев Ш.М., Аббасов Б.А., Ахмедли Ш.В., Алиева Л.С. Определение живого сечения окна для сортировки зернистых материалов // Актуальные вопросы современной науки. 2018. № 1 (17). С. 27-32. EDN: YWYKZE
10. Аскерова А.А., Бабаев Ш.М. Расчет параметров дозирующего устройства для интенсификации процесса регулирования концентрации раствора // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2014. № 5-6 (341-342). С. 90-92. EDN: TEATLL
11. Бабаев Ш.М., Аскерова А.А. Исследование технологических характеристик устройства для дозирования раствора // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2015. № 2-3 (344-345). С. 90-92. EDN: TVWNAJ

Высокое качество смешивания наблюдается при расстоянии от осей симметрии дисков дозирующего устройства до оси вращения распределительных окон, равном 0,04...0,1 м. Отклонение фактического расхода рабочей жидкости от расчетного не превышает 5%.

3. Интеграция представленного смесителя в системы растворных узлов, опрыскивателей и других специализированных машин будет способствовать повышению качества выполнения мелкодисперсного орошения растений, семян и почвы.

References

1. Milyutkin V.A., Shakhov V.A., Asmankin E.M., Ushakov Yu.A., Komarova N.K., Smelik V.A. Research of innovative technologies, engineering and liquid mineral fertilizers based on carbamide-ammonia mixture for crop cultivation. *Izvestiya Orenburgskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2022;4(96):104-111. (In Russ.) <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-96-4-104-111>
2. Aldoshin N.V., Babaev Sh.M., Vasiliev A.S., Kudryavtsev A.V., Golubev V.V. Results of using a modified sprayer tip for of foliar treatment of forage crops. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2020;24 (187):51-66. (In Russ.)
3. Vasiliev A.S., Farinyuk Y.T., Yakovleva S.V., Kudryavtsev N.A. Phytopathological condition of flax crops during treatment with hightech preparations. *Annals of Biology*. 2022;38(1):71-76.
4. Smelik V.A., Ivanov A.I., Tsyganova N.A. Ecological aspects of variable-rate application of fertilizers in precision farming. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2014;34:147-149. (In Russ.)
5. Izmajlov A.Y., Marchenko L.A., Smirnov I.G., Spiridonov A.Y. Machine for differentiated application of pesticides, liquid mineral fertilizers and agrochemicals: Patent No 2748996 C1 Russian Federation, IPC A01C23/00, A01M 7/00, A01G 25/09. 2021. (In Russ.)
6. Kalinin A.B., Teplinskiy I.Z., Smelik V.A., Teplinskaya O.N., Nemtsev I.S. Improving the quality control methods for the functioning of dosing systems of chemicalization machines. *The Agrarian Scientific Journal*. 2022;6:94-98. (In Russ.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i6pp94-98>
7. Babaev Sh.M. Development of technology and technical means for local forced deposition of liquid pesticides. *Bulletin of Science and Practice*. 2022;8(3):93-106. (In Russ.) <https://doi.org/10.33619/2414-2948/76/11>
8. Babaev Sh.M., Askerova A.A. Device for preparing a salt solution of various concentrations: Patent No. a 2011 0004 Azerbaijan. Baku, 2011. (In Russ.)
9. Iskenderzade E.B., Babaev Sh.M., Abbasov B.A., Akhmedli Sh.V., Alieva L.S. Determining the clear area of a port for sorting granular materials. *Aktualnye Voprosy Soveremennoy Nauki*. 2018;1(17):27-32. (In Russ.)
10. Askerova A.A., Babaev Sh.M. Calculation of the parameters of a dosing device for intensified regulation of the concentration of a solution *Izvestiya Vuzov. Food Technology*. 2014;5-6(341-342):90-92. (In Russ.)
11. Babaev Sh.M., Askerova A.A. Research of technical characteristics of device for solution proportioning. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*. 2015;2-3(344-345):90-92. (In Russ.)

Информация об авторах

- Шахлар Махмуд оглы Бабаев**¹, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой; babashaxlar@mail.ru
- Николай Васильевич Алдошин**², д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник; naldoshin@yandex.ru
- Ахмед Гули оглы Меликов**³, д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры пищевой инженерии и экспертизы; melikaxmed61@mail.ru
- Василий Леонидович Андреев**⁴, д-р техн. наук, профессор; andreev.vas@mail.ru
- Александр Сергеевич Васильев**⁵, д-р с.-х. наук, доцент, заведующий кафедрой; vasilevtgsha@mail.ru
- Вячеслав Викторович Голубев**⁶, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой; slavasddg@mail.ru
- ^{1,3} Азербайджанский государственный аграрный университет; AZ2000, Азербайджан, г. Гянджа, проспект Атаюрка, 262
- ² Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5
- ⁴ Нижегородский государственный инженерно-экономический университет; 606340, Российская Федерация, Нижегородская область, г. Княгинино, ул. Октябрьская, 22 А
- ^{5,6} Тверская государственная сельскохозяйственная академия; 170904, Российская Федерация, г. Тверь, пос. Сахарово, ул. Василевского, 7

Вклад авторов

- Ш.М. Бабаев – руководство исследованием, формальный анализ, создание черновика рукописи;
- Н.В. Алдошин – концептуализация, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
- А.Г. Меликов – методология, проведение исследования;
- В.Л. Андреев – визуализация рукописи;
- А.С. Васильев – создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
- В.В. Голубев – методология, администрирование проекта.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 27.02.2024, после рецензирования и доработки 16.05.2024; принята к публикации 17.05.2024

Author Information

- Shakhtar M. Babaev**¹, DSc (Eng), Professor, Head of the Department; babashaxlar@mail.ru
- Nikolay V. Aldoshin**², DSc (Eng), Professor, Chief Research Engineer; naldoshin@yandex.ru
- Akhmed G. Melikov**³, DSc (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Food Engineering and Expertise; melikaxmed61@mail.ru
- Vasiliy L. Andreev**⁴, DSc (Eng), Professor; andreev.vas@mail.ru
- Aleksandr S. Vasiliev**⁵, DSc (Agr), Associate Professor, Head of the Department of Agrobiotechnologies, Processing Industries and Seed Production; vasilevtgsha@mail.ru
- Vyacheslav V. Golubev**⁶, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Technological and Transport Machines and Complexes; slavasddg@mail.ru
- ^{1,3} Azerbaijan State Agrarian University; Ataturka Ave. 262, Ganja, AZ2000, Azerbaijan
- ² Federal Scientific Agroengineering Centre VIM; 1st Institutskiy Proezd Str., 5, Moscow, 109428, Russian Federation
- ⁴ Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics; Oktyabrskaya Str. 22 A, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, 606340, Russian Federation
- ^{5,6} Tver State Agricultural Academy; Vasilevskogo Str. 7, Sakharovo, Tver, 170904, Russian Federation

Author Contribution

- Sh.M. Babaev – research supervision, formal analysis, writing – original draft preparation;
- N.V. Aldoshin – conceptualization, finalizing (revising and editing) of the manuscript;
- A.G. Melikov – methodology, investigation;
- V.L. Andreev – visualization;
- A.S. Vasiliev – finalizing (revising and editing) of the manuscript;
- V.V. Golubev – methodology, project administration.

Conflict of interests

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

Received 27.02.2024, Revised 16.05.2024, Accepted 17.05.2024

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ORIGINAL ARTICLE

УДК 631.171:535.8:636.085.2

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-51-57>



Non-contact assessment of the nutritional value of feed with optical technologies

*E.A. Nikitin¹, M.V. Belyakov², I.Yu. Efremenkov³, D.A. Blagov⁴, R.A. Mamedova⁵,
A.S. Sviridov⁶, A.Y. Alipichev⁷*

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia

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

¹ evgeniy.nicks@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>

² bmv20100@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>

³ matiusharius@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>

⁴ aspirantura2013@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7826-5197>

⁵ femaks@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9145-4478>

⁶ sviridov.vim@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9396-2281>

⁷ alipichev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>

Abstract. The nutritional value of feed is assessed with optical instruments using infrared incandescent or halogen lamps as a source of excitation of the spectral signal of the feed. However, no use is still made of energy-efficient diode optics of the visible radiation range. The authors conducted research to identify the possibility of developing a portable feed value analyzer using a spectral analyzer based on diode optoelectronics. First, the Micran-3 infrared microscope was used to study the microstructure of concentrated feed components; then, measurement ranges were selected. The authors studied characteristic ranges of photoluminescence of corn grain, sunflower meal, grain stillage, and rapeseed meal. Excitation (absorption) spectra were measured at synchronous scanning by the SM 2203 spectrofluorimeter monochromators to analyze luminescence spectra of corn silage and concentrated mixed fodder. As a result, integral parameters of spectra were calculated: integral absorption capacity and the photoluminescence flux index. It has been established that the intensity of luminescence spectra of corn silage in the range between 360 and 370 nm and that of concentrated mixed fodder in the range between 420 and 440 nm differ in more than four times. The value of captured photovoltage of corn silage and concentrated mixed fodder differs in six times. The results of optical measurements have proved that the discrepancy of indicators characterizing the nutritional value of feed (dry matter content, total protein content, etc.) has a significant influence on the parameters of optical signals. The authors have proposed the functional design of a portable optical analyzer with diodes, which is capable of estimating the nutritional value of feed by the non-contact method for 12 hours running without additional recharging.

Keywords: non-contact assessment of nutritional value, assessment of nutritional value of feed, luminescence spectra, corn silage, concentrated mixed fodder, spectrum, spectrofluorimeter, light-emitting diode

For citation: Nikitin E.A., Belyakov M.V., Efremenkov I.Yu., Blagov D.A., Mamedova R.A., Sviridov A.S., Alipichev A.Y. Non-contact assessment of the nutritional value of feed with optical technologies. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2024;26(3):51-57 (In Eng.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-51-57>

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

Бесконтактная оценка питательной ценности сельскохозяйственных кормов с использованием оптических технологий

Е.А. Никитин^{1✉}, М.В. Беляков², И.Ю. Ефременков³, Д.А. Благов⁴, Р.А. Мамедова⁵,
А.С. Свиридов⁶, А.Ю. Алипичев⁷

^{1,2,3,4,5,6} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия

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

¹ evgeniy.nicks@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>

² bmv20100@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>

³ matiusharius@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>

⁴ aspirantura2013@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7826-5197>

⁵ femaks@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9145-4478>

⁶ sviridov.vim@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9396-2281>

⁷ alipichev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>

Аннотация. Оценка питательной ценности сельскохозяйственных кормов осуществляется оптическими приборами, в которых в качестве источника возбуждения спектрального сигнала кормов используются инфракрасные лампы накаливания или галогеновые лампы, но энергоэффективная диодная оптика видимого диапазона излучения не применяется. Исследования проведены с целью выявления возможности разработки портативного анализатора питательной ценности кормов с использованием спектрального анализатора на основе диодной оптоэлектроники. Инфракрасным микроскопом Микран-3 исследовали микроструктуру компонентов концентрированного корма и для них подобрали диапазоны измерений. Исследовали характерные диапазоны фотолюминесценции зерна кукурузы, шрота подсолнечного, барды зерновой, шрота рапсового. Измерены спектры возбуждения (поглощения) при синхронном сканировании монохроматорами спектрофлуориметра СМ 2203, и на их основе построены спектры люминесценции кукурузного силоса и концентрированного комбикорма. В результате вычислены интегральные параметры спектров: интегральная поглощательная способность и показатель потока фотолюминесценции. Установлено, что интенсивность спектров люминесценции кукурузного силоса в диапазоне 360...370 нм и концентрированного комбикорма в диапазоне 420...440 нм различается более чем в 4 раза. Величина улавливаемого фотонапряжения кукурузного силоса и концентрированного комбикорма различается в 6 раз. Результаты оптических измерений позволили заключить, что расхождение показателей питательной ценности сельскохозяйственных кормов (содержание сухого вещества, общее содержание протеина и др.) оказывает существенное влияние на параметры оптических сигналов. Предложена функциональная схема портативного оптического анализатора с диодами, способного на протяжении 12 ч без дополнительной подзарядки проводить оценку питательной ценности сельскохозяйственных кормов бесконтактным способом.

Ключевые слова: бесконтактная оценка питательной ценности, оценка питательной ценности сельскохозяйственных кормов, спектры люминесценции, кукурузный силос, концентрированный комбикорм, спектр, спектрофлуориметр, светодиод

Для цитирования: Никитин Е.А., Беляков М.В., Ефременков И.Ю., Благов Д.А., Мамедова Р.А., Свиридов А.С., Алипичев А.Ю. Бесконтактная оценка питательной ценности сельскохозяйственных кормов с использованием оптических технологий // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 3. С. 51-57. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-51-57>

Introduction

Livestock production in Russia remains a priority area in terms of enhancing the country's export opportunities. An important factor of development is the efficient technological activity of enterprises [1].

A large share in the production cost structure of milk and meat includes the costs associated with cattle feeding [2]. Many livestock enterprises directly purchase feed additives, which significantly increases the cost of feeding [3]. In addition to direct costs of feeding, there are

indirect costs associated with feed management and efficiency of utilizing feed supplies. The nutritional value of feed is determined by only 25% of Russian livestock enterprises [4]. This is due to the location of most specialized laboratories that determine the nutritional value of feed in the central part of our country, while highly productive livestock enterprises are located mainly in the Vologda and Yaroslavl regions, in the Republics of Tatarstan, Bashkortostan and in Krasnodar Krai [5]. Therefore, the availability of services for analyzing the nutritional value

of feed is often associated with high costs, and obtaining the analysis results can take a long time [6]. Therefore, an alternative solution to using the services of specialized laboratories to determine the nutritional value of feed is to employ one’s own facilities and devices [7].

We analyzed the advantages and drawbacks of the most common instruments for determining the nutritional value of feed (Table 1). The Analyzer FOSS DS2500 (Denmark) uses the principle of spectral analysis in the near (800 to 1400 nm) and middle infrared (1400 to 2500 nm) ranges [8]. This manufacturer applies optical technologies to determine the nutritional value of plant products without the use of chemical measurements. The company still remains the leader among manufacturers of analytical equipment for agriculture and the processing industry. However, the instrument has a stationary type of design, requires power supply from the central network, and is not designed for use afield [9]. Compact and independent of external power sources are the Dinamica Generale, X-nir (Italy) and the American Aurora NIR instrument with a touch screen [10].

In addition to the considered solutions, there are other foreign samples of optical analyzers of the nutritional value of feed, but all of them use a similar physical method of operation, and the same type of electronic components [11]. To determine the nutritional value of feed, a portable SCIO Cup feed analyzer has been developed. It is designed in the form of a cup, preventing external illumination during the optical analysis, which determines only the dry matter index in silage, hay, and haylage [12].

The study of existing analytical instruments revealed a tendency of developing portable optical analyzers operating from a battery power source. None of the instruments

under consideration use diode optics as a source of excitation of the optical signal [13, 14].

It is necessary to consider the prospects of using energy-efficient diode optics of the visible radiation range (200 to 800 nm) in instruments measuring the nutritional value of feed.

The research purpose: revealing the possibility of developing a portable analyzer of the nutritional value of feed using a spectral analyzer based on diode optoelectronics.

Materials and methods

We have carried out a comparative analysis of the functionality of existing instruments determining the nutritional value of feed. Characteristic ranges of photoluminescence of common feed types were determined for corn grain, sunflower meal, grain stillage, and rapeseed meal.

Studies of optical properties were carried out on the SM 2203 spectrofluorimeter, which can determine the excitation, emission, polarization, quantum yield, and the absorption spectra of liquid and solid samples of feed [15].

We took as study samples corn silage with a moisture content of 70% and components of concentrated mixed fodder consisting of corn grain, sunflower meal, grain stillage, and rapeseed meal with a moisture content of 14% and used as an additive in cattle diets.

Optical measurements of corn grain, grain stillage, and rapeseed meal were carried out (Fig. 1). The detailed study of the microstructure of concentrated feed components facilitated the task of further selection of the measurement range to determine their nutritional value.

The peculiarity of measurements was that the total protein content per fraction of dry matter in corn silage and sunflower meal differs in more than two times,

Instruments for determining the nutritional value of feed Using with infrared spectroscopy

Table 1

Приборы для определения питательной ценности сельскохозяйственных кормов, использующие для измерений инфракрасную спектроскопию

Таблица 1

Analyzer, purpose, manufacturer		Advantages	Drawbacks
FOSS DS2500, stationary, Denmark		Determines fat content, protein content, dry matter, moisture content, ash content and total fiber content and total fiber content	Requires regular maintenance, pre-calibration
Dinamica Generale, X-nir, portable, Italy		Divides the total fiber content into ADF and NDF, determines starch content. Compact, with a removable battery	Not suitable for use in winter, requires pre-warming of the device during operation
Aurora NIR, portable, USA		Large touch screen display, compact, shows the spectral curve	Uses energy-consuming incandescent lamps
SCIO Cup feed analyzer, portable, Israel		Prevents external light during the optical analysis, mobile app	Determines the value of dry matter only

and this can have a significant impact on the difference of optical properties of each sample.

For the spectrum of wave numbers in the absorption regions of carbohydrates, fats, and proteins, the integral absorption coefficients A_k in the spectral interval k_1-k_2 were determined [16]:

$$A_k = \int_{k_1}^{k_2} \alpha(\lambda) dk, \quad (1)$$

where $\alpha(\lambda)$ is the spectral absorption characteristic; k_1, k_2 are the boundaries of the frequency spectral range.

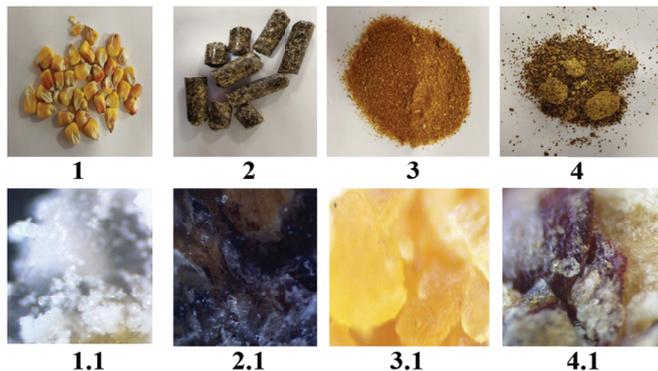


Fig. 1. Components of concentrated mixed fodder and the microstructure of corresponding samples (x20), obtained with the infrared microscope Mikran-3:

- 1 – corn grain; 2 – sunflower meal;
- 3 – grain stillage; 4 – rapeseed meal

Рис. 1. Компоненты концентрированного комбикорма и микроструктура соответствующих образцов (x20), полученная с помощью инфракрасного микроскопа Микран-3:

- 1 – зерно кукурузы; 2 – шрот подсолнечный;
- 3 – барда зерновая; 4 – шрот рапсовый

The results of the conducted studies to determine the nutritional value of feed components are presented in Table 2.

It follows from the data of Table 2 that beet pulp absorbs more actively than other components in the range between 800 and 1170 cm^{-1} . For rapeseed meal, on the contrary, absorption is higher in the range between 1260 and 1410 cm^{-1} , where A_k differs from other components in 1.15 to 1.73 times. For corn stillage and ground corn, the absorbance rate is approximately the same for each range. In the “protein” and “fat” regions the absorption rate is significantly lower and the difference in absolute values is less noticeable. Rapeseed meal was found to have the highest absorption rate.

First, we measured the excitation characteristics $\eta(\lambda)$ in the range between 230 and 600 nm according to the previously developed technique [16]. Based on the obtained results, we measured the photoluminescence spectra $\varphi(\lambda)$. From the obtained spectral characteristics, the integral absorption capacity H was calculated from the formula:

$$H = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

where $\eta(\lambda)$ is the spectral characteristic of excitation; λ_1, λ_2 are the boundaries of the spectral range of excitation.

Integral parameters of the spectra $\varphi(\lambda)$ – photoluminescence fluxes Φ – were determined from the formula:

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

where $\varphi(\lambda)$ where $\varphi(\lambda)$ is the spectral characteristic of photoluminescence; λ_1, λ_2 are the boundaries of the photoluminescence spectral range.

Table 2

Integral coefficients A_k in absorption regions (k_1-k_2)

Таблица 2

Интегральные коэффициенты A_k в областях поглощения (k_1-k_2)

Measurement range, nm	Integral absorption coefficient, A_k , %				
	Beet pulp	Corn stillage	Ground corn	Rapeseed meal	Concentrated mixed fodder
Carbohydrates					
800 to 920	1.08	1.07	1.03	0.91	-
1030 to 1125	1.58	1.47	1.37	1.15	-
1060 to 1150	1.42	1.33	1.27	1.05	-
1075 to 1100	0.46	0.42	0.40	0.33	-
1100 to 1170	1.01	0.97	0.92	0.77	-
1260 to 1350	0.22	0.21	0.26	0.36	-
1310 to 1410	0.23	0.22	0.30	0.38	-
Proteins and fats					
1300 to 1400	0.27	0.33	0.43	0.47	0.28
1550 to 1650	0.43	0.36	0.37	0.36	0.33
1485 to 1550	0.45	0.46	0.56	0.54	0.38
1610 to 1660	0.25	0.24	0.14	0.48	0.35
3030 to 3130	0.28	0.32	0.31	0.30	0.29

All measurements were taken in a 20-fold repetition, so that the error in determining the integral parameters H and Φ did not exceed 10% at a confidence level of 0.9.

As a result of measurements, curves characterizing optical properties of corn silage and concentrated mixed fodder were obtained. The results were statistically processed and averaged over 20 measurements.

Results and discussion

As a study result for corn silage and concentrated mixed fodder, the excitation (absorption) spectra $\eta_e(\lambda)$ were measured with spectrofluorimeter monochromators at synchronous scanning, and luminescence spectra $\varphi(\lambda)$ were determined then.

The integral parameters of the spectra were calculated in the R computing environment. During the measurements, the optical excitation was changed under the influence of the varying moisture level of corn silage from 75 to 55% with a step of 1% determined by a gravimetric moisture meter. As a result of measurements and statistical processing of optical data for corn silage, the photoluminescence spectrum η averaged over 20 measurements was obtained and expressed in relative units (r.u.). It was revealed that the greatest signal fluctuation is observed in the range between 300 and 400 nm (Fig. 2).

The optical properties of concentrated mixed feed consisting of corn grain, sunflower meal, grain stillage, and rapeseed meal had greater absorption intensity of the optical signal. The peaks of the plots shifted in the range between 400 and 520 nm (Fig. 3).

