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

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научный журнал

Том 24. № 6 / 2022

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

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 http://elibrary.ru

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.: (499) 976-07-27
E-mail: agroeng@rgau-msha.ru
http://www.timacad.ru/about/struktura-universiteta/izdaniia/vestnik-mgau

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

Подписано в печать 27.12.2022 г.
Формат 60 84/8
Тираж 500 экз.

© ФБГОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2022

Главный научный редактор

Ерохин М.Н., академик РАН, д-р техн. наук, профессор кафедры сопротивления материалов и деталей машин, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), https://orcid.org/0000-0001-6573-0950

Заместители главного научного редактора:

Дорохов А.С., академик РАН, д-р техн. наук, профессор, заместитель директора по научно-организационной работе, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва, Российская Федерация), https://orcid.org/0000-0002-4758-3843

Водянников В.Т., д-р экон. наук, профессор кафедры организации производства, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), https://orcid.org/0000-0001-7111-9437

Кубрушко П.Ф., чл.-корр. РАО, д-р пед. наук, профессор, заведующий кафедрой педагогики и психологии профессионального образования, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), https://orcid.org/0000-0002-2142-1037

Члены редакционного совета:

Алдошин Н.В., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой сельскохозяйственных машин, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), https://orcid.org/0000-0002-0446-1096

Балабанов В.И., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой мелиоративных и строительных машин, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), https://orcid.org/0000-0001-6486-6485

Бердышев В.Е., д-р техн. наук, профессор, руководитель Центра учебно-методического обеспечения подготовки кадров для АПК, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Гайдар С.М., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения и технологии машиностроения, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), https://orcid.org/0000-0003-4290-2961

Девянин С.Н., д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры тракторов и автомобилей, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), https://orcid.org/0000-0001-6776-0432

Загинайлов В.И., д-р техн. наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехники имени академика И.А. Будзко, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), https://orcid.org/0000-0002-2623-760X

Казанцев С.П., д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой сопротивления материалов и деталей машин, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Кобозева Т.П., д-р. с.-х. наук, профессор кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка и высоких технологий в растениеводстве, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Кравченко И.Н., д-р техн. наук, профессор кафедры технического сервиса машин и оборудования, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), https://orcid.org/0000-0002-1826-3648

Левшин А.Г., д-р техн. наук, заведующий кафедрой эксплуатации машинно-тракторного парка и высоких технологий в растениеводстве, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), http://orcid.org/0000-0001-8010-4448

Леонов О.А., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой метрологии, стандартизации и управления качеством, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), https://orcid.org/0000-0001-8469-8052

Назарова Л.И., канд. пед. наук, доцент кафедры педагогики и психологии профессионального образования РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), https://orcid.org/0000-0001-5698-6284

Роберт И.В., академик РАО, д-р пед. наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБНУ «Институт стратегии развития образования РАО» (г. Москва, Российская Федерация), https://orcid.org/0000-0001-9303-6560

Сторчевой В.Ф., 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, Российская Федерация), https://orcid.org/0000-0002-6929-3919

Худякова Е.В., д-р экон. наук, профессор, заведующая кафедрой прикладной информатики, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация) https://orcid.org/0000-0001-7875-074X

Чумаков В.Л., канд. техн. наук, профессор кафедры тракторов и автомобилей, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

Чутчева Ю.В., д-р экон. наук, заведующая кафедрой экономики, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), https://orcid.org/0000-0002-7450-5664

Шичков Л.П., д-р техн. наук, проф., ФГБОУ РГАЗУ, заведующий кафедрой информационных и электротехнических систем и технологий, ФГБОУ РГАЗУ (г. Балашиха, Московская область)

Шогенов Ю.Х., академик РАН, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий сектором механизации, электрификации и автоматизации ОСХН РАН, ФГБУ «Российская академия наук» (г. Москва, Российская Федерация), https://orcid.org/0000-0002-7588-0458

Иностранные члены редакционного совета:

Абдыров А.М., д-р пед. наук, профессор Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина (г. Нур-Султан, Казахстан), https://orcid.org/0000-0002-6852-0235

Божков Снежан Иванов, 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

Куанто Фредерик, профессор, Высший национальный институт аграрных наук, продовольствия и окружающей среды (АгроСюп, Дижон, Франция), https://orcid.org/0000-0001-8541-8382

Маматов Ф.М., 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

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

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

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

AGRICULTURAL ENGINEERING (MOSCOW)

Scientific Journal Vol. 24(6) / 2022

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

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

Founded in 2003

Publication Frequency:
6 issues per year

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

Full versions are posted on the site http://elibrary.ru

EXECUTIVE EDITORS:
Melnikova I.V.
Markovskaya V.I.
Lavrova A.S.
Alipichev A.Yu.

Editors' office address:
Timiryazevskaya str., 58, Moscow, 127434
Tel.: 8 (499) 976-07-27;
E-mail: agroeng@rgau-msha.ru
http://www.timacad.ru/about/struktura-universiteta/izdaniia/vestnik-mgau

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

Passed for printing 27.12.2022
Format – 60 84/8
Circulation – 500 copies.

© Federal State Budgetary Establishment of Higher Education – Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2022

Science Editor-in-Chief

Erokhin Mikhail N., Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor of the Department of Resistance of Materials and Machine Parts, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation) https://orcid.org/0000-0001-6573-0950

Deputy Science Editor-In-Chief:

Dorokhov Aleksei S., 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, the Russian Federation), https://orcid.org/0000-0002-4758-3843

Vodyannikov Vladimir T., DSc (Econ), Professor, Professor of the Department of Organization of Production, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), https://orcid.org/0000-0001-7111-9437

Kubrushko Petr. F., 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, the Russian Federation), https://orcid.org/0000-0002-2142-1037

Members of the Editorial Board:

Aldoshin Nikolay V., DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Agricultural Machines, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), https://orcid.org/0000-0002-0446-1096

Balabanov Viktor I., DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Land Reclamation and Construction Machines, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy Moscow, the Russian Federation), https://orcid.org/0000-0001-6486-6485

Berdyshev Viktor Ye., DSc (Eng), Professor, Head of the Centre for Education-and-Methodological Support of Human Resource Training for Agriculture, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russian Federation)

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

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

Zaginailov Vladimir I., 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, the Russian Federation), https://orcid.org/0000-0002-2623-760X

Kazantsev Sergey P., DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Strength of Materials and Machine Parts, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation)

Kobozeva Tamara P., DSc (Ag), Professor of the Department of Machinery and Tractor Operation and High Technologies in Plant Cultivation, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation)

Kravchenko Igor N., DSc (Eng), Professor of the Department of Technical Service of Machinery and Equipment, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), https://orcid.org/0000-0002-1826-3648

Levshin Aleksandr G., 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, the Russian Federation), http://orcid.org/0000-0001-8010-4448

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

Nazarova L.I., PhD (Ed), Associate Professor, Department of Pedagogy and Psychology of Professional Education, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), https://orcid.org/0000-0001-5698-6284

Robert Irena V., 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, Russian Federation), https://orcid.org/0000-0001-9303-6560

Storchevoy Vladimir F., DSc (Eng), Professor, Head of the Process Automation and Robotisation Department named after Academician I.F. Borodin, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), https://orcid.org/0000-0002-6929-3919

Khudyakova Yelena V., DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Applied Informatics, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation)

Chumakov Valeriy L., PhD (Eng), Professor, the Department of Tractors and Automobiles, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation)

Chutcheva Yulia V., DSc (Econ), Head of the Department of Economics, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), https://orcid.org/0000-0002-7450-5664

Shichkov Leonid P., DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Information and Electrical Engineering Systems and technologies, Russian State Agrarian Correspondence University (Balashikha, Moscow region)

Shogenov Yuriy Kh., Full Member of the Russian Academy of Sciences DSc (Eng), Senior Research Associate, Head of the "Mechanization, Electrification and Automation" Section, Department of Agricultural Sciences, the Russian Academy of Sciences (Moscow, the Russian Federation), https://orcid.org/0000-0002-7588-0458

International members of the Editorial Board:

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

Bozhkov Snezhan I., 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

Cointault Frederick, Professor, Higher National Institute of Agricultural Sciences, Food and Environment (Agrosup, Dijon, France), https://orcid.org/0000-0001-8541-8382

Mamatov Farmon M., 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

Kumhala Frantisek, 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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

Кирсанов В.В., Павкин Д.Ю., Довлатов И.М., Юрочка С.С., Рузин С.С.
Разработка алгоритма оценки физиологической упитанности молочных коров 4

Иванов Ю.Г., Борулько В.Г., Андреев С.А.
Комбинированная система управления местной вентиляцией в животноводческом помещении 9

Игнаткин И.Ю., Шевкун Н.А., Архипцев А.В., Кожевникова Н.Г., Скороходов Д.М.
Об особенностях организации реверсивного оттаивания в рекуператорах теплоты вытяжного воздуха 15

Щукина В.Н., Девянин С.Н., Казанцев С.П., Перевозчикова Н.В.
Разработка алгоритма поиска неисправности при удаленной диагностике 20

Никитченко С.Л., Гринченков Д.В.
Совершенствование методов резервирования запасных частей для сельскохозяйственной техники на основе генетических алгоритмов 25

Воложанинов С.С., Алдошин Н.В., Завалий А.А., Воложанинова Н.В., Щиголев С.В.
Применение физических методов обработки для обеззараживания почвы 32

Джибилов С.М., Солдатов Э.Д., Гулуева Л.Р., Бидеев С.И.
Улучшение деградированных горных склонов методом дискования 38

Белов М.И., Гаджиев И.П., Шемякин А.В., Кабдин Н.Е., Мельников О.М.
Математическая модель отделения примесей от картофеля на элеваторе 43

Панферов Н.С., Костенко М.Ю., Тетерин В.С., Пехнов С.А., Сибирёв А.В., Мосяков М.А.
Разработка центробежного рабочего органа разбрасывателя минеральных удобрений 47

Дидманидзе Р.Н., Бутузов А.Е., Майстренко Н.А.
Перспективный способ восстановления чайных плантаций 54

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

Леонов О.А., Голиницкий П.В., Антонова У.Ю., Леонов Д.О., Зимогорский В.К.
Выбор средств измерений для дефектации коренных опор двигателя ЯМЗ 59

Серов А.В., Латыпов Р.А., Бурак П.И., Серов Н.В.
Технологические процессы получения функциональных покрытий методом электроконтактной приварки. Часть 2 64

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Бурынин Д.А., Смирнов А.А., Прошкин Ю.А., Качан С.А., Долгалев А.П.
Диагностика на фабриках растений: обзор неинвазивных методов мониторинга состояния растений для закрытых регулируемых агроэкосистем 70

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Назарова Л.И., Чистова Я.С., Гриценко Н.С.
Смешанное обучение как механизм цифровой трансформации профессионального образования 76

CONTENTS

FARM MACHINERY AND TECHNOLOGIES

Vladimir V. Kirsanov, Dmitry Yu. Pavkin, Igor M. Dovlatov, Sergey S. Yurochka, Semen S. Ruzin
Developing an algorithm for body condition scoring of dairy cows 4

Yuri G. Ivanov, Vyacheslav G. Borulko, Sergey A. Andreev
Combined local ventilation control system in a livestock house 9

Ivan Yu. Ignatkin, Nikolay A. Shevkun, Aleksandr V. Arkhiptsev, Natalya G. Kozhevnikova, Dmitriy M. Skorokhodov
On the peculiarities of organizing reverse defrosting in exhaust air heat recuperators 15

Varvara N. Shchukina, Sergey N. Devyanin, Sergey P. Kazantsev, Natalia V. Perevozchikova
Designing a fault finding algorithm for remote diagnostics 20

Sergei L. Nikitchenko, Dmitriy V. Grinchenkov
Improving the methods of reserving spare parts for agricultural machinery based on genetic algorithms 25

Sergey S. Volozhaninov, Nikolay V. Aldoshin, Aleksei A. Zavaliy, Nina V. Volozhaninova,Sergey V. Shchigolev
Application of physical treatment methods for soil disinfection 32

Sergey M. Dzhibilov, Eduard D. Soldatov, Lyudmila R. Gulueva, Sergey I. Bideev
Improving degraded mountain slopes with discing 38

Mikhail I. Belov, Imran P. Gadzhiev, Aleksandr V. Shemyakin, Nikolay E. Kabdin, Oleg M. Melnikov
Mathematical model of separating potato impurities at the elevator 43

Nikolay S. Panferov, Mikhail Yu. Kostenko, Vladimir S. Teterin, Sergey A. Pekhov, Aleksei V. Sibiryov, Maksim A. Mosyakov
Design of a centrifugal working unit of a mineral fertilizer spreader 47

Remzi N. Didmanidze, Anton E. Butuzov, Nikolay A. Maystrenko
Promising method for the restoration of tea plantations 54

TECHNICAL SERVICE IN AGRICULTURE

Oleg A. Leonov, Pavel V. Golinitskiy, Uliana Yu. Antonova, Dmitriy O. Leonov, Vladislav K. Zimogorsky
Choosing measuring instruments for the fault detection of the main bearing supports of the YAMZ engine 59

Anton V. Serov, Rashit A. Latypov, Pavel I. Burak, Nikita V. Serov
Technological processes of obtaining functional coatings by electric contact welding. Part 2 64

POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

Dmitriy A. Burynin, Aleksandr A. Smirnov, Yuriy A. Proshkin, Sergey A. Kachan, Aleksei P. Dolgalev
Screening in plant factories: a review of non-invasive plant monitoring techniques for closed regulated agroecosystems 70

THEORY AND METHODOLOGY OF PROFESSIONAL EDUCATION

Liudmila I. Nazarova, Yana S. Chistova, Nataliya S. Gritsenko
Blended learning as a mechanism of digital transformation of professional education 76

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 636.2.034 : 631.17
DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-4-8

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ УПИТАННОСТИ МОЛОЧНЫХ КОРОВ

КИРСАНОВ ВЛАДИМИР ВЯЧЕСЛАВОВИЧ, *чл-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом*
kirvv2014@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2549-4070
ПАВКИН ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ, *канд. техн. наук, заведующий лабораторией*
dimqaqa@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-8769-8365
ДОВЛАТОВ ИГОРЬ МАМЕДЯРЕВИЧ, *канд. техн. наук, научный сотрудник*
dovlatovim@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-3058-2446
ЮРОЧКА СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ✉***,*** *младший научный сотрудник*
yurochkasr@gmail.com✉; https://orcid.org/0000-0002-2511-7526
РУЗИН СЕМЕН СЕРГЕЕВИЧ, *младший научный сотрудник*
ruzin.s.s@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0001-6870-5486
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5

Аннотация. Оценка упитанности коров (BCS) с применением нейросетевых алгоритмов позволяет следить за здоровьем и продуктивностью животного. С целью разработки алгоритма оценки физиологической упитанности молочных коров по параметрам маклаков, крестца и голодной ямки на ферме ГУП «Григорьевское» проведено исследование 80 гол., которые были распределены на группы упитанности (от 1 до 5). Исследования проводились в ноябре 2021 г. во время утреннего доения. Сбор массива данных производился с использованием 3D ToF-камеры O3D303. Предварительно было проведено моделирование установки трехмерной камеры на ферме, разработан алгоритм, учитывающий рост коровы и расстояние от высшей точки позвоночника до трехмерной камеры. Разработан алгоритм оценки физиологической упитанности молочных коров в соответствии с оценкой состояния маклаков, крестца, голодной ямки, определяющий наивысшую точку холки, пропорции между длиной и шириной туловища, а также глубиной голодных ямок и выраженность хвостовой связки. Разработано программное обеспечение, позволяющее регистрировать номер коровы и определять балл упитанности, а также показывать динамику изменения упитанности животного. Обработка данных проводилась в соответствии с разработанным алгоритмом. Обработка изображений проводилась методом регрессии. Сравнение оценки упитанности коров, проведенной согласно разработанному алгоритму, и оценки экспертов показало, что погрешность работы алгоритма в диапазоне упитанности 2…4 балла составила в среднем 10%. При определении упитанности коров, имеющих пограничное и граничное состояние упитанности (1 и 5 баллов), ошибка измерения предложенным алгоритмом увеличивается до 25%. На основе полученных результатов для дальнейших исследований рекомендовано обучить нейронную сеть; определить корректирующий коэффициент для 1 и 5 баллов упитанности; доработать программное обеспечение, разработать пользовательское ПО с разработкой проходного станка бонитировки и провести испытания.

Ключевые слова: лактирующие коровы, оценка состояния тела (BCS), 3D-датчик TOF, бесконтактная оценка упитанности, маклаки, крестец.

Благодарности: *Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации на право получения гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых-кандидатов наук – МК-2513.2022.4.*

Формат цитирования: Кирсанов В.В., Павкин Д.Ю., Довлатов И.М., Юрочка С.С., Рузин С.С. Разработка алгоритма оценки физиологической упитанности молочных коров // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 4-8. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-4-8.

© Кирсанов В.В., Павкин Д.Ю., Довлатов И.М., Юрочка С.С., Рузин С.С., 2022

ORIGINAL PAPER

DEVELOPING AN ALGORITHM FOR BODY CONDITION SCORING OF DAIRY COWS

VLADIMIR V. KIRSANOV, *RAS Corresponding Member, DSc (Eng), Professor, Head of the Department*
kirvv2014@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2549-4070
DMITRY Yu. PAVKIN, *PhD (Eng), Head of Laboratory*
dimqaqa@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-8769-8365

IGOR M. DOVLATOV, *PhD (Eng), Research Engineer*
dovlatovim@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-3058-2446
SERGEY S. YUROCHKA ✉***,*** *Junior Research Engineer*
yurochkasr@gmail.com✉; https://orcid.org/0000-0002-2511-7526
SEMEN S. RUZIN, *Junior Research Engineer*
ruzin.s.s@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0001-6870-5486
Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract. Cow's body condition scoring (BCS) based on neural network algorithms is necessary to monitor the health and productivity of the animals. To develop an algorithm for assessing the physiological fatness of dairy cows according to the parameters of the fermur heads, the sacrum and the hunger hollow, the authors studied eighty animals on a farm of the state unitary enterprise "Grigorievskoe", which were divided into fatness groups (from 1 to 5). The studies were carried out in November 2021 during the morning milking. Data were collected using a 3D ToF camera O3D303. Previously, the installation of a three-dimensional camera on the farm was simulated, and an algorithm was developed that takes into account the cow height and the distance from the highest point of the spine to the three-dimensional camera. An algorithm for assessing the physiological fatness of dairy cows (BCS) has been developed to take into account the condition of the fermur heads, the sacrum, the hunger hollow, which determines the highest point of the withers, the proportions between the body length and width, as well as the depth of the hunger hollows and the severity of the caudal ligament. Software has been developed to register the unique number of a cow and determine the BCS, as well as show the dynamics of changes in the animal's fatness. Data were processed in accordance with the developed algorithm. The image was processed using the regression method. Comparison results of the BCS of cows, obtained according to the developed algorithm, and the experts' assessment showed that the algorithm error in the fatness range of 2…4 points averaged 10%. When determining the BCS of cows with borderline and limit fatness state (1 and 5 points), the measurement error by the proposed algorithm increased to 25%. Based on the results obtained, the authors recommend pre-setting a neural network for further research; determine the correction factor for fatness points 1 and 5; finalize the software, develop customized software and an automatic system for body condition scoring, and conduct tests.

Keywords: lactating cows, body condition scoring (BCS), 3D TOF sensor, non-contact body condition scoring, fermur heads, sacrum

Acknowledgments: *The work was supported by the Council for Grants of the President of the Russian Federation for the right to receive a grant from the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists – PhD holder – MK-2513.2022.4.*

For citation: Kirsanov V.V., Pavkin D.Yu., Dovlatov I.M., Yurochka S.S., Ruzin S.S. Developing an algorithm for body condition scoring of dairy cows. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(6): 4-8. (In Rus.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-4-8.

Введение. Мировая тенденция развития молочного животноводства направлена на автоматизацию и роботизацию технологических процессов производства молока на товарной ферме [1-3]. Интенсивность производства, с одной стороны, увеличивает надой на одну голову, делая процесс производства сырого молока более рентабельным. С другой стороны, интенсивность производства приводит к быстрейшему изнашиванию организма молочных коров, когда среднее производственное использование молочных коров равно трем лактациям. Также у высокопродуктивных молочных коров наблюдается развитие кетоза.

Установлена связь между упитанностью молочных коров и вероятностью развития субклинического кетоза. Коровы с баллом упитанности ≥3,25 более подвержены заболеванию, чем худые с баллом упитанности ≤3 [4].

В исследованиях [5] установлена зависимость между баллом упитанности молочных коров и снижением массы тела в течение 30-40 дней после отела. Из 47 исследуемых коров 37 коров на 14-е сутки после отела потеряли ≥0,75 балла по шкале BCS; 10 коров потеряли ≤0,75 балла. Потеря массы тела связана с отрицательным энергетическим балансом у коровы после отела и последующей мобилизацией резервов организма для восстановления.

Установлена взаимосвязь между склонностью к заболеванию метритом и упитанностью коров по шкале BCS ≤ 3 балла [6].

В исследованиях [7] авторы оценивали связь между физиологическим состоянием тела (BCS) в переходный период и развитием заболеваний с изменением удоев. Оценке подлежали 232 коровы. Оценка упитанности производилась с 1 до 5 баллов с шагом 0,25. По результатам анализа крови делалось заключение о здоровье животных. Измерение упитанности молочных коров по шкале BCS проводились за 21 день до отела и на 21-й день после отела. Коровы, у которых увеличился показатель упитанности в этот период, составили 28%; у которых он уменьшился – 22%; коров, сохранивших показатель, оказалось 50%. У 18% коров, у которых уменьшился в этот период балл упитанности, возникли проблемы со здоровьем в сравнении с животными, которые сохранили балл упитанности. 28% коров, набравших соответствующий балл упитанности, имели меньший шанс заболеть субклиническим кетозом.

Результаты исследований подтверждают возможность автоматически бесконтактным способом регистрировать развивающийся кетоз. Альтернативным способом определения кетоза является проведение анализа крови [8]. На больших фермах с количеством дойного стада, превышающем 200 гол., проводить постоянную активную оценку здоровья животных методом анализа крови достаточно сложно ввиду имеющегося дефицита специалистов, трудоемкости процесса забора крови, необходимости наличия лабораторного оборудования и др. На небольших фермах (порядка 200 гол.) у фермера, как правило, нет высококвалифицированных специалистов, и данные анализы не проводятся.

Оценку упитанности по шкале BCS можно проводить ручным [9] и автоматическим способом [10]. В работе [11] описывается разработка автоматической системы оценки BCS с использованием нейросетевого алгоритма, основанного на глубоком обучении (deep learnin) с помощью сверхточной нейросети. Применение нейросетевых алгоритмов для прямой оценки упитанности имеет и свои недостатки,

а именно необходимость продолжительного обучения под каждое конкретное стадо. Нейронная сеть в работе применяется в качестве инструмента, фиксирующего соответствующие геометрические параметры характерных точек животного (вершины маклаков, крестца, голодной ямки и др.) в трехмерных координатах.

Цель исследований: разработать алгоритм оценки физиологической упитанности молочных коров на основе применения 3D ToF-камеры по соответствующим геометрическим параметрам маклаков, крестца, голодной ямки.

Материалы и методы. Сбор натурных данных производился в ноябре 2021 г. на ферме ГУП Григорьевское во время утреннего доения. Было отобрано 80 гол., которые были распределены на группы упитанности с баллами от 1 до 5.

Сбор массива данных производился с использованием коммерческой 3D ToF-камеры O3D303 (рис. 1). Камера способна рассчитывать и выводить пространство точек (Point Cloud) в виде многомерного массива I×J×K, где I и J – разрешение камеры, 352×264, K – координаты X, Y, Z. Вывод полученных данных производится в формате «.dat». Скорость записи видеоизображений – 5 кадров/с.

Изначально было проведено моделирование установки трехмерной камеры на ферме (рис. 2а, 3) с использованием лабораторного макета животного (рис. 2б). Система от сети 220 В преобразует через блок питания необходимое напряжение 24 В для работы трехмерной камеры, установленной на высоте 2200 мм над уровнем пола. Разработано программное обеспечение, которое регистрирует номер коровы и определяет балл упитанности. По результатам нескольких испытаний строится график, показывающий динамику изменения упитанности животного.

Высота и угол наклона установки трехмерной камеры обусловлены четырьмя параметрами: высотой и длиной коровы, минимальным рабочим расстоянием от камеры до объекта, допустимой погрешностью камеры (рис. 3). Высоту коровы принимаем от 1300 до 1500 мм, минимальное рабочее расстояние от исследуемой поверхности объекта до объектива камеры – 300 мм. Погрешность камеры, заявленная техническими характеристиками производителя, на каждый метр рабочего расстояния от объектива камеры до объекта равна ±1 см. Например, погрешность измерения составит ≤1 см при условии, что рабочее расстояние от крестца коровы, имеющей высоту 1500 мм, до объектива трехмерной камеры, расположенной на высоте 2200 мм, равно 700 мм.

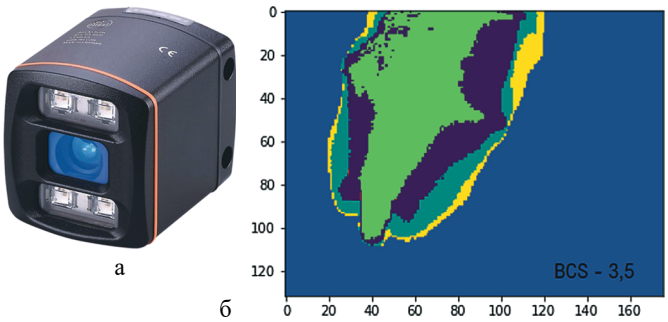


Рис. 1. 3D ToF-камера O3D303:
а – трехмерная камера O3D303;
б – цифровое изображение с баллом упитанности 3,5

Fig. 1. 3D ToF camera O3D303:
a – 3D camera O3D303;
b – digital image with a body condition score of 3.5

При установке трехмерной камеры на высоте 2200 мм от уровня пола при наклоне угла 10°, рабочем угле обзора 60° и высоте коровы 1300 мм протяженность сканируемой поверхности составит 1142,7 мм, при высоте 1500 мм – 889,12 мм (рис. 3*в*). Режим работы системы: 5 кадров за 1 сек. с последующей их обработкой.

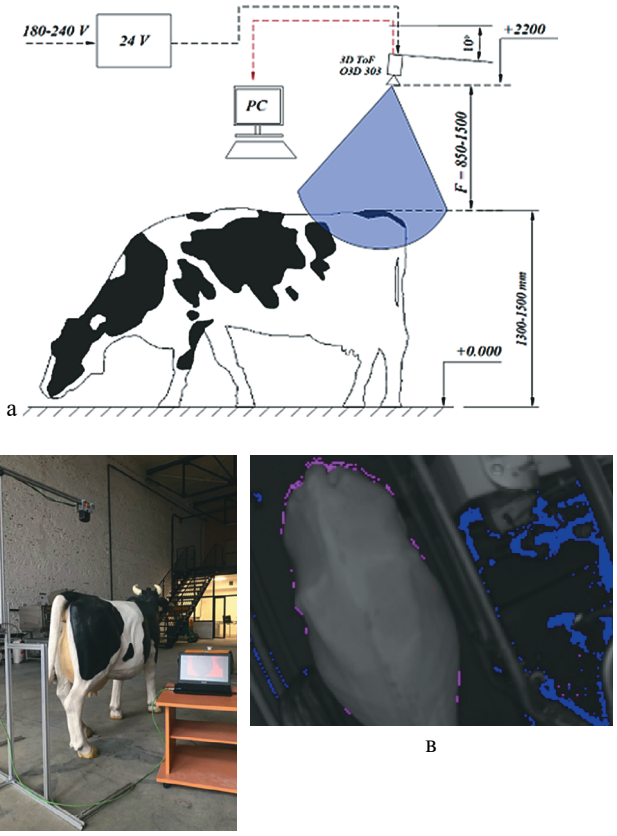


Рис. 2. Этапы исследований системы определения упитанности молочных коров:
а – теоретическая модель;
б – лабораторные/предварительные исследования;
в – натурные исследования с живым объектом

Fig. 2. Stages of research of the system for determining the fatness of dairy cows:
a – theoretical model; b – laboratory/preliminary studies;
c – field studies with a living object

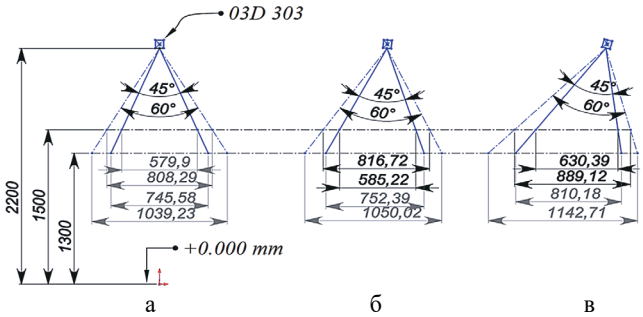


Рис. 3. Изменение протяженности сканируемой поверхности от угла наклона датчика:
а – вертикальное расположение;
б – смещение на 5° от вертикальной оси;
в – смещение на 10° от вертикальной оси

Fig. 3. Change in the length of the scanned surface from the inclination angle of the sensor:
a – vertical arrangement; b – offset by 5° from the vertical axis;
c – offset by 10° from the vertical axis

Результаты и их обсуждение. Процесс сканирования осуществляется следующим образом. Фермер/исследователь инициирует запрос к трехмерной камере. Камера собирает натурные данные с коров в специальном станке и отправляет их на сервер, где производится обработка данных в соответствии с разработанным алгоритмом (рис. 4).

Технология работы специального станка заключается в открытии двух ворот (на вход и выход животного) для запуска животного на площадку станка, оборудованную камерой, снимающей параметры (рост и расстояние от высшей точки позвоночника животного).

Пример обработки изображения методом регрессии при уточнении глубины впадин на крестцовой связке представлен на рисунке 5, где обозначены следующие точки: M_L – левый маклак; M_R – правый маклак; KX – седалищные бугры; H – голодные ямки.

Алгоритм программного обеспечения работает следующим образом.

Шаг s1 – производится поиск массива точек тела коровы, находящихся в диапазоне высот от 700 мм до 1500 мм, с разрешением не менее 40×40 пикселей.

Шаг s2 – производится повторная проверка точек по высоте. Если точка не подходит по высоте, но вокруг неё не менее 6 точек, подходящих по высоте и находящихся на допустимом расстоянии, точка берётся как среднее квадратичное значение множества точек. Во время испытаний был установлен квадрат точек 5x5 пикселей.