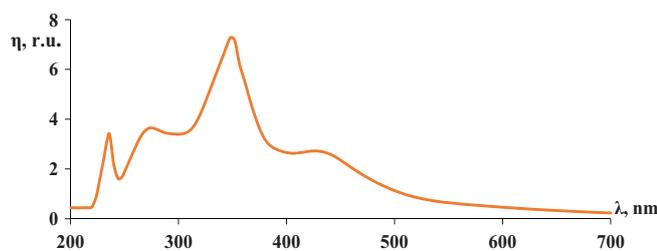


Fig. 2. Photoluminescence spectrum of corn silage

Рис. 2. Спектр фотолюминесценции кукурузного силоса

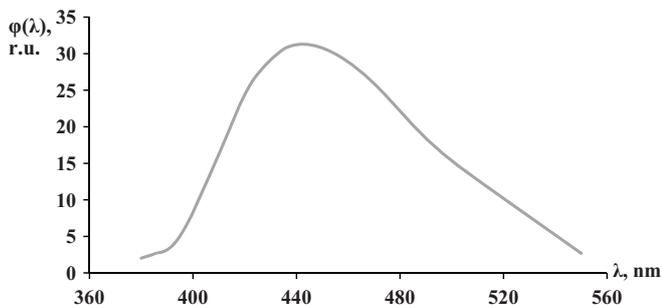


Fig. 3. Averaged photoluminescence spectrum of concentrated mixed fodder

Рис. 3. Усредненный спектр фотолюминесценции концентрированных кормов

Estimating the intensity of the luminescence spectra of corn silage and concentrated mixed fodder consisting of corn grain, sunflower meal, grain stillage, and rapeseed meal (Fig. 2, 3), which differed in more than four times, we can hypothesize about the influence of chlorophyll contained in greater amounts in corn silage, which absorbs the optical flux of the radiation source and thus contributes to the decrease in the spectrum intensity. However, the photoluminescence spectrum of concentrated mixed fodder (Fig. 3) is also characterized by the intensity peculiar to plant protein groups, confirming the fact of higher protein content in the analyzed sample (in more than six times).

In accordance with the obtained results, we can state that the indicators of the nutritional value of feed (dry matter content and total protein content) can be determined by the optical method using photodiodes for photoluminescence registration and LEDs for its excitation [16].

The functional diagram of the proposed portable optical analyzer of the nutritional value of feed based on the diode component base is shown in Figure 4.

According to the proposed functional diagram, it is possible to produce an energy-efficient portable analyzer with diodes serving as luminescence excitation sources. The diodes will ensure continuous operation of the device for 12 h (during a working shift) without additional recharging from a commercially available battery with a voltage of 18 V and a capacity of 2 Ah.

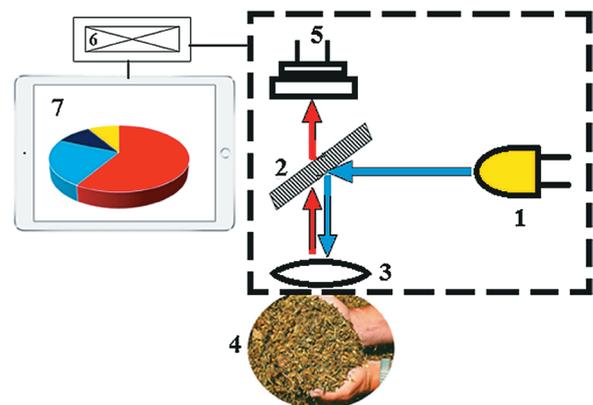


Fig. 4. Functional diagram of the technological process of analyzing the nutritional value of feed with the spectral analyzer:

- 1 – LED source; 2 – dielectric mirror; 3 – condenser; 4 – feed;
- 5 – photodiode block; 6 – controller with interface device;
- 7 – instrument display or mobile application

Рис. 4. Функциональная схема технологического процесса анализа питательной ценности с использованием спектрального анализатора:

- 1 – светодиодный источник; 2 – диэлектрическое зеркало;
- 3 – конденсор; 4 – корм; 5 – блок фотодиодов;
- 6 – контроллер с устройством сопряжения;
- 7 – дисплей прибора или мобильное приложение

The expected technological effect of the proposed solution is the reduction of time costs associated with the chemical analysis of the nutritional value of feed, as well as the possibility of adjusting the diet of animals kept on the livestock farm.

Further research will focus on the development and manufacture of a prototype of a portable express analyzer of the nutritional value of feed and the development of optical calibrations.

Conclusions

1. The existing optical instruments for determining the nutritional value of feed use infrared incandescent lamps or halogen lamps of special purpose as a source

of excitation of the spectral signal. The lamps take measurements in the near or middle infrared range.

2. Research results confirm the possibility of using LEDs in the ranges between 200 to 800 nm and 800 to 1400 nm.

3. Some indicators of the nutritional value of feed, such as dry matter content and total protein content, can be determined by the optical method using photodiodes for photoluminescence registration and LEDs for its excitation. The greatest variation in the optical properties of feed is observed in the visible radiation range.

4. According to the proposed functional diagram, it is possible to produce a prototype of an optical device for the express assessment of the nutritional value of feed.

References

1. Kirsanov V.V. Structural and functional models for building new generation automated and robotic dairy farms. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022;16;1:4-9. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-1-4-9>
2. Mikhailichenko S.M., Kupreenko A.I., Ivanov Yu.G., Nikitin E.A. Optimization of volume for an automatic feed wagon by graph theory based modeling. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17;4:35-41. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-4-35-41>
3. Erokhin M.N., Dorokhov A.S., Kirsanov V.V., Chpurina E.L. Conceptual grounds for the construction of a regional multifunctional service center for dairy livestock. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2021;1(101):4-10. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-1-4-10>
4. Ivanov Yu.G., Mashoshina E.V., Verlikov V.V., Gabdullin G.G., Lukyanchuk E.V., Verlikov V.V. Robotic technology of obtaining milk from individual cows and its technical and economic evaluation. *Machinery and technologies in livestock*. 2021;2(42):46-52. (In Russ.)
5. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Mikhailichenko S.M. Automatic cattle feeding system based on the use of a suspended robotic feeder. *Machinery and technologies in livestock*. 2021;3(43):5-9. (In Russ.)
6. Lyalin E.A., Trutnev M.A.; Trutnev N.V. Parameters of the spiral-screw device for dosing mineral fertilizers with different consumption characteristics. *Perm Agrarian Journal*. 2021;4(36):14-22. (In Russ.) https://doi.org/10.47737/2307-2873_2021_36_14
7. Lyalin E.A.; Trutnev M.A.; Trutnev N.V. Performance assessment of mixed fodder distributor with a spiral-screw dispenser. *Perm Agrarian Journal*. 2019;4(28):4-10. (In Russ.)
8. Simachkova M.S. Analysis of technological lines and equipment for the preparation of compound feeds. *Bulletin NGIEI*. 2023;6(145):18-36. (In Russ.)
9. Vakhrushev A.V., Zemskov A.V., Fedotov A.Yu. Hardware-software complex for uniform mixing analysis of micro and nanoelements. *Chemical Physics and Mesoscopy*. 2009;11;4:421-429. (In Russ.)
10. Nikitin E.A., Semenyuk V.S. Analysis of feed mixture effective preparation's problems in the modern farming. *Vestnik Vserossiyskogo Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Mekhanizatsii Zhivotnovodstva*. 2019;2(34):158-163. (In Russ.)
11. Bloch V., Levit H., Halachmi I. Assessing the potential of photogrammetry to monitor feed intake of dairy cows. *Journal of Dairy Research*. 2019;86(1):34-39. <https://doi.org/10.1017/S0022029918000882>

Список источников

1. Кирсанов В.В. Структурно-функциональные модели построения автоматизированных и роботизированных молочных ферм нового поколения // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16, № 1. С. 4-9. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-1-4-9>
2. Михайличенко С.М., Купреенко А.И., Иванов Ю.Г., Никитин Е.А. Оптимизация объема роботизированного кормораздатчика методом моделирования с применением теории графов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17, № 4. С. 35-41. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-4-35-41>
3. Ерохин М.Н., Дорохов А.С., Кирсанов В.В., Чепурина Е.Л. Концепция построения регионального многофункционального сервисного центра по молочному животноводству // Агроинженерия. 2021. № 1 (101). С. 4-10. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-1-4-10>
4. Иванов Ю.Г., Машошина Е.В., Верликова Л.Н., Габдуллин Г.Г., Лукьянчук Е.В., Верликов В.В. Роботизированная технология получения молока от отдельных коров и ее технико-экономическая оценка // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 2 (42). С. 46-52. EDN: DOXBLH
5. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Михайличенко С.М. Автоматическая система кормления КРС на базе подвешенного роботизированного кормораздатчика // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 3 (43). С. 5-9. EDN: GURWWY
6. Лялин Е.А., Трутнев М.А., Трутнев Н.В. Параметры спирально-винтового устройства для дозирования минеральных удобрений с различными расходными характеристиками // Пермский аграрный вестник. 2021. № 4 (36). С. 14-22. https://doi.org/10.47737/2307-2873_2021_36_14
7. Лялин Е.А., Трутнев М.А., Трутнев Н.В. Оценка эффективности работы раздатчика комбикормов со спирально-винтовым дозатором в производственных условиях // Пермский аграрный вестник. 2019. № 4 (28). С. 4-10. EDN: ZOFCEC
8. Симачкова М.С. Анализ технологических линий и оборудования для приготовления комбикормов // Вестник НГИЭИ. 2023. № 6 (145). С. 18-36. EDN: IXKLBI
9. Вахрушев А.В., Земсков А.В., Федотов А.Ю. Программно-аппаратный комплекс для анализа равномерности перемешивания микро- и наноэлементов // Химическая физика и мезоскопия. 2009. Т. 11, № 4. С. 421-429. EDN: PJLTGJ
10. Никитин Е.А., Семенюк В.С. Анализ проблем эффективного приготовления кормовой смеси в современном животноводстве // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2019. № 2 (34). С. 158-163. EDN: KJPYIL

12. Lednev V.N., Sdvizhenskii P.A., Grishin M.Y., Gudkov S.V., Pershin S.M., Nikitin E.A. Improving calibration strategy for LIBS heavy metals analysis in agriculture applications. *Photonics*. 2021;8(12):563. <https://doi.org/10.3390/photonics8120563>

13. Knight C.H. Quality dairying. *Journal of Dairy Research*. 2023;90(3):215-220. <https://doi.org/10.1017/S0022029923000535>

14. Ichimura T., Kusaka M., Nakamura T. The effect of high-temperature heat treatment and homogenization on the microstructure of set yogurt curd networks. *Journal of Dairy Research*. 2023;90(3):306-311. <https://doi.org/10.1017/S0022029923000523>

15. Varkhushev A.V. Modeling the processes of ordering and self-organization of nanostructures. *Chemical Physics and Mesoscopy*. 2005;7;2:219-228. (In Russ.)

16. Belyakov M.V., Pavkin D.Yu., Nikitin E.A., Efremkov I. Yu. Substantiation of the choice of special ranges for photoluminescent control of the composition and nutritional value of forages. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;2(308):31-36. (In Russ.)

11. Bloch V., Levit H., Halachmi I. Assessing the potential of photogrammetry to monitor feed intake of dairy cows. *Journal of Dairy Research*. 2019;86(1):34-39. <https://doi.org/10.1017/S0022029918000882>

12. Lednev V.N., Sdvizhenskii P.A., Grishin M.Y., Gudkov S.V., Pershin S.M., Nikitin E.A. Improving calibration strategy for LIBS heavy metals analysis in agriculture applications. *Photonics*. 2021;8(12):563. <https://doi.org/10.3390/photonics8120563>

13. Knight C.H. Quality dairying. *Journal of Dairy Research*. 2023;90(3):215-220. <https://doi.org/10.1017/S0022029923000535>

14. Ichimura T., Kusaka M., Nakamura T. The effect of high-temperature heat treatment and homogenization on the microstructure of set yogurt curd networks. *Journal of Dairy Research*. 2023;90(3):306-311. <https://doi.org/10.1017/S0022029923000523>

15. Вархушев А.В. Моделирование процессов упорядочения и самоорганизации наноструктур // Химическая физика и мезоскопия. 2005. Т. 7, № 2. С. 219-228. EDN: PJRNPP

16. Беляков М.В., Павкин Д.Ю., Никитин Е.А., Ефремов И.Ю. Обоснование выбора спектральных диапазонов фотолуминесцентного контроля состава и питательной ценности кормов // Техника и оборудование для села. 2023. № 2 (308). С. 31-36. EDN: ZMQMNG

Author Information

Evgeniy A. Nikitin¹, Senior Research Engineer, PhD (Eng);
evgeniy.nicks@yandex.ru;
<https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>

Mikhail V. Belyakov², Lead Research Engineer;
bmv20100@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>

Igor Yu. Efremkov³, Specialist; matiusharius@mail.ru;
<https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>

Dmitriy A. Blagov⁴, Senior Research Engineer, PhD (Bio);
aspirantura2013@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0001-7826-5197>

Ravza A. Mamedova⁵, PhD (Eng);
femaks@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9145-4478>

Aleksei S. Sviridov⁶, Junior Research Engineer;
sviridov.vim@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9396-2281>

Aleksei Yu. Alipichev⁷, PhD (Ed), Associate Professor,
Russian and Foreign Languages Department;
alipichev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>

^{1,2,3,4,5,6} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428,
Russian Federation, Moscow, 1st Institutskiy Proezd Str., 5

⁷ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev
Agricultural Academy; Russia, Moscow, 49,
Timiryazevskaya Str

Author Contribution

E.A. Nikitin – research supervision, conceptualization, critical analysis, finalizing (reviewing and editing) of the manuscript;

M.V. Belyakov – investigation and discussion, formal analysis – description of the results obtained and formulation of conclusions;

I.Yu. Efremkov – visualization;

D.A. Blagov – analytics, investigation and discussion;

R.A. Mamedova – writing – original draft preparation, visualization;

A.S. Sviridov – writing – original draft preparation;

A.Yu. Alipichev – English translation, writing – original draft preparation, finalizing (reviewing and editing) of the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.
Received 09.11.2023, Revised 04.04.2024, Accepted 05.04.2024

Информация об авторах

Евгений Александрович Никитин¹, старший научный сотрудник, канд. техн. наук; evgeniy.nicks@yandex.ru;
<https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>

Михаил Владимирович Беляков², ведущий научный сотрудник;
bmv20100@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>

Игорь Юрьевич Ефремов³, специалист;
matiusharius@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>

Дмитрий Андреевич Благов⁴, старший научный сотрудник, канд. биол. наук; aspirantura2013@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0001-7826-5197>

Равза Анвяровна Мамедова⁵, канд. техн. наук;
femaks@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9145-4478>

Алексей Сергеевич Свиридов⁶, младший научный сотрудник;
sviridov.vim@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9396-2281>

Алексей Юрьевич Алипичев⁷, канд. пед. наук, доцент кафедры иностранных языков;
alipichev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>

^{1,2,3,4,5,6} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ;
109428, Российская Федерация, г. Москва,

1-й Институтский проезд, 5

⁷ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434,

Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

E.A. Nikitin – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, критический анализ, доработка текста;

M.V. Belyakov – описание результатов и формирование выводов исследования, участие в обсуждении материалов статьи;

I.Yu. Efremkov – графическое оформление рисунков;

D.A. Blagov – аналитика, участие в обсуждении материалов статьи;

R.A. Mamedova – подготовка начального варианта текста статьи, табличное представление результатов исследования;

A.S. Sviridov – подготовка текста статьи;

A.Yu. Alipichev – англоязычный перевод статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.
Статья поступила 09.11.2023, после рецензирования и доработки 04.04.2024; принята к публикации 05.04.2024

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 681.5.015.22

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-58-65>

Моделирование и идентификация элемента Пельтье ТЕС1-12706 для применения в малообъемных биореакторах искусственного ЖКТ рыб

Ю.А. Иванов¹, А.Д. Лукьянов², Д.Ю. Донской^{3✉}, Д.В. Рудой⁴¹ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия^{2,3,4} Донской государственный технический университет; г. Ростов-на-Дону, Россия¹ vniimzh@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6843-4556>² alexlukjanov1998@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3827-6569>³ dand22@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3556-7758>⁴ rudoy.d@gs.donstu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1916-8570>

Аннотация. Биореактор статической мини-модели искусственного желудочно-кишечного тракта рыбы обеспечит моделирование процессов в ЖКТ промышленно выращиваемых рыб (карповых, форелевых, осетровых). Исследования проведены с целью изучения термодинамических процессов, происходящих в биореакторе, и возможности применения термоэлектрического преобразователя ТЕС1-12706 в системе контроля температуры биореактора. Температура в биореакторе объемом до 200 мл должна варьироваться от 45 до 14°C, точность поддержания температуры – 0,1°C. Как результат, была получена математическая модель с корректировкой по идентифицированным параметрам системы, что позволяет оценить термодинамические процессы в биореакторе, подобрать аппаратное оснащение и создать его общую математическую модель. Идентификация параметров элемента Пельтье осуществлялась с помощью макета-прототипа, измеряющего температуру холодной стороны преобразователя, горячего радиатора, окружающей среды, температуру жидкости в реакторе и потребляемый ток. Функционирование реальной системы происходило при внешней температуре 28,31°C, все физические накопители находились в температурном равновесии и в одинаковых начальных условиях. Сравнение температурных изменений в реальной системе и полученной нами математической модели в результате идентификации параметров элемента Пельтье показало, что соответствие значений было не идеальным, но характер изменения температур был идентичным. Сделаны следующие выводы: в математической модели необходимо учитывать дополнительные накопители и потоки, описывающие неидеальные условия экспериментальных данных: например, тепловое отражение рабочей поверхности стола и частичное отражение воздушных потоков. Для снижения температуры заполненного биореактора на 2...3°C достаточно 1/3 от максимальной мощности преобразователя. Таким образом, термоэлектрический преобразователь ТЕС1-12706 может применяться в системе *in vitro* моделирования желудочно-кишечного тракта рыб.

Ключевые слова: моделирование, идентификация, *in vitro*, биореактор, элемент Пельтье, ЖКТ рыбы

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-30006, <https://rscf.ru/project/23-76-30006/>.

Для цитирования: Иванов Ю.А., Лукьянов А.Д., Донской Д.Ю., Рудой Д.В. Моделирование и идентификация элемента Пельтье ТЕС1-12706 для применения в малообъемных биореакторах искусственного ЖКТ рыб // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 3. С. 58-65. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-58-65>

ORIGINAL PAPER

Modeling and identification of the Peltier element TEC1-12706 for use in low-volume bioreactors of the artificial gastrointestinal tract of fishYu.A. Ivanov¹, A.D. Lukyanov², D.Yu. Donskoy³✉, D.V. Rudoy⁴¹ Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia^{2,3,4} Don State Technical University; Rostov-on-Don, Russia¹ vniimzh@mail.ru.; <https://orcid.org/0000-0002-6843-4556>² alexlukjanov1998@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3827-6569>³ dand22@bk.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-3556-7758>⁴ rudoy.d@gs.donstu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1916-8570>

Abstract. The bioreactor of a static mini-model of the artificial gastrointestinal tract of fish will provide modeling of processes in the gastrointestinal tract of industrially grown fish (carp, trout, and sturgeon). The study aimed to determine the thermodynamic processes occurring in the bioreactor and the possibility of using the thermoelectric converter TEC1-12706 in the temperature control system of the bioreactor. The temperature in a bioreactor with a volume of up to 200 ml should vary from 45 to 14°C, the accuracy of maintaining the temperature is 0.1°C. As a result, a mathematical model was obtained with an adjustment according to the identified system parameters, which makes it possible to evaluate thermodynamic processes in the bioreactor, select hardware and create its general mathematical model. The parameters of the Peltier element were identified using a prototype layout measuring the temperature of the cold side of the converter, the hot radiator, the environment, the temperature of the liquid in the reactor, and the current consumed. The operation of the real system took place at an external temperature of 28.31°C; all physical drives were in the temperature equilibrium and under the same initial conditions. A comparison of temperature changes in the real system and the mathematical model obtained as a result of identifying the parameters of the Peltier element showed a non-perfect match of values, but the nature of the temperature change is identical. The following conclusions have been drawn: in the mathematical model, it is necessary to take into account additional drives and flows describing non-ideal conditions of experimental data, for example, thermal reflection of the working surface of the table and partial reflection of air flows. One third of the maximum converter power is sufficient to reduce the temperature of the filled bioreactor by 2 to 3°C. Thus, the thermoelectric converter TEC1-12706 can be used in an *in vitro* modeling system of the gastrointestinal tract of fish.

Keywords: modeling, identification, *in vitro*, bioreactor, Peltier element, digestive tract of fish

Funding: The research was funded by a grant from the Russian Science Foundation No. 23-76-30006, <https://rscf.ru/project/23-76-30006/>.

For citation: Ivanov Yu.A., Lukyanov A.D., Donskoy D.Yu., Rudoy D.V. Modeling and identification of the Peltier element TEC1-12706 for use in low-volume bioreactors of the artificial gastrointestinal tract of fish. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2024;26(3):58-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-58-65>

Введение

Автоматизация исследований и совершенствование методов *in vitro* моделирования органов живых существ являются комплексной задачей, требующей реализации программно-аппаратного наблюдения и тонкого контроля параметров для создания в биореакторах среды, подобной реальной у носителя микробиоты. Данная область науки является молодой, а моделирование ЖКТ животных – одна из важных задач для ветеринаров, биологов и фармакологов, решение которой позволит проводить исследования более дешево, быстро и гуманно. Моделирование и идентификация параметров термоэлектрического преобразователя TEC1-12706 позволит внедрить его

в систему контроля температуры биореактора статической мини-модели искусственного ЖКТ рыбы. Рабочий объем подобных систем менее 200 мл, что потенциально позволит контролировать температуру на не пиковой мощности данного преобразователя [1, 2].

Цель исследований: разработка математической модели элемента Пельтье TEC1-12706; численная оценка возможности применения данного термоэлектрического преобразователя в системе *in vitro* моделирования ЖКТ рыб; анализ термодинамических процессов, происходящих в биореакторе.

Результаты исследований, изложенные в данной статье и статье «Математическая модель системы

управления рН в *in vitro* модели желудочно-кишечного тракта домашней птицы» [3], направлены на создание комплексной модели системы контроля параметров среды в биореакторе.

Материалы и методы

Прототип для анализа параметров термоэлектрического преобразователя. Идентификация параметров элемента Пельтье осуществлялась с помощью макета-прототипа, измеряющего температуру холодной стороны преобразователя, горячего радиатора, окружающей среды, температуру жидкости в реакторе и потребляемый ток (рис. 1). Макет, оснащенный лабораторным блоком питания E3632A Agilent Technologies, базируется на микроконтроллере ESP8266 для сохранения данных на удаленном носителе через интернет. Для измерения температуры применялись датчики DS18B20. Контроль токопотребления осуществлялся с помощью датчика ACS712(20A), откалиброванного по лабораторному блоку питания E3632A Agilent Technologies [3, 4].

При изучении физических взаимодействий элементов рассматриваемой системы представим ее структуру без реактора [5-7] (рис. 2).

Уравнение, описывающее поток тепла от холодной стороны элемента Пельтье в воздух, представлено уравнением:

$$q_1 = S_{pel} (a_0 + a_1 v_{air}) (\theta_{out} - \theta_1), \tag{1}$$

где v_{air} – скорость воздуха в комнате, м/с; a_0 и a_1 – константы теплоотдачи, Вт/(м²·К); θ_{out} – температура воздуха, К; θ_1 – температура холодной стороны элемента Пельтье, К.