Шаг s3 – применяется алгоритм шумоподавления, который объединяет все найденные массивы в одно скопление точек.

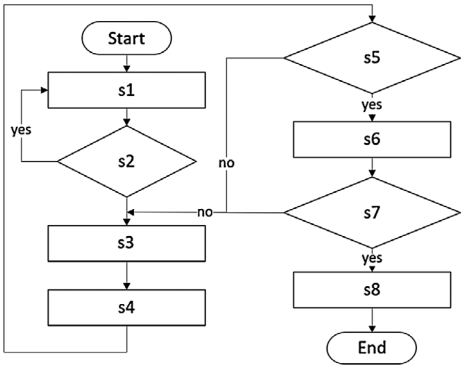


Рис. 4. Алгоритм функционирования программного обеспечения

Fig. 4. Software operation algorithm

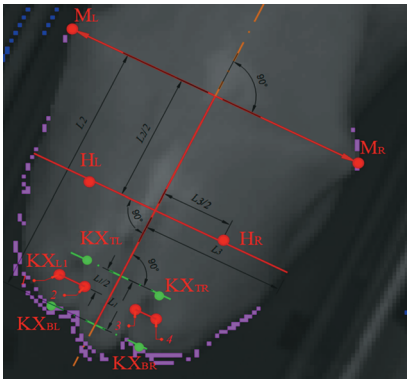


Рис. 5. Определение характерных точек на крестце коровы при уточнении глубины впадин на крестцовой связке

Fig. 5. Determining characteristic points on the sacrum of the cow when specifying the depth of sacrum hollows

Шаг s7 – проверка схожести построенной линии позвоночника с эталонным образцом. После построения линии позвоночника находятся наиболее удалённые от центральной линии маклаки M_R и M_L и расстояние между ними M_{RL}, расстояние от середины отрезка между маклоками до хвоста $M_{RLdistance}$. Примерно посередине между маклаками и хвостом строятся точки H_R и H_L. Производится расчёт высот KX_{TL}, KX_{TR}. (табл.).

Шаг s8 – производится расчёт расстояния от наивысшей точки позвоночника до камеры.

Шаг s4 – производится приближенный поиск линии позвоночника и нахождения самых высоких точек при применении регрессии к точкам средней линии массива (позвоночник коровы); определяется высота коровы за счёт построения поперечной линии, проведенной по двум крайним точкам – маклакам (прямая, проведенная через самые высокие точки).

Шаг s5 – производится уточняющий поиск точек линии позвоночника с применением регрессии. Линией является диапазон точек 5×5 пикселей, заключающийся в повторном построении перпендикулярной оси, образуемой между точками маклаков (M_L и M_R). Центр пересечения линий является центральной точкой на позвоночнике. Задняя точка этой оси – точка KX, её координаты – KX_{BL}, KX_{BR}.

Шаг s6 – нахождение на кривом хребте точки KRF, лежащей на расстоянии 600 мм на прямой линии, построенной через центры отрезков $KX_{BL}KX_{BR}$ и M_LM_R.

Таблица

Результаты проверки алгоритма с использованием 3D-камеры

Table

Algorithm verification results using 3D camera

№ коровы / *Cow number*	**Входные данные** / *Input data*						**Упитанность по алгоритму, балл** *Body condition (fatness) score assessed according to the algorithm, points*	**Экспертная оценка, балл** / *Expert evaluation, points*	**Разность между оценками, балл** *Difference between scores, points*	**Погрешность работы алгоритма, %** *Algorithm operation error, %*
	Длина прямой позвоночника, мм *Straight spine length, mm*	**Расстояние между M_L и M_R, мм** *Distance between M_L and M_R, mm*	**Расстояние от M_LM_R до хвоста, мм** *Distance from M_LM_R to the tail, mm*	**Расстояние от камеры по оси Z до H_L, мм** *Distance from the camera along the Z axis to HL, mm*	**Расстояние от камеры по оси Z до H_R, мм** *Distance from the camera along the Z axis to HR, mm*	**Высота коровы, мм** / *Cow's height, mm*				
1	1512	699,26	603,03	1099	1119	1020	2,12	2,50	0,38	15,2
2	1505	589,97	518,71	1164	1200	1099	3,18	2,75	–0,43	–15,6
3	1506	735,35	619,78	1086	1108	1010	4,98	4,75	–0,23	–4,8
4	1497	569,47	465,06	1122	1132	1032	2,36	2,00	–0,36	–18,0
5	1483	607,02	514,26	1133	1156	1058	5,00	4,00	–1,00	–25,0
6	1501	480,43	404,93	1213	1220	1135	1,68	1,50	–0,18	–12,0
7	1502	592,06	367,26	1136	1167	1071	3,22	3,00	–0,22	–7,3
8	1508	566,29	383,78	1193	1180	1108	4,54	4,25	–0,29	–6,8
9	1510	740,06	491,49	1080	1076	968	2,31	2,25	–0,06	–2,7
10	1489	655,20	417,68	1111	1114	1033	4,02	3,50	–0,52	–14,9
11	1506	556,54	489,20	1105	1098	831	2,78	2,50	–0,28	–11,2

Результаты оценки упитанности, проведенной согласно разработанному алгоритму, сравнивались с экспертной оценкой, определялась погрешность работы алгоритма (табл.).

Согласно данным таблицы в диапазоне упитанности 2…4 балла погрешность работы алгоритма составляет в среднем 10%. При определении упитанности коров, имеющих пограничное и граничное состояние упитанности (балл упитанности – 1 и 5), ошибка измерения предложенным алгоритмом увеличивается до 25%.

Предлагаются рекомендации для дальнейших исследований, а именно:

1. Для обучения нейронной сети собрать массив данных о ключевых точках, участвующих в определении балла упитанности, от 6 коров каждого балла упитанности с шагом 0,5 от 1 до 5.

2. Для определения упитанности коров, имеющих пограничное и граничное состояние упитанности (1 и 5 баллов по оценке экспертов), определить корректирующий коэффициент.

3. Доработать программное обеспечение, разработать пользовательское ПО с разработкой проходного станка бонитировки.

4. Провести стендовые и производственные испытания.

Выводы

1. Использование нейронной сети с методом регрессии для определения координат (x, y, z) точек маклоков, крестца, голодных ямок, верхней точки холки является перспективным методом определения упитанности и бонитировки животных.

2. Алгоритмическая ошибка определения балла упитанности в диапазоне 2…4 балла в сравнении с экспертной оценкой составляет 10%, ближе к граничным значениям (1 и 5 баллов) погрешность возрастает до 25%.

3. Определение балла упитанности с шагом 1 балл требует проведения дальнейших испытаний с параллельным сбором натурных данных.

Список использованных источников / References

1. Pavkin D.Yu., Dorokhov A.S., Vladimirov F.E., Dovlatov I.M., Lyalin K.S. Algorithms for detecting cattle diseases at early stages and for making diagnoses and related recommendations. Applied Sciences (Switzerland). 2021; 11 (23): 11148. https://doi.org/10.3390/app112311148

2. Колотушкин А.Н., Юрочка С.С., Васина М.Ю., Довлатов И.М. Устройство автоматического регулирования качества воздуха в животноводческих помещениях // Агротехника и энергообеспечение. 2021. № 3 (32). С. 17-23. EDN: GWBZKJ.

Kolotushkin A.N., Yurochka S.S., Vasina M.Yu., Dovlatov I.M. Device for the automatic control of air quality in livestock premises. Agrotekhnika i energoobespechenie. 2021; 3 (32): 17-23. (In Rus.)

3. Кирсанов В.В., Павкин Д.Ю., Никитин Е.А., Довлатов И.М. Методика оптимизации параметров машинного кормления крупного рогатого скота // Агроинженерия. 2021. № 1 (101). С. 10-14. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-1-10-14

Kirsanov V.V., Pavkin D.Yu., Nikitin E.A., Dovlatov I.M. Methods for optimizing the parameters of machine cattle feeding. *Agricultural Engineering*. 2021; 1: 10-14. https ://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-1-10-14 (In Rus.)

4. Vanholder T., Papen J., Bemers R., Vertenten G., Berge A.C.B. Risk factors for subclinical and clinical ketosis and association with production parameters in dairy cows in the Netherlands. Journal of dairy science. 2015; 98 (2): 880-888. https://doi.org/10.3168/jds.2014-8362

5. Chapel J.M., Muiño R., Pereira V., Castillo C., Hernández J., Benedito J.L. Relationship of BCS prepartum with reproductive performance and lipomobilization in Holstein dairy cows. Pakistan Veterinary Journal. 2017; 37 (2): 215-219.

6. Daros R.R., Hötzel M.J., Bran J.A., LeBlanc S.J., Keyserlingk M.A.G. Prevalence and risk factors for transition period diseases in grazing dairy cows in Brazil. Preventive veterinary medicine. 2017; 145: 16-22. https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2017.06.004

7. Barletta R.V. et al. Association of changes among body condition score during the transition period with NEFA and BHBA concentrations, milk production, fertility, and health of Holstein cows. Theriogenology. 2017; 104: 30-36. https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2017.07.030

8. Garzón A., Oliver-Espinosa O. Incidence and risk factors for ketosis in grazing dairy cattle in the Cundi-Boyacencian Andean plateau, Colombia. Tropical animal health and production. 2019; 51 (6): 1481-1487. https://doi.org/10.1007/s11250-019-01835-z

9. Berry D.P., Macdonald K.A., Penno J.W., Roche J.R. Association between body condition score and live weight in pasture-based Holstein-Friesian dairy cows. Journal of dairy research. 2006; 73 (4): 487-491. https://doi.org/10.1017/S0022029906002020

10. Paul A., Mondal S., Kumar S., Kumari T. Body condition scoring in dairy cows-a conceptual and systematic review. Indian journal of animal research. 2020; 54: 929-935. https://doi.org/10.18805/ijar.B-3859

11. Yukun S. et al. Automatic monitoring system for individual dairy cows based on a deep learning framework that provides identification via body parts and estimation of body condition score. Journal of dairy science. 2019; 102 (11): 10140-10151. https://doi.org/10.3168/jds.2018-16164

Критерии авторства

Кирсанов В.В., Павкин Д.Ю., Довлатов И.М., Юрочка С.С., Рузин С.С. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Кирсанов В.В., Павкин Д.Ю., Довлатов И.М., Юрочка С.С., Рузин С.С. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 14.04.2022

Одобрена после рецензирования 14.07.2022

Принята к публикации 13.10.2022

Contribution

V.V. Kirsanov, D.Yu. Pavkin, I.M. Dovlatov, S.S. Yurochka and S.S. Ruzin performed theoretical studies and, based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. V.V. Kirsanov, D.Yu. Pavkin, I.M. Dovlatov, S.S. Yurochka and S.S. Ruzin have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 14.04.2022

Approved after reviewing 14.07.2022

Accepted for publication 13.10.2022

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.22.01 : 697.9
DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-9-14

КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МЕСТНОЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ В ЖИВОТНОВОДЧЕСКОМ ПОМЕЩЕНИИ

ИВАНОВ ЮРИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ✉**,** *д-р техн. наук, профессор*
electro@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-4766-9532
БОРУЛЬКО ВЯЧЕСЛАВ ГРИГОРЬЕВИЧ, *д-р техн. наук, доцент*
vborulko@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-3221-3567, Scopus ID57224405698, ResearcherID: AAE-4940-2022
АНДРЕЕВ СЕРГЕЙ АНДРЕЕВИЧ, *канд. техн. наук, доцент*
energo-andreev@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-8945-963X
Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Продуктивность коров зависит от температурно-влажностных показателей окружающей среды. На фермах с беспривязно-боксовым содержанием коров с местной принудительной вентиляцией целесообразно осуществлять ее управление по клинико-физиологическим показателям состояния коров. С этой целью проанализированы экспериментальные исследования зависимости частоты сокращений сердца и частоты дыхания животных от превышения температуры и относительной влажности воздуха. Проведен анализ динамики изменения клинико-физиологических показателей животных при воздействии на них тепловыми и влажностными факторами в форме единичного ступенчатого воздействия. Для предотвращения теплового стресса животных предложено осуществлять управляющее воздействие местной вентиляцией по комбинированному принципу, когда в качестве объекта управления выступает животное, а управляемыми величинами являются частота сокращений сердца и частота дыхания. В этой системе роль возмущающих воздействий принадлежит температуре и влажности воздуха в животноводческом помещении. В то же время контур управления температурой и влажностью выполняет страховую функцию. Командный фактор для формирования управляющего воздействия в установившемся режиме предложено рассматривать как произведение масштабированных отклонений фактических значений частоты сокращений сердца и частоты дыхания от их нормированных значений. По результатам анализа динамических свойств объекта управления предложено осуществлять формирование управляющего воздействия по пропорционально-дифференциальному закону, для реализации которого необходим периодический поворот вентиляторов.

Ключевые слова: содержание коров, параметры микроклимата, температурно-влажностный режим, температурный стресс, местная вентиляция, частота сердечных сокращений, частота дыхания, система управления, комбинированное управление

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

© Иванов Ю.Г., Борулько В.Г., Андреев С.А., 2022

ORIGINAL PAPER

COMBINED LOCAL VENTILATION CONTROL SYSTEM IN A LIVESTOCK HOUSE

YURI G. IVANOV✉**,** *DSc (Eng), Professor*
electro@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-4766-9532
VYACHESLAV G. BORULKO, *DSc (Eng), Associate Professor*
vborulko@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-3221-3567, Scopus ID57224405698, ResearcherID: AAE-4940-2022
SERGEY A. ANDREEV, *PhD (Eng), Associate Professor*
energo-andreev@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-8945-963X
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. The productivity of cows depends on the temperature and humidity of the environment. On farms with the loose-box keeping of cows with local forced ventilation, it is advisable to control the environemnt according to the clinical and physiological indicators of the cows' conditon. For this purpose, the authors conducted experimental studies to analyze the dependence of the heart rate and respiratory rate of animals on overtemperature and relative air humidity. The study focused on the dynamics of changes in the clinical and physiological parameters of animals under the influence of thermal and humidity factors in the form of a single step impact. To prevent heat stress in animals, it is proposed to control local ventilation according to the combined principle, where the animal acts as the object of control, and the controlled values are the heart rate and respiratory rate. In this system, the role of disturbing influences belongs to air temperature and humidity

in the livestock building. At the same time, the temperature and humidity control circuit performs a safeguard function. The command factor making the control action in the steady state is proposed to be considered the product of the scaled deviations of the actual values of the heart rate and the respiratory rate from their normalized values. Based on the analysis results of the dynamic properties of the control object, the authors propose to form the control action according to the proportional-differential law, which requires a periodic rotation of the fans.

Keywords: cow keeping, indoor climate parameters, temperature and humidity parametres, temperature stress, local ventilation, heart rate, respiratory rate, control system, combined control

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

Введение. Создание благоприятных условий содержания крупного рогатого скота остается важной задачей современного животноводства. Традиционное решение этой задачи сводится к обеспечению научно обоснованных параметров микроклимата, закрепленных в зооветеринарных нормах и включающих в себя требуемые значения температуры и влажности воздушной среды [1, 2]. Современные конструкции молочных ферм практически лишены теплоизоляции и содержат открытые стенные проемы и вентиляционный конек[1]. Вследствие этого температура и влажность воздуха внутри таких сооружений сильно зависят от параметров окружающей среды, что является причиной нарушения установленных норм.

Известно, что превышение температуры воздуха в животноводческом помещении всего лишь на 1…2 град. значения 25°С определяет снижение суточного удоя на 1 л [3]. Отрицательное влияние превышения температуры на организм животных приобретает особое значение в летнее время, и преимущественно – в южных регионах страны [4]. Можно отметить, что и увеличение относительной влажности с 85 до 95% приводит к снижению надоев на 9…12% [5].

Для предотвращения тепловых стрессов у коров, а также для обеспечения требуемого состава воздуха используют активную вентиляцию помещений. Количественные характеристики активной вентиляции (например, производительность вентилятора, его расположение в пространстве, алгоритм включения и длительность работы) выбираются в соответствии с учетом условий особенностей содержания животных. Как правило, решение этой задачи сводится к реализации управления по замкнутому принципу, при котором управляющее воздействие формируется с целью создания благоприятных параметров микроклимата. Функциональная схема такой системы управления представлена на рисунке 1.

Для достижения благоприятных условий производится формирование управляющего воздействия U при возникновении отклонений ε_1 и ε_2, превышающих заранее установленные допуски [6]. Однако при таком подходе не может быть учтена фактическая реакция животных на параметры микроклимата. Различия между ожидаемой и фактической реакцией объясняются различным физиологическим состоянием животных: их возрастом, биологическими ритмами, особенностями кормления и т.д. Кроме того, централизованная активная вентиляция не способна обеспечить равномерное удаление излишков тепловой энергии по всему объему помещения, создавая различные температурно-влажностные условия для отдельных животных.

Прогрессивное направление повышения эффективности систем искусственного микроклимата на фермах с беспривязно-боксовом содержании коров заключается в использовании местной принудительной вентиляции, управляемой по клинико-физиологическим показателям состояния коров [7]. В результате рекогносцировочных исследований установлено, что такими показателями могут стать частота сердечных сокращений и частота дыхания животных.

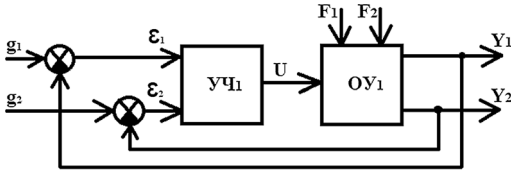


Рис. 1. Функциональная схема системы управления микроклиматом в животноводческом помещении:
$ОУ_1$ (объект управления) – животноводческое помещение; $УЧ_1$ (управляющая часть) – совокупность технических средств; Y_1 (температура) и Y_2 (влажность) – управляемые параметры в животноводческом помещении; g_1 и g_2 (задающие воздействия) – требуемые значения температуры и влажности; F_1 и F_2 – внешние факторы, влияющие на температуру и влажность в животноводческом помещении; ε_1 и ε_2 – отклонения фактических значений температуры и влажности от заданных значений ($\varepsilon_1 = g_1 - y_1$ и $\varepsilon_2 = g_2 - y_2$); U (управляющее воздействие) – расход воздуха

Fig. 1. Functional diagram of the climate control system in a livestock building:
$ОУ_1$ (control object) – livestock building; $УЧ_1$ (control part) – a set of technical means; Y_1 – temperature and Y_2 – humidity – controlled parameters in the livestock building; g_1 and g_2 (setting actions) – required values of temperature and humidity; F_1 and F_2 – external factors affecting the temperature and humidity in the livestock building; ε_1 and ε_2 – deviations of the actual values of temperature and humidity from the set values, $\varepsilon_1 = g_1 - y_1$ and $\varepsilon_2 = g_2 - y_2$; U (control action) – air flow

Цель исследований: изучение динамики изменения клинико-физиологических параметров животных при внешних тепловых и влажностных воздействиях и обоснование комбинированного принципа управления местной принудительной вентиляцией.

Материалы и методы. Исходными материалами послужили результаты экспериментальных исследований динамики изменения частоты сердечных сокращений и частоты дыхания коров при единичных ступенчатых воздействиях температуры и влажности окружающей среды, зооветеринарные нормы содержания животных, а также сведения из классической теории управления. В работе использованы метод активного эксперимента и метод оптимизации замкнутых систем управления. Для проведения исследований были сформированы две группы животных-аналогов и создана климатическая камера, обеспечивающая формирование заданных значений температуры, относительной влажности и скорости потока воздуха. В процессе эксперимента

[1] Нормы технологического проектирования предприятий крупного рогатого скота: НТП 1-99. М.: МСХ РФ, 1999. 152 с.

осуществлялась регистрация клинико-физиологических показателей коров и параметров микроклимата в климатической камере.

Климатическая камера представляет собой специальный изолированный бокс на три коровы, состоящий из деревянного каркаса, обтянутого прозрачной полиэтиленовой пленкой. Климатическая камера оснащена теплогенератором, устройствами принудительной вентиляции и увлажнения воздуха, а также комплексом контрольно-измерительных приборов.

Исследования проводились в коровнике зоостанции РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева с двумя группами коров черно-пестрой породы, по три особи в каждой группе. Шесть коров одного возраста находились в промежуточной стадии лактации. Среднее количество дней лактации – 100-160, средний удой – от 25 до 32 кг/корову (на день начала исследования). Первая группа содержалась в климатической камере с применением принудительной вентиляции, а вторая группа (контрольная) содержалась в климатической камере с использованием естественной вентиляции.

Микроклиматические параметры измерялись на различной высоте в разных зонах камеры и коровника. Для измерения температуры, относительной влажности, скорости потока воздуха и атмосферного давления применялся электронный регистратор Метеоскоп-М. Температура тела животного измерялась ректально термометром с ценой деления 0,1°С. Частота сердечных сокращений измерялась пальпацией вены в хвосте коровы. Частота дыхания животного оценивалась визуально по двигательным движениям грудной клетки.

Результаты и их обсуждение. Температурно-влажностный режим играет решающую роль в обеспечении условий эффективного животноводства. Превышение температуры и относительной влажности воздуха в животноводческом помещении сверх допустимых значений вызывает изменение клинико-физиологических показателей животных, и в первую очередь – частоты сокращения сердца и частоты дыхания.

Экспериментально установлено, что при относительной влажности воздуха 50% изменение температуры среды с 15 до 35°С вызывало увеличение пульса животного на 32,7% (с 64,3 до 85,3 ударов в 1 мин). При относительной влажности воздуха 65% аналогичные изменения температуры определили увеличение пульса уже на 41,2% (с 65,7 до 92,7 ударов в 1 мин). Наконец, при относительной влажности воздуха 80% это увеличение достигло 64,0% (с 63 до 103,3 ударов в 1 мин). Подобные наблюдения были произведены относительно частоты дыхания. Отмечено, что при относительной влажности воздуха 50% увеличение температуры с 15 до 30°С вызвало рост частоты дыхания в среднем на 65,70% (с 20,7 до 34,3 дыхательных движений в 1 мин). При относительной влажности 65% этот показатель составил 84,82% (с 19,1 до 35,3 дыхательных движений в 1 мин), при 80% – 116,23% (с 19,1 до 41,3 дыхательных движений в 1 мин). Более полная информация по зависимостям частоты сердечных сокращений и частоты дыхания от приращения температуры при различных значениях относительной влажности воздуха представлена в таблицах 1, 2 [8].

Таблица 1

Изменение частоты сердечных сокращений животных при различной температуре и относительной влажности воздуха, %

Table 1

Change in the heart rate of animals at different values of temperature and relative humidity, %

Относительная влажность воздуха, % *Relative humidity, %*	**Температура воздуха, °С** / *Air temperature, °C*								
	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	32,5	35,0
50	64,30	64,30	68,70	68,30	75,00	78,30	79,00	83,70	85,30
55	65,30	65,30	69,70	72,30	74,30	76,70	80,00	85,30	87,70
60	63,00	65,30	65,70	67,30	72,00	77,30	79,70	86,00	88,30
65	65,70	64,00	70,30	72,30	76,70	80,30	84,30	89,70	92,70
70	66,30	65,30	69,70	74,30	75,30	82,00	86,70	91,30	95,00
75	63,30	63,30	67,30	74,00	75,30	80,70	86,00	93,30	100,70
80	63,00	65,30	68,30	71,70	76,30	82,70	88,70	98,30	103,30

Таблица 2

Изменение частоты дыхательных движений животных при различной температуре и относительной влажности воздуха, %

Table 2

Change in the frequency of respiratory movements of animals at different values of temperature and relative air humidity, %

Относительная влажность воздуха, % *Relative humidity, %*	**Температура воздуха, °С** / *Air temperature, °C*								
	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	32,5	35,0
50	20,7	22,1	23,2	23,2	25,3	26,1	28,2	30,2	34,3
55	19,3	21,4	23,2	24,1	25,3	27,2	29,2	30,4	34,1
60	19,7	20,2	22,3	24,2	26,3	28,3	30,2	32,1	35,7
65	19,1	22,1	23,2	25,1	27,2	29,2	32,3	34,2	35,3
70	19,3	21,0	24,0	24,1	29,3	31,0	34,2	35,2	37,3
75	19,3	23,2	24,2	26,2	32,1	35,2	36,1	38,3	39,2
80	19,1	23,3	26,2	28,1	33,2	36,3	38,1	39,2	41,3

Таким образом, частота сердечных сокращений и частота дыхания животных повышаются с ростом температуры воздуха. При этом чем выше относительная влажность воздуха, тем более интенсивно изменяются эти показатели. Примечательно, что вследствие природной терморегуляции эти изменения практически не сопровождаются повышением ректальной температуры.

Для обеспечения стационарного теплового состояния животного необходимо равенство количества тепловой энергии, образующейся в организме, и теплоты, отданной в окружающую среду. При повышенной температуре воздуха тепловой баланс животного можно стабилизировать либо посредством уменьшения выработки тепловой энергии, либо увеличением теплоотдачи. По экономическим соображениям первый способ оказывается нерентабельным. Реализация второго подхода требует использования принудительного воздухообмена посредством активного вентилирования помещения.

В результате эксперимента с привлечением камеры принудительной вентиляции установлено, что при включении вентилятора и воздействии потока воздуха у коров происходит снижение частоты сердечных сокращений и частоты дыхания. При скорости воздушного потока 1 м/с, действующего на животных в течении 40 мин, снижение частоты сердечных сокращений при относительной влажности 50% и температуре 35°С в среднем составило 32,7%. В то же время при относительной влажности 80% произошло снижение частоты сердечных сокращений на 43,47%.

По соответствующим зависимостям, представленным на рисунке 2, можно сделать вывод о том, что при скорости воздуха 1 м/с и относительной влажности 50…55, 60…65, 70…75 и 80% частота сердечных сокращений приближается к нормальному значению за 15, 20, 25, 35 и более чем за 40 мин соответственно. Весьма схожий вид имеют графики снижения частоты дыхательных движений (рис. 3).

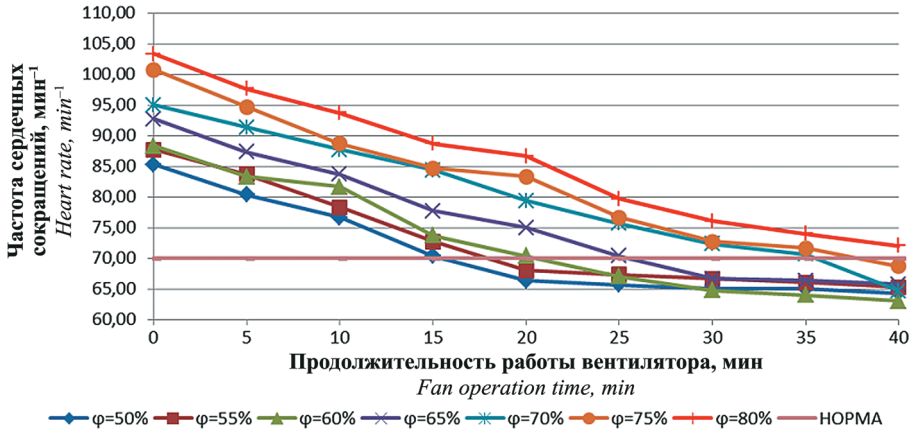


Рис. 2. Зависимость частоты сокращений сердца от продолжительности работы вентилятора при различной относительной влажности воздуха

Fig. 2. Relationship between the heart rate and the fan operation time at different values of relative air humidity

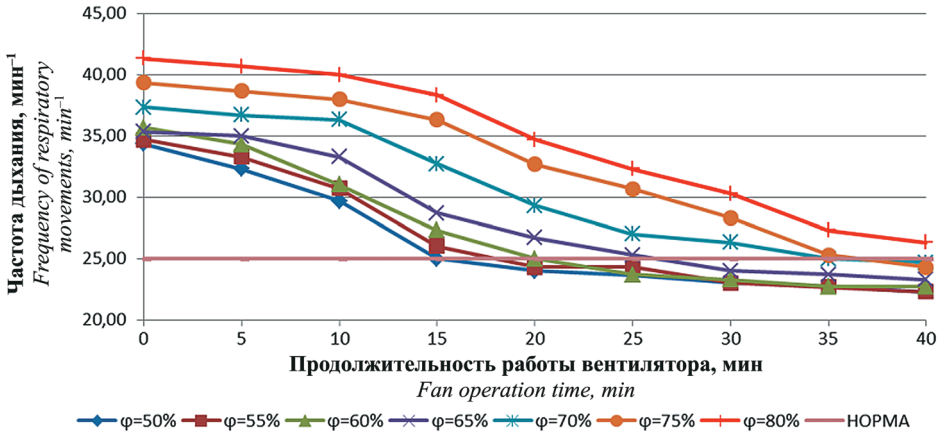


Рис. 3. Зависимость частоты дыхательных движений от продолжительности работы вентилятора при различной относительной влажности воздуха

Fig. 3. Relationship between the frequency of respiratory movements and the fan operation time at different values of relative air humidity

С целью повышения эффективности управления микроклиматом предложено осуществлять формирование управляющего воздействия комбинированным способом. Функциональная схема системы комбинированного управления местной вентиляцией и параметрами микроклимата представлена на рисунке 4.

Аналогично традиционному подходу

$$\begin{cases} \varepsilon_3 = g_3 - y_3; \\ \varepsilon_4 = g_4 - y_4; \\ \varepsilon_5 = g_5 - f_4; \\ \varepsilon_6 = g_6 - f_3. \end{cases} \quad (1)$$

Первое и второе уравнения системы (1) предписывают принцип управления по отклонению параметров состояния животных, а третье и четвертое уравнения – управление по отклонению параметров микроклимата. Функциональное назначение управляющей части $УЧ_2$ сводится к формированию управляющего воздействия, которое обобщает все четыре информационных сигнала $\varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5$ и ε_6, определяя их количественную взаимосвязь с командным фактором управляющим воздействием u. Очевидно, что выбор численных значений коэффициентов взаимосвязи этих величин должен предусматривать приоритетное управление по отклонению параметров состояния животных, однако при значительных отличиях реализуемых параметров микроклимата от нормированных значений должны вступать в силу определенные ограничения.