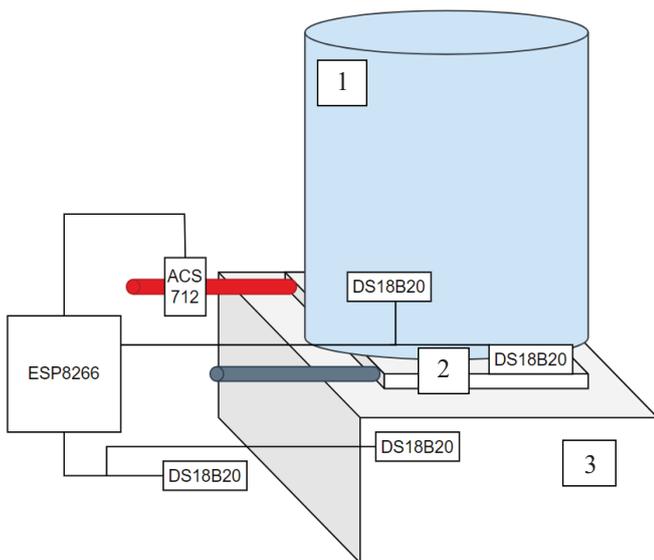


Рис. 1. Структура прототипа:

1 – биореактор; 2 – элемент Пельтье; 3 – радиатор

Fig. 1. Structure of the prototype:

1 – bioreactor; 2 – Peltier element; 3 – radiator

Поток тепла, передаваемый от холодной стороны термоэлектрического преобразователя его горячей стороне с учетом наличия припоя, –

$$q_2 = S_{ps} \left(\frac{A_{t1}}{d_{t1}} + \frac{A_{TB}}{d_{TB}} \right) (\theta_2 - \theta_1), \tag{2}$$

где A_{t1} и A_{TB} – соответственно теплопроводность припоя и полупроводника элемента Пельтье, Вт/(м·К); d_{t1} – толщина припоя, м; d_{TB} – толщина полупроводниковых элементов в термоэлектрическом преобразователе, м; θ_2 – температура горячей стороны элемента Пельтье, К.

Джоулев нагрев описывается третьим потоком:

$$q_3 = 0,5 \cdot I^2 R, \tag{3}$$

где I – сила тока, А; R – сопротивление элемента Пельтье, Ом.

Перекачивание тепла на основе эффекта Пельтье описывается потоком 4:

$$q_4 = \Pi_p \cdot t \cdot I, \tag{4}$$

где Π_p – коэффициент Пельтье; t – абсолютная температура полупроводниковых элементов (принимается как температура моделируемой стороны), К.

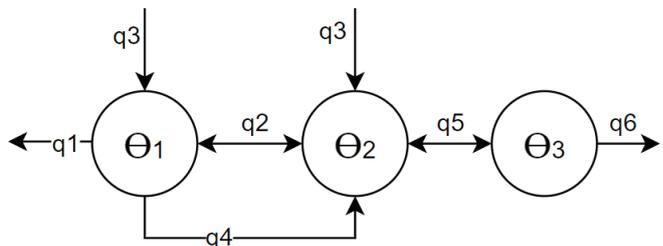


Рис. 2. Структурная схема модели:

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – соответственно накопитель теплоты в холодной и горячей стороне элемента Пельтье и в радиаторе;

- q_1 – поток тепла от холодной стороны элемента Пельтье в воздух;
- q_2 – поток тепла от холодной стороны термоэлектрического преобразователя его горячей стороне;
- q_3 – потоки тепла в результате Джоулевого нагрева;
- q_4 – поток тепла в результате эффекта Пельтье;
- q_5 – поток тепла от горячей стороны элемента Пельтье к радиатору охлаждения;
- q_6 – поток тепла, передаваемый от радиатора охлаждения в воздух

Fig. 2. Block diagram of the model:

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – accordingly, the heat storage in the cold and hot side of the Peltier element and in the radiator;

- q_1 – heat flow from the cold side of the Peltier element into the air;
- q_2 – heat flow from the cold side of the thermoelectric converter to its hot side;
- q_3 – heat flows as a result of Joule heating;
- q_4 – heat flow as a result of the Peltier effect;
- q_5 – heat flow from the hot side of the Peltier element to the cooling radiator;
- q_6 – the heat flow transferred from the cooling radiator to the air

Поток тепла от горячей стороны элемента Пельтье к радиатору охлаждения:

$$q_5 = S_p \frac{A_{t2}}{d_{t2}} (\theta_3 - \theta_2), \quad (5)$$

где S_p – площадь соприкосновения элемента Пельтье с радиатором, m^2 ; A_{t2} – теплопроводность термопасты, $Вт/(м \cdot К)$; d_{t2} – толщина термопасты, $м$; θ_3 – температура радиатора охлаждения, $К$.

Поток тепла, передаваемый от радиатора охлаждения в воздух, –

$$q_6 = S_{rh} (a_0 + v_{air_{fan}}) (\theta_{out} - \theta_3), \quad (6)$$

где $v_{air_{fan}}$ – скорость ветра, создаваемая активным охлаждением (вентилятором), $м/с$.

Накопителями в данной системе являются две керамические стенки элемента Пельтье и радиатор охлаждения.

Для керамических пластин накопители описываются следующими уравнениями [8, 9]:

$$\begin{aligned} dQ_1 &= c_a \rho_a V_a \cdot d\theta_1 \\ dQ_2 &= c_a \rho_a V_a \cdot d\theta_2, \end{aligned} \quad (7)$$

где c_a – удельная теплоемкость керамики, $Дж/(кг \cdot К)$; ρ_a – плотность керамики, $кг/м^3$; V_a – объем керамической пластины, $м^3$; Q_1 и Q_2 – соответственно количество теплоты в пластинах холодной и горячей стороны элемента Пельтье, $Дж$.

Для радиатора охлаждения накопители описываются как

$$dQ_3 = c_r \rho_r V_r \cdot d\theta_3. \quad (8)$$

Из уравнений (1-8) методом накопителей и потоков можно составить математическую модель, описывающую термодинамический процесс работы элемента Пельтье:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\theta_1}{dt} &= \frac{1}{c_a \rho_a V_a} \left(S_{pel} (a_0 + a_1 v_{air}) (\theta_{out} - \theta_1) + \right. \\ &\quad \left. + S_{ps} \left(\frac{A_{t1}}{d_{t1}} + \frac{A_{TB}}{d_{TB}} \right) (\theta_2 - \theta_1) - \right. \\ &\quad \left. - \Pi_p \cdot \theta_1 \cdot I + 0,5 \cdot I^2 R \right) \\ \frac{d\theta_2}{dt} &= \frac{1}{c_a \rho_a V_a} \left(S_{ps} \left(\frac{A_{t1}}{d_{t1}} + \frac{A_{TB}}{d_{TB}} \right) (\theta_1 - \theta_2) + \right. \\ &\quad \left. + \Pi_p \cdot \theta_2 \cdot I + \right. \\ &\quad \left. + 0,5 \cdot I^2 R + S_p \frac{A_{t2}}{d_{t2}} (\theta_3 - \theta_2) \right) \\ \frac{d\theta_3}{dt} &= \frac{1}{c_r \rho_r V_r} \left(S_p \frac{A_{t2}}{d_{t2}} (\theta_2 - \theta_3) + \right. \\ &\quad \left. + S_{rh} (a_0 + a_1 v_{air_{fan}}) (\theta_{out} - \theta_3) \right) \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Для моделирования реальных процессов с помощью описанной выше модели требуется идентифицировать физические параметры системы и функциональные зависимости некоторых нестационарных физических параметров элемента Пельтье.

Идентификация параметров полученной математической модели. Для идентификации параметров термоэлектрического преобразователя проведен ряд экспериментов, в которых изменялось входное напряжение при неограниченном потреблении тока. Датчик температуры радиатора был максимально приближен к элементу Пельтье.

Первым и основным параметром данного термоэлектрического преобразователя является его сопротивление. При подаче какого-либо напряжения на преобразователь через него начинает течь ток, но в количественном отношении он является непостоянным и изменяется со временем относительно пускового значения, причем колебания могут быть как в положительную, так и в отрицательную сторону. Это происходит по причине изменения градиента температур по всей толщине термоэлектрического преобразователя, что изменяет его сопротивление.

Для упрощения расчетов нашей модели будем опираться на расчетную абсолютную температуру в центре термоэлектрического преобразователя. Таким образом, задача сводится к поиску оптимальной с точки зрения минимизации суммы квадратов отклонений функции, описывающей сопротивление TEC1-12706:

$$R = f\left(\frac{\theta_2 + \theta_1}{2}, U\right). \quad (10)$$

В результате анализа полученного набора данных с помощью полиномиальной аппроксимации методом наименьших квадратов (11) сформирована регрессионная модель изменения сопротивления элемента Пельтье [10, 11]:

$$R = p_{00} + p_{10} \cdot x + p_{01} \cdot y + p_{20} \cdot x^2 + p_{11} \cdot x \cdot y + p_{02} \cdot y^2 + p_{21} \cdot x^2 \cdot y + p_{12} \cdot x \cdot y^2 + p_{03} \cdot y^3, \quad (11)$$

где x – температура горячей стороны элемента Пельтье, $К$; y – температура холодной стороны, $К$; p – безразмерные коэффициенты ($p_{00} = 4,491$; $p_{10} = 0,02123$; $p_{01} = -0,09192$; $p_{20} = -1,563 \cdot 10^{-17}$; $p_{11} = 0,005907$; $p_{02} = 0,006333$; $p_{21} = 1,386 \cdot 10^{-18}$; $p_{12} = -0,0004636$; $p_{03} = -0,0005059$).

Полученная модель имеет следующую характеристику: SSE $3.116 \cdot 10^{-29}$; R-square 1; Adjusted R-square 1; RMSE. $1.218 \cdot 10^{-15}$.

Идентифицированная модель соответствует реальным данным (рис. 3).

Отличие начальных характеристик обусловлено неравномерностью распределения температур

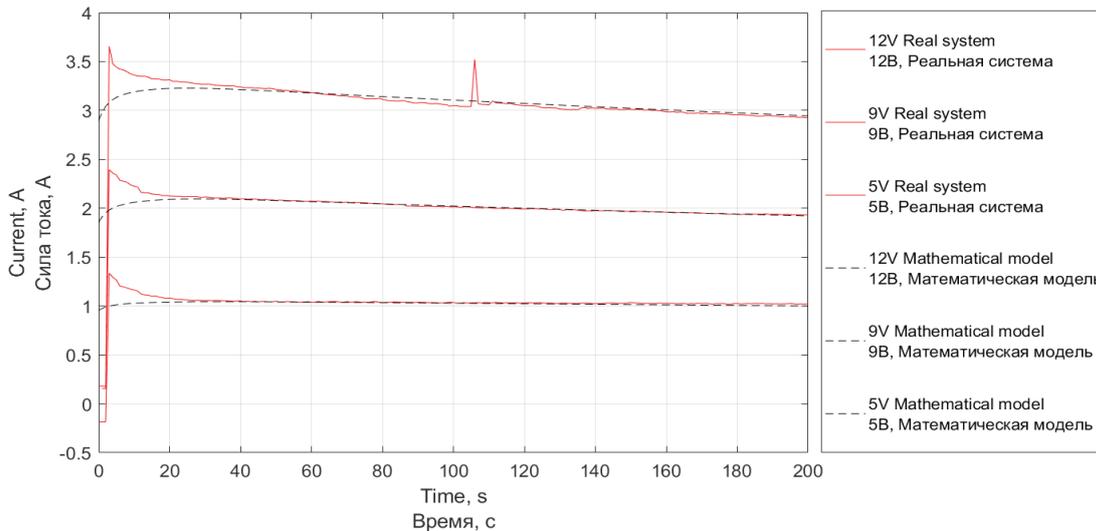


Рис. 3. Сравнение изменения сопротивления TEC1-12706 математической модели с реальной системой
Fig. 3. Comparison of the resistance variation of the TEC1-12706 mathematical model with a real system

и внутренней структурой, а также относительно низким начальным сопротивлением. Отметим, что при использовании элемента Пельтье необходимо наблюдать за динамикой роста температуры горячей стороны. Для обеспечения лучшего охлаждения радиатор должен находиться на отдалении от любых тепловых экранов (например, рабочего стола). В противном случае в математическую модель требуется вносить физические параметры данного экрана, так как в реальной системе будет наблюдаться его влияние. Данный эффект влияет на изменение сопротивления в процессе работы, что прослеживается при повышении мощности преобразователя (рис. 3) [12].

Аналогичная оценка коэффициента Пельтье относительно подаваемого на термоэлектрический преобразователь напряжения представлена на рисунке 4. Диапазон напряжений ограничен максимальным рабочим напряжением питания TEC1-12706.

С основой на идентифицированных параметрах TEC1-12706 сформирована схема математической модели в прикладном пакете Matlab Simulink [13]. Полученная модель позволяет оценить и верифицировать идентифицированные характеристики системы на основе реальной модели.

Результаты и их обсуждение

Функционирование реальной системы происходило при внешней температуре 28,31°C, все физические накопители находились в температурном равновесии и в одинаковых начальных условиях.

Анализируя данные рисунка 5, можно говорить о качественном и количественном соответствии математической модели и реальной системы. Однако существуют физические параметры, требующие дальнейшего уточнения: теплопроводность TEC1-12706,

удельная теплоемкость керамических пластин, теплопроводность припоя, используемого в местах контакта полупроводников, и т.п. Стоит помнить, что теплопроводность может меняться при изменении абсолютной температуры.

Для анализа влияния термоэлектрического преобразователя на биореактор следует внести в нашу модель (рис. 2) уравнения, описывающие физические параметры системы, и дополнить структуру модели накопителями (θ_4, θ_5) и потоками ($q_7 \dots q_{11}$) (рис. 6).

Потоки тепла, передаваемые от холодной стороны элемента Пельтье биореактору, описываются потоком 7:

$$q_7 = S_{pel} \frac{A_t}{d_t} (\theta_1 - \theta_5), \tag{12}$$

где S_{pel} – площадь соприкосновения термоэлектрического преобразователя и реактора, м²; A_t – теплопроводность термоинтерфейса, Вт/(м·К); d_t – толщина термоинтерфейса, м; θ_5 – температура биореактора, К.

Взаимодействие реактора с окружающим его воздухом описывается потоком 8:

$$q_8 = S_b (a_0 + a_1 v_{air}) (\theta_{out} - \theta_5), \tag{13}$$

где S_b – площадь поверхности биореактора, взаимодействующая с воздухом, м; θ_5 – температура реактора, К.

Перенос тепла между реактором и его содержимым описывается потоком 9:

$$q_9 = S_{in} (a_{0w} + a_{1w} \sqrt{v_{ch}}) (\theta_5 - \theta_4), \tag{14}$$

где α_{0w}, α_{1w} – коэффициенты теплоотдачи движущейся воды, Вт/(м²·К); v_{ch} – скорость движения содержимого реактора, м/с; S_{in} – площадь соприкосновения содержимого со стенками биореактора, м²; θ_4 – температура содержимого биореактора, К.

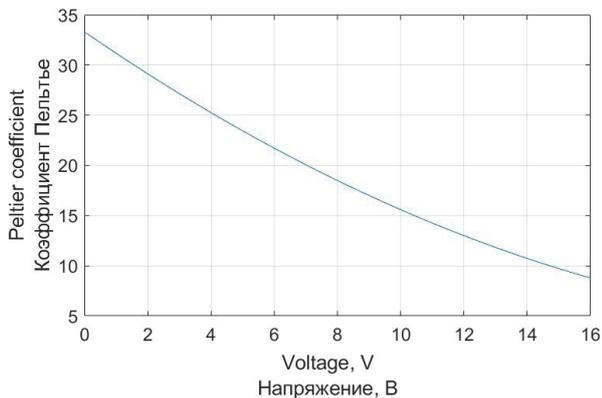


Рис. 4. Регрессионная модель изменения коэффициента Пельтье TEC1-12706

Fig. 4. Regression model of the Peltier coefficient variation TEC1-12706

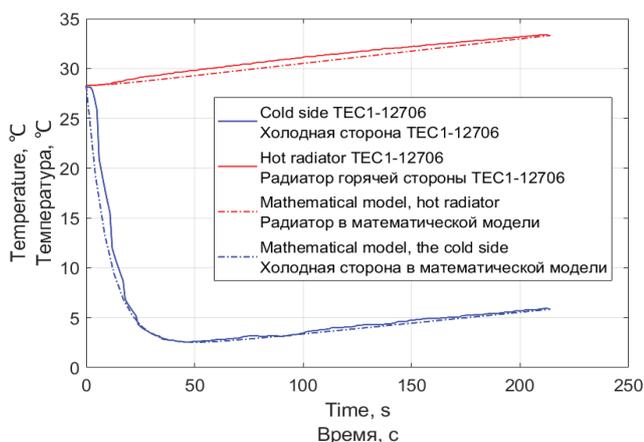


Рис. 5. Сравнение математической модели с реальной системой

Fig. 5. Comparison of a mathematical model with a real system

Перенос тепла от содержимого реактора через его стенки в воздух описывается потоком 10:

$$q_{10} = \frac{A_{gl} S_{ch}}{d_{gl}} (\theta_{out} - \theta_4), \quad (15)$$

где A_{gl} – коэффициент теплопроводности материала биореактора, Вт/(м·К); S_{ch} – площадь поверхности, передающей тепло, м²; d_{gl} – толщина стенки реактора, м.

$$\begin{cases} \frac{d\theta_4}{dt} = \frac{1}{c_{ch}\rho_{ch}V_{ch}} \left(S_{in} (a_0 + a_1\sqrt{v_h}) (\theta_5 - \theta_4) + \frac{A_{gl}S_{ch}}{d_{gl}} (\theta_{out} - \theta_4) + \frac{A_{gl}S_{pel}}{d_{gl}} (\theta_1 - \theta_4) \right), \\ \frac{d\theta_5}{dt} = \frac{1}{c_{gl}\rho_{gl}V_b} \left(S_{bot} (a_0 + a_1\sqrt{v_h}) (\theta_4 - \theta_5) + S_b (a_0 + a_1v_{air}) (\theta_{out} - \theta_5) + S_{pel} \frac{A_t}{d_t} (\theta_1 - \theta_5) \right), \\ \frac{d\theta_1}{dt} = \frac{1}{c_a\rho_aV_a} \left(S_{pel} (a_0 + a_1v_{air}) (\theta_{out} - \theta_1) + S_{Ps} \left(\frac{A_{t1}}{d_{t1}} + \frac{A_{TB}}{d_{TB}} \right) (\theta_2 - \theta_1) + \frac{A_{gl}S_{pel}}{d} (\theta_4 - \theta_1) - \Pi_p \cdot \theta_1 \cdot I + 0,5 \cdot I^2 R \right), \\ \frac{d\theta_2}{dt} = \frac{1}{c_a\rho_aV_a} \left(S_{Ps} \left(\frac{A_{t1}}{d_{t1}} + \frac{A_{TB}}{d_{TB}} \right) (\theta_1 - \theta_2) + \Pi_p \cdot \theta_2 \cdot I + 0,5 \cdot I^2 R + S_p \frac{A_{t2}}{d_{t2}} (\theta_3 - \theta_2) \right), \\ \frac{d\theta_3}{dt} = \frac{1}{c_r\rho_rV_r} \left(S_p \frac{A_{t2}}{d_{t2}} (\theta_2 - \theta_3) + S_{rh} (a_0 + a_1v_{air_{fan}}) (\theta_{out} - \theta_3) \right). \end{cases} \quad (17)$$

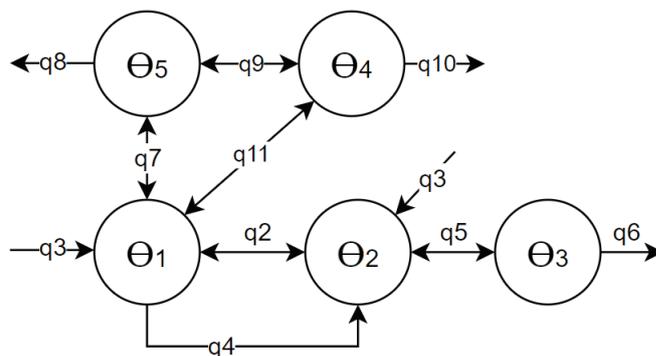


Рис. 6. Структурная схема модели с биореактором и его наполнением:

θ_4, θ_5 – соответственно накопитель теплоты содержимого биореактора и накопитель теплоты в материале реактора;
 q_7 – поток от холодной стороны элемента Пельтье биореактору;
 q_8 – поток от реактора к окружающему его воздуху;
 q_9 – поток тепла между реактором и его содержимым;
 q_{10} – поток тепла от содержимого реактора через его стенки в воздух;
 q_{11} – поток теплообмена содержимого реактора с элементом Пельтье

Fig. 6. Block diagram of a model with a bioreactor and its filling:

θ_4, θ_5 – heat storage of the bioreactor contents and heat storage in the reactor material, respectively;
 q_7 – flow from the cold side of the Peltier element to the bioreactor;
 q_8 – flow from the reactor to the air surrounding it;
 q_9 – heat flow between the reactor and its contents;
 q_{10} – heat flow from the contents of the reactor through its walls into the air;
 q_{11} – flow heat exchange of reactor contents with the Peltier element

Теплообмен содержимого реактора с элементом Пельтье описывается с помощью потока 11:

$$q_{11} = \frac{A_{gl} S_{pel}}{d_{gl}} (\theta_1 - \theta_4). \quad (16)$$

Результирующая математическая модель описывается следующей системой уравнений:

Моделирование с идентифицированными параметрами биореактора и его содержимого позволило оценить изменение температур в макете. Сравним температурные изменения в реальной системе и в полученной нами математической модели (рис. 7).

Согласно рисунку 7 полученная математическая модель не идеально описывает изменение температур в системе, что обусловлено сложностью идентификации кривых теплопроводности элемента Пельтье. Однако качественно данная модель показывает

характер изменения температур и говорит о том, что 1/3 от максимальной мощности TEC1-12706 уже достаточно для снижения температуры заполненного биореактора на 2...3°C. Данная модель требует дальнейших исследований и внедрения ее в уже разработанную модель системы контроля pH малообъемных биореакторов. Интеграция двух систем в единую модель мини-биореактора позволит повысить качество моделирования и максимально приблизит моделируемые процессы к реальным.

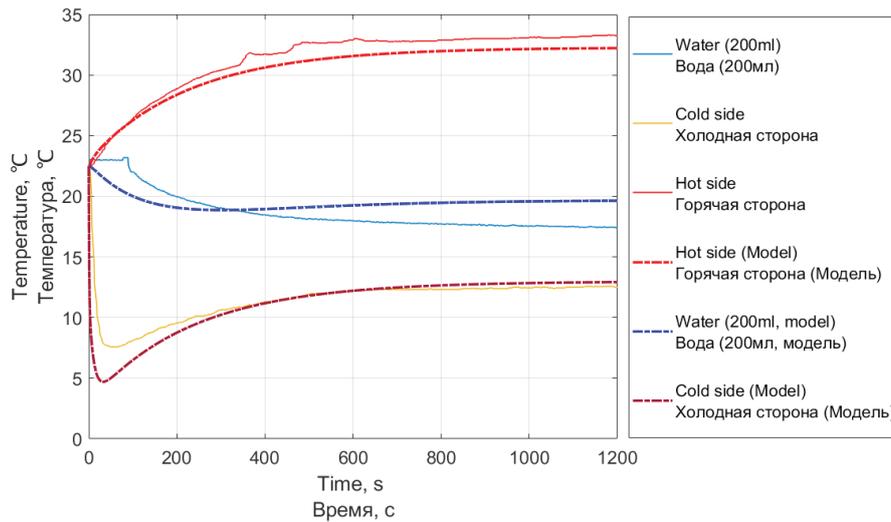


Рис. 7. Переходные характеристики модели и реальной системы

Fig. 7. Transitional characteristics of the model and the real system

Выводы

1. Полученная математическая модель и идентифицированные параметры элемента Пельтье не идеально описывают изменение температуры в системе, но дают понять характер переходных процессов. Для снижения температуры заполненного биореактора на 2...3°C достаточно 1/3 от максимальной мощности

TEC1-12706. Для приближения к реальной системе в модель необходимо внести дополнительные накопители и учесть потоки, описывающие неидеальные условия при получении экспериментальных данных.

2. Термоэлектрический преобразователь TEC1-12706 может применяться в системе *in vitro* моделирования желудочно-кишечного тракта рыб.

Список источников / References

1. Verhoeckx K, Cotter P, López-Expósito I, et al. The Impact of Food Bioactives on Health: in vitro and ex vivo models [Internet]. Cham (CH): Springer; 2015. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK500148/>

2. Van de Wiele T., Van den Abbeele P., Osseur W., Possemiers S., Marzorati M. The Simulator of the Human Intestinal Microbial Ecosystem (SHIME®). The Impact of Food Bioactives on Health. Springer. Cham. 2015. Pp. 305-317. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16104-4_27

3. Донской Д.Ю., Лукьянов А.Д., Филипович В., Астен Т.Б. Математическая модель системы управления pH в *in vitro* модели желудочно-кишечного тракта домашней птицы. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(1):95-106. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-1-95-106>

Donskoy D.Yu., Lukyanov A.D., Filipović V., Asten T.B. Mathematical Model of the pH control system in an *in vitro* model of the gastrointestinal tract of poultry. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(1):95-106. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-1-95-106>

4. Mandalari G., Chessa S., Bisignano C., Chan L., Carughi A. The effect of sun-dried raisins (*Vitis vinifera* L.) on the *in vitro* composition of the gut microbiota. *Food & Function*. 2016;7(9):4048-4060. <http://dx.doi.org/10.1039/C6FO01137C>

5. Donskoy D., Katin O., Alekseenko L. Development and implementation of the GIT-modeling bioreactor system: the way to reducing a carbon footprint. *E3S Web of Conferences*. 2021;279:01030. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127901030>

6. Лапшин В.П., Туркин И.А., Закалюжный А.А. Синтез управления, стабилизирующего режимы работы термодинамической системы // *Научные технологии в машиностроении*. 2019. №3. С. 43-48. https://doi.org/10.30987/article_5c7434fd136d59.56723792

Lapshin V.P., Turkin I.A., Zakalyuzhniy A.A. Synthesis of management stabilizing operation modes of thermodynamic system. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2019;3:43-48. (In Russ.) https://doi.org/10.30987/article_5c7434fd136d59.56723792

7. Lukyanov A., Donskoy D., Bykador V., Chuveyko M., Kasyanenko E. Simulation of thermodynamic systems with a thermoelectric converter based on the Peltier element for energy efficient management. *E3S Web of Conferences*. 2019;104:01001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910401001>

8. Майстренко А.В. Тепловой расчет конструкций. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2021. Т. 21, № 3. С. 260-267. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-3-260-267>

Maistrenko A.V. Thermal calculation of structures. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2021;21(3):260-267. (In Rus.) <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-3-260-267>

9. Mao J., Du J., Wang S., Zhou J., Wang Y. The transient supercooling enhancement for a pulsed thermoelectric cooler (TEC). *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. 2016. Paper 1773. <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/1773>

10. Snyder G.J., Soto M., Alley R., Koester D., Conner B. Hot spot cooling using embedded thermoelectric coolers.

Twenty-Second Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement And Management Symposium, Dallas, TX, USA, 2006, pp. 135-143. <https://doi.org/10.1109/STHERM.2006.1625219>

11. Piggott A. Transient thermoelectric supercooling: Isosceles current pulses from a response surface perspective and the performance effects of pulse cooling a heat generating mass. 2015. Vol. 55-03. 130 p. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015PhDT.....160P/abstract>

12. Okawa K., Amagai Y., Fujiki H., Kaneko N. Reverse heat flow with Peltier-induced thermoinductive effect. *Commun Phys*. 2021;4:267. <https://doi.org/10.1038/s42005-021-00772-4>

13. Remeli M., Bakaruddin N., Shawal S., Husin H., Othman M., Singh B. Experimental study of a mini cooler by using Peltier thermoelectric cell. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;788:012076. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/788/1/012076>

Информация об авторах

Юрий Анатольевич Иванов¹, академик РАН, профессор, д-р с.-х. наук; vniimzh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6843-4556>

Александр Дмитриевич Лукьянов², канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов»; alexlukjanov1998@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3827-6569>

Данила Юрьевич Донской³, аспирант; dand22@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3556-7758>

Дмитрий Владимирович Рудой⁴, канд. техн. наук, декан факультета «Агропромышленный»; rudoy.d@gs.donstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1916-8570>

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

^{2,3,4} Донской государственный технический университет; 344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

Вклад авторов

Ю.А. Иванов – концептуализация, анализ результатов исследования;

А.Д. Лукьянов – научное руководство исследованиями, моделирование, анализ литературных источников, создание черновика рукописи;

Д.Ю. Донской – математическое моделирование, идентификация параметров, анализ литературных источников, создание черновика рукописи;

Д.В. Рудой – методология, формальный анализ, визуализация.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 06.12.2023, после рецензирования и доработки 29.04.2024; принята к публикации 30.04.2024

Author Information

Yuriy A. Ivanov¹, Full Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, DSc (Ag); vniimzh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6843-4556>

Alexandr D. Lukyanov², CSc (Eng), Head of the Department “Automation of Production Processes”; alexlukjanov1998@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3827-6569>

Danila Yu. Donskoy³, postgraduate student; dand22@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3556-7758>

Dmitry V. Rudoy⁴, CSc (Eng), Dean of the Agroindustrial Faculty; rudoy.d@gs.donstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1916-8570>

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

^{2,3,4} Don State Technical University; Gagarina Square, 1, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation

Author Contribution

Yu.A. Ivanov – conceptualization, analysis of research results;

A.D. Lukyanov – research supervision, modeling, literature review, writing – original draft preparation;

D.Yu. Donskoy – mathematical modeling, identification of parameters, literature review, writing – original draft preparation;

D.V. Rudoy – methodology, formal analysis, visualization.

Conflict of interests

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

Received 06.12.2023, Revised 29.04.2024, Accepted 30.04.2024

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.3.083.72

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-66-72>

Конденсаторная установка для сельской распределительной сети 0,4 кВ: особенности построения

В.В. Тропин¹, Р.Е. Кучеренко²^{1,2} Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина; г. Краснодар, Россия¹ tropin.v09@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-5966-9328>² r-kucherenko.98@mail.ru

Аннотация. Компенсация реактивной мощности на базе конденсаторной установки, подключенной к сельской распределительной сети 0,4 кВ, при использовании неспециализированных контакторов сопровождается возникновением больших пусковых токов конденсаторов. К тому же установка проводниковой связи с трансформаторами тока нагрузки требует конструктивной доработки конденсаторной установки. С целью устранения указанных недостатков предлагается использовать батарею конденсаторов, управляемую реле времени и защищаемую от пусковых токов тремя *RL*-контурами. «Включение-отключение» батареи конденсаторов при этом должно производиться внутренним сигналом конденсаторной установки, задающим временной интервал «Включено-выключено». С помощью математической модели, а также трехфазной физической модели мощностью 1,2 квар изучалось поведение переходных и установившихся токов при различных значениях параметров *RL*-контуров. Исходными неизменными параметрами модели являлись реактивные сопротивления конденсаторов и катушек индуктивности. Номинальная величина тока фазы батареи конденсаторов составляла 2,14 А. Переменными параметрами были величины активных сопротивлений *RL*-контуров, принимавших значения 0, 10, 20, 30 и ∞. Изучалась осциллограмма стационарного и переходного тока. В результате установлено, с целью соответствия батареи конденсаторов критерию использования автоматических выключателей и контакторов сети 0,4 кВ, что величина сопротивления резистора *RL*-контура каждой фазы трехфазной батареи конденсаторов должна десятикратно превышать реактивное сопротивление токоограничивающей катушки *RL*-контура и быть в 5 раз меньше величины реактивного сопротивления силового конденсатора фазы батареи конденсаторов. В сельских электрических сетях 0,4 кВ для компенсации реактивной мощности можно установить одиночную конденсаторную установку мощностью 25 квар с простым автономным управлением. Несколько конденсаторных установок могут компенсировать реактивные нагрузки 50 и 75 квар.

Ключевые слова: конденсаторная установка, контактор, резистор, реле времени, осциллограмма, батареи конденсаторов, *RL*-контур

Для цитирования: Тропин В.В., Кучеренко Р.Е. Конденсаторная установка для сельской распределительной сети 0,4 кВ: особенности построения // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 3. С. 66-72. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-66-72>

ORIGINAL ARTICLE

Condenser installation for a rural distribution network of 0.4 kV: construction features

V.V. Tropin¹, R.E. Kucherenko²^{1,2} Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin; Krasnodar, Russia¹ tropin.v09@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-5966-9328>² r-kucherenko.98@mail.ru

Abstract. Reactive power compensation based on a capacitor plant connected to a rural 0.4 kV distribution network, when using non-specialized contactors, is accompanied by the occurrence of large starting currents of capacitors. In addition, the installation of a conductor connection with load current transformers requires structural modification of the capacitor plant. In order to eliminate these disadvantages, it is proposed to use a capacitor bank controlled by a time relay and protected from inrush currents by three *RL* circuits. In this case, the “on-off” mode of the capacitor bank must be switched to by an internal signal of the capacitor bank setting the time interval “on-off”. Using a mathematical model, as well as a three-phase physical model with a power of 1.2 kV, the authors studied the behavior of transient and steady-state currents at various values of the parameters of *RL* circuits.

The initial invariant parameters of the model were the reactive resistances of capacitors and inductors. The nominal value of the phase current of the capacitor bank was 2.14 A. The variable parameters were the values of the active resistances of the RL circuits, which took the values of 0, 10, 20, 30 and ∞ . The oscillogram of stationary and transient current was studied. As a result, it was found that in order to match the capacitor bank to the criterion of using circuit breakers and contactors of the 0.4 kV network, the resistance value of the RL circuit resistor of each phase of a three-phase capacitor bank should be tenfold higher than the reactance of the current-limiting coil of the RL circuit and be five times less than the reactance value of the power capacitor of the capacitor bank phase. In rural 0.4 kV electric networks, a single 25 kV capacitor plant with simple autonomous control can be installed to compensate for reactive power. Several capacitor plants can compensate for reactive loads of 50 and 75 kVAr.

Keywords: capacitor bank, contactor, resistor, time relay, oscilloscope, capacitor banks, RL circuit

For citation: Tropin V.V., Kucherenko R.E. Condenser installation for a rural distribution network of 0.4 kV: construction features. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2024;26(3):66-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-66-72>

Введение

Конденсаторные установки (КУ), используемые для компенсации реактивной мощности [1] в сельских распределительных сетях 0,4 кВ, приносят в эксплуатацию сети определенные проблемы, значительно снижающие эффективность их применения [2-4]. Одной из проблем являются пусковые (переходные) токи большой величины, на порядок и более превышающей номинальное значение. Эта проблема не снимается даже при наличии контакторов, специально предназначенных для подключения батареи конденсаторов (БК) к сети [5, 6] с помощью вводимых на определенное время (порядка 0,5 мс) пусковых резисторов, одномоментно подзаряжающих конденсаторы, по причине возможных больших пусковых токов при возникновении случайных импульсов напряжения в самой сети и при подключении к данному узлу сети других КУ или их секций. Второй проблемой с позиции общей эффективности КУ и работоспособности контура регулирования является усложнение монтажа и эксплуатации регулятора. Необходимо специальными проводниками связать входные датчики тока и напряжения регулятора с измерительными трансформаторами тока и напряжения сети, установленными в удаленных, неудобных для монтажа точках. Длинная проводниковая линия значительно ухудшает работоспособность регулятора [7, 8] ввиду снижения помехоустойчивости и наличия сложных разъемных соединений [9].

Отметим, что стандарт ГОСТ Р 56744-2015¹, формулирующий требования к низковольтным КУ для повышения коэффициента мощности, не учитывает особенности расчета, наладки, монтажа и эксплуатации КУ в современных сельских распределительных сетях, имеющих значительную долю нелинейной нагрузки. Некоторые понятия не имеют пояснений

¹ ГОСТ Р 56744-2015 (МЭК 61921:2003). Конденсаторы силовые. Установки конденсаторные низковольтные для повышения коэффициента мощности. М.: Стандартинформ, 2016. С. 14.

в стандарте. Например, если регуляторы подразделяются на встроенные и автономные, то возникает вопрос о том, что означает автономность. Если под автономностью регулятора понимать отсутствие соединения с трансформаторами тока сети, то автономным регулятором можно считать простое реле календарного времени. И такие упрощенные схемы регуляторов находят применение в распределительных сетях 0,4 кВ.

Повысить работоспособность КУ в сельских распределительных сетях 0,4 кВ с предсказуемым графиком нагрузок электроприемников (например, электроприемники птицеводческих предприятий) несмотря на предложения по использованию тиристоров для управления током БК, по нашему мнению, может подойти кардинально упрощающий систему управления (рис. 1).

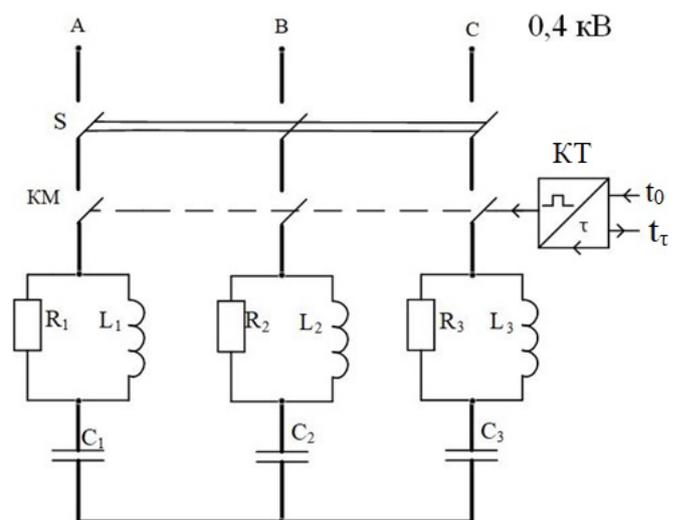


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема батареи конденсаторов (C_1 , C_2 , C_3), управляемой реле времени (KT) и защищаемой от пусковых токов тремя RL -контурами

Fig.1. Schematic diagram of a capacitor bank (C_1 , C_2 , C_3) controlled by a time relay (KT) and protected from inrush currents by three RL circuits

В электрической схеме (рис. 1) реле времени *KT* задает интервал от момента t_0 начала включения контактов контактора *KM* до их отключения t_r . Временной интервал $t_r - t_0$, равный τ , формируется эксплуатационным персоналом после анализа графика реактивной нагрузки сети.

Цель исследований: разработать математическую и физическую модели процесса формирования пускового тока БК и с их помощью исследовать динамические характеристики БК с *RL*-контуром, включенным в каждую фазу БК, для выявления влияния величины активного сопротивления *R*.

Материалы и методы

Для снижения пускового тока предложено ввести *RL*-контур в каждую фазу БК (рис. 1). Действие резистора направлено на создание пускового зарядного тока в момент включения. Подъемом напряжения конденсатор подготавливается к взаимодействию с катушкой индуктивности с целью уменьшения ее переходного тока на начальном этапе переходного процесса. Одновременно резистор демпфирует собственные резонансные колебания *RLC*-цепи с сетью, чтобы не вызывать дополнительных высших гармоник, аналогичных высшим гармоникам, вызванным нелинейными электроприемниками.

Для определения необходимых параметров демпфирующего *RL*-контура (рис. 1), обеспечивающего заданное соотношение величин пускового и номинального токов БК, выполнено математическое и физическое моделирование переходного процесса, при котором анализировались величины свободных токов i_1, i_2, i_3 (конденсатора емкостью *C*, катушки индуктивности *L*, резистора с сопротивлением *R*). Схема соответствующей математической модели представлена на рисунке 2.

Уравнения, связывающие между собой токи конденсатора *C*, катушки индуктивности *L* и резистора

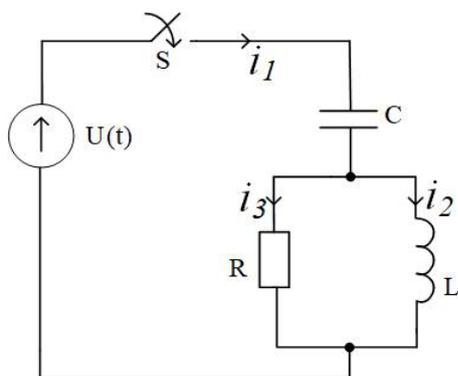


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема математической модели фазы батареи конденсаторов
Fig. 2. Schematic diagram of the mathematical model of the capacitor bank phase

R токоограничивающего контура с воздействующей ЭДС *U(t)*, представлены формулами:

$$\frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt + L \frac{di_2}{dt} = U(t); \quad L \frac{di_2}{dt} = Ri_3; \quad i_1 = i_2 + i_3,$$

где i_1, i_2, i_3 – величины токов конденсатора, катушки, резистора (*A*) соответственно; *C, L, R, U* – величины емкости (мкФ), индуктивности (мГн), сопротивления (Ом), напряжения (В) соответственно.

Для анализа величины и формы пускового тока i_1 в цепи с выключателем *S* определена его свободная составляющая, но для упрощения предварительно определена величина тока i_2 , поскольку его временная функция содержит только одну ортогональную составляющую – синусную. Однородное дифференциальное уравнение для тока i_2 имеет вид:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{di}{dt} + \frac{1}{CL} i = 0,$$

корни его характеристического уравнения $p_{1,2} = -\frac{1}{2\tau} \pm \sqrt{\frac{1}{4\tau^2} - \frac{1}{LC}}$, где постоянная времени $\tau = RC$.

Величина частоты резонанса *RLC*-контура (ω_0) определяется выражением:

$$\omega_0 = \omega \sqrt{\frac{X_C}{X_L} \sqrt{1 - \frac{X_C X_L}{4R^2}}}, \tag{1}$$

где ω – угловая частота напряжения сети, равная $2\pi f$, а $f = 50$ Гц.

Отметим, что система «Сеть-БК» демпфируется, если $R^2 = (X_C X_L / 4)$.

Временная функция свободной составляющей тока i_2 имеет вид:

$$i_2(t) = \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) \cdot \frac{U(0)}{X_L} e^{-t/(2\tau)} \sin \omega_0 t, \tag{2}$$

где $U(0)$ – напряжение источника в момент коммутации ключа *S*.

При стремлении *R* к бесконечности формула (2) дает известное значение величины амплитуды пускового тока БК, ограничиваемого катушкой индуктивности в каждой фазе $I_{2\text{пуск}} = I_{1\text{пуск}} = U(0) / (\sqrt{X_L X_C})$.

Ток i_3 в цепи резистора *R* найден из уравнения $i_3 = \frac{L}{R} \frac{di_2}{dt}$ и суммированием токов i_3 и i_2 .

Свободная составляющая искомого тока конденсатора (i_1):

$$i_1(t) = \left(\frac{U(0)}{R}\right) e^{-t/(2\tau)} \left[\cos \omega_0 t + \left(\frac{R}{X_L}\right) \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) \left(1 - \frac{X_L X_C}{2R^2}\right) \sin \omega_0 t \right]. \tag{3}$$

Формула (3) дает оценку величин амплитуд и характерных изменений тока коммутации БК по трем составляющим: экспоненциальной,

синусной, косинусной, и если величина амплитуды косинусной составляющей зависит только от сопротивления R резистора, то величина синусной составляющей зависит от соотношения всех параметров, в частности, может быть даже равна нулю, если $2R^2 = X_L X_C$.

Проведено сравнение теоретических расчетов с результатами физического моделирования на базе трехфазной БК мощностью 1,2 квар, защищенной от переходного пикового тока в каждой фазе RL -контуром. Принципиальная электрическая схема физической модели представлена на рисунке 3. Исходными неизменными параметрами модели являются реактивные сопротивления конденсаторов (C_1, C_2, C_3) $X_C = 103,0$ Ом (погрешность $\pm 1,0\%$) и катушек индуктивности (L_1, L_2, L_3) $X_L = 2,1$ Ом (погрешность $\pm 2\%$). Номинальная величина тока фазы БК составляет 2,14 А.

Переменными параметрами являются величины активных сопротивлений RL -контуров. При $R = 0$ и подключении конденсаторов БК непосредственно к сети через выключатель S пиковая величина фазного тока i_f составила 115 А. Длительность импульса коммутации при этом имеет величину порядка 0,2 мс.

Величина установившегося тока 2,24 А больше номинального значения, что обусловлено значительной величиной токов высших гармоник (рис. 4).