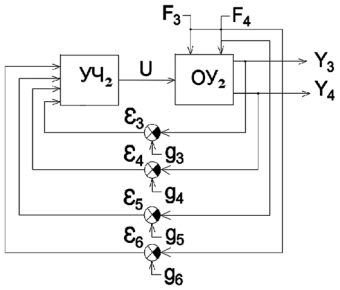


Рис. 4. Функциональная схема системы комбинированного управления местной вентиляцией и параметрами микроклимата:
$ОУ_2$ (объект управления) – животное; управляемые величины Y_3 (частота сердечных сокращений) и Y_4 (частота дыхания); возмущающее воздействие F_3 (температура) и F_4 (влажность воздуха в животноводческом помещении); g_3 и g_4 – требуемые значения частоты сердечных сокращений и частоты дыхания; g_5 и g_6 – требуемые значения температуры и влажности; $УЧ_2$ – управляющая часть; $\varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6$ – информационные сигналы

Fig.4. Functional diagram of the combined control system for local ventilation and climate parameters:
$ОУ_2$ (control object) – animal; controlled values: Y_2 – heart rate and Y_4 – respiratory rate; disturbing influence: F_3 – temperature and F_4 – air humidity in the livestock building; g_3 and g_4 – the required values of heart rate and respiratory rate; g_5 and g_6 – the required temperature and humidity values; $УЧ_2$ – control part; ε_3, ε_4 ε_5, ε_6 – information signals

Таким образом, контур управления по отклонению параметров микроклимата выполняет страховую функцию, обеспечивая опережающее достижение благоприятного состояния и не допуская явных нарушений зооветеринарных норм.

Для отражения количественной взаимосвязи командного фактора u с сигналами рассогласования ε_3 и ε_4 в статическом режиме можно рекомендовать новую функцию, представляющую собой произведение этих рассогласований, с учетом весовых коэффициентов:

$$u = \varepsilon_3^{'} \cdot \varepsilon_4^{'}, \qquad (2)$$

где $\varepsilon_3^{'} = k_1\varepsilon_3$ и $\varepsilon_3^{'} = k_2\varepsilon_3$; k_1 и k_2 – весовые коэффициенты, масштабирующие частоту сокращений сердца и частоту дыхания животных, учитывающие значимость каждого их них. В таком случае результирующее управляющее воздействие U должно формироваться под влиянием командного фактора u с учетом динамических характеристик реакции животных на воздействие потока воздуха, создаваемого вентиляционным оборудованием.

Как следует из рисунков 2, 3, рассматриваемые реакции являются инерционными, то есть проявляющимися с течением времени. Эти реакции обусловлены воздействием направленного потока воздуха, создаваемого вентилятором, который однократно включается в начале эксперимента и остается во включенном состоянии до его окончания, то есть в течение 40 мин. По отношению к животному как к объекту воздействия влияние воздушного потока является входной величиной, характеризующейся производительностью вентилятора Q_0. Эта входная величина может быть представлена условиями $Q = 0$ при $t < 0$ и $Q = Q_0$ при $t \geq 0$, которые соответствуют единичному ступенчатому воздействию. В таком случае графики зависимостей частоты сердечных сокращений и частоты дыхания от времени являются кривыми переходных процессов, которые с некоторыми допущениями можно описать дифференциальными уравнениями первого порядка:

$$\begin{cases} T_{01}\dfrac{dy_3}{dt} + y_3 = k_{o1}u \\ T_{02}\dfrac{dy_4}{dt} + y_4 = k_{o2}u \end{cases}, \qquad (3)$$

где k_{o1} и k_{o2} – коэффициенты передачи объекта управления по частотам сокращений сердца и дыхательных движений соответственно; T_{01} и T_{02} – постоянные времени объекта управления по частотам сокращений сердца и дыхательных движений соответственно.

Упомянутые выше допущения касаются едва заметного искривления кривых переходного процесса (рис. 2, 3), наблюдаемых при 20-минутной продолжительности работы вентилятора. Если в дальнейших исследованиях эти искривления будут признаны существенными, то для повышения точности расчетов рассматриваемые зависимости могут быть переведены в категорию функций второго порядка. Однако ввиду незначительности отмеченных искривлений эти манипуляции решающей роли играть не будут.

В операторной форме система (3) может быть представлена как

$$\begin{cases} T_{01}py_3 + y_3 = k_{o1}u \\ T_{02}py_4 + y_4 = k_{o2}u \end{cases},$$

где p – оператор Лапласа; $p = \dfrac{d}{dt}$.

Принимая во внимание то, что передаточные функции звеньев представляются отношением операторных представлений выходных и входных величин, запишем:

$$W_{01}(p) = \frac{k_{01}}{T_{01}p + 1} \text{ и } W_{02}(p) = \frac{k_{o2}}{T_{02}p + 1}.$$

Обе рассматриваемые передаточные функции описывают апериодический процесс первого порядка. Для таких функций оптимальная управляющая часть $УЧ_2$ для обеспечения устойчивой работы с минимумом ошибки в установившемся режиме должна осуществлять пропорционально-дифференциальные законы управления по каналам частот сокращений сердца и дыхательных движений [9]:

$$W_{УЧ2}(P) = \frac{T_о}{K_{охдоп}K_о}P + \frac{1}{K_{охдоп}K_о}, \qquad (4)$$

где $K_{охдоп}$ – допустимый коэффициент ошибки системы управления в установившемся режиме.

На практике пропорционально-дифференциальный закон управления может быть реализован изменением производительности вентиляционного оборудования в пределах от некоторого постоянного значения, определяемого вторым слагаемым выражения (4) и переменной, кратковременной составляющей в соответствии с его первым слагаемым. Это означает, что при очевидном отклонении частоты сердечных сокращений и частоты дыхания животных от нормы производительность вентилятора должна быть резко увеличена, но через непродолжительное время снижена и зафиксирована на номинальном уровне до завершения процесса стабилизации клинико-физиологических параметров. Во избежание технического усложнения управления такой результат может быть достигнут периодическим поворотом (или вращением) вентилятора относительно животных.

Выводы

1. Превышение температуры и относительной влажности воздуха в животноводческом помещении сверх допустимых значений вызывает изменение клинико-физиологических показателей животных, сопровождаемое увеличением частоты сокращения сердца и частоты дыхания.

2. Воздействие на параметры температурно-влажностного режима в животноводческом помещении посредством управления централизованной вентиляцией характеризуется чрезмерной инерционностью и осуществляется без учета индивидуальных особенностей животных.

3. Формирование благоприятных условий содержания коров целесообразно осуществлять в соответствии с комбинированным принципом приоритетного управления местной принудительной вентиляцией по частоте сердечных сокращений и частоте дыхания животных, управления температурой и влажностью в животноводческом помещении по их отклонению от заданных значений.

4. Для формирования командного фактора для включения местной принудительной вентиляции может быть использована функция произведения масштабированных отклонений значений частот сердечных сокращений и дыхательных движений от их нормированных значений.

5. Для обеспечения устойчивого и качественного управления местной приточной вентиляцией связь управляющего воздействия с командным фактором может осуществляться в соответствии с пропорционально-дифференциальным законом, реализуемым периодическим поворотом вентиляторов.

Список использованных источников

1. Чикалев А.И. Зоогигиена / А.И. Чикалев, Ю.А. Юлдашбаев. М.: КУРС: ИНФРА-М, 2018. 248 с. EDN: BKVBJG.

2. Трухачев В.И. Техника и технологии в животноводстве / В.И. Трухачев, И.В. Атанов, И.В. Капустин, Д.И. Грицай. СПб.: Лань, 2022. 380 с. EDN: BZPPTN.

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

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

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

6. Бородин И.Ф., Андреев С.А. Автоматизация технологических процессов и системы автоматического управления. М.: Юрайт, 2022. 386 с. EDN: ZTAHXZ.

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

8. Иванов Ю.Г., Борулько В.Г., Понизовкин Д.А. Влияние параметров принудительной вентиляции на физиологические показатели коров при высоких значениях температуры и относительной влажности воздуха в помещении // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2015. № 4 (20). С. 192-194. EDN: VBWKSH.

9. Кирилин Н.И. Расчет оптимального алгоритма САУ сельскохозяйственными технологическими процессами // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1984. № 8. С. 46-55.

References

1. Chikalev A.I., Yuldashbaev Yu.A. Zoogigiena [Zoohygiene]. Moscow, COURSE: INFRA-M. 2018. 248 p. (In Rus.)

2. Trukhachev V.I., Atanov I.V., Kapustin I.V., Gritsai D.I. Machinery and technologies used in animal husbandry. St. Petersburg: Lan', 2022. 380 p. (In Rus.)

3. Martynova E.N., Yastrebova E.A. Climate formation in livestock houses under the influence of outdoor temperature. *Molochnoe i myasnoe skotovodstvo.* 2012; 4: 24-26. (In Rus.)

4. Timoshenko V., Muzyka A., Moskalev A.I., Shmatko N. Cow comfort as a guarantee of high productivity. *Zhivotnovodstvo Rossii*. 2014; 8: 39-41. (In Rus.)

5. Vtoriy V.F., Gordeev V.V., Vtoriy S.V., Lantsova E.O. Influence of weather conditions on the temperature and humidity conditions in the cowshed. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*. 2016; 3(23): 67-72. (In Rus.)

6. Borodin I.F., Andreev S.A. Automation of technological processes and automatic control systems. Moscow, Yurayt, 2022. 386 p. (In Rus.)

7. Ivanov Yu.G., Ponizovkin D.A. Forced ventilation system of the cowshed. *Sel'skiy mekhanizator*. 2015; 8: 26-27. (In Rus.)

8. Ivanov Yu.G., Borulko V.G., Ponizovkin D.A. Influence of forced ventilation parameters on the physiological parameters of cows at high indoor temperatures and relative humidity. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*. 2015; 4(20): 192-194. (In Rus.)

9. Kirilin N.I. Determining an optimal algorithm for ACS as applied to agricultural technological processes. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 1984; 8: 46-55. (In Rus.)

Критерии авторства

Иванов Ю.Г., Борулько В.Г., Андреев С.А. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Иванов Ю.Г., Борулько В.Г., Андреев С.А. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 03.10.2022

Одобрена после рецензирования 22.10.2022

Принята к публикации 01.11.2022

Contribution

Yu.G. Ivanov, V.G. Borulko and S.A. Andreev performed theoretical studies and, based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. Yu.G. Ivanov, V.G. Borulko and S.A. Andreev have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 03.10.2022

Approved after reviewing 22.10.2022

Accepted for publication 01.11.2022

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 697.921.47
DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-15-19

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ОРГАНИЗАЦИИ РЕВЕРСИВНОГО ОТТАИВАНИЯ В РЕКУПЕРАТОРАХ ТЕПЛОТЫ ВЫТЯЖНОГО ВОЗДУХА

ИГНАТКИН ИВАН ЮРЬЕВИЧ✉***,*** *д-р техн. наук, доцент*
ignatkin@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0003-4867-1973; Scopus Author ID: 57222543815
ШЕВКУН НИКОЛАЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ, *канд. с.-х. наук, доцент*
energo-shevkun@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7451-7828; Scopus Author ID: 57222576008
АРХИПЦЕВ АЛЕКСАНДР ВАЛЕРЬЕВИЧ, *канд. техн. наук, доцент*
aarchiptsev@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-6339-3943; Scopus Author ID: 57360996100
КОЖЕВНИКОВА НАТАЛЬЯ ГЕОРГИЕВНА, *канд. техн. наук, доцент*
energo-ngk@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-3664-9456
СКОРОХОДОВ ДМИТРИЙ МИХАЙЛОВИЧ, *канд. техн. наук, доцент*
d.skorokhodov@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-6315-4184; Scopus Author ID: 57223623999
Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. С учетом цен на энергоресурсы одним из путей решения проблемы энергосбережения является сокращение затрат на отопление животноводческих помещений путём внедрения рекуперативных теплоутилизационных установок, позволяющих снизить потери тепла и оптимизировать работу систем микроклимата. С целью разработки метода управления и конструкции рекуперативной установки, обеспечивающей оттаивание намерзшего конденсата без применения системы рециркуляционных клапанов, предложена рекуперативная теплоутилизационная установка с реверсивным оттаиванием рекуператоров, обеспечивающая организацию реверсирования приточного вентилятора. Рассмотрены конструктивные параметры рециркуляционного проёма в выпускном воздуховоде. Функционирование предлагаемой системы должно создавать определенное аэродинамическое сопротивление, которое в режиме «Оттаивание» не должно превышать 20…30 Па. Теоретические расчёты рециркуляционного проёма, если исходить из заданных величин аэродинамического сопротивления и размеров выпускного воздуховода 800 × 800 мм, показывают, что площадь проёма должна составлять 0,32…0,512 м^2. При ширине канала 800 мм его высота варьируется в диапазоне соответственно 400…640 мм. Результатами теоретических исследований подтверждена эффективность функционирования установки в режимах рекуперации и оттаивания с рециркуляцией при размерах рециркуляционного проёма в диапазоне 80…50% от площади вытяжного воздуховода. Сопротивление движению воздуха (подпор) при этом составляет 10…25,7 Па. При выбранных геометрических размерах рециркуляционного проёма и минимальном расходе воздуха в системе 20% создается положительный подпор в пределах 1,0…0,4 Па.

Ключевые слова: вентиляция, микроклимат, оттаивание, рекуперация тепла, рециркуляция, утилизация теплоты

Формат цитирования: Игнаткин И.Ю., Шевкун Н.А., Архипцев А.В., Кожевникова Н.Г., Скороходов Д.М. Об особенностях организации реверсивного оттаивания в рекуператорах теплоты вытяжного воздуха // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 15-19. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-15-19.

Благодарности: *Статья опубликована в ходе выполнения внутриуниверситетского гранта РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева на проведение научно-исследовательских проектов в сфере импортозамещения «Продовольственный суверенитет» рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».*

© Игнаткин И.Ю., Шевкун Н.А., Архипцев А.В., Кожевникова Н.Г., Скороходов Д.М., 2022

ORIGINAL PAPER

ON THE PECULIARITIES OF ORGANIZING REVERSE DEFROSTING IN EXHAUST AIR HEAT RECUPERATORS

IVAN YU. IGNATKIN✉***,*** *DSc (Eng), Associate Professor*
ignatkin@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0003-4867-1973; Scopus Author ID: 57222543815
NIKOLAY A. SHEVKUN, *PhD (Ag), Associate Professor*
energo-shevkun@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7451-7828, Scopus Author ID: 57222576008
ALEKSANDR V. ARKHIPTSEV, *PhD (Eng), Associate Professor*
aarchiptsev@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-6339-3943; Scopus Author ID: 57360996100

NATALYA G. KOZHEVNIKOVA, *PhD (Eng), Associate Professor*
energo-ngk@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-3664-9456
DMITRIY M. SKOROKHODOV, *PhD (Eng), Associate Professor*
d.skorokhodov@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-6315-4184; Scopus Author ID: 57223623999
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. Taking into account the prices of energy resources, one of the ways to solve the problem of energy saving is to reduce heating costs by introducing regenerative heat recovery units. These units reduce heat loss and optimize the operation of climate control systems. To develop a control method and design of a recuperative unit providing defrosting of frozen condensate without using a recirculation damper system, the authors propose a design of a recuperative heat recovery unit with reversible defrosting recuperators and the reverse operation of a supply fan. They also consider design parameters of a recirculation opening in an exhaust air duct. The functioning of the proposed system will create a certain aerodynamic drag, which in the "defrosting" mode should not exceed 20…30 Pa. Theoretical calculations of the recirculation opening parametres based on the specified values of aerodynamic drag and the exhaust duct size of 800 × 800 mm show that the opening area should be range between 0.32 and 0.512 sq.m. This corresponds to a height of 400 to 640 mm with a channel width of 800 mm. The results of theoretical research confirmed the efficiency of the unit operation in the regeneration and defrosting modes with recirculation when the recirculation opening sized ranges between 80 and 50% of the area of an exhaust duct, and the resistance to air movement (back pressure) amounts to 10…25.7 Pa. With the selected geometric dimensions of the recirculation opening and the system's minimum airflow of 20%, a positive air back pressure of 1.0…0.4 Pa is generated.

Keywords: ventilation, indoor climate, defrosting, heat recuperation, recirculation, heat recovery

For citation: Ignatkin I.Yu., Shevkun N.A., Arkhiptsev A.V., Kozhevnikova N.G., Skorokhodov D.M. On the peculiarities of organizing reverse defrosting in exhaust air heat recuperators. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(6): 15-19. (In Rus.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-15-19.

Acknowledgments: *The article publication is funded by an intra-university grant of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy for research projects in the field of import substitution "Food Sovereignty" within the framework of the "Priority 2030" strategic academic leadership program.*

Введение. В условиях устойчивого роста цен на энергетические носители снижение затрат на отопление производственных помещений возможно с помощью утилизации теплоты вытяжного воздуха рекуперативными теплообменниками, конструкция которых исключает возможность перемешивания чистого уличного воздуха и загрязненного вытяжного. Движение потоков приточного и вытяжного воздуха осуществляется в герметичных каналах, а теплообмен происходит через разделяющую стенку [1-8].

При охлаждении теплообменной стенки ниже температуры точки росы в вытяжном канале теплообменника образуется конденсат, а при понижении температуры поверхности теплообменника ниже 0°С конденсат кристаллизуется, что приводит к обмерзанию вытяжного канала [1, 3, 4, 9].

Исключить обмерзание можно предварительным прогревом уличного воздуха посредством электрических или жидкостных калориферов. Однако с экономической точки зрения данный метод является не совсем эффективным, так как усложняется конструкция и требуются дополнительные эксплуатационные затраты на функционирование системы [1, 2, 6].

Альтернативным решением является применение рекуператоров в циклическом режиме «Рекуперация-оттаивание», когда первоначально происходит обмерзание вытяжного канала, а затем, после остановки аппарата, осуществляется его прогрев помещения теплым воздухом до полного оттаивания. Этот принцип реализуется за счёт выключения приточного вентилятора и применения системы клапанов, организующих подачу вытяжного воздуха в рециркуляционном режиме, то есть теплый вытяжной воздух подается в обмерзший теплообменник, плавит лед и далее направляется обратно в помещение. Особенность схемы не позволяет снизить температуру вытяжного воздуха до уличной, поэтому рециркуляционный воздух сохраняет в себе значительный энергетический потенциал.

Решение проблемы обмерзания вытяжного канала, реализуемое в конструкции электротеплоутилизационной установки, обеспечивается за счет подмешивания рециркуляционного воздуха к приточному [10]. В приточный воздуховод из рециркуляционного канала подмешивается часть отработанного воздуха (до 30% от общей воздухоподачи). Возможны реверсирование приточного вентилятора и оттаивание вытяжных каналов теплообменника разогретым ТЭНами воздухом помещения.

Ряд французских и немецких компаний [12] предлагает производить разбалансировку производительностей приточной и вытяжной систем рекуперативной установки за счет снижения расхода холодного приточного воздуха. Однако такое решение является неприемлемым в российских условиях. Это обусловлено тем, что зависимость эффективности утилизации теплоты от расхода носит нелинейный характер:

$$\varepsilon = \frac{t_{\text{пр}} - t_{\text{н}}}{t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}} \cdot \left(\frac{W_{\text{пр}}}{W_{\text{выт}}} \right)^{0,4}, \quad (1)$$

где $t_{пр}$ – температура приточного воздуха на выходе из рекуператора, °С; $t_н$ – температура наружного воздуха, °С; $t_{вн}$ – температура в помещении, °С; $W_{пр}$ – производительность рекуператора по притоку, кг/ч; $W_{выт}$ – производительность рекуператора по вытяжке, кг/ч.

Значительная разбалансировка рекуператора по производительности приточной и вытяжной систем приводит к снижению эффективности, и существенный энергетический потенциал теряется вместе с удаляемым воздухом. Также увеличенный отток воздуха по сравнению с притоком будет приводить к образованию разрежения в производственном помещении, что влечет за собой инфильтрацию, холодные сквозняки и дополнительное снижение энергетической эффективности системы в целом.

Решением проблемы является направление части вытяжного воздуха после теплообмена обратно в помещение через рециркуляционный клапан [11].

Применяемая в рекуператоре система клапанов с приводом и системой управления существенно повышает его стоимость,

а сложность конструкции снижает надежность и требует дополнительных затрат на обслуживание. С учетом того, что в ряде регионов в течение отопительного периода длительность периода стояния отрицательной температуры ниже –10°С составляет от нескольких суток до нескольких часов, это приводит к увеличению сроков окупаемости системы оттаивания, и в целом – системы утилизации теплоты. По этой причине возникает необходимость разработки системы оттаивания рекуперативных теплообменников, обеспечивающей бесперебойную работу установки в наиболее холодный период года с минимальными затратами на ее создание и эксплуатацию.

Цель исследований: разработать метод управления и конструкцию рекуперативной установки, обеспечивающей оттаивание намерзшего конденсата без применения системы рециркуляционных клапанов; обеспечить функционирование системы в режимах «Рекуперация» и «Оттаивание».

Материалы и методы. Решение проблемы замерзания конденсата в вытяжном канале теплоутилизационной установки и его последующего оттаивания без применения дополнительного оборудования и усложнения конструкции в целом возможно за счет изменения схемы управления её работой, а именно за счет перевода приточного вентилятора в реверсивный режим работы.

Предполагается, что в реверсивном режиме вентилятор должен подавать теплый воздух в приточный канал, который будет обеспечивать таяние обмерзшего конденсата с последующим восстановлением работоспособности теплоутилизационной установки. Для этого предлагается автоматизированное теплоутилизационное устройство (рис. 1), состоящее из приточного вентилятора *1*; конденсатоотводчика *2*, размещенного в нижней части корпуса теплообменника для удаления конденсата; вытяжного патрубка *3*, установленного вертикально под теплообменником *4*; приточного воздуховода *5*; вытяжного вентилятора *6*, соединенного с выпускным воздуховодом *7*; рециркуляционного проема *8*; терморегулятора *9* с датчиком температуры *10* вытяжного воздуха после теплообмена, закрепленного на приточном вентиляторе *1*.

Работает установка следующим образом. В режиме рекуперации (рис. 1а) производительность вытяжной и приточной систем равна, и в помещении поддерживается давление, близкое к атмосферному ($P_1 \approx P_A$). Вытяжной воздух, побуждаемый вентилятором, преодолевает сопротивление теплообменника, создает подпор воздуха в рециркуляционном проеме и устремляется вверх. Поскольку температура удаляемого воздуха выше наружной, в воздуховоде возникает естественная тяга (ΔP), способствующая преодолению аэродинамического сопротивления.

При необходимости оттаивания (рис. 1б) вытяжной вентилятор *6* продолжает работать, а приточный вентилятор *1* останавливается и включается с обратным вращением (реверсируется). Это обеспечивает одновременную подачу теплого воздуха в приточный и вытяжной каналы теплообменника *4*. Сигнал для перевода системы в режим оттаивания подает терморегулятор *9* (ТР) – реле времени с термодатчиком. Порог срабатывания настраивается по температуре вытяжного воздуха после теплообмена (*t*, °С), уменьшение температуры вытяжного воздуха ниже критического значения 0…+5°С свидетельствует об обмерзании теплообменника *4* и необходимости включения режима оттаивания.

Намерзший конденсат быстро тает, однако баланс приточной и вытяжной систем нарушается. В помещении образуется разрежение ($P_1 < P_A$), для компенсации которого атмосферный воздух устремляется в вытяжной воздуховод *7* снаружи, создавая подпор для отработанного воздуха. Вытяжной воздух, нагнетаемый вентилятором, смешивается с атмосферным и направляется через рециркуляционный проем *8* в помещение. При этом доля поступающего свежего воздуха во многом определяется сопротивлением (пропускным сечением) рециркуляционного проема: чем оно больше (сечение меньше), тем на большем разрежении стабилизируется система, и наоборот.

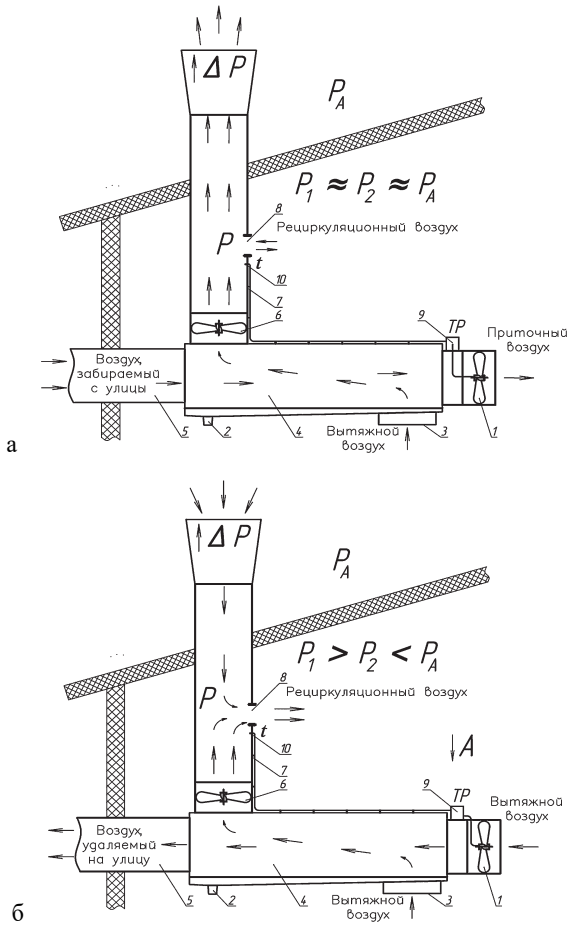


Рис. 1. Схема работы автоматизированного теплоутилизационного устройства в режиме рекуперации (а) и в режиме оттаивания (б):
1 – приточный вентилятор; 2 – конденсатоотводчик; 3 – вытяжная трубка; 4 – теплообменник; 5 – приточный воздуховод; 6 – вытяжной вентилятор; 7 – выпускной воздуховод; 8 – рециркуляционный проем; 9 – терморегулятор; 10 – датчик температуры

Fig. 1. Operating scheme of the automated heat recovery unit in the recovery mode(a) and the defrosting mode(b):
1 – supply fan; 2 – condensate trap; 3 – exhaust pipe; 4 – heat exchanger; 5 – supply air duct; 6 – exhaust fan; 7 – exhaust air duct; 8 – recirculation opening; 9 – thermostat; 10 – temperature sensor

Предполагается, что рециркуляционный проём на выпускном канале теплоутилизационной установки должен иметь площадь проходного сечения на 20…50% меньше площади самого выпускного канала. Границы указанного диапазона обусловлены тем, что при снижении площади сечения рециркуляционного проёма менее 20% от площади поперечного сечения выпускного воздуховода уменьшается аэродинамическое сопротивление выпуска и в зоне рециркуляционного проёма не образуется необходимый подпор выпускного воздуха. В таких условиях под действием естественной тяги и эффекта эжекции часть теплого воздуха помещения будет удаляться на улицу, минуя теплообменник, что снижает эффективность утилизации теплоты системы в целом.

На другой границе диапазона площадей пропускного сечения рециркуляционного проёма (более 50%) значительно увеличивается суммарное аэродинамическое сопротивление

системы, и для его преодоления в режиме оттаивания система стабилизируется при разрежении 20…30 Па и более. Работа системы микроклимата под разрежением более 20 Па приводит к увеличению доли инфильтрации, появлению холодных сквозняков, значительного сопротивления при открывании входных дверей (дополнительно 40…60 Н). Увеличивается доля холодного воздуха в формируемой смеси, что приводит к образованию конденсата (и даже инея) в зоне рециркуляционного проёма.

Результаты и их обсуждение. Для теплоутилизационного устройства производительностью 6000 м^3/ч подходят вентиляторы ВО-8,0 или их аналоги с габаритными размерами 800 × 800 × 550 мм. Размеры выпускного воздуховода в соответствии с размерами вентилятора должны составлять 800 × 800 мм.

Технологично будет рециркуляционный проём выпускного воздуховода изготовить равным по ширине воздуховоду, а изменение площади пропускного сечения обеспечить варьированием высоты. Приняв во внимание размеры выпускного воздуховода 800 × 800 мм, получим его площадь, равную 0,64 м^2. Из указанных ранее предложений варьирования проходного сечения рециркуляционного проёма в пределах от 20 до 50% следует, что 20% будет соответствовать площадь 0,512 м^2 с размерами проема 800 × 640 мм, а 50% – площадь 0,32 м^2 с размерами 800 × 400 мм.

С энергетической точки зрения для обеспечения функционирования системы в режимах «Рекуперация» и «Оттаивание» проём должен создавать подпор (аэродинамическое сопротивление), обеспечивающий удаление вытяжного воздуха наружу в режиме рекуперации, не превышающее 20…30 Па в режиме оттаивания. Возникает необходимость теоретического подтверждения удаления вытяжного воздуха через рециркуляционный проём с заданными геометрическими размерами. В этих целях согласно схеме установки, представленной на рисунке 1, необходимо определить потери давления на участке выпускного воздуховода от вентилятора до выхода. Для этого участка характеры потери по длине и потери на местных сопротивлениях (выход из вентилятора, проём, выход).

Суммарное аэродинамическое сопротивление может быть определено по формуле:

$$\Delta p_{\text{вып}} = 0{,}1266\,\mathrm{Re}^{-0{,}167}\frac{L}{D_{\text{тр}}}\upsilon_1^2 + \xi_{\text{вых}1}\frac{\bar{\rho}\upsilon_1^2}{2} + \xi_{\text{пр}}\frac{\rho_{\text{вн}}\upsilon_2^2}{2} + \xi_{\text{вых}2}\frac{\bar{\rho}\upsilon_2^2}{2} - \Delta p_{\text{ест}},$$

где $\xi_{\text{вых}1}$, $\xi_{\text{вых}2}$ – коэффициенты местных сопротивлений выхода закрытой и свободной затопленной струи (0,5 и 1); $\xi_{\text{пр}}$ – коэффициент местного сопротивления проема; υ_1, υ_2 – скорость движения воздуха до проёма и после него, м/с; $\Delta p_{\text{ест}}$ – естественная тяга, Па (1…4 Па в зависимости от температуры наружного воздуха).

В зависимости от расхода вытяжного и температуры наружного воздуха суммарное сопротивление за вычетом естественной тяги составляет 1…5 Па.

Подпор со стороны рециркуляционного проёма можно вычислить по формуле:

$$\Delta p_{\text{пр}} = \xi_{\text{пов}}\frac{\bar{\rho}\upsilon_1^2}{2} + \xi_{\text{пр}}\frac{\rho_{\text{вн}}\upsilon_3^2}{2},$$

где $\xi_{\text{пов}}$, $\xi_{\text{пр}}$ – коэффициенты местных сопротивлений поворота и выхода свободной затопленной струи (0,5 и 1); υ_1, υ_3 – скорость движения воздуха в воздуховоде и выходящей струе, м/с.

Сопротивление потока изменяется в зависимости от размеров проёма шириной b = 800 мм, высотой h = 400…640 мм и расхода воздуха, который может варьироваться от 0 до 100% от максимальной производительности установки 6000 м^3/ч. Результаты расчетов приведены в таблице.