При установке RL -контюра с сопротивлением резистора 20 Ом ток i_f очищается от высших гармоник (рис. 5). Ярко выделена только одна гармоника

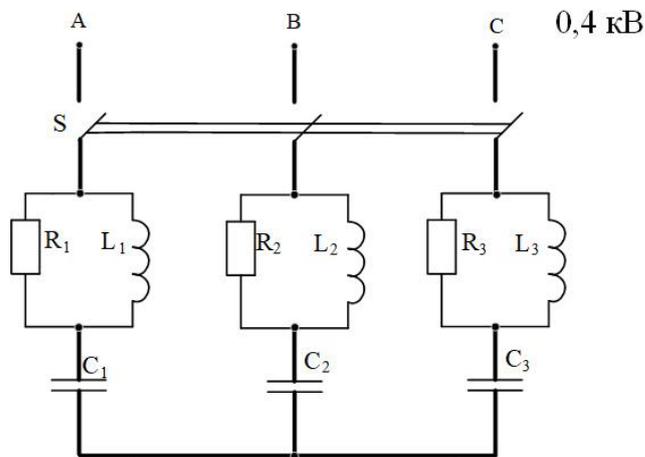


Рис. 3. Принципиальная схема физической модели на базе трехфазной батареи конденсаторов

Fig. 3. Schematic diagram of a physical model based on a three-phase capacitor bank

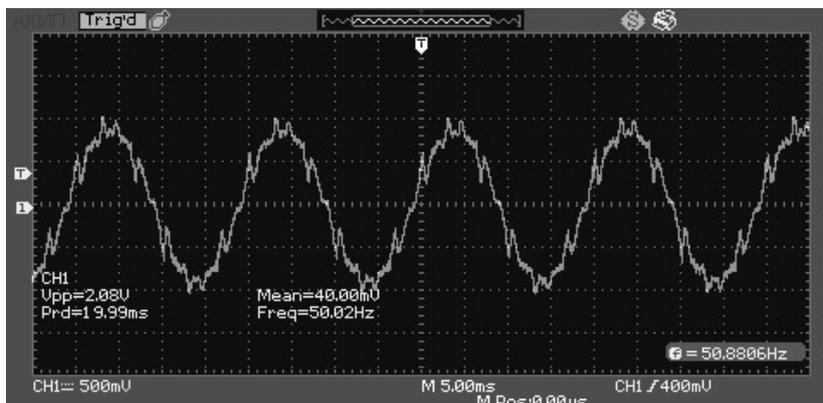


Рис. 4. Осциллограмма стационарного тока i_f фазы А батареи конденсаторов без RL -контюра

Fig. 4. Oscillogram of the stationary current i_f of phase A of a capacitor bank without a RL circuit

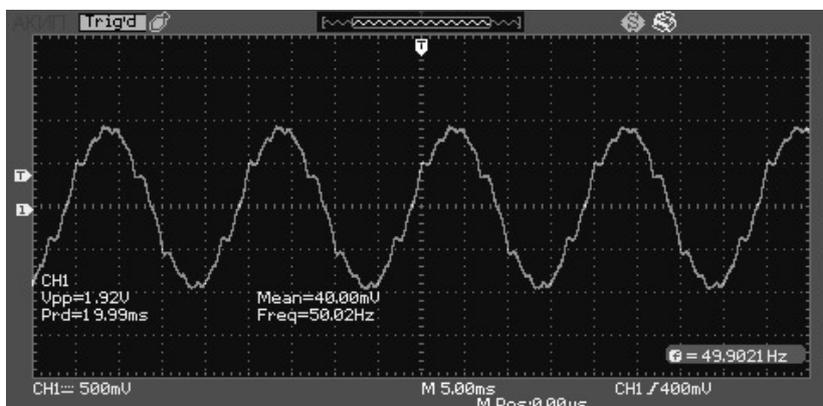


Рис. 5. Осциллограмма стационарного тока i_f с RL -контуром при $R = 20$ Ом

Fig. 5. Oscillogram of stationary current i_f with an RL circuit at $R = 20$ ohms

сети – частотой 350 Гц, поскольку собственная частота RLC -контура согласно (1) составляет величину 330 Гц, близкую величине седьмой гармоники.

При этих же параметрах и воздействии входного сетевого напряжения пиковым значением 290 В в переходном процессе амплитудное значение тока составило 14,5 А, а через 3 мс переходной процесс закончился и установился принужденный режим работы с номинальным током величиной 2,14 А (рис. 6). Это указывает на вполне достаточную для практики использования БК величину соотношения пикового и номинального токов, равную 7, поскольку именно в этом случае можно использовать и автоматический выключатель, и контактор, рассчитанные на номинальный ток БК. Отметим, что при соотношении 10:1 активного и реактивного сопротивлений RL -контура дополнительные потери будут незначительными (0,7% от полной мощности БК).

При установке сопротивления резистора RL -контуров величиной 10 Ом ток коммутации i_1 меняет форму (рис. 7). Величина сопротивления 10 Ом близка к критическому значению 7 Ом, определенному по формуле (1) для данной БК. Поэтому колебательный процесс в токе практически отсутствует:

косинусная свободная составляющая тока сильно подавляется экспоненциальной составляющей согласно формуле (3), а синусная ортогональная составляющая обращается в нуль согласно условию для коэффициента (множителя перед синусом тока).

При воздействующем напряжении 120 В в момент $t = 0$ пиковое значение тока составляет 12,1 А, а при максимальной величине входного напряжения 300 В равно 29 А, что в 14 раз превышает номинальный ток БК, поэтому пятикратное превышение сопротивления демпфирующего резистора над реактивным сопротивлением катушки индуктивности не может быть рекомендовано для практики. Отметим, что электротехнической фирмой «Нокиа» используется именно такое пятикратное соотношение для реализации широкополосных силовых фильтров 11 гармоники.

Для случая $R = 30$ Ом свободный переходной ток, или ток коммутации i_1 , определяемый формулой (3), по сравнению с током, полученным при $R = 20$ Ом, имеет меньшее пиковое значение за счет меньшей косинусной составляющей тока, но среднее значение тока остается почти прежним ввиду увеличения времени переходного процесса до 10 мс вместо 3 мс (рис. 8).

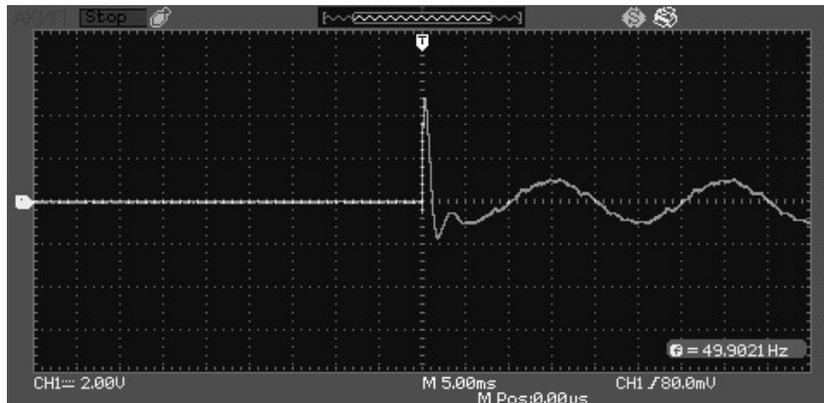


Рис. 6. Осциллограмма переходного процесса для тока i_1 фазы А батареи конденсаторов при $R = 20$ Ом
 Fig. 6. Oscillogram of the transient process for the current i_1 of phase A of the capacitor bank at $R = 20$ ohms

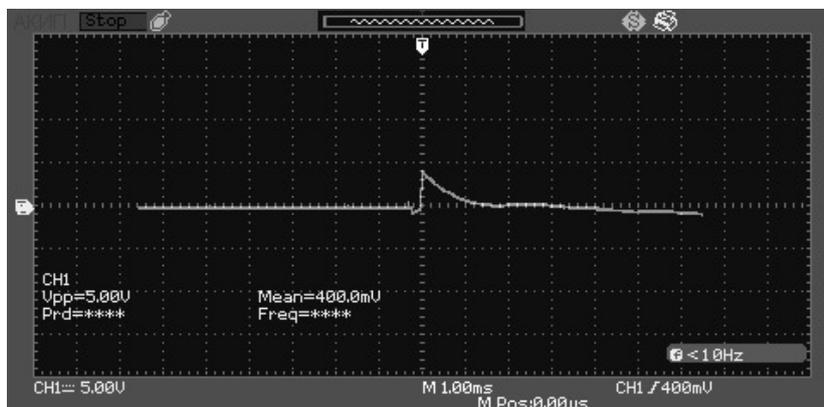


Рис. 7. Осциллограмма переходного тока i_1 фазы А батареи конденсаторов при $R = 10$ Ом
 Fig. 7. Oscillogram of the transient current i_1 of phase A of the capacitor bank at $R = 10$ ohms

При $R = \infty$ график тока переходного процесса после коммутации i_t представлен на осциллограмме рисунка 9. Амплитудное значение тока I_A величиной 17,3 А определяется формулой $I_{2\text{пуск}} = U(0) / (\sqrt{X_L X_C})^1$. Переходной процесс длительностью 20 мс имеет колебательный характер с частотой резонанса, соответствующей расчетному значению по формуле (1). Такой ток переменного характера с амплитудными величинами, значительно превышающими номинальное, также является нежелательным в практике использования конденсаторов

БК, поскольку вызывает дополнительные высокочастотные тепловые воздействия на изоляцию, приводящие к недопустимым превышениям величины выделенной энергии. Частично эта энергия поглощается резисторами RL -контуров, причем рассеиваемая в них активная мощность не должна превышать общепринятый критерий 0,5% от полной мощности БК. Этому критерию соответствует десятикратное увеличение реактивного сопротивления катушки RL -контура. Анализ показал, что указанное соотношение является наиболее рациональным.

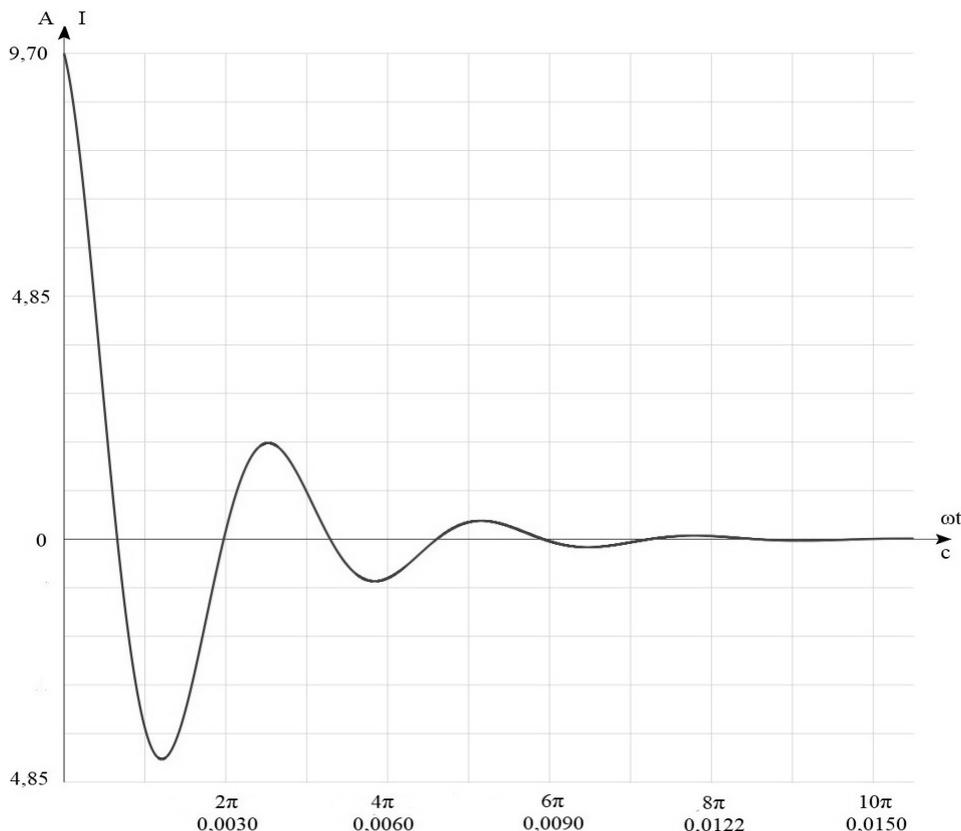


Рис. 8. Переходной ток i_t , фазы А батареи конденсаторов при $R = 30$ Ом
 Fig. 8. Transient current i_t , of phase A of the capacitor bank at $R = 30$ ohms

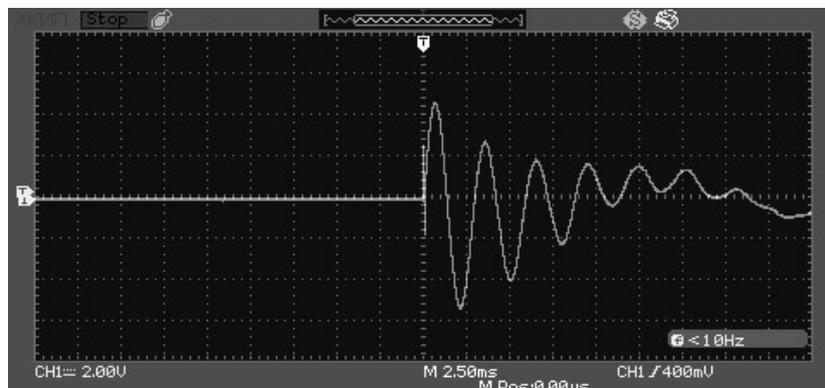


Рис. 9. Переходной ток i_t , фазы А батареи конденсаторов при отсутствии резисторов
 Fig. 9. Transient current i_t , of phase A of the capacitor bank without any resistors

¹ Королёв Ю.П. О надёжности электроснабжения сельских потребителей // Техника в сельском хозяйстве. 2000, №6. С. 33,34.

Выводы

1. Для соответствия критерию использования автоматических выключателей и контакторов сети 0,4 кВ для БК величина сопротивления резистора RL -контура каждой фазы трехфазной БК должна быть в 10 раз больше реактивного сопротивления токоограничивающей катушки RL -контура и в 5 раз меньше величины реактивного сопротивления силового конденсатора фазы БК.

Список источников

1. Кондратюк М.И. Компенсация реактивной мощности в сетях 0,4 кВ // *Моя профессиональная карьера*. 2021. Т. 1, № 20. С. 54-57. EDN: XHZOZR
2. Корепанова О.Ю. Компенсация реактивной мощности в электросетях АПК и оценка энергосбережения // *Главный энергетик*. 2014. № 2. С. 33-39. EDN: SBXLAV
3. Богдан А.В., Перекопский К.В. Определение мощности одноступенчатой конденсаторной установки // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2007. № 8. С. 30-31. EDN: IAYELH
4. Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Брежнев И.В. Исследование проблем качества электроэнергии в сетях напряжением 0,4 кВ // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2022. Т. 24, № 2. С. 72-85. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-2-73-86>
5. Nisja I., Zoni M. Study of capacitor bank switching transient in distribution network. *MATEC Web of Conferences*. 2018;248:02004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824802004>
6. Савиных В.В., Тропин В.В. Условия токовой коммутации при подключении силового конденсатора к электрической сети // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2011. № 1. С. 67-70. EDN: NQSRNR
7. Устройство для компенсации реактивной мощности: а.с. SU1515254 A1, МПК H02J 3/18 / Н.И. Джус; № 4215574; заявл. 27.02.1987; опубл. 15.10.1989, Бюл. № 38. EDN: HOYNBO
8. Устройство для компенсации реактивной мощности: Патент на полезную модель RU222051 U1, МПК H02J 3/18 (2006.01) / В.В. Тропин, Р.Е. Кучеренко, Л.В. Богородицкая; заявл. 19.06.23; опубл. 07.12.2023, Бюл. № 34. EDN: RBMTDT
9. Qiao X., Bian J., Chen C., Li.H. Comparison and analysis of reactive power compensation strategy in power system. 2019 *IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*, Beijing, China, 2019. Pp. 689-692. <https://doi.org/10.1109/iSPEC48194.2019.8975301>

Информация об авторах

Владимир Валентинович Тропин¹, д-р техн. наук, профессор; tropin.v09@mail.ru

Роман Евгеньевич Кучеренко², аспирант; r-kucherenko.98@mail.ru

^{1,2} Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина; 350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, 13

Вклад авторов

В.В. Тропин – формулирование основной концепции исследования, подготовка текста статьи.

Р.Е. Кучеренко – проведение эксперимента, анализ и дополнение текста статьи.

Статья поступила 10.12.2023, после рецензирования и доработки 27.03.2024; принята к публикации 01.04.2024

2. В сельских электрических сетях 0,4 кВ для компенсации реактивной мощности можно устанавливать одиночные КУ мощностью 25 квар с простым автономным управлением. С учетом возможности КУ настраиваться на работу в определенном графике нагрузки несколько КУ могут компенсировать реактивные нагрузки 50 и 75 квар.

References

1. Kondratyuk M.I. Reactive power compensation in 0.4 kV networks. *My Professional Career*. 2021;1(20):54-57. (In Russ.)
2. Korepanova O.Yu. Compensation of reactive power in electrical grids of agroindustrial complex and estimation of energy saving. *Chief Power Engineer*. 2014;2:33-39. (In Russ.)
3. Bogdan A.V., Perekopsky K.V. Determination of the power of a single-stage capacitor plant. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2007;8:30-31. (In Russ.)
4. Biryulin V.I., Kudelina D.V. Model development for the analysis of reducing voltage asymmetry methods in power supply systems. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2022;24(2):72-85. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-2-73-86>
5. Nisja I., Zoni M. Study of capacitor bank switching transient in distribution network. *MATEC Web of Conferences*. 2018;248:02004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824802004>
6. Savinykh V.V., Tropin V.V. Conditions of current switching when connecting a power capacitor to an electrical network. *Russian Electromechanics*. 2011;1:67-70. (In Russ.)
7. Juice N.I. Device for compensating for reactive power: A.S. SU1515254 A1, IPC H02J 3/18; No. 4215574, 1989. (In Russ.)
8. Tropin V.V., Kucherenko R.E., Bogoroditskaya L.V. Device for reactive power compensation: utility model patent No. 222051 Russian Federation, IPC H02J 3/18 (2006.01), 2023. (In Russ.)
9. Qiao X., Bian J., Chen C., Li.H. Comparison and analysis of reactive power compensation strategy in power system. 2019 *IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*, Beijing, China, 2019, pp. 689-692. <https://doi.org/10.1109/iSPEC48194.2019.8975301>

Author Information

Vladimir V. Tropin¹, DSc (Eng), Professor; tropin.v09@mail.ru

Roman E. Kucherenko², postgraduate student; r-kucherenko.98@mail.ru

^{1,2} Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin; 13 Kalinina Str., Krasnodar, 350044, Russian Federation

Author Contribution

V.V. Tropin – conceptualization, writing – original draft preparation and editing

R.E. Kucherenko – investigation (conducting the experiment)

Received 10.12.2023, Revised 27.03.2024, Accepted 01.04.2024

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК: 621.47

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-73-79>**Тепловой насос и солнечная панель: эксергетический метод термодинамического анализа****С.И. Кускарбекова¹, А.А. Ершов², О.Ю. Корнякова³, К.В. Осинцев⁴**^{1,2,3,4} Южно-Уральский государственный университет; г. Челябинск, Россия¹ kuskarbekovasi@susu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7171-6661>, Scopus ID: 57212311063² sanyayershov2000@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0001-3626-3799>³ korniakovaoi@susu.ru⁴ osintcevkv@susu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0791-2980>, Scopus ID: 8838619800

Аннотация. Эксергетический анализ проектируемой системы необходим для определения степени ее термодинамического совершенства. С целью оценки эффективности технологического процесса на примере повышения КПД установки на экспериментальном стенде теплового насоса, предназначенном для исследования процесса отбора тепла с тыльной поверхности солнечной панели, и преобразовании ее в полезную произведен анализ двух методов: подбор холодильного агента и анализ внешних источников. Анализ методов позволил сравнить эксергетический КПД модернизированной установки, включающей в себя тепловой насос и солнечную панель в качестве дополнительного низкопотенциального источника теплоты с лабораторной установкой теплового насоса до модернизации. Произведены эксергетический расчет, подбор жидкости, анализ внешних источников. Выявлено, что наиболее эффективным методом оценки эксергетического КПД новых технических решений является метод анализа источников внешних источников. Расчетами установлено, что энергоэффективная схема работы теплового насоса совместно с солнечной панелью приводит к наивысшему коэффициенту полезного действия, равному 23,4%. Однако данное значение достигается при большом количестве солнечного света, температуре воздуха порядка 25 °С и перпендикулярном падении солнечных лучей на панель. Эксергия электроэнергии, потребляемой электродвигателем, по сравнению с тепловым насосом до модернизации снижена на 8,92 кДж/кг, а эксергетический КПД модернизированной установки вырос на 7,5%, что доказывает эффективность перенаправления электрической энергии на питание компрессора. Установка солнечной панели и теплового насоса приведет к улучшению экологической ситуации и экономии денежных средств в связи с отсутствием затрат на топливо.

Ключевые слова: тепловой насос, солнечная панель, эксергетический анализ, эксергия, подбор холодильного агента, анализ внешних источников, эксергетический КПД

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-20011; <https://rscf.ru/project/22-19-20011/>.

Для цитирования: Кускарбекова С.И., Ершов А.А., Корнякова О.Ю., Осинцев К.В. Тепловой насос и солнечная панель: эксергетический метод термодинамического анализа // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, № 3. С. 73-79. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-73-79>

ORIGINAL ARTICLE

Heat pump and solar panel: exergy method of thermodynamic analysis**S.I. Kuskarbekova¹, A.A. Ershov², O.Yu. Kornyakova³, K.V. Osintsev⁴**^{1,2,3,4} South Ural State University; Chelyabinsk, Russia¹ kuskarbekovasi@susu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7171-6661>, Scopus ID: 57212311063² sanyayershov2000@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0001-3626-3799>³ korniakovaoi@susu.ru⁴ osintcevkv@susu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0791-2980>, Scopus ID: 8838619800

Abstract. Exergy analysis of the designed system is necessary to determine the degree of its thermodynamic perfection. The research goal was to evaluate the degree of increasing the efficiency of an installation on an experimental bench heat pump designed to study heat extraction from the back surface of a solar panel and its conversion into useful work. Two methods were analyzed – selection of a refrigerant and analysis of external sources. The analysis of the methods was used to compare the exergy efficiency of a modernized installation,

including a heat pump and a solar panel as an additional low-grade heat source, with a laboratory heat pump installation before modernization. The authors performed exergy calculation, fluid selection, and analysis of external sources. It was revealed that the most effective method for assessing the exergy efficiency of new technical solutions is the method of analyzing the external sources. Calculations have established that the energy-efficient operation scheme of a heat pump together with a solar panel leads to the highest efficiency of 23.4%. However, this value is achieved with a large amount of sunlight, an air temperature of about 25°C and a perpendicular incidence of sunlight on the panel. The exergy of electricity consumed by the electric motor compared to the heat pump before modernization was reduced by 8.92 kJ/kg, and the exergy efficiency of the modernized installation increased by 7.5%. The results prove the effectiveness of redirecting electrical energy to power the compressor. Installing a solar panel and heat pump will improve the environmental situation and save money due to the lack of fuel costs.

Keywords: heat pump, solar panel, exergy analysis, exergy, selection of refrigerant, analysis of external sources, exergy efficiency

Funding: The research was funded by the grant of the Russian Science Foundation No. 22-19-20011, <https://rscf.ru/project/22-19-20011/>

For citation: Kuskarbekova S.I., Ershov A.A., Korniyakova O.Yu., Osintsev K.V. Heat pump and solar panel: exergy method of thermodynamic analysis. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2024;26(3):73-79. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-73-79>

Введение

Основой создания высокоэффективных теплотехнических решений является анализ проектируемой системы с точки зрения степени ее термодинамического совершенства. Анализ технологической системы способствует раскрытию энергетического потенциала оборудования путем выявления и покрытия зон экстремального теплового напряжения. Ориентиром эффективности применяемого метода служит изменение степени термодинамической эффективности системы¹. Результатом применения аналитических методов оценки эффективности системы является получение оптимальной характеристики эффективности системы для передачи тепловой энергии, составленной на основе эксергетического анализа, и формулирование термодинамических требований к исследуемой установке.

Модернизация действующих и проектируемых систем производится на основе эксергетического анализа, основанного на одновременном использовании первого и второго законов термодинамики и являющегося теоретической базой процесса энергосбережения². Эксергетический анализ используется для оценки путей повышения эффективности энергоносителей, процессов преобразования и рационального использования энергии. Задача анализа заключается в определении оптимального пути подведения в анализируемую систему эксергии таким образом, чтобы она была минимальной и реализовывалась с максимально возможным

эксергетическим КПД, который и является общим критерием эффективности. Сформулированные на этой основе термодинамические требования являются основой совершенствования технологической схемы. Данный анализ позволяет модернизировать отдельные малоэффективные компоненты экспериментального стенда, следовательно, и более совершенных установок.

Метод подбора рабочей жидкости (холодильного агента) позволяет подобрать для лабораторного стенда хладагент с необходимыми теплофизическими параметрами: температурой кипения жидкости, температурой конденсации пара, степенью токсичности, теплотой парообразования и удельной теплоемкостью. Задача метода подбора рабочей жидкости заключается в выявлении хладагента с высоким значением количества полезной работы, максимально влияющим на КПД и эффективность работы оборудования [1].

Метод анализа внешней среды позволяет оценить возможные источники альтернативной энергии (солнечной энергии), которые могут повысить энергоэффективность системы. Метод заключается в анализе низкопотенциальной энергии. Внешним фактором выступает выработка электроэнергии солнечной панелью. При нагреве панели солнечными лучами вырабатывается также тепловая энергия [2].

Цель исследований: сопоставление воздействия, оказываемого применением двух аналитических методов оценки эффективности технологического процесса, на примере повышения КПД установки.

Материалы и методы

Анализ методов оценки эффективности технологического процесса на примере повышения КПД установки произведен на экспериментальном стенде, предназначенном для исследования процесса

¹ Казаков В.Г., Луканин П.В., Смирнова О.С. Термодинамический метод анализа в энергоиспользующих процессах: Учебное пособие. СПб.: СПб ГТУРП, 2011. 93 с.

² Казаков В.Г., Луканин П.В., Смирнова О.С. Эксергетические методы оценки эффективности теплотехнологических установок: Учебное пособие. СПб.: СПб ГТУРП, 2013. 93 с.

отбора тепла с тыльной поверхности солнечной панели (рис. 1), используемой в качестве источника двух ресурсов одновременно: теплоты и электричества. Экспериментальный стенд работает по принципу теплового насоса, заключающегося в заборе тепловой энергии из окружающей среды и преобразовании ее в полезную [3].

Составляющие стенда:

- солнечная панель 1 размером $670 \times 540 \times 28$ мм и мощностью 50 Вт. Теплоизолированная конструкция обеспечивает плотное прилегание панели к испарителю и отдачу ему теплоты через интерфейс;

- теплоноситель, поступающий через трубки сечением 5 мм от испарителя в компрессор 4 мощностью не более 200 Вт;

- змеевиковый конденсатор 2 из нержавеющей стали длиной 10 м, размещенный в теплоизолированном баке объемом 10 л. Теплоноситель проходит по конденсатору из верхней его части к нижней;

- бак 3 из нержавеющей стали, имеющий съемную крышку для возможности чистки от накипи. В верхней части боковой стенки установлена заливная горловина, а внизу – сливной кран и трубчатый показатель уровня воды;

- терморегулирующий клапан 5, в который поступает теплоноситель после конденсатора;

- датчики для измерения давления и температуры теплоносителя, расположенные на входе и выходе из конденсатора (на схеме не изображены).

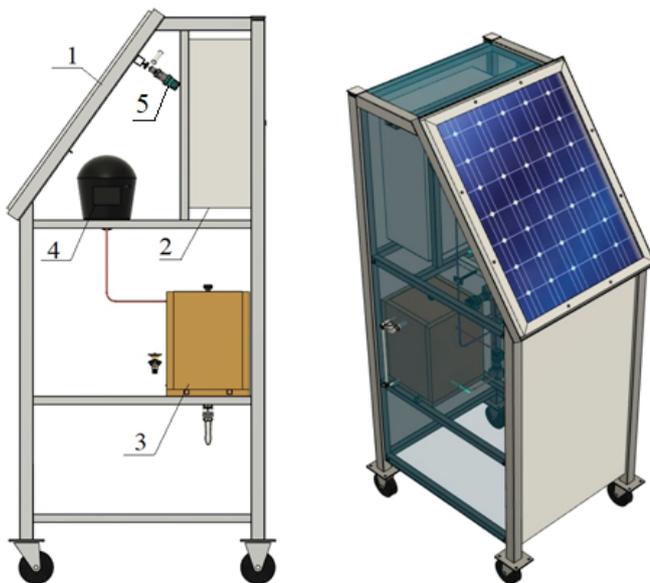


Рис. 1. Компонентная

экспериментального стенда теплового насоса:

1 – солнечная панель; 2 – конденсатор; 3 – бак;
4 – компрессор; 5 – терморегулирующий клапан

Fig. 1. Layout of the experimental bench:

1 – solar panel, 2 – condenser, 3 – tank,
4 – compressor, 5 – thermostatic valve

Автоматика стенда размещена в щитке размером $500 \times 400 \times 200$ мм. Каркас стенда размером 40×40 мм, толщиной 2 мм, выполненный из алюминиевого профиля квадратного сечения, имеет два поворотных и два неповоротных колеса. Одна из стенок стенда изготовлена из оргстекла.

К экспериментальному стенду теплового насоса были применены метод подбора рабочей жидкости и анализ внешней среды. Эффективность методов была оценена на основе эксергетического анализа. В процессе анализа результатов методики были определены расположение, размеры и источники термодинамической неэффективности в системе преобразования энергии.

Для оценки эффективности двух методов используется сравнение их эксергетических КПД. В качестве примера в расчете была взята лабораторная установка до модернизации. Схема и расчетный цикл в $\lg(p)$ - h диаграмме пароконденсационного теплового насоса установки представлены на рисунке 2.

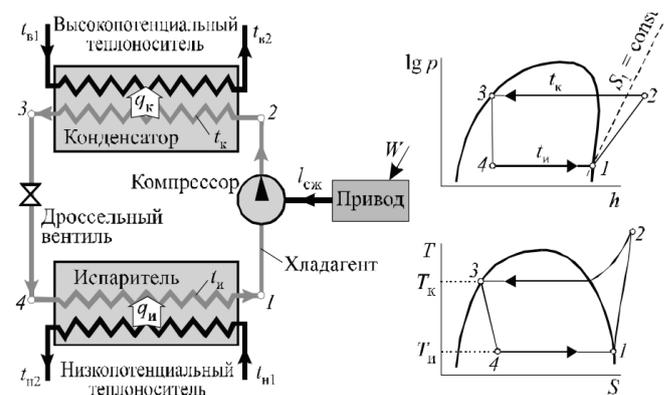


Рис. 2. Схема и цикл пароконденсационного теплового насоса:

$t_{в1}$, $t_{в2}$, $t_{н}$, $t_{н2}$ – температуры высокопотенциального и низкопотенциального теплоносителя на входе и выходе;

1-2 – обратимый процесс сжатия хладагента

в компрессоре при постоянной энтропии;

2-3 – процесс изотермической конденсации

хладагента в конденсаторе и отдачи теплоты

высокопотенциальному теплоносителю;

3-4 – обратимый процесс расширения хладагента

в детандере при постоянной энтропии;

4-1 – процесс изотермического испарения хладагента

в испарителе за счет теплоты, отобранной

у низкопотенциального теплоносителя

Fig. 2. Scheme and cycle of a steam compression heat pump:

$t_{в1}$, $t_{в2}$, $t_{н}$, $t_{н2}$ – temperatures of high-potential and low-potential coolant at the inlet and outlet;

process 1-2 – reversible process of refrigerant

compression in the compressor at constant entropy;

process 2-3 – isothermal condensation of the refrigerant

in the condenser and heat transfer to a high-potential coolant;

process 3-4 – reversible expansion

of the refrigerant in the expander at constant entropy;

process 4-1 – isothermal evaporation of the refrigerant

in the evaporator due to heat taken from a low-potential coolant

Теплота отбирается от солнечной панели и направляется к тепловому аккумулятору, заправляемому теплоносителем с высокой удельной теплоемкостью, в качестве которого выбрана соленая вода с целью последующего применения солнечных панелей в опреснительных установках [4, 5].

Результаты и их обсуждение

Оптимизация технологического процесса экспериментального стенда производилась за счет применения двух аналитических методов.

Метод подбора рабочей жидкости. Расчет эксергетического КПД выполнялся в последовательности [6], изложенной ниже.

В испарителе теплота от низкопотенциального теплоносителя передается фреону, температура которого должна быть выше температуры его испарения. По температуре поверхности панели $t_{н2} = 30^\circ\text{C}$ и температурному перепаду $\Delta t_{н} = 3 \dots 5^\circ\text{C}$ определяется температура испарения фреона:

$$t_{н} = t_{н2} - \Delta t_{н} = 25^\circ\text{C}. \quad (1)$$

По температуре испарения $t_{н}$ на правой пограничной кривой p-h диаграммы фреона определяется точка 1, которой соответствует энтальпия $h_1 = 460$ кДж/кг, давление испарения $p_u = 0,2$ МПа. Выбран фреон R21.

В конденсаторе теплота передается от более горячего фреона к воде. По температуре воды на выходе $\Delta t_{в2} = 50^\circ\text{C}$ и температурному перепаду $\Delta t_{к} = 5 \dots 10^\circ\text{C}$ определяется температура конденсации фреона:

$$t_{к} = t_{в2} + \Delta t_{к} = 60^\circ\text{C}. \quad (2)$$

По температуре конденсации $t_{к}$ на правой пограничной кривой находится точка 3, для которой определяются энтальпия $h_3 = 260$ кДж/кг и давление конденсации $p_{к} = 0,52$ МПа.

На пересечении линии постоянной энтропии S_1 , проходящей через точку 1, и линии изобары $p_{к}$, проходящей через точку 3, определяются точка 2a, которая соответствует концу адиабатного сжатия. По диаграмме в точке 2a определяется энтальпия $h_{2a} = 490$ кДж/кг.

Адиабатный КПД компрессора η_a :

$$\eta_a = \frac{h_{2a} - h_1}{h_2 - h_1}, \quad (3)$$

$$h_2 = \frac{h_1 + h_{2a} - h_1}{\eta_a}. \quad (4)$$

Адиабатный КПД компрессора может быть рассчитан по выражению:

$$\eta_a = \frac{0,98 \cdot (273 + t_0)}{273 + t_{к}}, \quad (5)$$

где t_0 – температура наружного воздуха $t_0 = 20^\circ\text{C}$.

$$\eta_a = \frac{0,98 \cdot (273 + t_0)}{273 + t_{к}} = 0,86;$$

$$h_2 = \frac{h_1 + (h_{2a} - h_1)}{\eta_a} = 495 \text{ кДж/кг}.$$

По значению энтальпии h_2 и давлению $p_{к}$ определяется точка 2. По значению энтальпии h_3 , h_4 и давлению p_u определяется точка 4. Рассчитываются удельные тепловые нагрузки в узлах теплового насоса:

$$q_{и} = h_1 - h_4 = 200 \text{ кДж/кг}; \quad (6)$$

$$q_{к} = h_2 - h_3 = 235 \text{ кДж/кг}; \quad (7)$$

$$l_{сж} = h_2 - h_1 = 35 \text{ кДж/кг}. \quad (8)$$

Правильность расчета определяется проверкой теплового баланса:

$$q_{и} + l_{сж} = q_{к} = 235 \text{ кДж/кг}. \quad (9)$$

Дополнительно определяются тепловая нагрузка теплового насоса

$$q_{тн} = q_{к} \quad (10)$$

и удельная энергия, потребляемая электродвигателем W :

$$W = \frac{l_{сж}}{\eta_{э,м} \cdot \eta_э} = 36 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \quad (11)$$

Определяются показатели энергетической эффективности теплового насоса:

– коэффициент преобразования теплоты $\mu = \frac{q_{к}}{l_{сж}} = 6,7$;

– коэффициент преобразования электроэнергии $\mu_э = \eta_{э,м} \cdot \eta_э \cdot \mu = 5,75$.

Степень повышения давления в компрессоре:

$$\varepsilon = \frac{p_{к}}{p_u} = 2,6. \quad (12)$$

Производится эксергетический расчет схемы:

– эксергия $e_{н}$, отданная низкопотенциальным теплоносителем в испарителе:

$$e_{н} = \tau_{н} \cdot q_{и}, \quad (13)$$

где $\tau_{н}$ – эксергетическая температура низкопотенциального теплоносителя (значение эксергетической температуры должно составлять от 0 до 1):

$$\tau_{н} = \frac{T_{ср,н} - (t_0 + 273)}{T_{ср,н}};$$

– средняя логарифмическая температура холодного теплоносителя:

$$T_{ср,н} = \frac{\tau_{н1} - \tau_{н2}}{\ln \frac{\tau_{н1} + 273}{\tau_{н2} + 273}} = 322,58 \text{ К}; \quad (14)$$

$$\tau_{н} = \frac{322,58 - (t_0 + 273)}{322,58} = 0,091; \quad (15)$$

$$e_{н} = 0,091 \cdot 200 = 18,2.$$

Эксергия e_b , полученная высокопотенциальным теплоносителем в конденсаторе:

$$e_b = \tau_b \cdot q_k; \quad (16)$$

$$\tau_b = \frac{T_{\text{ср.в}} - (t_0 + 273)}{T_{\text{ср.в}}}.$$

Средняя логарифмическая температура горячего теплоносителя:

$$T_{\text{ср.в}} = \frac{\tau_{b2} - \tau_{b1}}{\ln \frac{\tau_{b2} + 273}{\tau_{b1} + 273}} = 307,75 \text{ К}; \quad (17)$$

$$\tau_b = \frac{307,75 - (25 + 273)}{307,75} = 0,048;$$

$$e_b = 0,048 \cdot 235 = 11,28. \quad (18)$$

Эксергия электроэнергии, потребляемой электродвигателем:

$$e_s = W = 27. \quad (19)$$

Эксергетический КПД η_s теплового насоса определяется по суммарной эксергии входных $e_{\text{вх}}$ и выходных $e_{\text{вых}}$ потоков:

$$\eta_s \frac{e_{\text{вых}}}{e_{\text{вх}}} = \frac{e_b}{e_h + e_s} = 0,181; \quad (20)$$

$$\eta = \eta_s \cdot 100\% = 18,1\%. \quad (21)$$

Метод анализа внешних источников. Метод анализа внешней среды позволяет определить количество теплоты, вырабатываемой солнечной панелью, и количество полезно использованной энергии, отпущенной для работы компрессора. Модернизация стенда при выборе этого метода заключается в повышении энергоэффективности солнечной панели за счет перевода электрической энергии с аккумуляции на собственные нужды установки. После усовершенствования солнечной панели снижаются затраты на электроэнергию, отпущенную на работу компрессоров. Коэффициент полезного действия экспериментального стенда увеличивается на 4...5%.

Расчет эксергетического КПД с помощью метода анализа внешних источников выполнялся в изложенной ниже последовательности.

Внешним источником энергии в данном случае является солнечная энергия. Солнечная панель использовалась для разделения солнечной энергии на тепловую и электрическую с последующим накоплением обеих типов энергии в аккумуляторах.

Если рассматривать систему как замкнутую, то эксергетический КПД системы значительно вырастет после перенаправления электрической энергии на питание компрессора.

При площади солнечной панели $S = 0,3618 \text{ м}^2$, средней энергетической плотности потока $W = 170,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ и КПД $\eta = 14,6\%$ генерируемая мощность имеет значение $N = 8,96 \text{ кВт}$. Стоит отметить, что мощность такой величины может вырабатываться в течение двух месяцев только при идеальных условиях: большое количество солнечного света, температура воздуха порядка $25 \text{ }^\circ\text{C}$, перпендикулярное падение солнечных лучей на панель.

Количество электроэнергии из внешних источников может быть определено по формуле:

$$W = \frac{l_{\text{сж}}}{\eta_{\text{э.м}} \cdot \eta_s} - N = 18,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2.$$

Эксергетический КПД η_s теплового насоса определяется по суммарной эксергии входных $e_{\text{вх}}$ и выходных $e_{\text{вых}}$ потоков:

$$\eta_s \frac{e_{\text{вых}}}{e_{\text{вх}}} = \frac{e_b}{e_h + e_s} = 0,234;$$

$$\eta = \eta_s \cdot 100\% = 23,4\%.$$

Технически грамотным и наиболее эффективным является метод анализа источников внешней среды (табл.).

Эксергия электроэнергии, потребляемой электродвигателем, по сравнению с тепловым насосом до модернизации снижена на $8,92 \text{ кДж}/\text{кг}$, а эксергетический КПД модернизированной установки составил $23,4\%$ (возрос на $7,5\%$), что доказывает эффективность перенаправления электрической энергии на питание компрессора.

Эксергетический анализ помог определить количество полезной работы, выработанной тепловым насосом, и выявить причину энергетических потерь в экспериментальной установке теплового насоса: нерациональное использование теплоты конденсатора [7, 8].

Отметим, что применять солнечную панель в качестве низкопотенциального источника целесообразно в местностях, где количество солнечных дней существенно превышает количество пасмурных дней. В противном случае использование солнечной панели в качестве источника энергии является нецелесообразным [9].

Аккумуляция солнечной энергии являлась иррациональным с точки зрения замкнутой системы в связи с тем, что электрическая энергия не была направлена на энергетические нужды системы. Расчетным путем определено, что на компрессор необходимо направить электрическую энергию, выработанную посредством солнечной панели [10].

Рассмотренные методы оптимизации технического процесса выработки энергии могут использоваться в холодильных установках и тепловых насосах [11].

Таблица

Результаты расчета теплового насоса

Table

Calculation results of a heat pump

Показатель <i>Indicator</i>	Тепловой насос до модернизации <i>Heat pump before modernization</i>	Тепловой насос + солнечная панель <i>Heat pump + solar panel</i>	
		метод подбора хладагента <i>refrigerant selection method</i>	метод анализа внешних источников <i>external source analysis</i>
Хладагент / <i>Refrigerant</i>	R134a	R21	R134a
Температурный перепад между средами в испарителе, $\Delta t_{\text{и}}$, °C <i>Temperature difference between the media in the evaporator, $\Delta t_{\text{и}}$, °C</i>	5	5	5
Температура испарения хладагента, $t_{\text{и}}$, °C / <i>Refrigerant vaporization temperature, $t_{\text{и}}$, °C</i>	25	25	25
Температура теплового аккумулятора, $t_{\text{а2}}$, °C / <i>Temperature of heat accumulator, $t_{\text{а2}}$, °C</i>	50	50	50
Температурный перепад между средами в конденсаторе, $\Delta t_{\text{к}}$, °C <i>Temperature difference between media in the condenser, $\Delta t_{\text{к}}$, °C</i>	10	10	10
Температура конденсации фреона, $t_{\text{к}}$, °C / <i>Freon condensation temperature, $t_{\text{к}}$, °C</i>	60	60	60
Адиабатный КПД компрессора, $\eta_{\text{а}}$ / <i>Adiabatic efficiency of compressor, $\eta_{\text{а}}$</i>	0,86	0,86	0,86
Удельная тепловая нагрузка в испарителе $q_{\text{и}}$, кДж/кг <i>Specific heat load in the evaporator, $q_{\text{и}}$, kJ/kg</i>	120	200	110
Удельная тепловая нагрузка в конденсаторе $q_{\text{к}}$, кДж/кг <i>Specific heat load in the condenser $q_{\text{к}}$, kJ/kg</i>	149	235	151
Удельная работа сжатия, $l_{\text{сж}}$, кДж/кг / <i>Specific work of compression, $l_{\text{сж}}$, kJ/kg</i>	29	35	29
Удельная энергия, потребляемая электродвигателем, W , кДж/кг <i>Specific energy consumed by the electric motor, W, kJ/kg</i>	33,9	36,0	18,4
Коэффициент преобразования теплоты, μ / <i>Heat conversion coefficient, μ</i>	5,13	6,70	5,20
Коэффициент преобразования электроэнергии, $\mu_{\text{э}}$ / <i>Electricity conversion coefficient, $\mu_{\text{э}}$</i>	4,39	5,77	4,46
Степень повышения давления в компрессоре, ϵ <i>Pressure ratio in the compressor, ϵ</i>	3,0	2,6	3,0
Средняя логарифмическая температура холодного теплоносителя $\tau_{\text{н}}$, °C <i>Average logarithmic temperature of cold coolant $\tau_{\text{н}}$, °C</i>	0,091	0,091	0,091
Средняя логарифмическая температура горячего теплоносителя $\tau_{\text{в}}$, °C <i>Average logarithmic temperature of hot coolant $\tau_{\text{в}}$, °C</i>	0,048	0,048	0,048
Эксергия, отданная низкопотенциальным теплоносителем в испарителе $e_{\text{н}}$, кДж/кг <i>Exergy given off by low-potential coolant in the evaporator $e_{\text{н}}$, kJ/kg</i>	11,00	18,20	9,15
Эксергия, полученная высокопотенциальным теплоносителем в конденсаторе $e_{\text{в}}$, кДж/кг <i>Exergy received by high potential heat carrier in condenser $e_{\text{в}}$, kJ/kg</i>	7,14	11,28	7,99
Эксергия электроэнергии, потребляемой электродвигателем $e_{\text{э}}$, кДж/кг <i>Exergy of electricity consumed by electric motor $e_{\text{э}}$, kJ/kg</i>	33,90	27,00	24,98
Эксергетический КПД, $\eta_{\text{э}}$, % / <i>Exergy efficiency, $\eta_{\text{э}}$, %</i>	15,9	18,1	23,4

Выводы

1. Наиболее эффективным методом оценки эксергетического КПД новых технических решений является метод анализа источников внешних источников.
2. Наивысший КПД (23,4%) модернизированной установки, состоящей из солнечной панели и теплового насоса, обеспечивается при большом количестве солнечного света, температуре воздуха порядка 25°C и перпендикулярном падении солнечных лучей на панель.

3. Увеличение эксергетического КПД модернизированной установки до 23,4% (на 7,5%) доказывает эффективность перенаправления электрической энергии на питание компрессора.
4. Установка солнечной панели и теплового насоса приведет к улучшению экологической ситуации и экономии денежных средств в связи с отсутствием затрат на топливо.