Таблица

Сопротивление рециркуляционного проёма шириной 0,8 м и высотой *h*, м в зависимости и расхода воздуха, $\Delta p_{\text{пр}}$, Па

Table

Resistance of the recirculation opening with a width of 0.8 m and a height *h*, m depending on the air flow, Δp_{pr}, Pa

Расход воздуха от максимальной производительности, % *Air consumption at maximum performance, %*	**Высота проёма** *h*, м / *Opening height h, m*					
	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,64
100	25,7	20,3	16,5	13,6	11,4	10,0
90	20,8	16,5	13,3	11,0	9,3	8,1
80	16,5	13,0	10,5	8,7	7,3	6,4
70	12,6	10,0	8,1	6,7	5,6	4,9
60	9,3	7,3	5,9	4,9	4,1	3,6
50	6,4	5,1	4,1	3,4	2,9	2,5
40	4,1	3,2	2,6	2,2	1,8	1,6
30	2,3	1,8	1,5	1,2	1,0	0,9
20	1,0	0,8	0,7	0,5	0,5	0,4
10	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1

На основании данных таблицы построена поверхность распределения потерь давления на сопротивление рециркуляционного проёма в зависимости от высоты проёма и варьирования расхода воздуха от 0 до 100% (рис. 2).

Полученные расчеты подтверждают, что при площади рециркуляционного проёма, соответствующего 20…50% площади выпускного воздуховода, сопротивление движению воздуха (подпор) не превышает 30 Па. Создание положительного подпора не менее 1,0…0,4 Па, обеспечивающего удаление вытяжного воздуха через рециркуляционный проём, начинается при производительности установки, равной 20% от максимальной.

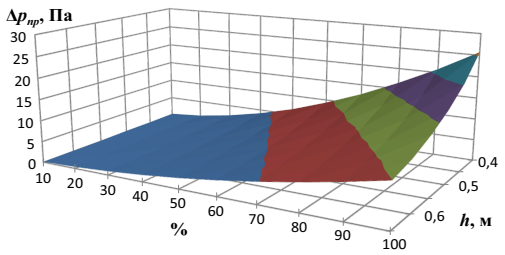


Рис. 2. Поверхность распределения потерь давления на сопротивление рециркуляционного проёма

Fig. 2. Surface of the distribution of pressure losses on the resistance of the recirculation opening

Выводы

1. Разработанный метод управления и конструкция рекуперативной установки обеспечивают оттаивание намерзшего конденсата без применения системы рециркуляционных клапанов.

2. Теоретически подтверждена эффективность функционирования установки в режимах рекуперации и оттаивания с рециркуляцией при размерах рециркуляционного проёма в диапазоне 80…50% от площади вытяжного воздуховода, при котором сопротивление движению воздуха (подпор) составляет 10…25,7 Па.

3. Положительный подпор не менее 1,0…0,4 Па, обеспечивающий удаление вытяжного воздуха на улицу, достигается при расходе воздуха через рециркуляционный проём, равном 20% и более от максимальной производительности.

Список использованных источников

1. Мишуров Н.П., Кузьмина Т.Н. Энергосберегающее оборудование для обеспечения микроклимата в животноводческих помещениях. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2004. 93 с. EDN: OUETUZ.

2. Тихомиров Д.А. Методика теплоэнергетического расчета энергосберегающей вентиляционно-отопительной установки для животноводческих ферм // Альтернативная энергетика и экология: Международный научный журнал. 2013. № 2 (119). С. 125-131. EDN: PXCYUF.

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

4. Игнаткин И.Ю., Бондарев А.М.,. Курячий М.Г., Путан А.А., Архипцев А.В. Опыт внедрения системы рекуперации тепла вентиляционного воздуха в систему поддержания микроклимата в свинарнике ООО «Фирма Мортадель» // Инновации в сельском хозяйстве. 2014. № 4 (9). С. 256-261. EDN: TAOTIT.

5. Расстригин В.Н., Тихомиров А.В., Тихомиров Д.А., Першин А.Ф. Система микроклимата с теплоутилизатором и озонатором воздуха // Техника в сельском хозяйстве. 2005. № 4. С. 7-10. EDN: ZMRZJB.

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

7. Шацкий В.П., Гулевский В.А. О некоторых аспектах моделирования работы пластинчатых теплообменников // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2011. № 12 (636). С. 84-90.

8. Игнаткин И.Ю. Оценка эффективности рекуперации теплоты в свинарнике-откормочнике ООО «Фирма Мортадель» // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ имени В.П. Горячкина. 2016. № 1 (71). С. 14-20. EDN: VNXNMH.

9. Шацкий В.П., Гулевский В.А. Моделирование теплообмена в пластинчатых теплообменниках // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2012. № 2 (33). С. 140-143. EDN: RWLXIX.

10. Электротеплоутилизационная установка: RU2296463 C1 № 2005134261/12 / В.Н. Расстригин, Д.А. Тихомиров, А.В. Сычков; заявл. 08.11.2005; опубл. 10.04.2007, Бюл. № 10. EDN: FECBAU.

11. Игнаткин И.Ю. Теплоутилизационная установка с адаптивной рециркуляцией // Вестник НГИЭИ. 2016. № 10 (65). С. 102-110. EDN: WXBXRN.

12. Кирсанов В.В., Игнаткин И.Ю. Энергосбережение при обеспечении микроклимата в свиноводстве. М., 2020. 178 с.

References

1. Mishurov N.P., Kuz'mina T.N. Energy-saving equipment for providing a microclimate in livestock buildings. Moscow, Rosinformagrotekh, 2004. 96 p. (In Rus.)

2. Tikhomirov D.A. Method of heat and power analysis of a energy-saving ventilation and heating installation for livestock farms. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*. 2013; 2 (119): 125-131. (In Rus.)

3. Shackiy V.P., Gulevskiy V.A., Spirina N.G. Use of heat exchangers (recuperators) to normalize the microclimate of livestock buildings. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2013; 9: 64-68. (In Rus.)

4. Ignatkin I.Yu., Bondarev A.M., Kuryachiy M.G, Putan A.A., Arhiptsev A.V. Experience of implementing a ventilation air heat recovery system in a climate control system used in a pigsty of LLC "Firma "Mortadel". *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2014; 4: 256-261. (In Rus.)

5. Rasstrigin V.N., Tikhomirov A.V., Tikhomirov D.A., Pershin A.F. Cimate control system with a heat exchanger and an air ozonator. *Tekhnika v sel'skom khozyaystve.* 2005; 4: 7-10. (In Rus.)

6. Tikhomirov D.A. Ventilation and heating unit of a modular type. *Selskiy mekhanizator*. 2012; 9: 32-33 (In Rus.)

7. Shatskiy V.P., Gulevskiy V.A. On some aspects of modeling the operation of plate-type heat exchangers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo.* 2011; 12: 84-90. (In Rus.)

8. Ignatkin I.Yu. Evaluation of the efficiency of heat recovery in the fattening pigsty of "Firma Mortadel" LLC. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University.* 2016; 1 (71): 14-20. (In Rus.)

9. Shatskiy V.P., Gulevskiy V.A. Modeling heat transfer in plate-type heat exchangers. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2012; 2(33): 140-143. (In Rus.)

10. Rasstrigin V.N., Tikhomirov D.A., Sychkov A.V. Electric heat recovery unit: patent RU2296463 C1 No. 2005134261/12, 2007.

11. Ignatkin I.Yu. Heat recovery unit with adaptive recirculation. *Vestnik NGIEI*. 2016; 10 (65): 102-110. (In Rus.)

12. Kirsanov V.V., Ignatkin I.Yu. Energy saving while providing the required climate conditions in pig breeding. Moscow, 2020. 178 p. (In Rus.)

Критерии авторства

Игнаткин И.Ю., Шевкун Н.А., Архипцев А.В., Кожевникова Н.Г., Скороходов Д.М. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов подготовили рукопись. Игнаткин И.Ю., Шевкун Н.А., Архипцев А.В., Кожевникова Н.Г., Скороходов Д.М. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 30.08.2022

Одобрена после рецензирования 11.10.2022

Принята к публикации 25.10.2022

Contribution

I.Yu. Ignatkin, N.A. Shevkun, A.V. Arkhiptsev, N.G. Kozhevnikova and D.M. Skorokhodov performed theoretical studies and, based on the results obtained wrote the manuscript. I.Yu. Ignatkin, N.A. Shevkun, A.V. Arkhiptsev, N.G. Kozhevnikova and D.M. Skorokhodov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 30.08.2022

Approved after reviewing 11.10.2022

Accepted for publication 25.10.2022

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 621.432.3:681.518.5
DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-20-24

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОИСКА НЕИСПРАВНОСТИ ПРИ УДАЛЕННОЙ ДИАГНОСТИКЕ

ЩУКИНА ВАРВАРА НИКОЛАЕВНА✉***,*** *канд. техн. наук*
firstnotbarbara@gmail.com✉; https://orcid.org/0000-0002-3344-0358
ДЕВЯНИН СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ, *д-р техн. наук, профессор*
devta@rambler.ru; https://orcid.org/0000-0001-6776-0432
КАЗАНЦЕВ СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ, *д-р техн. наук, профессор*
kspts@bk.ru; https://orcid.org/0000-0002-7158-1709
ПЕРЕВОЗЧИКОВА НАТАЛИЯ ВАСИЛЬЕВНА, *канд. техн. наук, доцент*
n.perevozchikova@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-8529-5631
Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. В настоящее время все более широкое распространение получает удаленная диагностика транспортных средств, позволяющая анализировать данные с уже установленных датчиков, без вмешательства в конструкцию транспортного средства, и выводить только необходимую информацию для поддержания надлежащего уровня технического состояния транспортного средства. С целью разработки алгоритма удаленной диагностики, проводимой в процессе эксплуатации техники без установки дополнительных датчиков на двигателе, с использованием диагностических показателей, контроля расхода топлива и метода выбега, проведены исследования диагностики работы двигателя на холостом ходу. Для анализа технического состояния двигателя и апробации разработанного алгоритма специально последовательно вносились две неисправности: сопротивление впуску воздуха («Засоренный фильтр») и отсутствие подачи топлива в цилиндр («Неисправная форсунка»). Разработанный алгоритм направлен на разделение неисправностей в двигателе внутреннего сгорания, связанных с механическими потерями и ухудшением его технико-экономических характеристик. Для апробации разработанного алгоритма использовалась экспериментальная установка на базе дизельного двигателя внутреннего сгорания IVECO F4HE9687P*J101, позволяющая исследовать работу двигателя в технически исправном состоянии и при специально вносимых неисправностях. Результаты экспериментов показали адекватность разработанного алгоритма диагностики и необходимость его внедрения.

Ключевые слова: удаленная диагностика, диагностика двигателя внутреннего сгорания, механические потери, метод выбега

Формат цитирования: Щукина В.Н., Девянин С.Н., Казанцев С.П., Перевозчикова Н.В. Разработка алгоритма поиска неисправности при удаленной диагностике // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 20-24. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-20-24.

© Щукина В.Н., Девянин С.Н., Казанцев С.П., Перевозчикова Н.В., 2022

ORIGINAL PAPER

DESIGNING A FAULT FINDING ALGORITHM FOR REMOTE DIAGNOSTICS

VARVARA N. SHCHUKINA✉***,*** *PhD* (*Eng*)
firstnotbarbara@gmail.com✉; https://orcid.org/0000-0002-3344-0358
SERGEY N. DEVYANIN, *DSc* (*Eng*)*, Professor*
devta@rambler.ru; https://orcid.org/0000-0001-6776-0432
SERGEY P. KAZANTSEV, *DSc* (*Eng*)*, Professor*
kspts@bk.ru; https://orcid.org/0000-0002-7158-1709
NATALIA V. PEREVOZCHIKOVA, *PhD* (*Eng*)*, Associate Professor*
n.perevozchikova@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-8529-5631
Russian State Agrarian University – K.A. Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127550, Russian Federation

Abstract. Remote diagnostics of vehicles is currently becoming increasingly widespread. The application of this concept will allow analyzing data from pre-installed sensors, without interfering with the vehicle design, doing it remotely and displaying only the necessary information to maintain the proper level of the vehicle's technical condition. To develop an algorithm for remote diagnostics carried out during the operation of machinery without installing additional sensors on the engine, using diagnostic indicators, the retardation method, and monitoring fuel consumption rate, the authors carried out the engine diagnostics at the idling speed. To analyse the technical state of the engine and to test the developed algorithm, two faults were intentionally sequentially introduced: air inlet resistance ("Clogged

filter") and no fuel supply into the cylinder ("Faulty injector"). The developed algorithm aims at distinguishing faults in the internal combustion engine associated with mechanical losses and the deterioration of its technical and economic performance. An experimental installation on the basis of the diesel engine of internal combustion IVECO F4HE9687P*J101 was used for approbation of the developed algorithm. This installation can examine the operation of technically serviceable engines having intentionally introduced defects. The experimental results have proved the adequacy of the developed diagnostic algorithm and the feasibility of its introduction.

Keywords: remote diagnostics, internal combustion engine diagnostics, mechanical losses, retardation method

For citation: Shchukina V.N., Devyanin S.N., Kazantsev S.P., Perevozchikova N.V. Designing a fault finding algorithm for remote diagnostics. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(6): 20-24. (In Rus.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-20-24.

Введение. В современных мобильных машинах установлена электронная система управления, в которую входят датчики и реле, позволяющие контролировать состояние различных узлов и систем машины. Информация с этих датчиков стекается в электронный блок управления [1], к которому необходимо подключить сканер для считывания информации с датчиков. Анализ технического состояния машины зависит от возможностей сканера получать расширенные показатели для одной или группы моделей. Отсутствие специализированного сканера не позволяет постоянно в процессе эксплуатации контролировать техническое состояние машин. К тому же это оборудование является весьма дорогостоящим [2], поэтому необходимо разрабатывать более универсальные и менее затратные методы диагностирования.

Одним из важных частей транспортного средства является двигатель, работу которого можно контролировать, отслеживая показатели расхода топлива [3]. Контроль расхода топлива позволяет следить за различными процессами, протекающими в двигателе: износом различных составных частей двигателя, экономичностью расхода топлива, экологичностью выхлопа и др. – словом, помогает проследить за качественной работой двигателя и рассчитать изменение механических потерь. Благодаря современным системам управления можно постоянно контролировать расход топлива в двигателе [4] и отслеживать его изменение во время эксплуатации.

Для разработки простой и эффективной системы удаленной диагностики можно воспользоваться информацией с установленных производителем датчиков [5]. Анализ данной информации по разработанному алгоритму позволит косвенно судить о техническом состоянии различных узлов и систем двигателя без установки дополнительных датчиков.

Для выбора режима диагностики проанализированы режимы работы двигателя под нагрузкой и без нагрузки. Поскольку при работе двигателя под нагрузкой сложно контролировать ее изменение, принято решение использовать режим без нагрузки – режим холостого хода. При эксплуатации различных видов техники подсчитана доля работы различных типов автотранспортных средств на холостом ходу[1]:

– легковой автомобиль (до 3,5 т) – 16%;
– грузовой автомобиль (свыше 3,5 т) –17%;
– городской автобус – 23%;
– сельскохозяйственная техника – 25%.

Отметим, для сельскохозяйственной техники время работы на режиме холостого хода составляет 25%, то есть 1/4 от всего времени работы. Это существенная часть от времени работы, поэтому использовать режим холостого хода для диагностирования технического состояния, не прерывая процесс работы, достаточно выгодно и удобно.

[1] ISO 8178-4-2013. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Ч. 4. Испытательные циклы для двигателей различного применения на установившихся режимах. М.: Стандартинформ, 2014. 23 с.

Цель исследований: разработать алгоритм удаленной диагностики, проводимой в процессе эксплуатации техники без установки дополнительных датчиков на двигателе; осуществить экспериментальную апробацию предложенного алгоритма.

Материалы и методы. Работа двигателя на холостом ходу направлена на преодоление механических потерь, поэтому необходимо выбрать методы диагностики этих потерь.

Анализ различных методов определения механических потерь в двигателе показал, что самыми применимыми в процессе эксплуатации являются проведение выбега и контроль расхода топлива [6].

Для мониторинга механических потерь методом контроля расхода топлива необходимо представить зависимость одного от другого. Исходя из теории двигателей внутреннего сгорания [7]

$$N_i = const \cdot n \cdot g_ц \cdot \eta_i, \quad (1)$$

где Ni – индикаторная мощность, Вт; n – частота вращения коленчатого вала, об/мин; $g_ц$ – цикловая подача топлива, кг/цикл; η_i – индикаторный коэффициент полезного действия (КПД).

В константу входят число цилиндров, тактность двигателя и теплотворная способность топлива. Для каждого двигателя, эксплуатируемого на определенном топливе, существует своя константа.

При работе двигателя на холостом ходу вся производимая двигателем индикаторная мощность направлена на механические потери [8]. Исходя из этого из выражения (1) можно получить цикловую подачу топлива:

$$g_ц = \frac{N_м}{const \cdot n \cdot \eta_i}. \quad (2)$$

Согласно выражению (2) при работе двигателя на контролируемой частоте вращения и на известном качестве топлива изменение цикловой подачи топлива зависит от изменения мощности механических потерь и индикаторного КПД.

Изменение расхода топлива будет свидетельствовать о наличии неисправности, которая в свою очередь зависит либо от механических потерь, либо от индикаторного КПД. Поэтому необходимо применение второго метода определения механических потерь – метода выбега.

Метод выбега основывается на определении механических потерь с помощью измерения угловой частоты вращения при резком отключении подачи топлива. Время замедления частоты вращения зависит от момента сопротивления и от момента инерции вращающихся масс:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{N_м \omega}{J} = \frac{M_c}{J}, \quad (3)$$

где ε – угловое ускорение/замедление, с$^{-2}$; ω – угловая частота вращения, с$^{-1}$; $N_м$ – мощность механических потерь двигателя, Вт; M_c – момент сопротивления, Н·м; J – момент инерции вращающихся масс, кг·м^2.

Поскольку массу двигателя можно считать постоянной, момент инерции вращающихся масс тоже будет величиной неизменной. Изменение времени падения угловой частоты вращения напрямую зависит от изменения показателей механических потерь двигателя.

Для определения отклонения цикловой подачи топлива, возникающего при появлении неисправности, необходимо найти отношение подачи неисправного двигателя к исправному. Поскольку двигатель один, неизменяемые показатели в отношении (2) сократятся, а мощность механических потерь можно выразить как (3) – через угловое ускорение. Выражение для расчета изменения цикловой подачи топлива примет вид:

$$\Delta g = \frac{\eta_{iэ}}{\eta_{iН}} \cdot \frac{\varepsilon_Н}{\varepsilon_э}, \quad (4)$$

где Δg – изменение цикловой подачи топлива; $\eta_{iэ}$ – индикаторный КПД для эталонного двигателя; $\eta_{iн}$ – индикаторный КПД для неисправного двигателя; $\varepsilon_н$ – угловое ускорение для неисправного двигателя $\varepsilon_э$ – угловое ускорение для исправного двигателя.

Для удобства дальнейших расчетов отношение изменения цикловой подачи предлагается считать диагностическим показателем $Д_1$, а отношение угловых ускорений для исправного и неисправного двигателя – $Д_2$. Тогда отношение (4) примет вид:

$$Д_1 = \frac{\eta_{iэ}}{\eta_{iн}} \cdot Д_2. \quad (5)$$

Чтобы оценить влияние мощности механических потерь и индикаторного КПД, предлагается рассчитывать их влияние на изменение расхода топлива в долях:

$$\delta_1 = Д_2 - 1; \quad (6)$$

$$\delta_2 = Д_1 / Д_2 - 1, \quad (7)$$

где δ_1 – оценка влияния мощности механических потерь; δ_2 – оценка влияния индикаторного КПД.

Порядок диагностики двигателя внутреннего сгорания. На первом этапе диагностики постоянно контролируется расход топлива на холостом ходу. Исключение составляет процесс пуска и прогрева двигателя, так как работа идет еще на неустановившихся режимах. Постоянно сравнивается расход топлива, который есть в данный момент, с эталонным расходом топлива. Если значения действительного расхода топлива не выходят за границы допуска, то двигатель считается исправно работающим и в дальнейшей диагностике нет необходимости. Если значения действительного расхода топлива превышают границы допуска, необходимо переходить ко второму этапу оценки технического состояния двигателя – к выбегу и расчету диагностического показателя $Д_2$.

Для определения причины неисправности (это факторы, влияющие либо на механические потери, либо на индикаторные показатели) необходимо сравнить два диагностических показателя. Равенство показателей (или если их значения близки) свидетельствует о возникновении неисправности в узлах и агрегатах, оказывающих влияние на мощность механических потерь.

В случае, когда изменение цикловой подачи превышает изменение углового ускорения ($Д_1 > Д_2$) или когда $Д_2 = 1$, можно судить о неисправности в двигателе, возникшей по причине появления проблем с факторами, влияющими на индикаторные показатели.

В случае $Д_2 > 1$ и $Д_1 \neq Д_2$ неисправность в двигателе возникла ввиду факторов, влияющих на индикаторные показатели и на мощность механических потерь.

Для апробации разработанного алгоритма собрана установка на базе дизельного двигателя внутреннего сгорания IVECO F4HE9687P*J101 (максимальная мощность – 175 кВт, максимальный крутящий момент – 1020 Н · м) [9]. Для фиксации и анализа значений использовалась современная вычислительная техника [10].

Результаты и их обсуждение. Для сравнения экспериментально полученных данных в процессе диагностики с показателями эталонного двигателя построены эталонные поверхности для исправного двигателя на режиме холостого хода (рис. 1, 2).

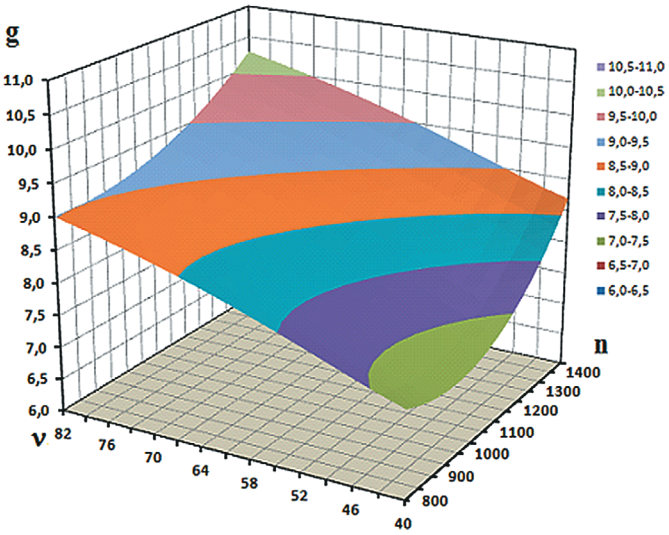


Рис. 1. Эталонная поверхность изменения цикловой подачи топлива в зависимости от вязкости (ν, сСт) и частоты вращения (n, мин$^{-1}$)

Fig. 1. Reference surface of the change in cyclic fuel supply, depending on viscosity (ν, cSt) and speed (n, min^{-1})

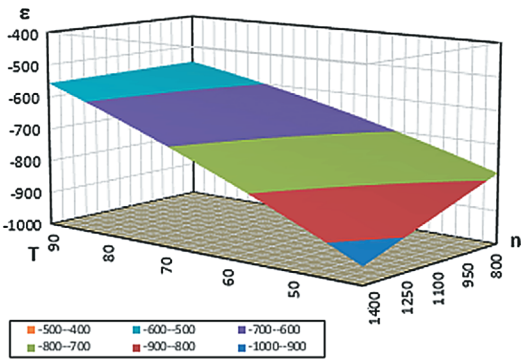


Рис. 2. Эталонная поверхность изменения углового ускорения (ε, с$^{-2}$) в зависимости от температуры (T, °C) и частоты вращения (n, мин$^{-1}$)

Fig. 2. Reference surface of the change in angular acceleration (ε, s^{-2}), depending on temperature (T, °C) and speed (n, min^{-1})

Для анализа технического состояния двигателя и апробации разработанного алгоритма специально последовательно вносились неисправности, влияющие на механические потери и индикаторные показатели. Первая неисправность – сопротивление впуску воздуха («Засоренный фильтр»), вторая – отсутствие подачи топлива в цилиндр («Неисправная форсунка»). Двигатель, который был использован на испытательном стенде, оснащен собственной системой диагностики, и кодов ошибок в процессе испытаний обнаружено

не было. При внесении каждой неисправности двигатель приводился в исправное состояние.

При экспериментальной апробации диапазон измерений частоты вращения находился в границе значений 700…1550 мин$^{-1}$, шаг измерений составлял 100 мин$^{-1}$, диапазон температур работы двигателя – 20…95°С. Фиксировались различные показатели двигателя, самыми главными из которых были цикловая подача топлива, температура масла и расход воздуха. Эталонные значения сравнивались со значениями, полученными при внесении неисправностей. Построены графики, показывающие отклонение цикловой подачи от эталонной подачи топлива при разной температуре масла (рис. 3).

На графиках рисунка 3 зафиксирован выход за границу допуска отклонений, установленную на проводимые эксперименты в 10%. Исходя из этого техническое состояние двигателя можно считать неисправным. Нужно приступать ко второму шагу диагностирования причины появления поломки. Для этих целей был рассчитан первый показатель $Д_1$. На построенных графиках отмечены значения показателя для температур масла 60 и 70°С.

На следующем шаге диагностики (выбеге) к электронному блоку управления двигателем был подключен сканер Delphi, с помощью которого отключалась подача топлива и фиксировались значения частоты вращения до прекращения работы двигателя. На данном этапе был определен диагностический показатель $Д_2$. График зависимости момента сопротивления от угловой скорости для исправного двигателя (кривая 1) и для неисправного (кривая 2) представлен на рисунке 4, где также приведён характер изменения показателя $Д_2$ (кривая 3).

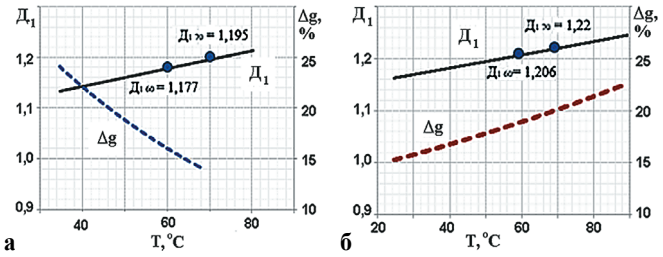


Рис. 3. Отклонение цикловой подачи от эталонной подачи топлива в процессе работы двигателя:
а – неисправность «Засоренный фильтр»;
б – неисправность «Неисправная форсунка»

Fig. 3. Deviation of the cyclic supply from the reference fuel supply during the engine operation:
a – *malfunction* "*Clogged filter*"; *b – malfunction "Faulty injector"*

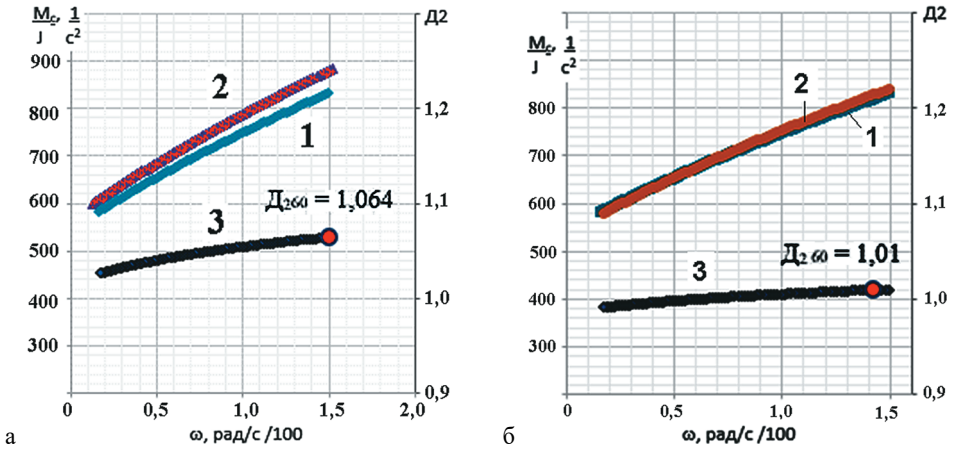


Рис. 4. Экспериментально полученные кривые при проведении выбега:
а – неисправность «Засоренный фильтр»; б – неисправность «Неисправная форсунка»

Fig. 4. Experimentally obtained curves when using the retardation method:
a – *malfunction "Clogged filter"; b – malfunction* "Faulty injector"

В таблице приведены значения диагностических показателей $Д_1$ и $Д_2$ для температур 60 и 70°С, рассчитано влияние мощности механических потерь и индикаторного КПД на отклонение от эталонного показателя расхода топлива с помощью показателей δ_1 и δ_2

Анализ неисправности «Засоренный фильтр» показал, что рост расхода топлива увеличивается пропорционально с ростом мощности механических потерь двигателя (рост составил 5…6% от эталонных значений) и с уменьшением индикаторного КПД (уменьшение составило 11…13% от эталонных значений).

Объяснить отклонение мощности механических потерь можно затрудненным впуском воздуха, ввиду чего увеличилась работа поршня на этапе насосного хода.

Уменьшение индикаторного КПД можно объяснить ухудшением воспламенения топливно-воздушной смеси по причине затрудненного впуска, при котором давление и температура в конце сжатия понизились.

Таблица

Значения диагностических показателей $Д_1$ и $Д_2$

Table

Values of diagnostic indicators D1 and D2

Показатель *Index*	**Неисправность «Засоренный фильтр»** *Malfunction "Clogged filter"*		**Неисправность «Неисправная форсунка»** *Malfunction "Faulty injector"*	
	60°С	70°С	60°С	70°С
$Д_1$	1,177	1,195	1,206	1,22
$Д_2$	1,064	1,054	1,01 ≈ 1	0,995 ≈ 1
δ_1	1,064	1,054	0	0
δ_2	0,11	0,13	0,21	0,22

Анализ неисправности «Неисправная форсунка» показал, что мощность механических потерь в двигателе не изменилась. Поэтому изменению расхода топлива способствовали

только факторы, влияющие на индикаторный КПД (уменьшение показателя составило 21…22% от эталонных значений).

Объяснить падение индикаторного КПД можно работой двигателя на уменьшенном количестве форсунок 5 из 6. В теории это должно привести к увеличению подачи топлива в 6/5 раза, или на 20%, что и было получено на практике.

Предложенный алгоритм выявления причины неисправности может применяться в удаленном диагностировании технического состояния транспортных средств.

При удаленной диагностике с использованием разработанного алгоритма для связи транспортного средства с различными службами (сервер, оператор, станция технического обслуживания) на электронный блок управления предлагается установить приёмно-передающее устройство. Данные с электронного блока управления с помощью приемно-передающего устройства будут передаваться на сервер для дальнейшего хранения и анализа. Если произойдет поломка или ресурс любого узла либо агрегата будет заканчиваться, проанализированные данные будут передаваться лицам, принимающим решения (станция технического облуживания, водитель и т.п.), для устранения поломки. Преимуществом данной системы будет оперативность и независимость от стационарных методов диагностики.