Список источников / References

1. Шоронов Д.В. Модернизация индивидуальных тепловых пунктов // Международный студенческий научный вестник. 2020. № 3. С. 15. EDN: YFDJVA
Shoronov D.V. Modernization of individual heat stations. *International Student Scientific Bulletin*. 2020;3:15. (In Russ.)
2. Solomin E., Salah Z., Osintsev K., Aliukov S., Kuskarbekova S., Konchakov V., Olinichenko A., Karelin A., Tarasova T. Ecological hydrogen production and water sterilization: an innovative approach to the trigeneration of renewable energy sources for water desalination: A Review. *Energies*. 2023;16(17):6118. <https://doi.org/10.3390/en16176118>
3. Osintsev K., Aliukov S., Kovalev A., Bolkov Ya., Kuskarbekova S.I., Olinichenko A. Scientific approaches to solving the problem of joint processes of bubble boiling of refrigerant and its movement in a heat pump heat exchanger. *Energies*. 2023;16(11):4405. <https://doi.org/10.3390/en16114405>
4. Möller S., Kaucic D., Sattler C. Hydrogen production by solar reforming of natural gas: A comparison study of two possible process configurations. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2006;128(1):16-23. <https://doi.org/10.1115/1.2164447>
5. Spath P.L., Amos W.A. Using a concentrating solar reactor to produce hydrogen and carbon black via thermal decomposition of natural gas: Feasibility and economics. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2003;125(2):159-164. <https://doi.org/10.1115/1.1565083>
6. Ильина Т.Н., Саввин Н.Ю., Орлов П.А., Уваров В.А. Тепловые насосы с испарителями различных конструкций // Вестник Евразийской науки. 2023. Т. 15, № 5. EDN: SRCVAS
Irina T.N., Savvin N.Yu., Orlov P.A., Uvarov V.A. Heat pumps with evaporators of various designs. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023;15(5):06SAVN523. (In Russ.) <https://esj.today/PDF/06SAVN523.pdf>
7. Лунева С.К., Чистович А.С., Эмиров И.Х. К вопросу применения тепловых насосов // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2013. № 4 (26). С. 45-52. EDN: RNIWSL
Luneva S.K., Chistovich A.S., Emirov I.H. To the question about the use of heat pumps. *Tekhniko-Tekhnologicheskie Problemy Servisa*. 2013;4:45-52. (In Russ.)
8. Полякова В.Ю., Калинина Т.О., Кичин К.В. Анализ энергоэффективности тепловых насосов в системах теплоснабжения по территориально-климатическому признаку // Молодой ученый. 2016. № 27 (131). С. 142-146. EDN: XEODXH
Polyakova V.Yu., Kalinina T.O., Kichin K.V. Analysis of energy efficiency of heat pumps in heat supply systems on a territorial and climatic basis. *Molodoy Ucheniy = Young Scientist*. 2016;27:142-146. (In Russ.)
9. Graf D., Monnerie N., Roeb M., Schmitz M., Sattler C. Economic comparison of solar hydrogen generation by means of thermochemical cycles and electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2008;33(17):4511-4519. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.05.086>
10. Обьедкова О.И., Кондратов И.С., Семенов А.С. Эффективность применения тепловых насосов // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 8-1. С. 43-44. EDN: QYYP
Obyedkova O.I., Kondratov I.S., Seminenko A.S. Efficiency of heat pump application. *Sovremennye Naukoemkie Tekhnologii = Modern High Technologies*. 2013;8-1:43-44. (In Russ.)
11. Osintsev K., Aliukov S., Kuskarbekova S., Tarasova T., Karelin A., Konchakov V., Kornyakova O. Increasing thermal efficiency: Methods, case studies, and integration of heat exchangers with renewable energy sources and heat pumps for desalination. *Energies*. 2023;16(13):4930. <https://doi.org/10.3390/en16134930>

Информация об авторах

Сулпан Ириквна Кускарбекова¹, kuskarbekovasi@susu.ru, SPIN-код: 9997-2865, <https://orcid.org/0000-0001-7171-6661>, scopus ID: 57212311063

Александр Александрович Ершов², sanyayershov2000@yandex.ru, SPIN-код: 2728-3196, <https://orcid.org/0009-0001-3626-3799>

Корнякова Ольга Юрьевна³, korniakovaoi@susu.ru, SPIN-код: 9431-7831, AuthorID: 1214227

Константин Владимирович Осинцев⁴, osintcevk@susu.ru, SPIN-код: 7497-3608, <https://orcid.org/0000-0002-0791-2980>, scopus ID: 8838619800

^{1,2,3,4} Южно-Уральский государственный университет, кафедра промышленной теплоэнергетики; 454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр-кт Ленина, 76

Вклад авторов

К.В. Осинцев – концептуализация, руководство исследования, ресурсы

А.А. Ершов – концептуализация, создание черновика рукописи
С.И. Кускарбекова – концептуализация, проведение исследования, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование

О.Ю. Корнякова – концептуализация, проведение исследования, визуализация

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 14.11.2023, после рецензирования и доработки 03.04.2024; принята к публикации 15.04.2024

Author Information

Sulpan I. Kuskarbekova¹, kuskarbekovasi@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7171-6661>, Scopus ID: 57212311063

Aleksandr A. Ershov², sanyayershov2000@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3626-3799>

Olga Yu. Kornyakova³, kuskarbekovasi@susu.ru, AuthorID: 1214227

Konstantin V. Osintsev⁴, osintcevk@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0791-2980>, Scopus ID: 8838619800

^{1,2,3,4} South Ural State University, Department of Industrial Thermal Power Engineering; 454080, Russian Federation, Chelyabinsk, Lenina Ave, 76

Author Contribution

K.V. Osintsev – conceptualization, research supervision, resources

A.A. Ershov – conceptualization, writing – original draft preparation

S.I. Kuskarbekova – conceptualization, investigation, finalizing (reviewing and editing) of the manuscript

O.Yu. Kornyakova – conceptualization, investigation, visualization

Conflict of interests

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

Received 14.11.2023, Revised 03.04.2024, Accepted 15.04.2024

ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СТАТЬЯ

УДК 62-13:62-111.2:62-83

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-80-88>

Защита электрогенераторов объектов распределенной генерации от аварийных режимов

В.Е. Большев¹, А.В. Виноградов², С.В. Крамской³, С.И. Белов⁴^{1,2} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия^{2,3} Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина; г. Орёл, Россия^{2,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ vadimbolshev@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5787-8581>² winaleksandr@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8845-9718>³ kramskois@gmail.com⁴ sbelov_@mail.ru

Аннотация. Распределенная генерация повышает надежность работы потребителя на отдаленных от источников централизованного электроснабжения территориях. Система электроснабжения с распределенной генерацией использует возобновляемые источники электроэнергии, дизель-генераторы и бензогенераторы, в том числе передвижные электростанции, оснащенные в большинстве случаев современными средствами защиты. В процессе исследований проведен анализ существующих способов и средств защиты электрогенераторов от ненормальных и аварийных режимов работы, в том числе от несимметрии напряжений, которая является одной из причин сокращения срока службы генераторов и характерна для сельских электрических сетей. В ходе анализа определены основные типы защиты генераторов от аварийных режимов работы: защита обмоток статора, защита от пониженной и повышенной частоты, защита от пониженного и повышенного напряжения, защита от несимметрии напряжений (токов). Отмечено, что основной причиной несимметрии напряжений, приводящей к механической вибрации и быстрому перегреву ротора, являются однофазные нагрузки в системе, которые неравномерно распределены по трем фазам. Проблема несимметрии напряжений решается в основном за счет перераспределения нагрузок в линиях электропередачи и/или установки компенсирующих устройств. Однако в сельских системах электроснабжения несбалансированное распределение нагрузки корректируется крайне редко. Компенсация несимметрии напряжений возможна посредством применения гибридных фильтров активной мощности последовательной компенсации и совершенствования методов управления этими фильтрами. Преобразователи напряжения, эффективные при выравнивании несимметрии напряжений в фотоэлектрических системах, могут эффективно защищать дизельные электрогенераторы малой мощности при условии достижения экономической рентабельности оснащения дополнительным оборудованием.

Ключевые слова: распределенная генерация, защита электрогенераторов, несимметрия напряжений, защита от несимметрии напряжений, методы устранения несимметрии, компенсация несимметрии, дизельные электрогенераторы, электрогенераторы малой мощности

Для цитирования: Большев В.Е., Виноградов А.В., Крамской С.В., Белов С.И. Защита электрогенераторов объектов распределенной генерации от аварийных режимов // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 3. С. 80-88. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-80-88>

REVIEW ARTICLE

Protection of electric generators of distributed generation objects against emergency modes

V.E. Bolshev¹, A.V. Vinogradov², S.V. Kramskoy³, S.I. Belov⁴^{1,2} Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia^{2,3} Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin; Orel, Russia^{2,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ vadimbolshev@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5787-8581>² winaleksandr@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8845-9718>³ kramskois@gmail.com⁴ sbelov_@mail.ru

Abstract. Distributed generation is a good solution for areas remote from centralized power supply sources as it helps increase the reliability of consumer operation. Distributed generation power supply systems use renewable

sources of electricity, diesel generators and gasoline generators in the form of mobile power stations, which in most cases are not equipped with modern means of protection. This study presents an analysis of existing means of protecting electric generators from abnormal and emergency operating conditions, including voltage asymmetry, which is one of the factors reducing the service life of generators and is typical for rural electrical networks. During the analysis, the authors determined the main types of generator protection against emergency operation modes: protection of stator windings, protection against underfrequency and overfrequency, protection against undervoltage and overvoltage, protection against voltage (current) asymmetry. It is noted that the main cause of voltage asymmetry leading to mechanical vibration and rapid overheating of the rotor is single-phase loads in the system, which are unevenly distributed over three phases. The problem of voltage asymmetry is mainly solved by redistributing loads in transmission lines and/or installing compensating devices. However, in rural power supply systems, unbalanced load distribution is rarely corrected. The voltage asymmetry can be compensated through the use of hybrid active power filters of series compensation and improved control methods of these filters. Voltage converters that are effective in equalizing voltage asymmetry in PV systems can effectively protect small capacity diesel power generators provided that the use of additional equipment is economically viable.

Keywords: distributed generation, protection of electric generators, voltage asymmetry, voltage asymmetry protection, methods of asymmetry elimination, asymmetry compensation, diesel electric generators, low-power electric generators

For citation: Bolshev V.E., Vinogradov A.V., Kramskoy S.V., Belov S.I. Protection of electric generators of distributed generation objects against emergency modes. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2024;26(3):80-88. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-80-88>

Введение

Распределенная генерация в системах электропитания низкого и среднего напряжения повышает эффективность электроснабжения потребителей за счет минимизации потерь электроэнергии, обусловленных сокращением расстояния при передаче энергии от источника к потребителю. Наиболее перспективными районами для развертывания распределенной генерации являются сельские территории, отдаленные от источников централизованного снабжения, вследствие чего их электроснабжение осуществляется по очень протяженным линиям электропередачи. Использование в таких случаях только источников электроэнергии на основе возобновляемой энергии (ВИЭ), например, ветровых и солнечных установок, не позволяет достичь эффективного электроснабжения ввиду непрогнозируемых природных условий, влияющих на выработку электроэнергии. Поэтому сети с распределенной генерацией на основе ВИЭ оснащаются средствами резервирования – такими, как аккумуляторные батареи и/или дизель-генераторы, способные покрывать возникающие дефициты мощности.

В последние годы значительно чаще стало использование потребителями генераторов малой мощности, например, генераторов с дизельными установками [1, 2]. Система дизель-генераторной установки состоит из таких компонентов, как дизельный двигатель, генератор переменного тока, система управления [2-4]. Конструкция генератора переменного тока в свою очередь состоит из двух основных частей:

ротора и статора. При этом генераторы могут быть синхронными и асинхронными, явнополусными и неявнополусными [4, 5]. Кроме дизельных установок, генераторы малой мощности используются также в системах преобразования энергии ветра. При этом асинхронные генераторы считаются наиболее перспективными в составе ветряных установок ввиду их низкой стоимости, надежности и необходимости минимального обслуживания или вообще его отсутствия [6, 7]. При постоянной частоте асинхронный генератор работает в небольшом диапазоне скоростей и, следовательно, функционирует с небольшим диапазоном скольжений относительно синхронной скорости. По сравнению с синхронным генератором у асинхронного генератора механическое напряжение меньше [8-10]. Особо стоит отметить асинхронный генератор на базе машины двойного питания, позволяющей добиться высокого качества напряжения при переменной скорости вращения вала [11, 12]. Интерфейс силовой электроники такого генератора чаще всего состоит из инверторов с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ) на роторе и статоре, которые рассчитаны на работу в ограниченном диапазоне скоростей [12, 13], что требует надежной защиты от аварийных режимов работы.

В отличие от мощных генераторов, работающих на больших электростанциях, генераторы малой мощности, в том числе с дизельными установками, не оснащаются передовыми средствами защиты по причине высокой стоимости их использования. Особую проблему представляет отсутствие защиты

от несимметрии напряжений. Считается, что данный аварийный режим является проблемой сетевого уровня, которая должна решаться через правильное распределение нагрузок по фазам, хотя, как показывает практика, это не всегда так. Особенно часто это наблюдается в сельских электрических сетях, имеющих большое количество линий электропередачи с завышенной протяженностью.

Цель исследований: анализ способов и средств защиты электрогенераторов объектов распределенной генерации от несимметрии токов и напряжений, а также от других аварийных режимов.

Материалы и методы

Методология, используемая в исследованиях, представляет собой информационный поиск, включающий в себя обзор интернет-источников и источников научной литературы, посвященных способам защиты электрогенераторов объектов распределенной генерации от аварийных режимов, в том числе от несимметрии напряжений. В качестве источников информации были использованы поисковые системы Yandex и Google, научные базы данных Scopus, Web of Science и Google Scholar, научные электронные библиотеки КиберЛенинка, eLIBRARY.ru, Elsevier, Springer, IEEE Xplore.

Результаты и их обсуждение

Защита электрогенераторов от аварийных режимов работы. Рассматривая основные типы защиты генераторов от аварийных режимов работы, перспективных к использованию на объектах распределенной генерации, следует рассмотреть основные виды защиты синхронных генераторов, применяемых в энергосистеме: защиту обмоток статора; защиту от пониженной и повышенной частоты; защиту от пониженного и повышенного напряжения; защиту от несимметрии напряжений (токов)¹ [14].

Защита обмоток статора необходима от неисправностей, возникающих по причине пробоя изоляции катушек статора. Среди неисправностей обмоток статора различают однофазное замыкание на землю, междуфазное замыкание и межвитковое замыкание². В качестве основной защиты используются дифференциальная защита и различные ее модификации^{3,4}, а также защита от перегрева. В качестве защиты об-

моток статора также применяется защита от замыканий на землю, реагирующая на напряжения третьей гармоники нулевой последовательности [15, 16], предлагаются способы на основе индукционного датчика магнитного поля рассеяния [17].

Превышение частоты, возникающее в результате избыточной генерации, устраняется путем снижения выходной мощности за счет применения быстродействующих регуляторов скорости. В то же время снижение частоты происходит из-за подключения нагрузки, превышающей выдаваемую мощность генератора. В качестве защиты используется автоматическое устройство сброса нагрузки [18].

Перенапряжение, возникающее ввиду увеличения скорости первичного двигателя при внезапной потере нагрузки генератора, устраняется за счет реле повышенного напряжения (одного мгновенного действия и одного с выдержкой времени, применяемых в зависимости от величины перенапряжения) [14]. Пониженное напряжение, наоборот, возникает при внезапном отключении параллельно работающего генератора, что приводит к увеличению нагрузки, тока и, соответственно, к снижению напряжения на клеммах генератора. В качестве защиты используются реле пониженного напряжения.

Существует ряд аварийных режимов, которые могут вызвать отсутствие симметрии трехфазного тока в генераторе. Наиболее распространенными причинами являются асимметрия системы, несбалансированные нагрузки, несбалансированные неисправности системы и обрыв фаз [19]. В результате несимметрии напряжений в фазах образуются компоненты тока обратной последовательности, создающие магнитное поле обратной последовательности, которое вращается по отношению к статору с синхронной скоростью в обратном направлении, а по отношению к ротору, вращающемуся с синхронной скоростью в прямом направлении, – с удвоенной синхронной скоростью⁵. Поэтому в обмотках возбуждения и на поверхности ротора индуцируются токи с частотой, вдвое превышающей частоту питания [20]. Эти токи подвержены нелинейному скин-эффекту ввиду магнитного насыщения [21] и протекают в твердом железе, а также в стопорных кольцах, пазовых клиньях, и в меньшей степени – в обмотке возбуждения. Влияние несимметрии токов сильно зависит от конструкции генераторов, и, как показано в работе [22], анализирующей распространение токов обратной последовательности в турбогенераторе, незначительные индуцируемые токи в роторе могут вызвать недопу-

¹ Никифорова Д.Р., Писарь А.С. Защита синхронных генераторов // В сб.: Актуальные проблемы энергетики. СНТК-76. Электроснабжение. Минск: РБ, 2020. С. 83-85

² Там же.

³ Там же.

⁴ Новожилов А.Н., Акаев А.М., Новожилов Т.А., Волгина Е.М. Обзор защит от витковых замыканий в синхронных машинах // Вестник ПГУ. 2014. Т. 3. С. 262-268.

⁵ Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. СПб.: Питер, 2007. 350 с.

стимый перегрев по краям зубцов ротора. Это может привести к повреждению генератора. В качестве защиты от несимметрии токов используется фильтр обратной последовательности на основе реле максимального тока.

В случае мощных генераторов, работающих на больших электростанциях, требуется применение большого количества систем защиты, предназначенных для быстрого устранения аварийных режимов на основе измерения различных параметров [23]. Появление в системах электроснабжения генераторов малой и средней мощности затрудняет правильный выбор защитной аппаратуры. Особенно остро этот вопрос возникает в гибридных системах электроснабжения, то есть в системах с распределенной генерацией, где потребители могут питаться от энергосистемы или генераторной установки, работающей на уровнях низкого и/или среднего напряжения [24, 25]. Защитой, используемой в этих сетях, являются преимущественно аппараты в виде автоматических выключателей и плавких предохранителей [26-28], используемых для защиты обмоток статора. Для защиты генераторов напряжением 0,4 кВ и мощностью до 1 МВА созданы современные и дорогие устройства – например, расцепитель Ekip G компании ABB⁶. Такие генераторы обычно используются на микроГЭС, когенерационных установках средней мощности, установках по переработке биомассы, дизельных и газовых генераторных установках.

Использование защиты генератора от несимметрии напряжений часто считается экономически неоправданным, так как основным виновником дисбаланса токов и напряжения является несимметричная нагрузка, проблема которой должна решаться на сетевом уровне за счет перераспределения нагрузок в линиях электропередачи и/или установки компенсирующих устройств (емкостной или индуктивной составляющей переменного тока) – например, синхронных компенсаторов [29, 30]. Однако несмотря на внедрение источников распределенной генерации в отдаленных сельских районах со слабыми сетями с несбалансированными нагрузками, при установке генераторов [31, 32] не используются компенсирующие устройства [33]. Поэтому разработка новых, экономически эффективных решений проблемы несимметрии напряжений является актуальной задачей.

Защита от несимметрии напряжений в распределительных энергосистемах. Основной причиной несимметрии напряжений обычно являются

однофазные нагрузки в системе, которые неравномерно распределены по трем фазам [34]. Это особенно характерно для сельских систем электроснабжения потребителей [35]. Многие генераторные установки подключаются к таким сетям, где несбалансированное распределение нагрузки не корректируется в течение многих месяцев. Проблемы с несбалансированным напряжением также возникают и в городских энергосистемах, где на крупных промышленных объектах используются мощные однофазные нагрузки, в том числе осветительные. При этом крупное производственное предприятие может иметь хорошо сбалансированное входное напряжение, но несбалансированные токи все равно могут возникать по причине неравномерного распределения нагрузок по фазам [36].

Даже при небольшой несимметрии фазных напряжений, ввиду низкого полного сопротивления обратной последовательности асинхронного генератора, могут возникнуть большие токи обратной последовательности, способные вызвать несбалансированный нагрев (горячие точки) в обмотках машины, что потенциально может привести к выходу из строя генератора. Кроме нагрева, работа при несбалансированном напряжении создает пульсирующий крутящий момент, который вызывает пульсацию скорости, механическую вибрацию, акустический шум, тем самым сокращая срок службы редуктора и других механических устройств генераторной установки [36]. Поэтому в системах преобразования энергии ветра рекомендуется отключать асинхронные генераторы от сети, когда несимметрия междуфазного напряжения превышает 6% [10]. Международная электротехническая комиссия (МЭК) рекомендует производить отключение асинхронных генераторов при несимметрии напряжений в электрических системах в 2% [37]. При этом ГОСТ РФ 32144-2013 также устанавливает значения для несимметрии напряжений (коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности и по нулевой последовательности) не более 2% в течение 95% времени интервала в одну неделю и 4% – в течение 100% времени⁷.

Компенсация несимметрии напряжений обычно осуществляется с помощью последовательного фильтра активной мощности (статический компенсатор реактивной мощности) путем подачи напряжения обратной последовательности [38, 39], при этом

⁷ ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Дата введения: 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.

⁶ Ekip G – Emax 2 (Circuit Breakers Low Voltage – ABB). URL: <https://new.abb.com/low-voltage/products/circuit-breakers/emax2/benefits/ekip-g> (дата обращения: 10.02.2024).

компенсация производится по обратной и нулевой составляющих несимметрии напряжений [40]. Фильтры активной мощности также используются для компенсации гармонического тока, регулирования напряжения на клеммах, подавления мерцаний напряжения и улучшения баланса напряжений в трехфазных системах [41].

Для уменьшения несимметрии напряжений используют параллельную компенсацию [42-44]. В этом случае несимметрия напряжений, вызванная несимметричной нагрузкой, компенсируется за счет балансировки линейных токов. Однако в случае превышения допустимых значений коэффициентов, оценивающих несимметрию нагрузки, амплитуда подаваемого активным фильтром тока может быть очень высокой и превышать номинал фильтра [45].

Наиболее распространенными являются фильтры последовательной и параллельной компенсации активной мощности, поскольку они эффективно снижают искажения тока и реактивную мощность, создаваемую нелинейными нагрузками, но, как правило, имеют высокую стоимость и эксплуатационные издержки [46, 47].

Повысить эффективность компенсации мощности при снижении стоимости фильтра можно за счет использования топологии гибридного фильтра активной мощности последовательной компенсации [48]. В данной топологии активный фильтр последовательно подключается с генератором и нелинейной нагрузкой, а пассивный фильтр – в параллель с нагрузкой. Такая топология позволяет выдерживать большие токи нагрузки [49, 50]. Эффективность компенсации мощности обеспечивается также за счет совершенствования методов управления активными и гибридными фильтрами: применения теории мгновенной реактивной мощности [51], теории баланса мощности [52], использования режекторных фильтров [53], регуляторов на основе потока [54], регуляторов скользящего режима [55], двух ПИ-регуляторов с замкнутым контуром [56].