Выводы

Предложенный алгоритм диагностики двигателя внутреннего сгорания, адекватность работы которого доказана экспериментальными данными, позволяет удаленно судить о техническом состоянии двигателя с помощью диагностических показателей $Д_1$ (оценки изменения цикловой подачи) и $Д_2$ (оценки изменения углового ускорения). Сравнение этих двух показателей позволяет выявить первоисточник неисправности.

Список использованных источников

1. Тихомиров М.В., Шаров Д.Н., Крутов В.В., Соколов О.Н., Хрящёв Ю.Е. Анализ методов автоматической диагностики транспортных дизелей // История и перспективы развития транспорта на севере России. 2012. № 1. С. 136-139. EDN: REOBNZ
2. Долгов И.А., Александров А.В. Мобильный комплекс для регистрации и обработки параметров работы автомобильного двигателя // Журнал автомобильных инженеров. 2017. № 2 (103). С. 11-17. EDN: YQFRLV.
3. Уханов А.П., Тимохин С.В., Уханов Д.А., Данилин А.М. Экономия топлива при эксплуатации автотракторных средств на холостом ходу // Новые промышленные технологии. 2004. № 2. С. 26-27.
4. Martyr A.J., Plint M.A. Engine testing: The design, building, modification and use of powertrain test facilities. US: Elsevier, 2012. 571 p.
5. Добролюбов И.П., Савченко О.Ф., Ольшевский С.Н. Оптимизация обнаружения и измерения параметров ДВС измерительной экспертной системой // Ползуновский вестник. 2011. № 2-2. С. 275-279. EDN: PBPJEF
6. Щукина В.Н. Анализ методов определения механических потерь для их последующего применения в процессе эксплуатации // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2016. № 5 (75). С. 18-22. EDN: WMULAT.
7. Ананьин А.Д. Диагностика и техническое обслуживание машин: Учебник / А.Д. Ананьин, В.М. Михлин, И.И. Габитов и др. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 432 с. EDN: QCEIGN.
8. Лобанов П.В., Кривцов С.Н. К вопросу определения допустимых значений диагностических параметров, функционально связанных с параметрами технического состояния аккумуляторной топливоподающей системы дизельного двигателя автомобиля // Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации: Сборник материалов 99-й Международной научно-технической конференции. 2017. С. 421-427. EDN: YSXVNZ.
9. Iveco. NEF Tier 3 series. Technical and repair manual. Milan: Satiz technical publishing, 2007. 580 p.
10. Девянин С.Н., Щукина В.Н., Павлов Я.Д., Симоненко А.Н. Экспериментальная установка с дизельным двигателем IVECO // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2018. № 3 (85). С. 30-34. https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-3-30-34

References

1. Tikhomirov M.V., Sharov D.N., Krutov V.V., Sokolov O.N., Khryashchov Yu.E. Analysis of methods for estimating the cost of diesel engines. *Istoriya i perspektivy razvitiya transporta na severe Rossii*. 2012; 1: 136-139. (In Rus.)
2. Dolgov I.A., Aleksandrov A.V. Mobile unit for registration and processing of the vehicle engine parameters. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov*. 2017; 2(103): 11-17. (In Rus.)
3. Ukhanov A.P., Timokhin S.V., Ukhanov D.A., Danilin A.M. Fuel economy during the idle operation of autotractor vehicles. *Novye promyshlennye tekhnologii*. 2004; 2: 26-27. (In Rus.)
4. Martyr A.J., Plint M.A. Engine testing: The design, building, modification and use of powertrain test facilities. US: Elsevier, 2012. 571 p.
5. Dobrolyubov I.P., Savchenko O.F., Ol'shevskiy S.N. Optimizatsiya obnaruzheniya i izmereniya parametrov DVS izmeritel'noy ekspertnoy sistemoy [Optimizing the detection and measurement of internal combustion engine parameters by a measuring expert system]. *Polzunovskiy vestnik*. 2011; 2-2: 275-279. (In Rus.)
6. Shchukina V.N. Analysis of methods for determining mechanical losses for their subsequent use in the process of operation. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2016; 5(75): 18-22. (In Rus.)
7. Ananin A.D., Mikhlin V.M., Gabitov I.I. et al. Diagnostics and maintenance of vehicles: study manusl for university students. Moscow, Izdatel'skiy tsentr "Akademiya", 2008. 432 p. (In Rus.)
8. Lobanov P.V., Krivtsov S.N. On the issue of determining the permissible values of diagnostic parameters functionally related to the technical condition parameters of the battery fuel supply system of a vehicle diesel engine. *Bezopasnost' kolesnykh transportnykh sredstv v usloviyakh ekspluatatsii*: *Sbornik materialov 99-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsi.* 2017: 421-427. (In Rus.)
9. Iveco. NEF Tier 3 series. Technical and repair manual. Milan: Satiz technical publishing, 2007. 580 p.
10. Devyanin S.N., Shchukina V.N., Pavlov Ya.D., Simonenko A.N. Experimental installation with an IVECO diesel engine. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2018; 3(85): 30-34. https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-3-30-34 (In Rus.)

Критерии авторства

Щукина В.Н., Девянин С.Н., Казанцев С.П., Перевозчикова Н.В. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Щукина В.Н., Девянин С.Н., Казанцев С.П., Перевозчикова Н.В. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 21.04.2022

Одобрена после рецензирования 16.05.2022

Принята к публикации 30.06.2022

Contribution

V.N. Shchukina, S.N. Devyanin, S.P. Kazantsev and N.V. Perevozchikova performed theoretical studies and, based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. V.N. Shchukina, S.N. Devyanin, S.P. Kazantsev and N.V. Perevozchikova have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 21.04.2022

Approved after reviewing 16.05.2022

Accepted for publication 30.06.2022

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.3.02:004.89
DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-25-31

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

НИКИТЧЕНКО СЕРГЕЙ ЛЕОНИДОВИЧ✉**,** *канд. техн. наук, доцент* [1]
binom_a@rambler.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-4480-9659; Scopus Author ID: 57203408315
ГРИНЧЕНКОВ ДМИТРИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ, *канд. техн. наук, доцент* [2]
grindv@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-0748-6096; Scopus Author ID: 57170803600

[1] Ростовский государственный университет путей сообщения; 344038, Российская Федерация, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2

[2] Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова; 346428, Российская Федерация, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132

Аннотация. Бесперебойное использование сельскохозяйственной техники в период полевых работ обеспечивается поддержанием работоспособного состояния машин путём своевременного проведения технического обслуживания и оперативного устранения эксплуатационных отказов. Период неработоспособного состояния машин можно сократить при наличии на складе эксплуатирующего предприятия некоторого резерва запасных частей. При обосновании резерва, учитывающего целесообразность резервирования и расчёт потребного количества резервируемых частей, недостаточно изучены методы искусственного интеллекта. С целью обоснования метода резервирования запасных частей для сельскохозяйственной техники и определения эффекта от его производственного внедрения разработаны генетический алгоритм и программное обеспечение. Разработанный метод резервирования апробирован на сельскохозяйственном предприятии для обоснования сезонных резервов запасных частей комбайнов Дон-1500Б и TORUM. В информационной модели данных учитывались стоимость и количество потребляемых запасных частей по годам, количество машин, потребляющих запчасти в конкретный сезон работ, значения времени установки запчастей на машину и др. Применение генетического алгоритма позволило из 2500 наименований запасных частей выделить 66 наиболее значимых позиций, необходимых к резервированию на сезон уборки. Установлено, что метод резервирования запасных частей для сельскохозяйственной техники, основанный на применении генетического алгоритма в сочетании с базой данных, содержащей информацию о реальном потреблении запасных частей машинами не менее чем за 3 предыдущих года, позволяет снизить время простоя комбайнов в ожидании подвоза запчастей на 37%, увеличить дневную производительность комбайнов на 11,4%, коэффициент оперативной готовности комбайнов на 4,38%.

Ключевые слова: сельскохозяйственная техника, запасная часть, резервирование, генетический алгоритм, программа для ЭВМ, зерноуборочный комбайн, производительность, показатель надёжности

Формат цитирования: Никитченко С.Л., Гринченков Д.В. Совершенствование методов резервирования запасных частей для сельскохозяйственной техники на основе генетических алгоритмов // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 25-31. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-25-31.

© Никитченко С.Л., Гринченков Д.В., 2022

ORIGINAL PAPER

IMPROVING THE METHODS OF RESERVING SPARE PARTS FOR AGRICULTURAL MACHINERY BASED ON GENETIC ALGORITHMS

SERGEI L. NIKITCHENKO✉**,** *PhD (Eng), Associate Professor* [1]
binom_a@rambler.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-4480-9659; Scopus Author ID: 57203408315
DMITRIY V. GRINCHENKOV, *PhD (Eng), Associate Professor* [2]
grindv@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-0748-6096; Scopus Author ID: 57170803600

[1] Rostov State Transport University; 2 Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

[2] Platov South-Russian State Polytechnic University named after M.I. Platov; 132, Prosveshchenya Str., Novocherkassk, Rostov Region, 346428, Russian Federation

Abstract. The uninterrupted use of agricultural machinery performing field operations is ensured by maintaining their working condition through timely maintenance and prompt elimination of operational failures. The period of inoperative state of machines can be

reduced if there is a certain inventory stock of spare parts in the warehouse of the operating company. When determining the stock, taking into account the feasibility of the reservation and the calculation of the required number of the reserved parts, the methods of artificial intelligence are to be sufficiently studied. To justify the method of reserving spare parts for agricultural machinery and determine the effect of its industrial implementation, the authors developed a genetic algorithm and software. The developed reservation method was tested at an agricultural enterprise to determine seasonal reserves of spare parts for Don-1500B and TORUM combine harvesters. The designers of the information data model took into account the cost and quantity of consumed spare parts by year, the number of machines consuming spare parts in a particular work season, the time values for installing spare parts on a machine, etc. The use of the genetic algorithm made it possible to identify sixty-six of the most significant items out of 2,500 spare parts that need to be reserved for the harvesting season. It has been established that the method of reserving spare parts for agricultural machinery based on the use of the genetic algorithm in combination with a database containing information on the actual consumption of spare parts by machines for at least three previous years, can reduce the idle time of combines waiting for the delivery of spare parts by 37%, increase the daily productivity of combines by 11.4%, and increase the coefficient of the operational availability of combines by 4.38%.

Keywords: agricultural machinery, spare part, reservation, genetic algorithm, computer program, combine harvester, productivity, reliability index

For citation: Nikitchenko S.L., Grinchenkov D.V. Improving the methods of reserving spare parts for agricultural machinery based on genetic algorithms. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(6): 25-31. (In Rus.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-25-31.

Введение. Сельскохозяйственная техника является основным средством производства в растениеводческих предприятиях. Время простоя тракторов и комбайнов по причине отказов можно существенно уменьшить при наличии некоторого резерва запасных частей на складе предприятия. В работах [1-3] представлены математические методы обоснования оптимального резерва запасных частей для сельхозтехники и эффекты от резервирования, связанные с увеличением производительности машин на полевых работах и повышением показателей их надёжности.

В настоящее время в мировой практике управления складской логистикой ведущее место занимают WMS-системы (Warehouse Management System) – информационные системы, предназначенные для автоматизации и роботизации управления складскими процессами и инфраструктурой склада в целом [4]. В основе функционирования таких систем лежат методы искусственного интеллекта: распознавание речи, техническое зрение, эволюционное моделирование и другие, способные организовать централизованное управление всеми складскими процессами, самостоятельно ставить задачи для персонала, формировать запросы на пополнение складских запасов, быстро решать различные производственные вопросы. Применение таких систем обеспечивает работу складской системы по принципу «Точно вовремя» [5].

При расчёте складского запаса деталей часто используют методы математической статистики, логистические методы определения складского запаса (например, на базе алгоритмов ABC-классификации и XYZ-классификации), а также имитационное моделирование и нейросети [6-9]. Такие методы, учитывающие реальное потребление деталей в прошлые периоды, позволяют обосновать складской запас с минимальной вероятностью дефицита. Однако эти методы больше подходят для предприятий с равномерным круглогодичным спросом на запасные части, что является нехарактерным для сельскохозяйственного производства. Недостатком большинства применяемых методов расчёта резерва запчастей является невозможность оценки потерь продукции от отсутствия запасных частей и затрат на хранение резервов.

Характерной особенностью современного производства является сокращение номенклатуры склада запчастей до минимума. Ставка делается на оперативность работы внешних сервисных структур в плане устранения отказов и доставки необходимых деталей. Но анализ производства показывает, что такая практика не всегда оправдана, и часто простой техники может быть предотвращён собственными силами инженерной службы предприятия при наличии на складе потребных деталей. Важно наличие информационной системы, способной осуществлять расчёт складских резервов и анализировать возможные потери предприятия – как от отсутствия нужных деталей, так и при их наличии.

Бурное развитие компьютерной техники стимулирует использование методов искусственного интеллекта для решения сложных задач управления резервами запчастей и работоспособностью технических объектов [10, 11]. Одной из задач с множеством влияющих факторов является резервирование запасных частей на складе предприятия, эксплуатирующего сельхозтехнику.

Цель исследований: обосновать метод резервирования запасных частей для сельскохозяйственной техники предприятия, основанный на использовании генетических алгоритмов, и оценить эффект от его производственного внедрения.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели применялся метод эволюционного моделирования, являющийся разновидностью методов искусственного интеллекта [12]. Эволюционное моделирование с применением генетических алгоритмов находит широкое применение в задачах оптимизации, в том числе складских запасов [8, 13, 14].

Генетический алгоритм – это математическая модель эволюции популяции искусственных особей. Эволюционные алгоритмы базируются на коллективном обучающем процессе внутри популяции индивидуумов, каждый из которых представляет собой поисковую точку в пространстве допустимых решений данной задачи. Решение формируется в процессе искусственной селекции виртуальных особей с учётом информации об окружающей среде, причём отбираются наиболее пригодные к внешним условиям особи [8].

Особь является наименьшей неделимой биологической единицей, подверженной действию факторов эволюции. Каждая особь характеризуется своей хромосомой χ_k. В качестве отдельной особи (хромосомы) был принят конкретный список запасных частей – заказ на резервирование. Особи

образуют популяцию – множество возможных заказов, из которых нужно выбрать наиболее эффективный. Эффективность особи оценивали по критерию максимума предотвращённого ущерба от простоя машин ввиду отсутствия запасных частей в период полевых работ.

Генетическая информация особей хранится в хромосомах, состоящих из генов. В качестве генов рассматривали отдельные записи (строки) в заказе на запчасти. Генотип характеризуется информацией о наименовании запасных частей, количестве их потребления и др. Воспроизводство новых особей реализуется механизмом рекомбинации генов – скрещиванием. Механизм скрещивания в генетическом алгоритме реализован в форме оператора размножения, который называют кроссовером. Он является аналогом механизма формирования «брачных пар» в процессе естественной эволюции. Новые особи формируются методом взаимного обмена участками «родительских» хромосом. Особей текущей популяции P^t называют «родителями», а особи, полученные в результате работы оператора размножения, – «потомками».

Кроссовер не является источником новой генетической информации в популяции особей. Генетическая изменчивость формируется в процессе мутации – изменения генотипов в одном или нескольких генах хромосом-«потомков». Появляющиеся в результате мутации особи называются мутантами. Мутации являются стохастическими, они не зависят ни от генетических кодов особи, ни от значений ее генотипа и функции приспособленности.

Структура генетического алгоритма обычно включает в себя следующие этапы: генерирование хромосом случайным образом; декодирование каждой хромосомы для получения индивидов; оценивание пригодности каждого индивида; генерирование новой популяции путем клонирования, скрещивания и мутации хромосом наиболее адаптированных к внешним условиям индивидов [8, 13]. Схема генетического алгоритма (ГА) нашей задачи представлена на рисунке 1.

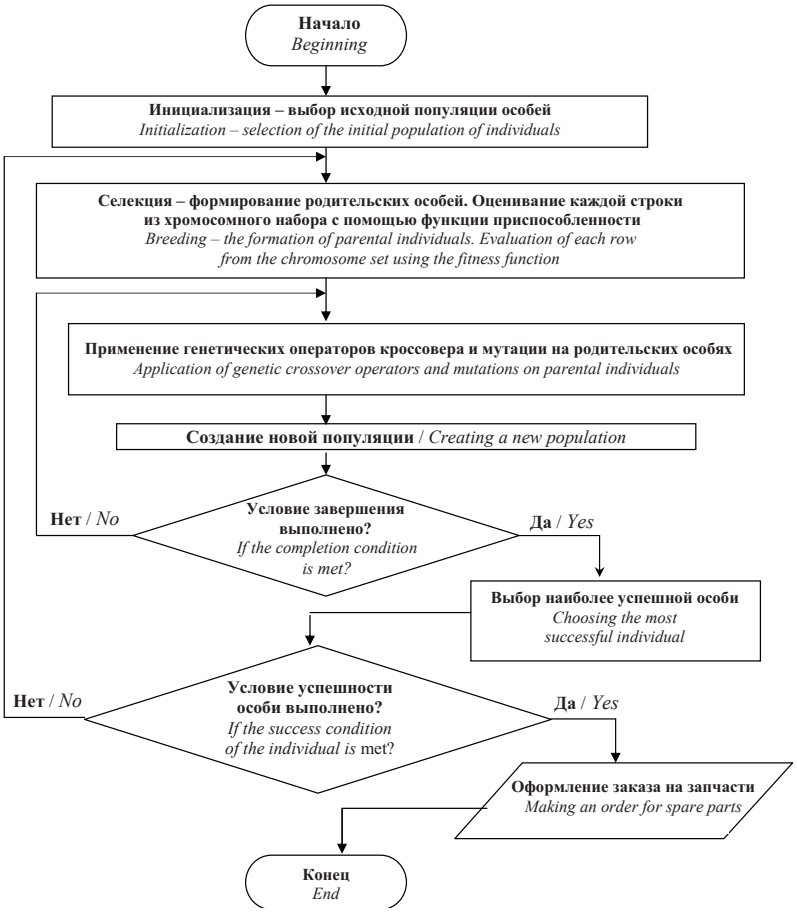


Рис. 1. Схема предлагаемого генетического алгоритма

Fig. 1. Scheme of the proposed genetic algorithm

Здесь реализуется канонический генетический алгоритм, являющийся подклассом репродукционно-популяционных алгоритмов поиска [13]. Это алгоритм поисковой оптимизации с начальной популяции P^t, представляющей совокупность кодировок $\left(\chi_1^0, \chi_2^0, ..., \chi_v^0\right)$. В данном алгоритме итеративно выполняется следующий цикл операций:

1. Оценивание с выбором исходной популяции особей P^t.

2. Селекция – выбор из популяции $P^t, t = 0,1....$ репродукционного множества R^t (подмножества кодировок $R^t \in P^t$).

3. Воспроизводство – генерация из репродукционного множества R^t новых кодировок с помощью комбинаций следующих операций:

а) скрещивание – конструирование новых кодировок путем случайного сцепления подстрок родительских кодировок из R^t;

б) мутация – конструирование новых кодировок путем разыгрывания и подстановки случайных значений гена – количество запасных частей.

4. Формирование новой популяции P^{t+1} путём замены некоторых или всех кодировок $\chi \in P^t$.

Канонический тип ГА отвечает следующим требованиям [13]:

– все кодировки $\chi \in S$ имеют одну и ту же длину L;

– элементы $\chi', \chi'' \in R^t$, называемые родителями, выбираются из популяции P^t случайным образом с вероятностями, пропорциональными значениям функции приспособленности;

– скрещивание осуществляется с помощью одноточечного кроссовера, когда символы $(\chi_1, \chi_2, ..., \chi_i)$ в новой кодировке χ, называемой «потомком», являются символами кодировки $\chi' \in R^t$, а индекс i называется случайной точкой кроссовера, выбираемой с равной вероятностью из интервала [1, L-1];

– мутации являются стохастическими операциями и не зависят от значений функции приспособленности.

Размножение родительских особей с помощью механизма одноточечного кроссовера осуществляется путём взаимного обмена участками родительских хромосом, расположенных в зонах A, B, C, D (рис. 2). При скрещивании двух родительских особей получаются два потомка, генотип которых представлен сочетанием наборов генов в зонах A-D и C-B родительских особей.

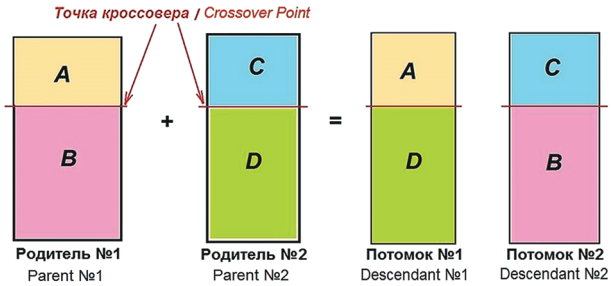


Рис. 2. Схема работы механизма одноточечного кроссовера

Fig. 2. Operating scheme of a single-point crossover mechanism

В данной задаче изменяться (мутировать) может только ген – количество потреблённых запасных частей. Принято, что мутациям подвергаются гены, имеющие наибольшую вероятность появления в хромосоме. Если анализируется потребление запасных частей в конкретный период полевых работ, например, за три прошлых года, и конкретная запасная часть (ген) была необходима каждый год, то её вероятность востребования составит $P(\chi_i) = 3/3 = 1$. Если ген был отмечен только в двух годах, то его вероятность составит 2/3 = 0,6667, а если один год, то 1/3 = 0,3333. Установлен порог возникновения мутации генов: $P(\chi_i) \geq 0{,}6667$. Значение гена у мутирующих хромосом будет определяться как случайное целое число в наблюдаемом диапазоне от min до max.

В ходе селекции при отборе родительских особей оценку жизнеспособности каждой строки хромосомного набора проводили по условию [2]:

$$C_{pi} < U_i, \quad (1)$$

где C_{pi} – затраты на резервирование i-й запасной части, руб.; U_i – ущерб предприятия при отсутствии i-й запасной части в период работ, руб.

Целесообразно резервировать запчасти, стоимость затрат на резерв которых меньше ущерба от их отсутствия в период полевых работ. Затраты на резервирование включают в себя стоимость приобретения, доставки и хранения i-й запасной части:

$$C_{pi} = C_i + C_д + C_{хpi} \quad (2)$$

или

$$C_{pi} = \frac{L_д}{V_{ТС}} \cdot C^1_{ТС} + n_i \cdot (C_i + C_{хpi}), \quad (3)$$

где C_i – средняя стоимость i-й детали, руб/шт.; $C_д$ – стоимость доставки деталей, руб.; $C_{хpi}$ – стоимость хранения i-й запасной части за период, руб/шт.; $L_д$ – расстояние доставки из торгующей организации, км; $V_{ТС}$ – средняя скорость транспортного средства, км/ч; $C^1_{ТС}$ – стоимость одного часа использования транспортного средства для доставки, руб/ч; n_i – количество резервируемых i-х запасных частей на период, шт.

Потребное количество i-й запасной части определяли по формуле:

$$n_i < \frac{1}{(C_i + C_{хр})} \cdot \lambda_i \cdot N_i \cdot T_a \cdot T_{см} \cdot n_{см} \cdot \frac{2 \cdot L_д}{V_{ТС}} \cdot (C^1_{ПП} + C^1_{ТС}), \quad (4)$$

где λ_i – интенсивность потребления i-й детали машинами в рассматриваемый сезон по данным прошлых лет, шт/(ч · маш.); N_i – количество машин, потребляющих i-ю деталь, шт.; T_a – продолжительность сезона работ, дни; $T_{см}$ – продолжительность смены, ч; $n_{см}$ – количество смен в день, шт.; $C^1_{ПП}$ – стоимость потерь продукции за один час простоя машины, руб.

Ущерб предприятия при отсутствии i-й запасной части в период полевых работ составил:

$$U_i = n_i \cdot \left[t_д \cdot C^1_{ТС} + \left(t_д + t^i_{уст}\right) \cdot C^1_{ПП}\right], \quad (5)$$

где $t^i_{уст}$ – время установки i-й запасной части на машину, ч.

Успешность отдельной особи (заказа на запчасти из K-наименований) определяем по критерию максимума предотвращённого ущерба ΣU от простоя машин по причине отсутствия запасных частей в период работ:

$$\sum_{i=1}^{K} U_i \to \max. \quad (6)$$

Приложение, реализующее предлагаемый генетический алгоритм (ГА) написано авторами на языке программирования Python. Для работы программного обеспечения создана специальная информационная модель данных, в которой отражены следующие параметры: стоимость и количество потребляемых запасных частей; количество машин, потребляющих запчасти в конкретный сезон работ; параметры λ_i; значения времени установки запчастей на машину и др.

В рамках статьи не рассматривается структура информационной модели. На её основе сформирована база необходимых для работы ГА производственных данных в условиях конкретного предприятия. Разработанная информационная модель интегрирована с базой данных существующей программы для управления складом запчастей «Агрокомплекс-Ресурсы» (свид. гос. регистрации № 2006611143), внедренной на предприятиях Ростовской области. Рассматриваемая задача резервирования запчастей решалась применительно к зерноуборочным комбайнам на операции уборки зерновых культур.

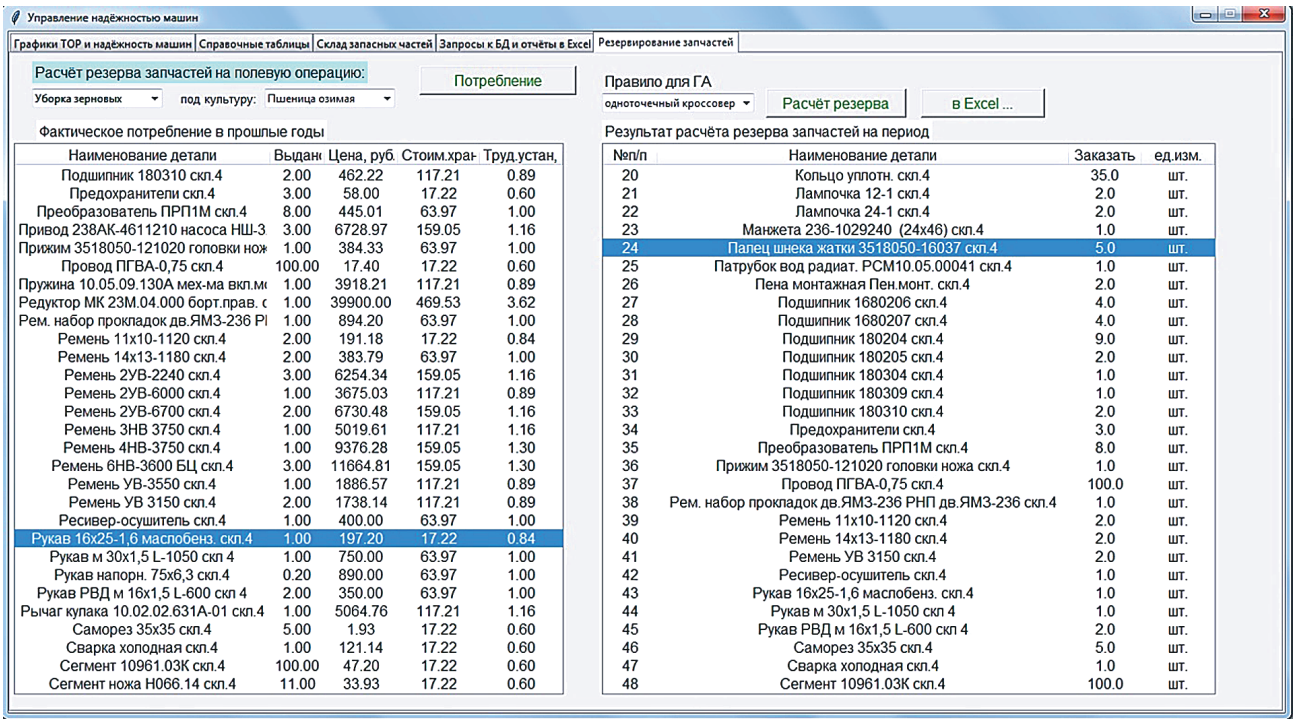
Определение эффективности предлагаемых решений осуществлялось после внедрения ПО путём статистической оценки времени $T_в$ простоя комбайнов с ожиданием подвоза запчастей, дневной производительности $W_{дн}$ и комплексного показателя надёжности комбайнов – коэффициента оперативной готовности $K_{ог}$. Коэффициент $K_{ог}$ для конкретного

типа машин предприятия в период полевых работ определяется по формуле:

$$K_{ог} = \frac{T_р}{T_р + T_в}, \quad (7)$$

где $T_р$ – период работы машин, ч; $T_в$ – среднее время восстановления или время простоев машин по техническим причинам, ч.

Результаты и их обсуждение. Окно программы, реализующей ГА, представлено на рисунке 3. В таблице слева пользователь имеет возможность видеть потребление запасных частей в период выполнения конкретной полевой операции за последние три года и более. Программа за каждый год группирует запчасти по наименованию и составляет их общий список. После указания нужной полевой операции и нажатия на кнопку «Расчёт резерва» программа запускает предлагаемый генетический алгоритм. Результат выполнения ГА выводится программой в виде реестра рекомендуемых к заказу запасных частей (таблица справа).



Наименование детали	Выдан	Цена, руб.	Стоим.хран	Труд.устан,
Подшипник 180310 скл.4	2.00	462.22	117.21	0.89
Предохранители скл.4	3.00	58.00	17.22	0.60
Преобразователь ПРП1М скл.4	8.00	445.01	63.97	1.00
Привод 238АК-4611210 насоса НШ-3	3.00	6728.97	159.05	1.16
Прижим 3518050-121020 головки нож	1.00	384.33	63.97	1.00
Провод ПГВА-0,75 скл.4	100.00	17.40	17.22	0.60
Пружина 10.05.09.130А мех-ма вкл.м	1.00	3918.21	117.21	0.89
Редуктор МК 23М.04.000 борт.прав. с	1.00	39900.00	469.53	3.62
Рем. набор прокладок дв.ЯМЗ-236 РІ	1.00	894.20	63.97	1.00
Ремень 11х10-1120 скл.4	2.00	191.18	17.22	0.84
Ремень 14х13-1180 скл.4	2.00	383.79	63.97	1.00
Ремень 2УВ-2240 скл.4	3.00	6254.34	159.05	1.16
Ремень 2УВ-6000 скл.4	1.00	3675.03	117.21	0.89
Ремень 2УВ-6700 скл.4	2.00	6730.48	159.05	1.16
Ремень 3НВ 3750 скл.4	1.00	5019.61	117.21	1.16
Ремень 4НВ-3750 скл.4	1.00	9376.28	159.05	1.30
Ремень 6НВ-3600 БЦ скл.4	3.00	11664.81	159.05	1.30
Ремень УВ-3550 скл.4	1.00	1886.57	117.21	0.89
Ремень УВ 3150 скл.4	2.00	1738.14	117.21	0.89
Ресивер-осушитель скл.4	1.00	400.00	63.97	1.00
Рукав 16х25-1,6 маслобенз. скл.4	1.00	197.20	17.22	0.84
Рукав м 30х1,5 L-1050 скл 4	1.00	750.00	63.97	1.00
Рукав напорн. 75х6,3 скл.4	0.20	890.00	63.97	1.00
Рукав РВД м 16х1,5 L-600 скл 4	2.00	350.00	63.97	1.00
Рычаг купака 10.02.02.631А-01 скл.4	1.00	5064.76	117.21	1.16
Саморез 35х35 скл.4	5.00	1.93	17.22	0.60
Сварка холодная скл.4	1.00	121.14	17.22	0.60
Сегмент 10961.03К скл.4	100.00	47.20	17.22	0.60
Сегмент ножа Н066.14 скл.4	11.00	33.93	17.22	0.60

№п/п	Наименование детали	Заказать	ед.изм.
20	Кольцо уплотн. скл.4	35.0	шт.
21	Лампочка 12-1 скл.4	2.0	шт.
22	Лампочка 24-1 скл.4	2.0	шт.
23	Манжета 236-1029240 (24х46) скл.4	1.0	шт.
24	Палец шнека жатки 3518050-16037 скл.4	5.0	шт.
25	Патрубок вод радиат. РСМ10.05.00041 скл.4	1.0	шт.
26	Пена монтажная Пен.монт. скл.4	2.0	шт.
27	Подшипник 1680206 скл.4	4.0	шт.
28	Подшипник 1680207 скл.4	4.0	шт.
29	Подшипник 180204 скл.4	9.0	шт.
30	Подшипник 180205 скл.4	2.0	шт.
31	Подшипник 180304 скл.4	1.0	шт.
32	Подшипник 180309 скл.4	1.0	шт.
33	Подшипник 180310 скл.4	2.0	шт.
34	Предохранители скл.4	3.0	шт.
35	Преобразователь ПРП1М скл.4	8.0	шт.
36	Прижим 3518050-121020 головки ножа скл.4	1.0	шт.
37	Провод ПГВА-0,75 скл.4	100.0	шт.
38	Рем. набор прокладок дв.ЯМЗ-236 РНП дв.ЯМЗ-236 скл.4	1.0	шт.
39	Ремень 11х10-1120 скл.4	2.0	шт.
40	Ремень 14х13-1180 скл.4	2.0	шт.
41	Ремень УВ 3150 скл.4	2.0	шт.
42	Ресивер-осушитель скл.4	1.0	шт.
43	Рукав 16х25-1,6 маслобенз. скл.4	1.0	шт.
44	Рукав м 30х1,5 L-1050 скл 4	1.0	шт.
45	Рукав РВД м 16х1,5 L-600 скл 4	2.0	шт.
46	Саморез 35х35 скл.4	5.0	шт.
47	Сварка холодная скл.4	1.0	шт.
48	Сегмент 10961.03К скл.4	100.0	шт.

Рис. 3. Вид окна программы с результатом расчёта резерва запасных частей на сезон уборки

Fig. 3. View of the program window with the result of calculating the reserve of spare parts for the harvesting season

При работе программа сначала осуществляет формирование трёх родительских особей. Особь № 1 представляет собой список запасных частей, потреблённых комбайнами за сезон уборки в прошлом году. При его формировании в список попадают только записи (гены), отвечающие условию (1). Особи № 2 и № 3 являются списками запасных частей, потреблённых в указанный сезон соответственно два и три года назад. Поскольку алгоритм реализуется в канонической форме, то программа выравнивает количество генов у всех родительских особей, ориентируясь на число генов наиболее успешной родительской особи. Успешность особи определяется по критерию (6). Далее выполняется процедура скрещивания родительских особей, в основе которой лежит механизм одноточечного кроссовера (рис. 2). Применяется следующий порядок скрещивания родительских особей: № 1 и № 2; № 1 и № 3; № 2 и № 3.

После 100 итераций скрещивания трёх родителей получили популяцию из 600 потомков и трёх родителей. Из полученного реестра потомков выбирается новая родительская особь с максимальной приспособленностью, то есть способная максимально снизить ущерб от простоя машин при отсутствии запасных частей. Здесь для отбора особей в новую популяцию использовался метод супериндивидуального приближения, в котором выбирается наилучшая особь среди числа родителей и их потомков – элитная хромосома [15]. Далее новая родительская особь скрещивается с наиболее успешной из первых трёх родительских особей. В итоге в полученном реестре программа определяет номер наиболее успешной особи, а её хромосомный набор выводится программой на форму приложения (таблица справа на рисунке 3). Это и есть результат расчёта резерва запасных частей на период уборки зерновых культур, который можно распечатать в форме заявки.

Разработанное программное обеспечение применялось в сельскохозяйственном предприятии для обоснования сезонных резервов запасных частей комбайнов Дон-1500Б и TORUM. База данных склада запчастей предприятия по комбайнам содержит более 2500 наименований, большая часть которых используется в основном в период ремонта комбайнов вне сезона уборочных работ. Применение ГА позволило из имеющейся номенклатуры запасных частей выделить 66 наиболее значимых позиций, которые следует резервировать на сезон уборки. Отметим, что прежде на предприятии на период уборки запасные части комбайнов набирались без использования расчётных методов. Инженеры резервировали многие из выявленных с помощью ГА позиций, но их резервное количество при этом не соответствовало рассчитанному с помощью ГА.

В ходе исследований установлено, что случайная величина время $T_в$ простоя комбайнов по техническим причинам с ожиданием подвоза запчастей подчиняется закону

распределения Вейбулла (табл.). Наличие резерва запчастей, обоснованного с использованием предлагаемого ПО, позволило снизить время $T_в$ для комбайнов на 37%.

Снижение времени простоев сказывается на увеличении дневной производительности комбайнов, которая описывается нормальным законом распределения (рис. 4).

Таблица

Основные статистические характеристики параметра $T_в$ до и после внедрения программного обеспечения

Table

Main statistical characteristics of the $T_в$ parameter before and after the software introduction

Показатель *Indicator*	**Значение $T_в$, мин** / *$T_в$ values, min*	
	до внедрения *before the introduction*	**после внедрения** *after the introduction*
Среднее значение $\bar{h}$ / *Average value $\bar{h}$*	102,84	64,72
Стандартное отклонение σ / *Standard deviation σ*	59,78	46,96
Дисперсия D / *Variance D*	3573,933	2205,72
Коэффициент вариации V / *Coefficient of variation V*	0,58	0,72
Параметры закона распределения Вейбулла / *Parameters of Weibull probability*	a = 120,94; b = 1,86	a = 75,30; b = 1,88

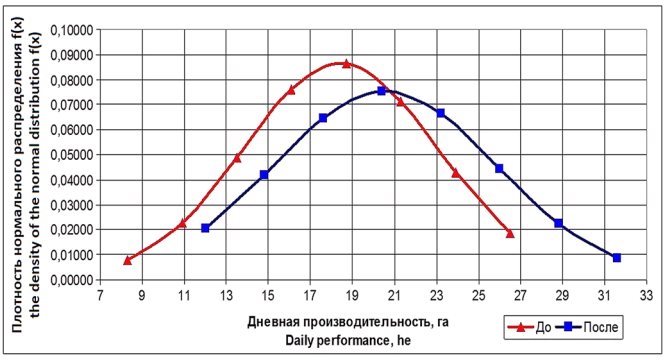


Рис. 4. Изменение дневной производительности зерноуборочных комбайнов при внедрении ПО для расчёта резервов запасных частей

Fig. 4. Changing the daily productivity of combine harvesters when implementing software for calculating the reserves of spare parts

График плотности распределения дневной производительности комбайнов после внедрения ПО смещается вправо, что говорит об увеличении производительности комбайнов. Коэффициент $K_{ог}$ для зерноуборочных комбайнов до внедрения ПО составлял 0,893, а после внедрения увеличился до 0,932.

Выводы

Метод резервирования запасных частей для сельскохозяйственной техники, основанный на применении генетического алгоритма в сочетании с базой данных, содержащей информацию о реальном потреблении запасных частей машинами не менее чем за три предыдущих года, позволяет при сезонном резервировании запасных частей с использованием предлагаемого программного обеспечения снизить время простоя комбайнов в ожидании подвоза запчастей на 37%, увеличить дневную производительность комбайнов на 11,4%, а комплексный показатель надёжности – на 4,38%.

Список использованных источников

1. Царев Ю.А., Симон Д.В. Алгоритм управления запасами как метод управления эксплуатационной надежностью зерноуборочных комбайнов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 115. С. 263-283. EDN: VJLQYN.

2. Никитченко С.Л., Гринченков Д.В. Математическое обеспечение информационной системы для резервирования запасных частей сельскохозяйственной техники // Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надёжности, устойчивости и эффективности систем: Материалы IV Международной научно-практической конференции. Елец, 2020. С. 374-379. EDN: ETZXPY.

3. Филатов М.И., Юсупова О.В. Формирование резерва запасных частей для ремонта транспортно-технологических машин // Вестник Оренбургского государственного университета. 2014. № 10 (171). С. 213-218. EDN: TPNRNR.

4. Рязанова Е.С., Корчагина Е.В. Экономическая эффективность WMS-систем в складском хозяйстве // Неделя науки СПбПУ: Материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербург, 2017. С. 106-108. EDN: YNABFX.

5. Шрайбфедер Дж. Эффективное управление запасами: Пер. с англ. 2-е изд. М.: Альпина Бизнес Букс, 2006. 304 с.

6. Жуков О.В., Сазонов С.П., Оноприенко Ю.Г., Мершиева Г.А. Методика применения ABC/XYZ-анализа для целей управления запасами в ERP-системе предприятия // Вестник Воронежского

References

1. Tsarev Yu.A., Simon D.V. Algorithm of inventory management as a control method of operational reliability of combine harvesters. *Politematicheskiy setevoy elektronniy nauchniy zhurnal Kubanskogo gosudarstvenno-go agrarnogo universiteta.* 2016; 115: 263-283. (In Rus.)

2. Nikitchenko S.L., Grinchenkov D.V. Mathematical support of an information system for reserving spare parts of agricultural machinery. *Fundamental'no-prikladnye problemy bezopasnosti, zhivuchesti, nadozhnosti, ustoychivosti i effektivnosti sistem*: *Materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Yelets, 2020: 374-379. (In Rus.)

3. Filatov M.I., Yusupova O.V. Formirovanie rezerva zapasnykh chastey dlya remonta transportno-tekhnologicheskikh mashin [Forming a reserve of spare parts for the repair of transport and technological machines]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014; 10 (171): 213-218. (In Rus.)

4. Ryazanova E.S., Korchagina E.V. Economic efficiency of WMS systems in warehousing. *Nedelya nauki SPbPU*: *Materialy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Sankt-Peterburg, 2017: 106-108. (In Rus.)

5. Schreibfeder G. Efficient inventory management. Translated from English. 2nd ed. Moscow, Alpina Business Books, 2006. 304 p.

6. Zhukov O.V., Sazonov S.P., Onoprienko Yu.G., Mershieva G.A. Methods of applying ABC/XYZ-analysis for the inventory management purposes within the ERP-system. *Vestnik Voronezhskogo*

государственного университета инженерных технологий. 2017. Т. 74, № 1. С. 477-484. https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-1-477-484

7. Рахутин М.Г. Перспективы применения нейросетей для прогноза расхода запасных частей гидрооборудования забойных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2002. № 2. С. 147-148. EDN: MURJLZ.

8. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И.Д. Рудинского. 2-е изд. М.: Горячая линия – Телеком, 2013. 384 с.

9. Бабина О.И. Разработка оптимизационной имитационной модели для поддержки процессов планирования складских систем // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6, № 2. С. 295-307. EDN: SITETL.

10. Проталинский О.М., Щербатов И.А., Проталинская Ю.О. Интеллектуальное управление производственными активами в энергетике // Шаг в будущее: искусственный интеллект и цифровая экономика: Материалы 1-й Международной научно-практической конференции. М.: ГУУ, 2017. С. 5-10. EDN: YVMQVB.

11. Сердюков В.И., Сердюкова Н.А., Шишкина С.И. Повышение безотказной работы изделий с использованием элементов искусственного интеллекта // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2017. № 1 (112). С. 62-72. https://doi.org/10.18698/0236-3941-2017-1-62-72

12. Волочков И.В. Эволюционное моделирование в процессе принятия решений // Экономика и предпринимательство. 2020. № 2 (115). С. 897-901. EDN: HEUCXV.

13. Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. The MIT Press, Cambridge, 1992. 211 p.

14. Доронин В.А. Применение генетического алгоритма для оптимизации складских запасов // Новые информационные технологии в автоматизированных системах: Материалы конференции. М.: Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ. 2006. № 9. С. 117-123. EDN: YNWXQV.

15. Periaux J., Chen H.Q., Mantel B., Sefrioui M., Sui H.T. Combining game theory and genetic algorithms with application to DDM-nozzle optimization problems. Finite Elements in Analysis and Design. 2001; 37 (5): 417-429. https://doi.org/10.1016/S0168-874X(00)00055-X

gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy. 2017; 74(1): 477-484. https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-1-477-484 (In Rus.)

7. Rakhutin M.G. Prospects of using neural networks for forecasting the consumption of spare parts for downhole hydraulic equipment. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2002; 2: 147-148. (In Rus.)

8. Rutkovskaya D., Pilin'skiy M., Rutkovskiy L. Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems. Translated from Polish by I.D. Rudinskiy. 2nd ed. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2013. 384 p. (In Rus.)

9. Babina O.I. Developing a simulation optimization model for supporting the planning of warehouse systems. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*. 2014; 6(2): 295-307. (In Rus.)

10. Protalinskiy O.M., Shcherbatov I.A., Protalinskaya Yu.O. Intelligent management of production assets in the energy sector. *Shag v budushchee*: *iskusstvenniy intellekt i tsifrovaya ekonomika*: *Materialy 1-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Moscow, GUU, 2017: 5-10. (In Rus.)

11. Serdyukov V.I., Serdyukova N.A., Shishkina S.I. Increase in product uptime by using elements of artificial intelligence. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie.* 2017; 1(112): 62-72. https://doi.org/10.18698/0236-3941-2017-1-62-72 (In Rus.)

12. Volochkov I.V. Evolutionary modeling in decision making. Ekonomika i predprinimatel'stvo. 2020; 2 (115): 897-901. (In Rus.)

13. Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. The MIT Press, Cambridge, 1992. 211 p. ISBN0262581116.

14. Doronin V.A. Application of a genetic algorithm for inventory optimization. *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh*: *Materialy konferentsii*. 2006; 9: 117-123. (In Rus.)

15. Periaux J., Chen H.Q., Mantel B., Sefrioui M., Sui H.T. Combining game theory and genetic algorithms with application to DDM-nozzle optimization problems. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2001; 37(5): 417-429. https://doi.org/10.1016/S0168-874X(00)00055-X

Критерии авторства

Никитченко С.Л., Гринченков Д.В. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов подготовили рукопись. Никитченко С.Л., Гринченков Д.В. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 19.07.2022

Одобрена после рецензирования 04.08.2022

Принята к публикации 22.10.2022

Contribution

S.L. Nikitchenko and D.V. Grinchenkov performed theoretical studies and, based on the results obtained, wrote the manuscript. S.L. Nikitchenko and D.V. Grinchenkov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 19.07.2022

Approved after reviewing 04.08.2022

Accepted for publication 22.10.2022

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.46
DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-32-37

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ПОЧВЫ

ВОЛОЖАНИНОВ СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ, *канд. техн. наук, доцент* [1]
s.volozhaninov@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-6686-1220; Scopus Autor ID: 57218094232
АЛДОШИН НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ, *д-р техн. наук, профессор* [2]
naldoshin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-0446-1096; Scopus Autor ID: 5719413129; Researcher ID: AAD-6548-2022
ЗАВАЛИЙ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ ✉***,*** *д-р техн. наук, доцент* [1]
zavalym@mail.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-0806-1110; Scopus Autor ID: 57214120527
ВОЛОЖАНИНОВА НИНА ВАЛЕРИЕВНА, *канд. ветеринар. наук, доцент* [1]
ya.volojaninova@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0001-8148-5959
ЩИГОЛЕВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ, *канд. техн. наук, доцент* [2]
shchigolev@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-8052-1591; Scopus Autor ID: 57209267407; Researcher ID: ABF-9023-2021

[1] Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского; 295007, Российская Федерация, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4

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

Аннотация. Для снижения химической нагрузки на почву, растения и плоды актуальным является использование альтернативных методов обработки почвы и растений, к которым относится облучение неионизирующим излучением. С целью установления диапазона технологических параметров и режимов работы разрабатываемых машин для обработки почвы неионизирующим излучением разработаны методика и экспериментальная установка с возможностью обеспечения инфракрасного и ультрафиолетового излучений. Для исследования почвы, предназначенной для защищенного грунта, применены стандартные методики определения физических, микробиологических и качественных свойств почвы. В ходе исследований реализовано 5 режимов обработки почвы: инфракрасное излучение в течение 3 ч без механического перемешивания почвы и с перемешиванием; ультрафиолетовое излучение в течение 1 ч; воздействие в течение 1 ч одного инфракрасного и одного ультрафиолетового излучателей при механическом перемешивании почвы; обработка в течение 1 ч тремя инфракрасными излучателями и одним ультрафиолетовым при механическом перемешивании почвы. Микробиологические исследования обработанной на экспериментальной установке почвы проводили в течение 1 ч после отбора материала по представленной методике. Экспериментально установлено, что в зависимости от режимов обработки почвы количество микроорганизмов уменьшается на 14…98%. Сочетание инфракрасного и ультрафиолетового излучений с одновременным трехкратным увеличением тепловой мощности излучения в течение 1 ч способствует снижению количества микроорганизмов до 98%. Снижение содержания микроорганизмов в почве вследствие неионизирующего излучения является основой для установления конструктивных и технологических параметров и режимов работы разрабатываемых машин для обработки тепличных грунтов.

Ключевые слова: почва, неионизирующее излучение, микроорганизмы, энергоэффективные технологии

Формат цитирования: Воложанинов С.С., Алдошин Н.В., Завалий А.А., Воложанинова Н.В., Щиголев С.В. Применение физических методов обработки для обеззараживания почвы // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 32-37. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-32-37.

© Воложанинов С.С., Алдошин Н.В., Завалий А.А., Воложанинова Н.В., Щиголев С.В., 2022

ORIGINAL PAPER

APPLICATION OF PHYSICAL TREATMENT METHODS FOR SOIL DISINFECTION

SERGEY S. VOLOZHANINOV, *PhD* (*Eng*)*, Associate Professor* [1]
s.volozhaninov@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-6686-1220; Scopus Autor ID: 57218094232
NIKOLAY V. ALDOSHIN, *DSc* (*Eng*)*, Professor* [2]
naldoshin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-0446-1096; Scopus Autor ID: 5719413129; Researcher ID: AAD-6548-2022
ALEKSEI A. ZAVALIY ✉***,*** *DSc* (*Eng*)*, Associate Professor* [1]
zavalym @mail.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-0806-1110; Scopus Autor ID: 57214120527

NINA V. VOLOZHANINOVA, *PhD (Vet), Associate Professor* [1]
ya.volojaninova@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0001-8148-5959
SERGEY V. SHCHIGOLEV, *PhD (Eng), Associate Professor* [2]
shchigolev@rgau-msha.ru; https://orcid.org/ 0000-0001-8052-1591; Scopus Autor ID: 57209267407; Researcher ID: ABF-9023-2021
[1] V.I. Vernadsky Crimean Federal University; 4 Akademika Vernadskogo Ave., Simferopol, 295007, Republic of Crimea, Russian Federation
[2] Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. To reduce the chemical load on the soil, plants and fruits, it is important to use alternative methods of soil and plant cultivation, which include irradiation with non-ionizing radiation. To establish the range of technological parameters and operating modes of the developed machines for tillage with non-ionizing radiation, the authors developed a technique and an experimental installation capable of providing infrared and ultraviolet radiation. To study the soil intended for use as protected greenhouse ground, standard methods for determining the physical, microbiological, and qualitative properties of the soil were applied. In the course of research, five modes of soil cultivation were implemented: infrared radiation for three hours with and without the mechanical mixing of the soil; ultraviolet radiation for one hour; exposure for one hour to one infrared and one ultraviolet emitters with the mechanical mixing of the soil; processing for one hour with three infrared emitters and one ultraviolet with the mechanical mixing of the soil. Microbiological studies of the soil treated at the experimental unit were carried out within one hour after the selection of the material according to the presented method. It has been experimentally established that, depending on the modes of soil cultivation, the number of microorganisms decreases by 14…98%. The combination of infrared and ultraviolet radiation with a simultaneous threefold increase in the thermal power of radiation for one hour helps to reduce the number of microorganisms up to 98%. The decrease in the content of microorganisms in the soil due to non-ionizing radiation is the first step to establish the design and technological parameters and operating modes of the developed machines used for tillage in protected greenhouse conditions.

Keywords: soil, non-ionizing radiation, microorganisms, energy-efficient technologies

For citation: Volozhaninov S.S., Aldoshin N.V., Zavaliy A.A., Volozhaninova N.V., Shchigolev S.V. Screening in plant factories: a review of non-invasive plant monitoring techniques for closed regulated agroecosystems. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(6): 32-37. (In Rus.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-32-37.

Введение. Современные технологии возделывания сельскохозяйственных культур включают в себя химические методы борьбы с вредителями, болезнями и сорной растительностью. Использование химикатов приводит к насыщению почвы, растений и плодов вредными для человека и природы химическими соединениями [1,2,3] [1].

Для снижения химической нагрузки на почву, растения и плоды актуальным является использование альтернативных методов обработки почвы и растений, к которым относятся ультрафиолетовые, инфракрасные, сверхвысокочастотные (СВЧ) и высокочастотные диапазоны электромагнитного излучения [4] [2-4].

Цель исследований: установление диапазона технологических параметров и режимов работы разрабатываемых машин для обработки почвы неионизирующим излучением, обеспечивающего существенное снижение содержания патогенных микроорганизмов в обработанной почве.

Материалы и методы. Объектом исследований является почва, упакованная в полиэтиленовую тару, предназначенная для защищенного грунта. Применены стандартные методики определения физических, микробиологических и качественных свойств почвы с использованием лабораторного оборудования [5-8].

Методика исследований включала в себя следующие этапы:

1. Анализ содержания микроорганизмов в почве.

2. Обработка и термометрия почвы на экспериментальной установке с возможностью обеспечения инфракрасного и ультрафиолетового излучений [9-11].

Исследования по содержанию микроорганизмов в почве проводились в такой последовательности:

– от каждой партии почвы, состоящей из 10 упаковок по 5 кг, отбиралась проба;

– отобранную пробу почвы массой 300…400 г помещали в стерильную стеклянную банку, микробиологические исследования проводили в течение 1 ч после отбора материала;

– навеску почвы для исследования подготавливали в условиях стерильного бокса с использованием стерильного инструмента, пробу почвы тщательно перемешивали, освобождали от крупных включений, измельчали в ступке, просеивали через сито на стерильную бумагу;

– отбирали навеску массой 30 г, помещали в стерильную колбу объемом 500 мл и доливали стерильную водопроводную воду в объеме 270 мл, получая, таким образом, разведение 1:10, в дальнейшем готовили последовательные десятикратные разведения почвы ($1:10^{-2}…1:10^{-5}$);

– посев производили на микробиологический агар по две чашки Петри на каждое разведение, в чашку вносили по 1 мл суспензии и заливали 15 мл расплавленного и охлажденного до 45°С агара. После посева чашки помещали в термостат при температуре 25°С, наблюдение за ростом в чашках осуществляли через 24, 48 и 72 ч. На третьи сутки проводили подсчет количества колоний в чашках с крайним разведением, затем вычисляли среднее значение и умножали на степень разведения;

– для получения более полных результатов производили перерасчет обнаруженных микроорганизмов на 1 г абсолютно сухой почвы:

[1] Методы микробиологического контроля почвы: Методические рекомендации / Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана, Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, центр ГСЭН в Краснодарском крае: Утв. 24 декабря 2004 г. 17 с.

[2] Методические указания по санитарно-микробиологическому исследованию почвы. М., 1981. 15 с.

[3] Дезинфекция тепличных грунтов и субстратов: Информационный агропромышленный портал РосАгро. URL: https://rosagroportal.ru/article/current/319/dezinfekcija_teplichnyh_gruntov_i_substratov (дата обращения: 10.03.2022).

[4] Обеззараживание почвогрунтов. Зооинженерный факультет МСХА: сайт. URL: https://www.activestudy.info/obezzarazhivanie-pochvogruntov/ (дата обращения: 10.03.2022).

$$N = \frac{Nc \cdot 100\%}{100\% - C\%}, \quad (1)$$

где N – количество клеток бактерий в 1 г абсолютно сухой почвы; Nc – количество клеток бактерий в 1 г сырой почвы; C – влажность исследуемой почвы. При этом

$$Nc = n\ a, \quad (2)$$

где a – степень десятикратного разведения; n – число колоний, выросших в чашке (берется среднее арифметическое из всех чашек).

Обработка и термометрия почвы проводились на экспериментальной установке, вид и принципиальная схема которой показаны на рисунке 1. Установка состоит из рамы с направляющими *1*, по которым посредством роликов движется тележка *3* с размещенной на ней обрабатываемой почвой *9*. Тележка совершает возвратно-поступательное движение, которое ей сообщает электродвигатель *2* через жестко закрепленный рычаг *7* и цепную передачу *5*. Движущее усилие от цепи *5* рычагу *7* передаётся закреплённой в звене цепи ползушкой, которая установлена в вертикальном пазе рычага *7*. Применение рычага *7* и ползушки позволило обеспечить возвратно-поступательное движение тележки *3* при безреверсивной работе электродвигателя. Для обеспечения возможности выбора скорости движения каретки изменением частоты вращения двигателя использован частотный регулятор.

Над центральной частью направляющих *1* установлена двухопорная балка с закреплёнными на ней ультрафиолетовым излучателем *6* и инфракрасными излучателями *8*, представляющими собой спиральные проволочные нагревательные элементы, выполненные из фехралевой проволоки, тепловой мощностью 1000 Вт. Спирали нагревательных элементов размещены в кварцевой трубке, над которой установлены параболические зеркальные отражатели, выполненные из листа анодированного зеркально полированного алюминия – аланода с отражательной способностью не менее 95%. Высота размещения излучателей *6* и *8* над поверхностью лотка тележки *3* может варьироваться изменением мест крепления балки с излучателями на вертикальных опорах. Изменение высоты положения излучателей и скорости движения каретки позволяет изменять тепловую мощность и величину теплового потока, поступающего на полосу тележки, проходящей в текущий момент времени под излучателями. При необходимости количество подключаемых излучателей и их сочетание могут изменяться. Для принудительной вентиляции тележки с почвой воздухом или заданной газовой средой (например, азотом, углекислотой, озоном) под ней установлены воздуховоды *4* с перфорацией, соединённые с нагнетающим вентилятором.

Порядок работы устройства. Почву размещают на сетчатой поверхности лотка тележки равномерным слоем толщиной 30 мм, включают привод тележки и излучатели, наблюдая за процессом обработки почвы, контролируют ее температуру; выключают излучатели и привод тележки, отбирают пробу почвы для микробиологического анализа [12, 13].

Для контроля температуры почвы в ходе обработки использовали термопары «Хромель-алюмель» или тип К с открытым спаем, представляющим собой «шарик» диаметром около 0,35 мм. Спай размещали в различных зонах тележки на разной глубине слоя почвы, который составлял 30 мм (рис. 1). Запись сигналов термопар выполняли компьютерной микропроцессорной 7-канальной системой, включающей в себя микропроцессорный многоканальный контроллер с преобразованием выходного сигнала в цифровой сигнал USB порта персонального компьютера, персональный компьютер с установленной программой регистрации данных микропроцессорного контроллера. Частота опроса каждого канала термопары составляла 2 Гц.

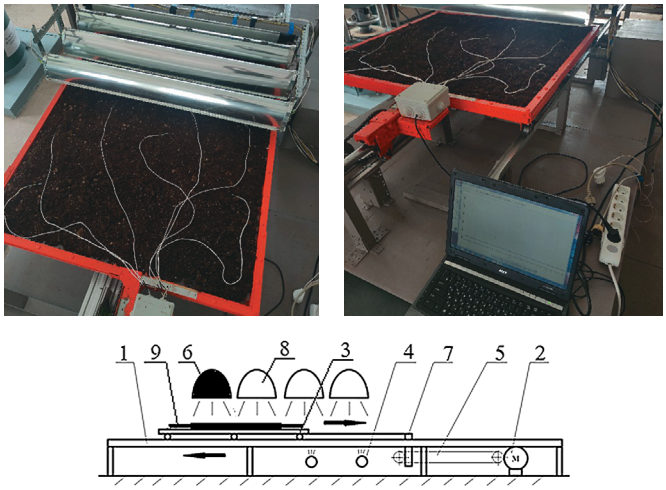


Рис. 1. Внешний вид и принципиальная схема установки для обеззараживания почвы:
1 – рама; 2 – электродвигатель; 3 – тележка; 4 – сопло; 5 – цепная передача; 6 – ультрафиолетовый излучатель; 7 – рычаг; 8 – инфракрасные излучатели; 9 – обрабатываемая почва

Fig. 1. View and schematic diagram of the unit for soil disinfection:
1 – frame; 2 – electric motor; 3 – trolley; 4 – nozzle; 5 – chain transmission; 6 – ultraviolet emitter; 7 – lever; 8 – infrared emitters; 9 – cultivated soil

В экспериментальной установке обеспечивается динамический режим волновой обеззараживающей обработки почвы инфракрасным излучением, ультрафиолетовым излучением или их сочетанием. Периодический нагрев и последующее охлаждение почвы интенсифицируют процесс обеззараживания и предотвращают перегрев почвы. Динамический режим волновой обеззараживающей обработки обеспечивает:

– максимальную сохраняемость биологического потенциала почвы, достигаемую «мягкими» динамическими тепловыми режимами обработки;

– низкие удельные затраты энергии на обработку (экологически безопасный ИК-нагрев и обработка ультрафиолетовым излучением);

– универсальность, низкую стоимость, низкие эксплуатационные затраты (ремонт, замена узлов, обслуживание).