Рассматривая системы преобразования энергии ветра с целью уменьшения влияния несбалансированной нагрузки, можно предложить подавать компенсирующий ток в ротор асинхронного генератора двойного питания, что в итоге позволяет уменьшить или полностью устранить пульсации крутящего момента [9, 10]. Основным недостатком этого метода является сохранение несимметрии токов статора, а следовательно, даже когда пульсации крутящего момента уменьшаются, выходная мощность асинхронной машины снижается, поскольку предел тока машины достигается только на одной из фаз статора. Устранить эту проблему может система управления

для компенсации дисбаланса токов статора ветрогенераторной установки, работающей как в автономном режиме работы, так и при подключении системы к сети [57]. Дополнительно для ветроэнергетических установок предлагается производить компенсацию несимметрии напряжений и токов за счет статического генератора реактивной мощности (СТАТКОМ) [58].

Методы устранения несимметрии напряжений для фотоэлектрических систем. Эффективные методы устранения несимметрии напряжений существуют для источников распределенной генерации в виде фотоэлектрических систем. Такие источники состоят из солнечных фотоэлектрических панелей (плюс система управления, аккумуляторная батарея), подключенных через преобразователи напряжения (например, инвертор в случае преобразования постоянного/переменного тока) к системе распределения электроэнергии переменного тока. Основная роль преобразователей напряжения заключается в регулировании угла фазы и амплитуды выходного напряжения для управления подачей активной и реактивной мощности. Существует несколько способов компенсации несимметрии напряжений за счет эффективных стратегий управления преобразователями напряжения [59-62].

– Методы управления [59, 60], основанные на использовании двухинверторной структуры (один из инверторов включен параллельно, другой – последовательно с сетью наподобие последовательно-параллельного фильтра активной мощности) [63]. Основная роль шунтирующего инвертора заключается в управлении потоками активной и реактивной мощности. Последовательный инвертор балансирует линейные токи и напряжения на чувствительных клеммах нагрузки несмотря на несбалансированное напряжение сети. Это делается путем подачи напряжения обратной последовательности. Таким образом, для подачи мощности и компенсации дисбаланса необходимы два инвертора, что можно рассматривать как экономически необоснованное решение.

– Метод компенсации несимметрии напряжений за счет подачи тока обратной последовательности, позволяющий линейным токам становиться уравновешенными несмотря на несимметричные нагрузки [61]. Однако в условиях серьезной несбалансированности большая часть мощности интерфейсного преобразователя будет использоваться для компенсации, что затруднит выработку активной и реактивной мощности со стороны источника фотоэлектрической системы.

– Способ, основанный на проводимости источника фотоэлектрической системы для компенсации

несимметрии напряжений в микросетях, позволяющий определять проводимость обратной последовательности на основе ее реактивной мощности [62]. После определения компенсационного опорного тока компенсационное задание (команда) отправляется на выход контура регулирования напряжения. Повысить эффективность компенсации несимметрии напряжений в микросети при данном подходе можно за счет прямого изменения опорного напряжения [64]. Однако компенсация, предложенная в данном способе, будет рассматриваться как помеха, которая должна быть устранена контуром управления напряжением. Таким образом, существует проблема выбора между эффективностью компенсации несимметрии и адекватностью регулирования напряжения.

Рассматривая способы защиты фотоэлектрических систем от несимметрии напряжений, можно отметить, что основным методом является использование преобразователей напряжения с различными вариациями стратегий его управления, которые выступают в качестве буфера между источником электроэнергии и распределительной сетью. Использование подобного рода преобразователей напряжения в качестве защиты дизельных электрогенераторов малой мощности также представляется перспективным при достижении экономической рентабельности оснащения электрогенераторов дополнительным оборудованием.

Выводы

1. Одним из опасных аварийных режимов работы генератора является работа при несбалансированной

по фазам нагрузке, приводящая к механической вибрации и быстрому перегреву ротора. Защита от этого режима не применяется ввиду экономической нецелесообразности, а решение проблемы заключается в основном за счет перераспределения нагрузок в линиях электропередачи и/или установки компенсирующих устройств. Однако несбалансированное распределение нагрузки во многих системах электропитания (например, сельских) не корректируется в течение длительного времени.

2. Компенсация несимметрии напряжений с помощью последовательного фильтра активной мощности путем подачи напряжения обратной последовательности и применения параллельной компенсации сопровождается большими издержками, снизить которые можно посредством гибридных фильтров активной мощности последовательной компенсации и совершенствования методов управления этими фильтрами.

3. Преобразователи напряжения, эффективные при выравнивании несимметрии напряжений в фотоэлектрических системах, могут быть эффективными для защиты дизельных электрогенераторов малой мощности при условии достижения экономической рентабельности оснащения дополнительным оборудованием.

4. Необходима разработка новых способов и средств защиты генераторов распределенной генерации от различных ненормальных и аварийных режимов, в том числе связанных с несимметрией токов и напряжений.

Список источников / References

1. Drozdowski P., Warzecha A. Mathematical study and control of diesel rotary uninterruptible power supply. *15th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE)*. IEEE. Zakopane, Poland, 2019. Pp. 469-475. <https://doi.org/10.1109/WZEE48932.2019.8979991>
2. Хватов О.С., Дарьенков А.Б. Электростанция на базе дизель-генератора переменной частоты вращения // *Электротехника*. 2014. № 3. С. 28-32. EDN: RVCDON
3. Khvatov O.S., Daryenkov A.B. Power plant based on a variable speed diesel generator. *Elektrotehnika*. 2014;3:28-32 (In Russ.).
3. Boldea I. Electric generators handbook-two volume set. New York, USA: CRC Press, 2018. 580 p.
4. Yulisetiawan R.D., Koenhardono E.S., Sarwito S. Effect analysis of unbalanced electric load in ship at three phase synchronous generator on laboratory scale. *Jurnal Teknik ITS*. 2016;5(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.19417>
5. Boldea I. Synchronous generators. New York, USA: CRC Press, 2005. 444 p. <https://doi.org/10.1201/9781420037258>
6. Мазалов А.А. Адаптивная ветроустановка переменного тока с асинхронным генератором // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2010. № 3. С. 250-256. EDN: LMCOZP
7. Mazalov A.A. Adaptive wind power plant of alternating current with inductor motor. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2010;3:250-256. (In Russ.).
7. Серебряков Р.А., Доржиев С.С., Базарова Е.Г. Современное состояние, проблемы и перспективы развития ветроэнергетики // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. № 1. С. 89-96. EDN: XPTXPF
8. Serebryakov R.A., Dorzhiev S.S., Bazarova E.G. State of the art, problems and prospects of wind energy development. *Vestnik VIESKH*. 2018;1:89-96. (In Russ.).
8. Muljadi E., Yildirim D., Batan T., Butterfield C.P. Understanding the unbalanced-voltage problem in wind turbine generation. *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat No99CH36370)*. IEEE, 1999. Pp. 1359-1365. <https://doi.org/10.1109/IAS.1999.801678>
9. Brekken T., Mohan N. A novel doubly-fed induction wind generator control scheme for reactive power control and torque pulsation compensation under unbalanced grid voltage conditions. *IEEE34th Annual Conference on Power Electronics Specialist*, 2003. PESC'03, Acapulco, Mexico. 2003;2:760-766. <https://doi.org/10.1109/PESC.2003.1218151>
10. Brekken T.K.A., Mohan N. Control of a doubly fed induction wind generator under unbalanced grid voltage conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2007;22(1):129-35. <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.889550>
11. Мещеряков В.Н., Муравьев А.А. Асинхронный генератор на базе машины двойного питания // *Известия СПбЭТУ (ЛЭТИ)*. 2016. № 4. С. 45-49. EDN: VWGUDH

Meshcheryakov V.N., Muravyev A.A. Asynchronous generator based on a dual power machine. *Izvestiya SPbETU (LETT)*. 2016;4:45-49. (In Russ.)

12. Степанчук Г.В., Моренко К.С. Двухроторные электрические генераторы для ветроустановок // Вестник аграрной науки Дона. 2011. № 2. С. 65-73. EDN: RDTGTF

Stepanchuk G.V., Morenko K.S. Bi-rotor electric generators for the wind sets. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2011;2:65-73. (In Russ.)

13. Амер И.А., Мирошниченко А.А., Соломин Е.В., Гордиевский Е.М., Ковалев А.А. Стратегия управления на основе отслеживания точки максимальной мощности асинхронного генератора двойного питания ветроэнергетической установки // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4. С. 56-62. EDN: YUNEQX

Amer I.A., Miroshnichenko A.A., Solomin E.V., Gordiyevskiy E.M., Kovalev A.A. Control strategy for maximum power point tracking of doubly fed induction motor for a wind turbine. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2018;4:56-62. (In Russ.)

14. Aujla R.K. Generator Stator Protection, under/over voltage, under/over frequency and unbalanced loading: Theory and applications of protective relays. London, Ontario, Canada: University of Western Ontario, 2008. 11 p.

15. Zielichowski M., Fulczyk M. Influence of load on operating conditions of third harmonic ground-fault protection system of unit connected generator. *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*. 1999;146(3):241-248. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19990249>

16. Fulczyk M., Mydlikowski R. Influence of generator load conditions on third-harmonic voltages in generator stator winding. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2005;20(1):158-165. <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.842391>

17. Полищук В.И. Построение защиты от виткового замыкания обмотки ротора синхронного генератора на основе индукционного датчика магнитного поля рассеяния // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2012. Т. 321, № 4. С. 57-61. EDN: PUTXIT

Polishchuk V.I. Designing protection against turn-to-turn short-circuit of the rotor winding of synchronous generator based on the induction sensor of magnetic field dissipation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2012;321(4):57-61. (In Russ.)

18. Anderson P.M., Henville C.F., Rifaat R., Johnson B., Meliopoulos S. Power system protection. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2022. 1424 p. <https://doi.org/10.1002/9781119513100>

19. Perdana I.N. Replacement of several single function generator protection relay at Badak LNG. *MATEC Web of Conferences. EDP Sciences*. 2019;277:03008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201927703008>

20. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Влияние несимметричной нагрузки на работу турбогенераторов установок распределенной генерации // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 3. С. 85-93. EDN: XQSNZJ

Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Influence of asymmetric load on turbine-generator sets in distributed generation plants. *Systems. Methods. Technologies*. 2016;3:85-93. (In Russ.)

21. Williamson A.C., Urquhart E.B. Analysis of the losses in a turbine-generator rotor caused by unbalanced loading. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1976;123(12):1325-1332. <https://doi.org/10.1049/piee.1976.0265>

22. Williamson A.C. Measurement of rotor temperatures of a 500 MW turbine generator with unbalanced loading. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1976;123(8):795-803. <https://doi.org/10.1049/piee.1976.0173>

23. Ciontea C.I. The use of symmetrical components in electrical protection. *2019 72nd Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. College Station, TX, USA, 2019. Pp. 1-8. <https://doi.org/10.1109/CPRE.2019.8765870>

24. Mamcarz D., Albrechtowicz P., Radwan-Pragłowska N., Rozegnał B. The analysis of the symmetrical short-circuit currents in backup power supply systems with low-power synchronous generators. *Energies*. 2020;13(17):4474. <https://doi.org/10.3390/en13174474>

25. Папков Б.В., Осокин В.Л., Куликов А.Л. Об особенностях малой и распределенной генерации в интеллектуальной электроэнергетике // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2018. Т. 22, № 4. С. 119-131. EDN: YTSNOP

Papkov B.V., Osokin V.L., Kulikov A.L. About the features of small and distributed generation in the intellectual electric power industry. *Vestnik UGATU*. 2018;22(4):119-131. (In Russ.)

26. Ludwinek K., Szczepanik J., Sułowicz M. Experimental analysis of assessing of the tripping effectiveness of miniature circuit breakers in an electrical installation fed from a synchronous generator set. *Electric Power Systems Research*. 2017. Т. 142. С. 341-350. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2016.09.028>

27. Albrechtowicz P., Szczepanik J. The analysis of the effectiveness of standard protection devices in supply systems fed from synchronous generator sets. *2018. International Symposium on Electrical Machines (SME)*. Andrychow, Poland, 2018. Pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/ISEM.2018.8442774>

28. Mamcarz D., Albrechtowicz P., Radwan-Pragłowska N., Rozegnał B. The Analysis of the Symmetrical Short-Circuit Currents in Backup Power Supply Systems with Low-Power Synchronous Generators. *Energies*. 2020;13(17):4474. <https://doi.org/10.3390/en13174474>

29. Давлетов Б.Б. Особенности синхронных двигателей. Синхронные компенсаторы // Развитие и актуальные вопросы современной науки. 2017. № 7. С. 38-40. EDN: YOCEUA

Davletov B.B. Peculiarities of synchronous engines. Synchronous compensators. *Razvitie i Aktualnye Voprosy Sovremennoy Nauki*. 2017;7:38-40. (In Russ.)

30. Орлов В.С., Сидоров А.В. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях низкого напряжения // В сб.: Энергосбережение и инновационные технологии. Тюмень, 2015. С. 144-146. EDN: VIHSHX

Orlov V.S., Sidorov A.V. Compensation of reactive power in low voltage distribution networks. In: *Energoberezhenie i Innovatsionnye Tekhnologii*. Tyumen, 2015. Pp. 144-146. (In Russ.)

31. Михалев Д.С., Исмаилов А.И., Коняев Н.В. Распределенная генерация для АПК // В сб.: Наука молодых – будущее России. Курск, 2019. С. 127-130. EDN: QYHXRS

Mikhalev D.S., Ismailov A.I., Konyaev N.V. Distributed generation for the agro-industrial sector. In: *Nauka Molodykh-Budushchee Rossii*. Kursk, 2019. Pp. 127-130. (In Russ.)

32. Назаренко Ю.В., Коняев Н.В., Шкабенко А.Ю., Гиллюк А.А. Обоснование использования альтернативного электроснабжения для крестьянско-фермерских хозяйств // Региональный вестник. 2018. № 1. С. 5-7. EDN: UQXDFM

Nazarenko Yu.V., Konyaev N.V., Shkabenko A.Yu., Gilyuk A.A. Justification for the use of alternative power supply for private farms. *Regionalniy Vestnik*. 2018;1:5-7. (In Russ.)

33. Дмитриев В.Н., Милашкина О.В., Борисов И.А. Применение симметрирующих устройств для повышения качества электроэнергии автономных источников // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2009. № 3-4. С. 59-64. EDN: KUVYZJ

Dmitriev V.N., Milashkina O.V., Borisov I.A. Application symmetriry pattern for raise quality electric energy autonomous

sources nutrition. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2009;3-4:59-64. (In Russ.).

34. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Голиков И.О. Анализ работы системы накопления электрической энергии с пофазным регулированием напряжения // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2022. Т. 69, № 3. С. 26-35. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-3-26-35>

Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Golikov I.O. Operation of an electric energy storage system with phase voltage adjusting. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2022;69(3):26-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-3-26-35>

35. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Виноградова А.В. Анализ конфигурации электрических сетей 0,4 кВ Орловской области // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2023. Т. 70, № 4. С. 22-29. EDN: LHIRSK

Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Vinogradova A.V. Analysis of the configuration of 0.4 kV electrical grids of the Orel region. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2023;70(4):22-29. (In Russ.).

36. Muljadi E., Yildirim D., Batan T., Butterfield C.P. Understanding the unbalanced-voltage problem in wind turbine generation. *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat No99CH36370)*. IEEE, 1999. Pp. 1359-1365. <https://doi.org/10.1109/IAS.1999.801678>

37. IEC61000-2-2:2002. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-2: Environment – Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems: 2002-03-28. Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2002. 57 p.

38. Barrero F., Martínez S., Yeves F., Mur F., Martínez P.M. Universal and reconfigurable to UPS active power filter for line conditioning. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2003;18(1):283-290. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.804014>

39. Graovac D., Katić V.A., Rufer A. Power quality problems compensation with universal power quality conditioning system. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2007;22(2):968-976. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.883027>

40. Morán L., Pastorini I., Dixon J., Wallace R. Series active power filter compensates current harmonics and voltage unbalance simultaneously. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*. 2000;147(1):31-36. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20000027>

41. Singh B., Al-Haddad K., Chandra A. A review of active filters for power quality improvement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1999;46(5):960-971. <https://doi.org/10.1109/41.793345>

42. García-Cerrada A., Pinzón-Ardila O., Feliu-Batlle V., Roncero-Sánchez P., García-González P. Application of a repetitive controller for a three-phase active power filter. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2007;22(1):237-246. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.886609>

43. Singh B., Solanki J. An implementation of an adaptive control algorithm for a three-phase shunt active filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009;56(8):2811-2820. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2014367>

44. Luo A., Peng S., Wu C., Wu J., Shuai Z. Power electronic hybrid system for load balancing compensation and frequency-selective harmonic suppression. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012;59(2):723-732. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2161066>

45. George S., Agarwal V. A DSP based optimal algorithm for shunt active filter under nonsinusoidal supply and unbalanced load conditions. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2007;22(2):593-601. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.890001>

46. Ali M., Laboure E., Costa F. Integrated active filter for differential-mode noise suppression. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2014;29(3):1053-1057. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2276396>

47. Ribeiro E.R., Barbi I. Harmonic voltage reduction using a series active filter under different load conditions. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2006;21(5):1394-1402. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.880265>

48. Peng F.Z., Akagi H., Nabae A. A New approach to harmonic compensation in power systems—a combined system of shunt passive and series active filters. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1990;26(6):983-990. <https://doi.org/10.1109/28.62380>

49. Swain S.D., Ray P.K., Mohanty K.B. Voltage compensation and stability analysis of hybrid series active filter for harmonic components. *Annual IEEE India Conference, INDICON*. Mumbai, India, 2013. Pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/INDICON.2013.6726005>

50. Swain S.D., Ray P.K., Mohanty K.B. Improvement of power quality using a robust hybrid series active power filter. *IEEE Trans Power Electron*. 2017;32(5):3490-3498. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2586525>

51. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1984; IA-20(3):625-630. <https://doi.org/10.1109/TIA.1984.4504460>

52. Dixon J.W., García J.J., Morán L. Control system for three-phase active power filter which simultaneously compensates power factor and unbalanced loads. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1995;42:636-641. <https://doi.org/10.1109/41.475504>

53. Rastogi M., Mohan N., Edris A.A. Hybrid-active filtering of harmonic currents in power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1995;10(4):1994-2000. <https://doi.org/10.1109/61.473352>

54. Bhattacharya S., Veltman A., Divan D.M., Lorenz R.D. Flux-based active filter controller. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1996;32(3):491-502. <https://doi.org/10.1109/28.502159>

55. Singh B., Al-Haddad K., Chandra A. Active power filter with sliding mode control. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*. 1997;144(6):564-568. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19971431>

56. Chandra A., Singh B., Singh B.N., Al-Haddad K. An improved control algorithm of shunt active filter for voltage regulation, harmonic elimination, power-factor correction, and balancing of nonlinear loads. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2000;15(3):495-507. <https://doi.org/10.1109/63.844510>

57. Pena R., Cardenas R., Escobar E., Clare J., Wheeler P. Control strategy for a Doubly-Fed Induction Generator feeding an unbalanced grid or stand-alone load. *Electric Power Systems Research*. 2009;79(2):355-364. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.07.005>

58. Hochgraf C., Lassetter R.H. Statcom controls for operation with unbalanced voltages. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1998;13(2):538-544. <https://doi.org/10.1109/61.660926>

59. Li Y., Vilathgamuwa D.M., Loh P.C. Microgrid power quality enhancement using a three-phase four-wire grid-interfacing compensator. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2005;41(6):1707-1719. <https://doi.org/10.1109/TIA.2005.858262>

60. Li Y.W., Vilathgamuwa D.M., Loh P.C. A grid-interfacing power quality compensator for three-phase three-wire microgrid applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2006;21(4):1021-1031. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.876844>

61. Hojo M., Iwase Y., Funabashi T., Ueda Y. A method of three-phase balancing in microgrid by photovoltaic generation systems. *13th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC2008*. Poznan, Poland, 2008. Pp. 2487-2491. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2008.4635637>

62. Cheng P.T., Chen C.A., Lee T.L., Kuo S.Y. A cooperative imbalance compensation method for distributed-generation

interface converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2009;45(2):805-815. <https://doi.org/10.1109/TIA.2009.2013601>

63. Oliveira da Silva S.A., Donoso-Garcia P, Cortizo P.C., Seixas P.F. A three-phase line-interactive UPS system implementation with series-parallel active power-line conditioning capabilities. *Conference Record – IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)* (Cat. No.01CH37248). Chicago, USA, 2001;4:2389-2396. <https://doi.org/10.1109/IAS.2001.955956>

64. Savaghebi M., Jalilian A., Vasquez J.C., Guerrero J.M. Autonomous voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012;60(4):1390-1402. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2185914>

Информация об авторах

Вадим Евгеньевич Большев¹, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории электроснабжения и возобновляемой энергетики; vadimbolshev@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-5787-8581>

Александр Владимирович Виноградов², д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории электроснабжения и возобновляемой энергетики; winaleksandr@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-8845-9718>

Сергей Викторович Крамской³, аспирант кафедры электроснабжения; kramskois@gmail.com[✉]

Сергей Иванович Белов⁴, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника имени академика И.А. Будзко»; sbelov@mail.ru

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

^{2,3} Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина; 302019, Российская Федерация, г. Орёл, ул. Генерала Родина, 69

^{2,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

В.Е. Большев – методология, верификация данных, формальный анализ, проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; А.В. Виноградов – концептуализация, методология, верификация данных, формальный анализ, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, руководство исследованием, администрирование проекта; С.В. Крамской – верификация данных, проведение исследования, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; С.И. Белов – участие в работе над окончательной версией рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 27.03.2024, после рецензирования и доработки 17.04.2024; принята к публикации 18.04.2024

Author Information

Vadim E. Bolshev¹, CSc (Eng), Senior Research Engineer, Laboratory of Electricity Supply and Renewable Energy, vadimbolshev@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-5787-8581>

Aleksandr V. Vinogradov², DSc (Eng), Associate Professor, Chief Research Engineer, Laboratory of Electricity Supply and Renewable Energy; Professor, Power Supply Department, winaleksandr@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-8845-9718>

Sergey V. Kramskoy³, postgraduate student, the Department of Power Supply

Sergey I. Belov, CSc (Eng), Associate Professor; Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering named after Academician I.A. Budzko, sbelov@mail.ru[✉]

^{1,2} Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutsky Proezd Str., bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

^{2,3} Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin; Generala Rodina Str., 69, Orel, 302019, Russian Federation

^{2,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contribution

V.E. Bolshev – methodology, data verification, formal analysis, investigation, data administration, writing – original draft preparation, finalizing (reviewing and editing) of the manuscript; A.V. Vinogradov – conceptualization, methodology, data verification, formal analysis, finalizing (reviewing and editing) of the manuscript, research supervision, project administration; S.V. Kramskoy – data verification, investigation, creating the draft manuscript, writing – original draft preparation, finalizing (reviewing and editing) of the manuscript; S.I. Belov – finalizing (reviewing and editing) of the manuscript.

Conflict of interests

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

Received 27.03.2024, Revised 17.04.2024, Accepted 18.04.2024