3. Анализ содержания микроорганизмов в почве после обработки на экспериментальной установке. После обработки пробу почвы отбирали стерильной ложкой методом квадрата из четырех точек по углам и одной – в центре. Масса пробы составляла 300…400 г. Объединенную пробу почвы помещали в стерильную стеклянную банку, микробиологические исследования проводили в течение 1 ч после отбора материала по вышеописанной методике.

Результаты и их обсуждение. В ходе исследований реализовано 5 режимов обработок образцов почвы:

1 – обработка одним инфракрасным излучателем без механического перемешивания почвы (тепловая мощность инфракрасного излучателя – 1000 Вт; экспозиция – 18 мин; продолжительность обработки – 3 ч);

2 – обработка одним инфракрасным излучателем с механическим перемешиванием почвы через каждые 15 мин (тепловая мощность инфракрасного излучателя 1000 Вт, экспозиция 18 мин, продолжительность обработки 3 ч);

3 – обработка ультрафиолетовым излучателем (мощность ультрафиолетового излучения – 12,6 Вт; экспозиция – 6 мин; продолжительность обработки – 1 ч);

4 – обработка комбинацией одного инфракрасного и одного ультрафиолетового излучателей с механическим перемешиванием через каждые 15 мин (тепловая мощность инфракрасного излучателя – 1000 Вт; мощность ультрафиолетового излучения – 12,6 Вт; экспозиция для каждого излучателя – по 6 мин; продолжительность обработки – 1 ч);

5 – обработка комбинацией батареи из трех инфракрасных излучателей и одного ультрафиолетового с механическим перемешиванием через каждые 15 мин (тепловая мощность одного инфракрасного излучателя – 1000 Вт; мощность ультрафиолетового излучения – 12,6 Вт; экспозиция для инфракрасных излучателей – 18 мин, для ультрафиолетового – 6 мин; продолжительность обработки – 1 ч).

В ходе обработки почвы на экспериментальной установке осуществлялся контроль температуры. Временная термограмма для 4-го режима обработки приведена на рисунке 2. По оси абсцисс расположена ось времени (сек.), а по оси ординат – температура (°С), измеряемая каждой термопарой. По рисунку можно наблюдать период нагрева почвы и стационарный период обработки, при котором температура не превышает 50°С. Термограмма демонстрирует высокую степень равномерности теплового облучения почвы и соответственно равномерности процесса обеззараживания. Высокая степень равномерности тепловой обработки почвы позволяет получить энергоэффективную обработку с одновременным обеззараживающим эффектом.

Результаты определения микроорганизмов в образцах почвы приведены в таблице.

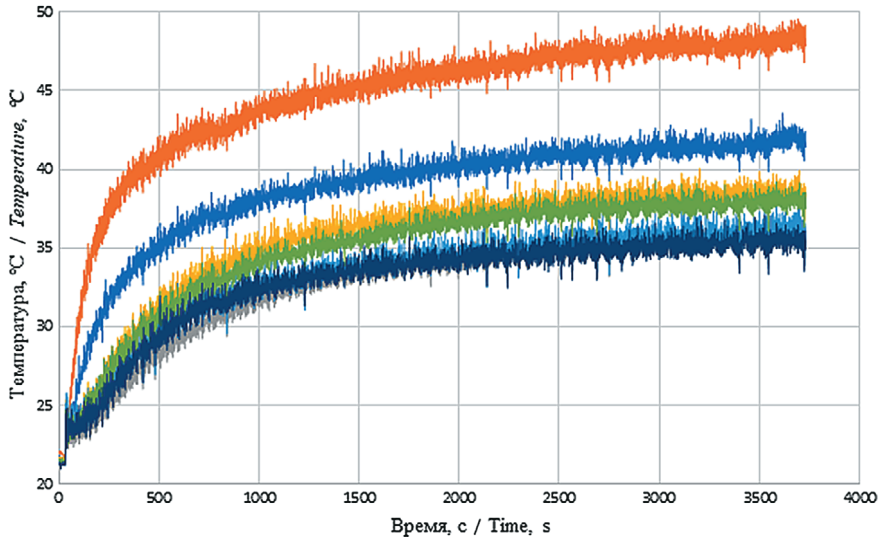


Рис. 2. Временная термограмма обработки почвы инфракрасным и ультрафиолетовым излучением для 4-го режима

Fig. 2. Temporary thermogram of soil treatment with infrared and ultraviolet radiation for Mode 4

Таблица

Результаты определения микроорганизмов в образцах почвы

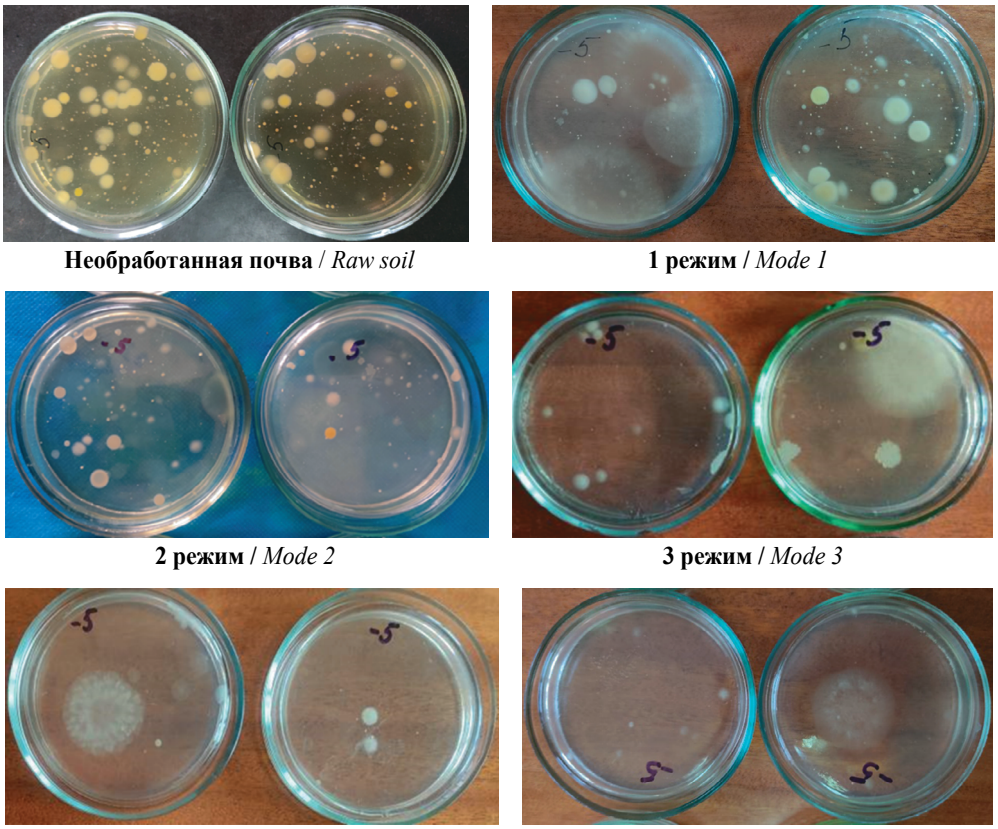
Table

Results of determination of microorganisms in soil samples

Образцы почвы *Soil samples*	**Влажность исследуемой почвы, %** *Moisture content of the studied soil, %*	**Разведение** *Dilution*	**Проба 1** *Sample 1*	**Проба 2** *Sample 2*	**Среднее значение** *Average value*	**Количество микроорганизмов в 1 г почвы** *Number of microorganisms in 1 g of soil*	**КОЕ в 1 г абсолютно сухой почвы** *CFU in 1 g of absolutely dry soil*
Исходный *Original*	65	10^{-5}	261	217	239	$239 \cdot 10^5$	$6{,}0 \cdot 10^7$
1	60	10^{-5}	198	214	206	$206 \cdot 10^5$	$5{,}2 \cdot 10^7$
2	60	10^{-5}	47	35	41	$41 \cdot 10^5$	$1{,}0 \cdot 10^7$
3	65	10^{-5}	26	22	24	$24 \cdot 10^5$	$6{,}8 \cdot 10^6$
4	50	10^{-5}	10	8	9	$9 \cdot 10^5$	$1{,}8 \cdot 10^6$
5	30	10^{-5}	4	6	5	$5 \cdot 10^5$	$7{,}1 \cdot 10^5$

Согласно экспериментальным данным количество микроорганизмов значительно уменьшается при обеззараживании почвы комбинацией инфракрасного и ультрафиолетового излучений.

Визуализация процесса роста микроорганизмов в чашках Петри показана на рисунке 3 для каждого образца почвы, подверженного обеззараживающей обработке в соответствии с вышеуказанными режимами.



Необработанная почва / *Raw soil* **1 режим** / *Mode 1*

2 режим / *Mode 2* **3 режим** / *Mode 3*

4 режим / *Mode 4* **5 режим** / *Mode 5*

Рис. 3. Чашки Петри с микроорганизмами

Fig. 3. Petri dishes with microorganisms

Результаты исследований показывают, что режим обработки одним инфракрасным излучателем с механическим перемешиванием по отношению к режиму без перемешивания приводит к снижению количества микроорганизмов в почве на 84%. При этом обработка только ультрафиолетовым излучателем позволяет снизить количество микроорганизмов по сравнению с исходным показателем почти на 90%. Сочетание инфракрасного и ультрафиолетового излучений с одновременным трехкратным увеличением тепловой мощности излучения в течение 1 ч и экспозиции 18 мин для инфракрасных излучателей дает наилучший результат: снижение количества микроорганизмов составляет 98% [7].

Выводы

1. В зависимости от режимов обработки почвы количество микроорганизмов уменьшается на 14…98%. Комбинацией инфракрасного и ультрафиолетового излучений можно достичь максимального обеззараживании почвы 98%.

2. Снижение содержания микроорганизмов в почве вследствие неионизирующего излучения является основой для установления конструктивных и технологических параметров и режимов работы разрабатываемых машин для обработки почвы в устройствах защищенного грунта.

Список использованных источников

1. Микаелян Г.А., Нурметов Р.Д. Основы оптимального проектирования производственных процессов в овощеводстве. Способы и методы обеззараживания почвы в теплицах. М.: Росинформагротех, 2005. С. 443-448. EDN: QKXKUZ.

2. Баранов Л.А., Бурнаев М.Г. Устройство для электротермической обработки почвы защищенного грунта // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2007. № 20 (92). С. 46-49. EDN: KWUPRZ.

3. Кабалоев Т.Х. Энергетические режимы и технические средства обеззараживания почвы в защищенном грунте: Автореф. дис. … д-ра техн. наук. Зерноград, 2005. 38 с. EDN: NIIKRD.

4. Поспелова И.Г., Возмищев И.В., Ниязов А.М., Дородов П.В., Владыкин И.Р. Автономная система электроснабжения установки для обеззараживания поверхностей ИК-излучением в защищенном грунте // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69, № 2 (47). С. 20-24. EDN: QOTCGP

5. Мобильная термическая установка: патент RU2064228 C1 / С.Н. Шахматов, Н.В. Цугленок, А.Л. Лазуренко; заявл. 16.06.1992; опубл. 27.07.1996. EDN: PFJMLS.

6. Устройство для обеззараживания почвы ИК-излучением: патент RU197880 U1 / И.Г. Поспелова, И.В. Возмищев, А.М. Ниязов,

References

1. Mikaelyan G.A., Nurmetov R.D. Methods and methods of soil disinfection in greenhouses. Fundamentals of optimal design of production processes in vegetable growing. Moscow: Rosinformagrotekh, 2005. P. 443-448. (In Rus.)

2. Baranov L.A., Burnaev M.G. Device for the electrothermal tillage of protected soil. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Series*: *Energetika*. 2007; 20(92): 46-49. (In Rus.)

3. Kabaloev T.Kh. Energy regimes and technical means of soil disinfection in protected soil: Self-review of DSc (Eng) thesis. Zernograd, 2005. 38 p. (In Rus.)

4. Pospelova I.G., Vozmishchev I.V., Niyazov A.M., Dorodov P.V., Vladykin I.R. Autonomous power supply system for surface disinfection by infrared radiation in protected ground. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovaniye v APK.* 2022; 69(2): 20-24

5. Shakhmatov S.N., Tsuglenok N.V., Lazurenko A.L. Mobile thermal installation: patent RU2064228 C1; applied on Jun 16, 1992; issued on July 27, 1996. (In Rus.)

6. Pospelova I.G., Vozmishchev I.V., Niyazov A.M., Novoselov I.M. Device for soil disinfection IR-radiation: patent RU197880 U1; applied on Dec 13, 2019; issued on Jun 06, 2020. (In Rus.)

7. Pospelova I.G., Vospishchev I.V., Vladykin I.R., Shakirov R.R., Kondratieva N.P. Device for soil disinfection with mechanical treatment:

И.М. Новоселов; заявл. 13.12.2019; опубл. 03.06.2020, Бюл. № 16. EDN: EQQKJP.

7. Устройство для обеззараживания почвы с механической обработкой: патент RU205568 U1 / И.Г. Поспелова, И.В. Возмищев, И.Р. Владыкин, Р.Р. Шакиров, Н.П. Кондратьева; заявл. 20.04.2021; опубл. 21.07.2021, Бюл. № 21. EDN: PVKGKP.

8. Апарин Б.Ф. Почвоведение: Учебник. М.: Академия, 2012. 256 с.

9. Завалий А.А., Алдошин Н.В., Воложанинов С.С., Волобуев Д.Д., Щиголев С.В. Технологии и машины для физических методов воздействия на почву, семена и растения // Агроинженерия. 2021. № 6 (106). С. 11-19. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-6-11-19

10. Debaeke Ph., Casadebaig P., Flenet F., Langlade N. Sunflower crop and climate change: vulnerability, adaptation, and mitigation potential from case-studies in Europe. OCL. 2017; 24 (1): D102. https://doi.org/10.1051/ocl/2016052

11. McCartney L., Lefsrud M.G. Protected agriculture in extreme environments: A review of controlled environment agriculture in Tropical, Arid, Polar, and Urban Locations. Applied Engineering in Agriculture. 2018; 34 (2): 455-473. https://doi.org/10.13031/aea.12590

12. Shin C.S., Kim K.U. CO_2 Emissions by Agricultural Machines in South Korea. Applied Engineering in Agriculture. 2018; 34 (2): 311-315. https://doi.org/10.13031/aea.11796

13. Мудрецова-Висс К.А., Дедюхина В.П., Масленникова Е.В. Основы микробиологии: Учебник. М.: Издательский Дом ФОРУМ, 2020. 384 с.

patent RU N205568; applied on Apr 20, 2021; issued on July 21, 2021. (In Rus.)

8. Aparin B.F. Soil science: study manual for educational institutions of secondary vocational education. Moscow, Akademia, 2012. 256 p. (In Rus.)

9. Zavaliy A.A., Aldoshin N.V., Volozhaninov S.S., Volobuev D.D., Shchigolev S.V. Technologies and machines for physical methods of influencing soil, seeds, and plants. *Agricultural Engineering*. 2021; 6: 11-19. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-6-11-19 (In Rus.)

10. Debaeke Ph., Casadebaig P., Flenet F., Langlade N. Sunflower crop and climate change: vulnerability, adaptation, and mitigation potential from case-studies in Europe. *OCL*. 2017; 24 (1): D102. https://doi.org/10.1051/ocl/2016052

11. McCartney L., Lefsrud M.G. Protected agriculture in extreme environments: A review of controlled environment agriculture in Tropical, Arid, Polar, and Urban Locations. *Applied Engineering in Agriculture*. 2018; 34 (2): 455-473. https://doi.org/10.13031/aea.12590

12. Shin C.S., Kim K.U. CO_2 Emissions by Agricultural Machines in South Korea. *Applied Engineering in Agriculture*. 2018. 34 (2): 311-315. https://doi.org/10.13031/aea.11796

13. Mudretsova-Viss K.A., Dedyukhina V.P., Maslennikova E.V. Fundamentals of microbiology: study manual. Moscow, Izdatelskiy Dom FORUM, 2020. 384 p. (In Rus.)

Критерии авторства

Воложанинов С.С., Алдошин Н.В., Завалий А.А., Воложанинова Н.В., Щиголев С.В. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Воложанинов С.С., Алдошин Н.В., Завалий А.А., Воложанинова Н.В., Щиголев С.В. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 05.09.2022

Одобрена после рецензирования 23.09.2022

Принята к публикации 13.10.2022

Contribution

S.S. Volozhaninov, N.V. Aldoshin, A.A. Zavaliy, N.V. Volozhaninova and S.V. Shchigolev performed theoretical studies and, based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. S.S. Volozhaninov, N.V. Aldoshin, A.A. Zavaliy, N.V. Volozhaninova and S.V. Shchigolev have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 05.09.2022

Approved after reviewing 23.09.2022

Accepted for publication 13.10.2022

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК. 631.312.8
DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-38-42

УЛУЧШЕНИЕ ДЕГРАДИРОВАННЫХ ГОРНЫХ СКЛОНОВ МЕТОДОМ ДИСКОВАНИЯ

ДЖИБИЛОВ СЕРГЕЙ МАЙРАМОВИЧ, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник*
mybox.82@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-3597-0720; AuthorID750961
СОЛДАТОВ ЭДУАРД ДМИТРИЕВИЧ, *канд. с.-х. наук, старший научный сотрудник*
irasha2012@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-0227-0835; AuthorID760282
ГУЛУЕВА ЛЮДМИЛА РОМАНОВНА✉, *научный сотрудник*
luda_gulueva@mail.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-1089-3688; AuthorID591784
БИДЕЕВ СЕРГЕЙ ИГОРЕВИЧ, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник*
biser0@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0003-4356-2639; AuthorID: 591783
Северо-Кавказский научно-исследовательский институт горного и предгорного сельского хозяйства (СКНИИГПСХ) Владикавказского научного центра РАН; 363110, Российская Федерация, Республика Северная Осетия-Алания, с. Михайловское, ул. Вильямса, 1

Аннотация. Отсутствие малогабаритных маневренных серийных образцов дискаторов для мелкоконтурных участков горных лугов и пастбищ способствовало разработке образца минидискатора для работы на горных склонах на почвах различного механического состава. Произведен расчет конструктивных параметров рабочих органов – дисков (расстояние между смежными дисками, радиус кривизны дисков, диаметр дисков) и их расположения на раме минидискатора. На базе минитрактора Феншоу-180 разработан лабораторный образец малогабаритного блок-модуля минидискатора для обработки (дискования) почв различного механического состава склоновых участков кормовых угодий горной зоны Северного Кавказа с уклоном до 12°. Спроектированный лабораторный образец минидискатора представляет собой навесную конструкцию с однорядным расположением 9 сферических дисков, установленных на индивидуальных стойках под углом к движению. Присутствуют устройство, исключающее забивание режущих дисков, и приспособление для регулировки давления на почву. Возможна установка прикатывающих катков. Предусмотрена возможность переключения конструкции при развороте из положения работы на склоне справа налево в положение работы на склоне слева направо. Техническая экспертиза лабораторного образца машины проведена на горном стационаре СКНИИГПСХ в с. Даргавс, РСО-Алания, на высоте 1540 м над уровнем моря с крутизной склона до 15°. Испытания лабораторного образца блок-модуля навесного минидискатора для обработки почв лугов и пастбищ горной зоны и техническая экспертиза научной документации проводились согласно ГОСТ 33687-2016 и ГОСТ 33687-2015. Разработанный и изготовленный лабораторный образец дает предпосылки к созданию серийного образца машины. Применение блок-модуля минидискатора обеспечит снижение деградационных процессов склоновых участков, повысит урожайность кормовых угодий, обеспечит устойчивость к водной и ветровой эрозии, а также повысит экологическую устойчивость и эффективность лугопастбищного хозяйства.

Ключевые слова: горы, луга, склоны, пастбища, дискатор, почва, минитрактор, дискование, технология.

Формат цитирования: Джибилов С.М., Солдатов Э.Д., Гулуева Л.Р., Бидеев С.И. Улучшение деградированных горных склонов методом дискования // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 38-42. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-38-42.

© Джибилов С.М., Солдатов Э.Д., Гулуева Л.Р., Бидеев С.И., 2022

ORIGINAL PAPER

IMPROVING DEGRADED MOUNTAIN SLOPES WITH DISCING

SERGEY M. DZHIBILOV, *PhD (Eng), Senior Research Engineer*
mybox.82@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-3597-0720; AuthorID750961
EDUARD D. SOLDATOV, *PhD (Agr), Senior Research Engineer*
irasha2012@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-0227-0835; AuthorID760282
LYUDMILA R. GULUEVA✉, *Research Engineer*
luda_gulueva@mail.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-1089-3688; AuthorID591784
SERGEY I. BIDEEV, *PhD (Eng), Research Engineer*
biser0@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0003-4356-2639; AuthorID: 591783
North Caucasian Research Institute of Mining and Piedmont Agriculture of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; 363110, Russian Federation, Republic of North Ossetia-Alania, Mikhailovskoe, Villyamsa Str., 1

Abstract. Lack of small-sized maneuverable serial discator samples for shallow contour areas of mountain meadows and pastures contributed to the development of mini-discator sample to operate on mountain slopes on soils of different texture. The authors analized the constructive parameters of working elements – discs (the distance between adjacent discs, the curvature radius of discs, and the disc diameter) and their location on the frame of a mini-discator. Based on the Feng Shou-180 mini-tractor, they developed a laboratory prototype of a small-sized modular unit of a mini-discator for soil cultivation (discing). The machine

is applicable to soils of different mechanical composition located in the mountain zone of the North Caucasus on the hillside areas of forage lands with a slope of up to 12°. The designed laboratory prototype of a mini-discator is a hinged construction with single-row arrangement of nine spherical disks mounted on individual racks at an angle to the movement axis. There is a device to prevent clogging of the cutting discs and a device to adjust the pressure on the ground. The machine can also be fitted with press rollers. The design can be switched from the right-left-hand to left-right-hand slope operation when turning. The technical tests of the laboratory prototype were carried out at the SKNIIGPSKH mountain facilities in the village of Dargavs, RNO-Alania, at the altitude of 1540 m above sea level and a slope inclination of up to 15°. The performance tests of the laboratory sample modular unit of the mounted mini-discator for meadow and pasture soil treatment in the mountain zone and technical examination of the scientific documentation were carried out in accordance with GOST 33687-2016 and GOST 33687-2015. The developed and manufactured laboratory sample gives prerequisites for designing a serial sample of the machine. The application of the modular unit of the minidiscator will ensure the reduction of degradation processes of sloping areas, increase the yield of forage lands, enhance the resistance to water and wind erosion, and increase the environmental sustainability and efficiency of grassland farming.

Keywords: mountains, meadows, slopes, pastures, discator, soil, minitractor, disking, technology

For citation: Dzhibilov S.M., Soldatov E.D., Gulueva L.R., Bideev S.I. Improving degraded mountain slopes with discing. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(6): 38-42. (In Rus.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-38-42.

Введение. В планах развития сельскохозяйственного машиностроения России – создание универсальных и многофункциональных машин нового поколения, способных обеспечить необходимую производительность и высокую надежность машин (на уровне лучших зарубежных аналогов). Предусмотрен максимальный переход сельскохозяйственного производства к внедрению новых ресурсосберегающих инновационных технологий, способов возделывания и уборки с минимальными затратами средств.

Увеличение урожайности сельскохозяйственных культур зависит от многих факторов, в том числе от обработки почвы – одной из наиболее важных и трудоемких работ. В России за последние 20 лет производство сельскохозяйственной продукции ежегодно сокращалось на 7% [1, 2]. Данная проблема является особенно актуальной для горной и предгорной местности.

Рост цен на горючее, технику, комплектующие детали, а также на сельскохозяйственную продукцию создает необходимость применения ресурсосберегающих технологий обработки почвы, в том числе мелкой вспашки, минимальной и нулевой обработки почвы, особенно на участках в горной зоне [3].

Природно-климатические условия горной и предгорной зон Северной Осетии характеризуются склоновостью и мелкоконтурностью земельных угодий, повышенной влажностью почвы, мелкими и крупными валунными камнями на поверхности и в пахотном слое, что препятствуют нормальной работе сельскохозяйственной техники, снижает производительность и надежность её работы [3-5].

Наиболее производительными почвообрабатывающими средствами являются бороны, у которых рабочие органы-диски расположены на одной оси, и дискаторы, у рабочих органов-дисков которых есть индивидуальное крепление к стойке, имеющей защиту от перегрузок, позволяющие производить обработку участков с каменистой почвой [6, 7].

Основное предназначение дискатора – подготовка земли к посевной без предварительной вспашки [8]. При использовании дискаторов происходит интенсивная обработка почвы, производится измельчение и заделка пожнивных и растительных остатков. Дискаторы используются также при обработке залежных земель, разделке дернины и пластов почвы после вспашки, а также при подготовке почвы под посев. Кроме того, дискаторы показывают неплохую производительность в условиях повышенной влажности и густой растительности.

На российском рынке сельскохозяйственной техники встречаются дискаторы, которые могут агрегироваться с любыми тракторами. Среди известных серий оборудования можно выделить двухрядные прицепные дискаторы БДМ 4×2 ПКС и БДМ 5×2 ПКС. Эти типы дискаторов подходят для работы с тракторами 3-4 тягового класса, мощностью от 130 до 170 л.с. Данные дискаторы – громоздкие, крупногабаритные; масса дискатора в комплекте составляет около 800…1400 кг на 1 м обрабатываемой поверхности, что неприемлемо для горной зоны. Однако еще не разработан малогабаритный маневренный серийный образец дискатора для мелкоконтурных участков горных лугов и пастбищ, поэтому его создание является актуальным [9].

Цель исследований: разработать лабораторный образец блок-модуля горного навесного минидискатора для обработки почв различного механического состава на участках горных и предгорных склонов.

Материалы и методы. На базе минитрактора Феншоу-180 разработан лабораторный образец малогабаритного блок-модуля минидискатора для обработки (дискования) почв различного механического состава склоновых участков кормовых угодий горной зоны Северного Кавказа с уклоном до 12°. Опытный образец позволяет устранить засоренность почвы, повысить плодородие и урожайность кормовых угодий, обеспечить устойчивость лугов и пастбищ к дефляции и эрозии [10]. Техническая экспертиза лабораторного образца машины проведена на горном стационаре СКНИИГПСХ в с. Даргавс, РСО-Алания, на высоте 1540 м над уровнем моря с крутизной склона до 15°.

Определено соответствие агротехнических параметров лабораторного образца блок-модуля техническому заданию и техническим условиям на изготовление, агротехническим требованиям; его научной и практической значимости с экономической и экологической оценкой, а также нормативным требованиям согласно ГОСТ 33687-2015 «Машины и орудия для поверхностной обработки почвы. Методы испытаний (переиздание)».

По ГОСТ 20915-85 определялись свойства почвы: влажность, твердость почвы, масса растительных остатков, рельеф и микрорельеф поля, характеристика дернового покрова. Нагрузка на почву и глубина обработки регулировались трактористом из кабины с использованием гидравлического устройства. Регулировка глубины обработки осуществлялась посредством изменения угла атаки дисков.

Дискаторы в отличие от поступательно движущихся лемешных рабочих органов меньше забиваются растительными

остатками. Конструкция агрегата максимально облегчена для снижения антропогенного воздействия на дернину лугов и пастбищ горной зоны. В технологическую схему входят две операции: подрыв и рыхление верхнего слоя почвы участка на определенную глубину обработки; разрушение комков почвы и их прикатывание по ширине захвата агрегата.

Главным отличием конструкции горного минидискатора от равнинной серийной модификации является способность конструкции переключаться при развороте из положения работы на склоне справа налево в положение для работы на склоне слева направо. При этом положение рабочих органов дискатора относительно склона создает поперечную реакцию, направленную вверх по склону, что способствует стабилизации движения агрегата по склону и снижает его сползание вниз по склону.

В технологическое оборудование малогабаритного дискатора входят следующие узлы: навесная рама; секция дисковых борон, закрепленных к раме чизельного культиватора КЧГ-2,4; устройство, исключающее забивание режущих дисков; приспособление для регулировки давления на почву и прикатывающие катки при необходимости [11].

Результаты и их обсуждение. Спроектированный минидискатор представляет собой навесную конструкцию с однорядным расположением сферических дисков в количестве 9 шт., установленных на индивидуальных стойках под необходимым углом к движению. Используемые диски могут иметь гладкую форму или быть с вырезами различной конфигурации. В ходе движения диски режут поверхностный слой почвы, рыхлят и перемешивают её [12]. Принципиальная схема горного минидискатора представлена на рисунке 1.

Разворот дисков на 180° обеспечивается конструктивными размерами: равенством диаметра диска горного минидискатора и расстояния между вертикальными осями поворота их на 180°.

Из конструктивных соображений диаметр диска D выбирают минимальным из расчетных с учетом условий работы [6, 15]:

$$D = k \cdot a,$$

где a – глубина обработки, мм; k – коэффициент, учитывающий степень забиваемости междискового пространства пожнивными остатками при обработке почвы. Для борон, предназначенных для обработки лугов и пастбищ, k = 4…6.

Чтобы избежать забивания между дисками почвы и пожнивных остатков, рекомендуется расстояние b между ними выбирать в соответствии с глубиной обработки почвы $b \geq 1{,}5a \ldots 2{,}0a$.

Если установить диски на отдельных стойках под углом атаки α и с наклоном их оси к горизонтали, междисковое пространство будет забиваться лишь при увеличении расстояния b до 300…400 мм. При выборе диметра диска и расстояния между дисками на батарее следует учесть и допустимую высоту гребней (e), образуемых между соседними дисками.

Известно, что важнейшим показателем качества обработки почвенного слоя дисковыми боронами является высота продольного гребня дна борозды (e), создаваемого между дисками, обрабатывающими смежные полоски земли.

Установка рабочих органов (дисков) предусматривает возможность их разворота на 180° при переходе обработки правого склона к левому по ходу движения агрегата. Рабочие органы переводятся из положения правосклонного в левосклонное направление с помощью специального реечного механизма[1], расположенного внутри профильной трубы рамы (рис. 2).

[1] Приспособление для дискования склоновых участков находится на стадии оформления как полезная модель, поэтому здесь подробное описание не приводится (примеч. авт.).

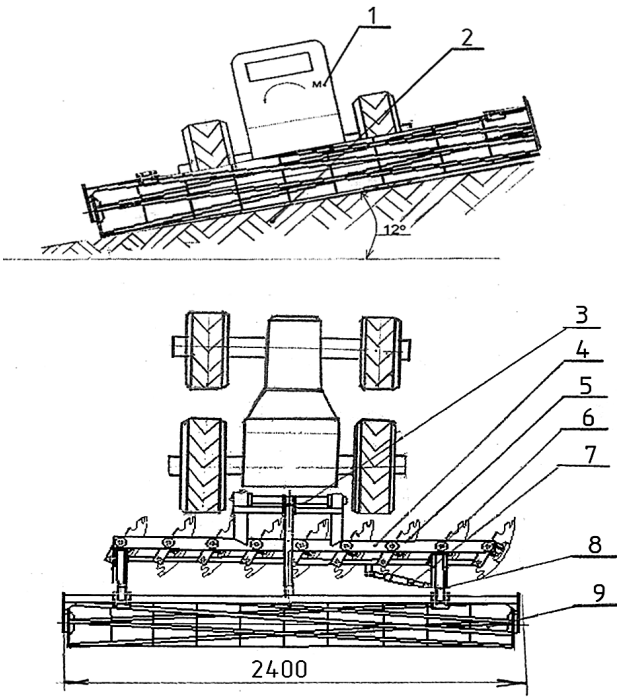


Рис. 1. Принципиальная схема горного минидискатора:
1 – минитрактор; 2 – почва; 3 – навеска агрегата;
4 – рама минидискатора; 5 – диск; 6 – соединение диска с рамой;
7 – гидроцилиндр; 8 – кронштейн прикатывающего устройства;
9 – прикатывающее устройство

Fig.1. Schematic diagram of a mountain minidiscator:
1 – mini tractor; 2 – soil; 3 – attachment of the unit;
4 – minidiscator frame; 5 – disk;
6 – disk-to-frame connection; 7 – hydraulic cylinder;
8 – bracket of the packing device; 9 – rolling device

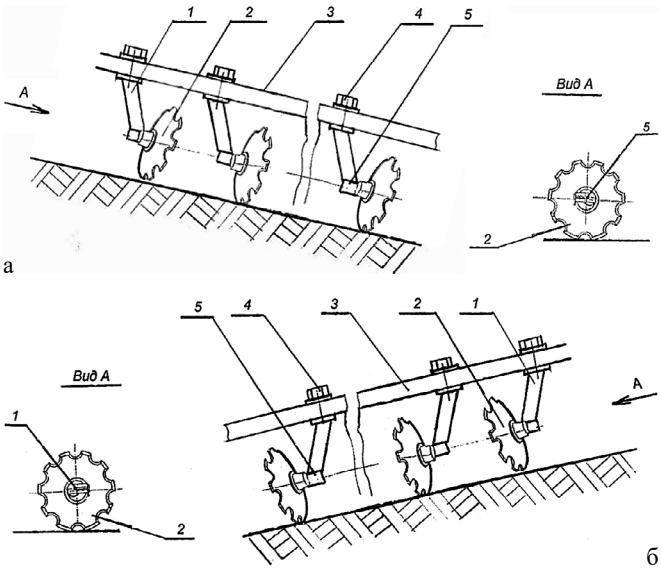


Рис. 2. Положение рабочих органов минидискатора на склонах при движении агрегата слева направо (а) и справа налево (б):
1 – кронштейн крепления диска; 2 – диск дискатора;
3 – рама минидискатора; 4 – гайка крепления кронштейна;
5 – крепление диска к стойке; 6 – поверхность склона почвы

Fig. 2. Position of the working tools of the minidiscator on the slopes for the unit movement along the slope from left to right (a), the unit movement along the slope from right to left (b):
1 – disc mounting bracket; 2 – discator disc;
3 – minidiscator frame; 4 – bracket fastening nut;
5 – disk fastening to the rack; 6 – soil slope surface

При расположении дисков типа батарей расстояние между дисками в плане равно

$$b \cdot \cos\alpha = D_e \cdot \sin\alpha,$$

где D_e – диаметр диска с учетом допустимого значения высоты гребней, мм ($D_e = D - e$); α (угол атаки) – угол между плоскостью вращения диска и линией направления движения (в зависимости от вида почвы и рельефных особенностей участка α = 0…21° [13]).

Известно, что отдельное самостоятельное крепление каждого диска позволяет более качественно бороться с сорняками, перемешивая грунт с растительными остатками. Между значением диаметра диска (D), глубиной его обработки (*a*), расстоянием между соседними дисками (*b*) и высотой гребня (c) существует зависимость (рис. 3):

$$b = 2\sqrt{c(D-c)} \cdot tga. \quad (1)$$

Для борон при малых значениях угла α условие c < *a* может приводить к чрезмерному уменьшению расстояния между дисками одной батареи. Для лущильников c ≤ 0,5*a* [9].

Заточку лезвия обычно производят со стороны внешней поверхности диска. Для обработки тяжелых почв изготавливают диски также и с внутренней заточкой. В данном случае угол заточки *i* = 10…20°. Угол зазора ε_a, образованный направлением поступательного движения орудия с линией, возникающей в сечении конуса заточки плоскостью, соответствует поверхности поля, у плугов и лущильников должен всегда иметь только положительное значение. При $\varepsilon_a < 0$ будет происходить смятие почвы, в результате – увеличение тягового усилия с нарушением устойчивости хода агрегата.

Для дисковых борон возможно применение углов $\varepsilon_a < 0$ [15], однако при этом не должно происходить соприкосновение выпуклой стороны дисков с почвой. Вместе с тем между диаметром и радиусом кривизны диска должна быть выдержана зависимость:

$$R = \frac{D}{2\sin\varphi}. \quad (2)$$

Значения φ для каждой группы дисков даны в справочнике[2]. Для дисковых плугов:

– отношение диаметра диска к глубине обработки k = D/a = 3…4;

– угол установки дисков к линии тяги α = 40…45°;

– угол при вершине сектора диска $\varphi = \arcsin\frac{D}{2R}$, град., φ = 31…37°;

– угол зазора в сечении, при максимальной глубине хода ε_a = 5…10°.

В центральном сечении вертикального сферического диска φ + i = α – ε = ω; в сечении же диска плоскостью, удаленной на расстоянии *a* от дна борозды,

$$\omega_a = \alpha - \varepsilon_a. \quad (3)$$

Значения α и ε_a берут из таблиц [12], по найденному значению ω_a определяют

$$\omega = arctg\frac{ktg\omega_a}{2\sqrt{k-1}}.$$

Значения ω для различных ω_a даны в справочнике [2].

По рассчитанному углу ω и выбранному углу заострения лезвия *i* определяют угол φ = ω – *i*, после чего по φ и D из формулы (2) определяют радиус кривизны диска R. При определении радиуса кривизны наклонных дисков следует применять графоаналитический способ. Зная значение диаметра и радиуса кривизны диска, из формулы (2) находят количественное значение угла φ; по φ и *i* рассчитывают угол ω.

По рассчитанным значениям вычерчивают боковую проекцию и вид диска (рис. 4). В сечении А-А конуса заточки лезвия горизонтальной плоскостью на высоте *a* от дна борозды по чертежу определяют угол ω_a, который в сумме с найденным значением угла ε_a должен составить угол

$$a = \omega_a + \varepsilon_a.$$

Если найденная величина ω_a не отвечает формуле (3), то задаваясь новыми значениями R, следует повторить аналитическое определение φ и ω и графическое определение ω_a до получения положительного результата.

Расчетные значения размеров диска округляют до ближайших значений, установленных ГОСТ 198-85.

Для увеличения прочности дисков их часто изготавливают с кольцевыми гофрами в центральной части. Вырезные диски используются в тяжелых боронах для работ на болотных и луговых участках. Данные диски осуществляют бóльшее количество разрезов почвы по сравнению с дисками со сплошным лезвием. Дно борозды при этом остается неровным. Вырезы (их обычно 6…12), имеющие форму равносторонних треугольников или полукругов, уменьшают рабочую прочность дисков. Размеры вырезных дисков выбираются аналогично дискам со сплошным лезвием.

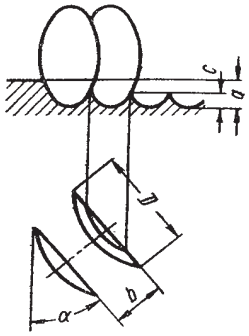


Рис. 3. Профиль дна борозды дискового минидискатора:
D – диаметр диска; a – глубина обработки
b – расстояние между смежными дисками; c – высота гребня

Fig. 3. Profile of the furrow bottom made by the disk minidiscator:
D – disk diameter; a – processing depth
b – distance between adjacent disks; c – ridge height

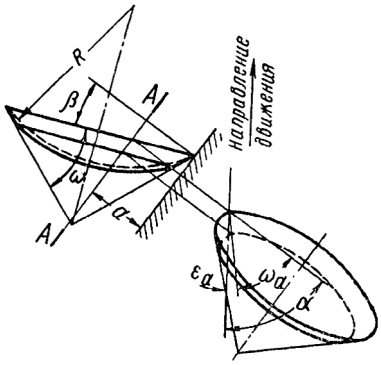


Рис. 4. Проектирование наклонного сферического диска

Fig. 4. Design of an inclined spherical disk

[2] Справочник конструктора сельскохозяйственных машин. Т. 2 / Под ред. М.И. Клецкина. М.: Машиностроение, 1964.

Выводы

1. Разработанный лабораторный образец малогабаритного блок-модуля минидискатора для обработки (дискования) почв различного механического состава склоновых участков послужит для изготовления опытной партии машин для производственной проверки на горных лугах и пастбищах.

2. Практическое применение блок-модуля минидискатора обеспечит снижение деградационных процессов склоновых участков, повысит урожайность кормовых угодий, обеспечит устойчивость к водной и ветровой эрозии, а также повысит экологическую устойчивость и эффективность лугопастбищного хозяйства.

Список использованных источников

1. Милосердов В.В. Экономические механизмы хозяйствования, обеспечивающие продовольственную безопасность страны // Агропродовольственная политика России. 2017. № 12 (72). С. 2-9. EDN: YPLLDC.

2. Солдатова И.Э., Солдатов Э.Д., Хаирбеков С.У. Состояние и рациональное использование горных лугопастбищных угодий Северного Кавказа // Горное сельское хозяйство. 2017. № 3. С. 44-49. EDN: ZHZUBB.

3. Солдатова И.Э., Солдатов Э.Д. Создание высокопродуктивных сенокосов и пастбищ в горной зоне Северного Кавказа // Известия Горского государственного аграрного университета. 2017. Т. 54 (3). С. 9-14. EDN: ZHELCF.

4. Зотов А.А., Агафонова Л.И., Шамсутдинов З.Ш., Головин В.П., Шамсутдинов Н.З. Энергоэкономическая оценка естественных пастбищных экосистем России // Нетрадиционное экорастениеводство, селекция, генетика и биоземледелие. Охрана бионоосферы и космология. Философия естествознания и экообразование в триединстве экономики, экологии и здоровья: Труды XXVIII Международного научного симпозиума. Алушта, 2019. С. 62-73. EDN: GNHFDQ.

5. Джибилов С.М., Гулуева Л.Р., Коробейник И.А. Агрегат для сгребания камней с одновременным автоматическим подсевом трав на горные луга и пастбища Северного Кавказа // Известия Горского государственного аграрного университета. 2018. Т. 55, № 1. С. 106-112. EDN: YTFUZF.

6. Трубилин Е.И., Сохт К.А., Коновалов В.И. Повышение технологической эффективности дисковых борон // Сельский механизатор. 2013. № 3. С. 8-9. EDN: QYYBMH.

7. Джибилов С.М., Гулуева Л.Р. Многофункциональный агрегат для улучшения горных лугов и пастбищ // Известия Горского государственного аграрного университета. 2016. Т. 53, № . 3. С. 103-111. EDN: WNDDZX.

8. Рабочий орган почвообрабатывающего орудия: Патент на полезную модель RU195543 U1, 30.01.2020 / К.А. Сохт, В.И. Коновалов; заяв. № 2019135723 от 06.11.2019. EDN: OZXOKZ.

9. Kudzaev A.B., Urtaev T.A., Tsgoev A.E., Korobeynik I.A., Tsgoev D.V. Study of elastic composite rods for creating fuses of tilthers // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2017; 8(11): 658-666.

10. Джибилов С.М., Гулуева Л.Р., Бестаев С.Г. Способ поверхностного улучшения горных лугов и пастбищ // Известия Горского государственного аграрного университета. 2013. Т. 50, № 1. С. 171-174. EDN: PXPQEV.

11. Способ улучшения горных лугов и пастбищ: Патент на изобретение RU2431248 C2, 20.10.2011 / С.М. Джибилов, Л.Р. Гулуева, Ф.А. Габараев, И.Э. Солдатова, Т.С. Абиева; заяв. № 2009127407/21 от 16.07.2009. EDN: ARAEYS.

12. Диск сферический почвообрабатывающего орудия: Патент на полезную модель RU178145 U1, 26.03.2018 / К.А. Сохт, В.И. Коновалов; заяв. № 2017126718 от 25.07.2017. EDN: VMVJGO.

13. Трубилин Е.И., Сохт К.А., Коновалов В.И., Кравченко В.В. Заглубляющая способность дисковых борон и лущильников // Техника и оборудование для села. 2013. № 11. С. 31-34. EDN: RKAJMB.

14. Джибилов С.М., Гулуева Л.Р., Бестаев С.Г. Рыхлитель междурядий – окучник маточных кустов в плодопитомнике // Известия Горского государственного аграрного университета. 2014. Т. 51, № 4. С. 201-207. EDN: TCCZAL.

References

1. Miloserdov V.V. Economic mechanisms of management that ensure the food security of the country. *Agroprodovol'stvennaya politika Rossii*. 2017; 12(72): 2-9. (In Rus.)

2. Soldatova I.E., Soldatov E.D., Khairbekov S.U. Current state and rational use of mountain grasslands of the North Caucasus. *Gornoe sel'skoe khozyaystvo*. 2017; 3: 44-49. (In Rus.)

3. Soldatova I.E., Soldatov E.D. Establishing highly productive hayfields and pastures in the mountainous zone of the North Caucasus. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2017; 54(3): 9-14. (In Rus.)

4. Zotov A.A., Agafonova L.I., Shamsutdinov Z.Sh., Golovin V.P., Shamsutdinov N.Z. Energy-economic assessment of natural pasture ecosystems in Russia. *Netraditsionnoe ekorastenievodstvo, selektsiya, genetika i biozemledelie. Okhrana bionoosfery i kosmologiya. Filosofiya estestvoznaniya i ekoobrazovanie v triedinstve ekonomiki, ekologii i zdorov'ya*: *trudy XXVIII mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma*. 2019: 62-73. (In Rus.)

5. Dzhibilov S.M., Gulueva L.R., Korobeinik I.A. Unit for raking stones with the simultaneous automatic sowing of grasses on mountain meadows and pastures of the North Caucasus. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2018; 55(1): 106-112. (In Rus.)

6. Trubilin E.I., Sokht K.A., Konovalov V.I. Improving the technological efficiency of disc harrows. *Sel'skiy mekhanizator*. 2013; 3: 8-9. (In Rus.)

7. Dzhibilov S.M., Gulueva L.R. Multifunctional unit for improving mountain meadows and pastures. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2016; 53(3): 103-111. (In Rus.)

8. Sokht K.A., Konovalov V.I. Working unit of the soil-cultivating tool. Utility model patent RU195543 U1, Jan 30, 2020. (In Rus.)

9. Kudzaev A.B., Urtaev T.A., Tsgoev A.E., Korobeynik I.A., Tsgoev D.V. Study of elastic composite rods for creating fuses of tilthers. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2017; 8(11): 658-666.

10. Dzhibilov S.M., Gulueva L.R. Method for surface improvement of mountain meadows and pastures. *Proceedings of the Gorsky State Agrarian University*. 2013; 50(1): 171-174. (In Rus.)

11. Dzhibilov S.M., Gulueva L.R., Gabaraev F.A., Soldatova I.E., Abieva T.S. Method for improving mountain meadows and pastures: Patent for invention RU2431248 C2, Oct 20, 2011, 2009. (In Rus.)

12. Sokht K.A., Konovalov V.I. Spherical disk of a soil-cultivating tool. Utility model patent RU178145 U1, March 26, 2018. (In Rus.)

13. Trubilin E.I., Sokht K.A., et al. Deepening capacity of disc harrows and cultivators. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela.* 2013; 11: 31-34. (In Rus.)

14. Dzhibilov S.M., Gulueva L.R., Bestaev S.G. Row spacing cultivator as a hiller of mother bushes in a fruit nursery. *Proceedings of the Gorsky State Agrarian University*. 2014; 51(4): 201-207. (In Rus.)

Критерии авторства

Джибилов С.М., Солдатов Э.Д., Гулуева Л.Р., Бидеев С.И. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов подготовили рукопись. Джибилов С.М., Солдатов Э.Д., Гулуева Л.Р., Бидеев С.И.имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 13.04.2022

Одобрена после рецензирования 11.07.2022

Принята к публикации 15.07.2022

Contribution

S.M. Dzhibilov, E.D. Soldatov, L.R. Gulueva and S.I. Bideev performed theoretical studies and, based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. S.M. Dzhibilov, E.D. Soldatov, L.R. Gulueva and S.I. Bideev have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 13.04.2022

Approved after reviewing 11.07.2022

Accepted for publication 15.07.2022

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 519.87 : 633.491
DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-43-46

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОТДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ ОТ КАРТОФЕЛЯ НА ЭЛЕВАТОРЕ

БЕЛОВ МИХАИЛ ИВАНОВИЧ✉***,*** *д-р техн. наук, профессор* [1]
belov@rgau-msha.ru✉; Scopus Author ID: 57212563127
ГАДЖИЕВ ИМРАН ПАРВИЗОВИЧ, *инженер* [2]
imgadjiev@mail.ru
ШЕМЯКИН АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ, *д-р техн. наук, профессор* [2]
shem.alex62@yandex.ru
КАБДИН НИКОЛАЙ ЕГОРОВИЧ, *канд. техн. наук, доцент* [1]
energo-nek@rgau-msha.ru
МЕЛЬНИКОВ ОЛЕГ МИХАЙЛОВИЧ, *канд. техн. наук, доцент* [1]
melnikov@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-3202-8799; Scopus Author ID: 57209744643

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

[2] Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева; 390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, 1

Аннотация. В связи с недостаточностью теоретических исследований моделирования сепарации картофеля на прутковом элеваторе проведены исследования полноты сепарации картофеля на элеваторе картофелеуборочного комбайна типа КПК-3. Представлена математическая модель отделения примесей от картофеля на элеваторе картофелеуборочного комбайна, позволяющая рассчитать полноту сепарации на элеваторе. Получены уравнения распределения полноты сепарации по длине полотна элеватора и обоснованы уравнения связи между длиной элеватора и полнотой сепарации. Установлено, что полнота сепарации функционально зависит от длины участка полотна элеватора и двух коэффициентов, каждый из которых можно определить по экспериментальным данным полноты сепарации на двух участках рабочей ветви элеватора. Установлено, что на картофелеуборочном комбайне типа КПК-3 90%-ная полнота сепарации достигается при увеличении длины пруткового элеватора до 1800 мм при заданной доле отделившихся примесей 50% на участке длиной 600 мм, и 75% – на участке длиной 1000 мм.

Ключевые слова: картофелеуборочный комбайн, элеватор, полнота сепарации, математическая модель сепарации

Формат цитирования: Белов М.И., Гаджиев И.П., Шемякин А.В., Кабдин Н.Е., Мельников О.М. Математическая модель отделения примесей от картофеля на элеваторе // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 43-46. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-43-46.

© Белов М.И., Гаджиев И.П., Шемякин А.В., Кабдин Н.Е., Мельников О.М., 2022

ORIGINAL PAPER

MATHEMATICAL MODEL OF SEPARATING POTATO IMPURITIES AT THE ELEVATOR

MIKHAIL I. BELOV✉***,*** *DSc (Eng), Professor* [1]
belov@rgau-msha.ru✉; Scopus Author ID: 57212563127
IMRAN P. GADZHIEV, *Eng* [2]
imgadjiev@mail.ru
ALEKSANDR V. SHEMYAKIN, *DSc (Eng), Professor* [2]
shem.alex62@yandex.ru
NIKOLAY E. KABDIN, *PhD (Eng), Associate Professor* [1]
energo-nek@rgau-msha.ru
OLEG M. MELNIKOV, *PhD (Eng), Associate Professor* [1]
melnikov@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-3202-8799; Scopus Author ID: 57209744643

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

[2] Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev; 1, Kostycheva Str., Ryazan, 390044, Russian Federation

Abstract. Due to the lack of theoretical studies of modelling potato separation on the rod elevator, the authors conducted research of potato separation completeness on the elevator of potato harvester type KPK-3. The research resulted in designing a mathematical model of separating

potato impurities on the potato harvester elevator that can help determine the completeness of separation on the elevator. As a result, the authors derived equations of the distribution of separating fineness over the elevator apron length; proved equations of connection between the elevator length and separating fineness. It was established that separation fineness depends functionally on the length of the elevator apron section and two coefficients, each of which can be determined according to the experimental data of separation fineness at two sections of the elevator's operating flight. It is established that when using the KPK-3 type potato harvester, 90% separation is reached when increasing the length of the rod elevator to 1800 mm with a given proportion of separated impurities of 50% at the length of 600 mm and 75% at the length of 1000 mm.

Keywords: potato harvester, elevator, potato separation, mathematical model of separation

For citation: Belov M.I., Gadzhiev I.P., Shemyakin A.V., Kabdin N.E., Melnikov O.M. Mathematical model of separating potato impurities at the elevator. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(6): 43-46. (In Rus.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-43-46.

Введение. Повышение полноты отделения картофеля от примесей является актуальной проблемой уборки урожая картофелеуборочными комбайнами[1] [1-8]. Проблема сепарации картофеля на прутковом элеваторе изучена достаточно широко[2,3,4] [8-13]. Однако вопрос разработки математической модели сепарации, устанавливающей взаимосвязь полноты сепарации с параметрами элеватора (в частности, с длиной элеватора), рассмотрен недостаточно. Представляет интерес математическая модель сепарации зерна в молотильном аппарате зерноуборочного комбайна[2].

Цель исследований: повышение полноты сепарации картофеля на элеваторе картофелеуборочного комбайна типа КПК-3.

Материалы и методы. Вывод уравнений распределения полноты отделения примесей по длине полотна элеватора, обоснование уравнений связи между длиной элеватора и полнотой сепарации основывались на материалах испытаний картофелеуборочных комбайнов [1]. Задача заданной величины сепарации на элеваторе решалась при регламентируемой техническим заданием подаче почвенно-клубненосной массы на элеватор картофелеуборочного комбайна. При разработке модели отделения примесей от картофеля использованы методы математического анализа, численного анализа и среды программирования Lazarus.

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим установившийся режим работы картофелеуборочного комбайна.

На схеме пруткового элеватора (рис. 1) введем следующие обозначения: Oxy – прямоугольная декартова система координат, жестко связанная с комбайном, в плоскости, перпендикулярной рабочему полотну элеватора с центром O на оси ведомого колеса, осью Ox, параллельной скорости точки полотна относительно комбайна; L – длина рабочей ветви полотна элеватора без учета прогиба, м; x – координата точки рабочей ветви полотна элеватора по оси Ox и точки сечения пласта, перпендикулярного оси Ox ($0 \le x \le L$), м; Q – подача клубненосного почвенного пласта, подрезанного лемехом без учета ботвы, кг/с; Q_0 – подача клубней за исключением мелкой фракции, относящейся к примесям, кг/с; Q_1 – подача примесей, которые не разрушены и не могут пройти в зазор между прутками элеватора, кг/с; Q_2 – подача примесей, которые могут пройти в зазор между прутками элеватора, кг/с; Q_3 – подача примесей, отделенных от клубней на участке полотна перед данным сечением пласта, кг/с; m – доля отделившихся примесей на участке полотна элеватора длиной x с отсчетом от начала ($0 \le m \le 1$).

В установившемся режиме переменные Q, Q_0, Q_1, Q_2, Q_3 не зависят от времени. При этом подачи Q и Q_0 не изменяются, а переменные Q_1, Q_2, Q_3 зависят от x. Подача Q определяется скоростью комбайна, заглублением лемеха, шириной захвата и плотностью пласта. Подача Q_0 определяется урожайностью картофеля, скоростью комбайна и шириной захвата.

По определению

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q - Q_0. \quad (1)$$

По мере продвижения пласта на элеваторе некоторые комки разрушаются и переходят в состояние, в котором могут отделиться через зазоры между прутками, то есть с увеличением координаты сечения x подача неразрушенных примесей, которые не могут пройти в зазоры между прутками, уменьшается. Будем полагать, что уменьшение подачи неразрушенных примесей на малом участке полотна тем больше, чем больше подача неразрушенных примесей при линейной связи между подачей и ее изменением на малом участке, то есть

$$\frac{dQ_1}{dx} = -k_1 Q_1, \quad (2)$$

где k_1 – постоянный коэффициент, м$^{-1}$.

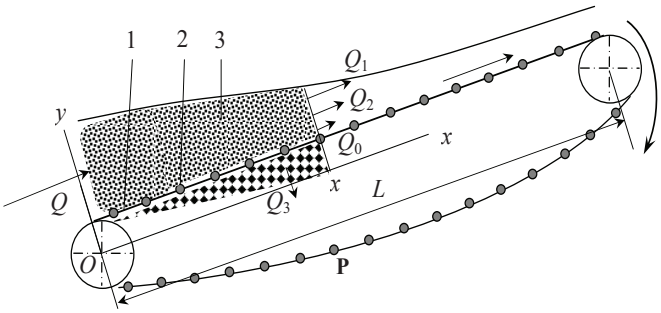


Рис. 1. Схема пруткового элеватора (без указания встряхивателей и поддерживающих роликов):
1 – полотно элеватора; 2 – пруток элеватора;
3 – пласт на участке полотна длиной x от начала

Fig. 1. Scheme of a bar elevator (without specifying shakers and supporting rollers):
1 – elevator apron; 2 – elevator rod;
3 – layer on a apron section with a length of x from the beginning

[1] Суздалева Г.Ф. Технология сепарации почвенно-картофельного вороха с обоснованием конструктивно-режимных параметров элеватора с комбинированными прутками и интенсификатором: Автореф. … канд. техн. наук. Рязань: Рязанская государственная сельскохозяйственная академия им. П.А. Костычева, 2005. 23 с.

[2] Рязанов Н.А. Усовершенствованный технологический процесс и интенсификатор основного элеватора картофелеуборочных машин: Автореф … канд. техн. наук. Рязань: Рязанская государственная сельскохозяйственная академия им. П.А. Костычева, 2012. 20 с.

[3] Босой Е.С. Теория, конструкция и расчет сельскохозяйственных машин / Е.С. Босой, О.В. Верняев, И.И. Смирнов, Е.Г. Султан-Шах; Под ред. Е.С. Босого. М.: Машиностроение, 1978. 567 с.

[4] Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 831 с.

Аналогично полагаем, что отношение изменения подачи отделенных от клубней примесей к изменению длины участка прямо пропорционально подаче примесей, которые могут пройти через зазоры, то есть

$$\frac{dQ_3}{dx} = k_2 Q_2, \qquad (3)$$

где k_2 – постоянный коэффициент, м$^{-1}$.

Три уравнения (1), (2), (3) позволяют определить три неизвестные Q_1, Q_2, Q_3 как функции от x, если заданы подачи Q и Q_0, коэффициенты k_1, k_2 и краевые условия подач на входе пласта на элеватор.

На входе подрезанного лемехом пласта на элеватор имеем

$$Q_1(x)|_{x=0} = Q - Q_0; \quad Q_2(x)|_{x=0} = 0; \quad Q_3(x)|_{x=0} = 0.$$

Решение дифференциального уравнения (2) запишем как

$$Q_1 = (Q - Q_0)e^{-k_1 x}. \qquad (4)$$

Решение дифференциального уравнения (3) после исключения переменной Q_2 с помощью уравнения (1) и подстановки вместо Q_1 выражения (4) можно записать как

$$Q_3 = Q - Q_0 - \frac{Q - Q_0}{k_1 - k_2}\left[k_1 e^{-k_2 x} - k_2 e^{-k_1 x}\right]. \qquad (5)$$

Запишем равенство (5):

$$Q_3 = m(Q - Q_0),$$

где

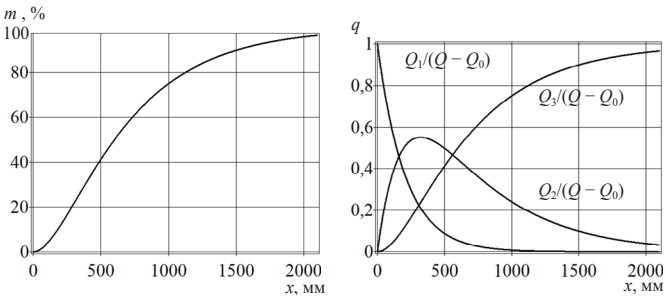
$$m = 1 - \left(k_1 e^{-k_2 x} - k_2 e^{-k_1 x}\right)/(k_1 - k_2). \qquad (6)$$

Из формулы (6) следует, что в рамках модели 100%-ная полнота сепарации достигается на элеваторе бесконечной длины. При этом полнота отделения примесей m на участке элеватора зависит от длины участка и двух коэффициентов: k_1 и k_2. Формула позволяет определить коэффициенты k_1, k_2 по заданной полноте отделения примесей, а также рассчитать длину полотна элеватора при известных коэффициентах k_1, k_2. Уравнения для определения коэффициентов k_1, k_2 по результатам эксперимента, в которых установлены полнота m_1 на участке элеватора длины l_1 и полнота m_2 на участке элеватора длины l_2, запишем как

$$\begin{cases} m_1 = 1 - \left(k_1 e^{-k_2 l_1} - k_2 e^{-k_1 l_1}\right)/(k_1 - k_2) \\ m_2 = 1 - \left(k_1 e^{-k_2 l_2} - k_2 e^{-k_1 l_2}\right)/(k_1 - k_2). \end{cases} \qquad (7)$$

При заданной доле 50% на участке длиной 600 мм, и 75% – на участке длиной 1000 мм из уравнений (7) численным методом Ньютона определены неизвестные коэффициенты[3], имеющие значения $k_1 = 4{,}83$ м$^{-1}$; $k_2 = 1{,}85$ м$^{-1}$.

Расчеты по формуле (6) показали, что 90%-ная полнота сепарации достигается на данном элеваторе при увеличении его длины до 1800 мм и более (рис. 2*a*). При этом на полотне остаются только те примеси, которые могут пройти в зазоры между прутками (рис. 2*b*).



a b

Рис. 2. Зависимость доли *m* отделившихся примесей на участке полотна элеватора (*a*) и относительной подачи *q* примесей (*b*) от длины *x* участка при $k_1 = 4{,}83$ м$^{-1}$; $k_2 = 1{,}85$ м$^{-1}$

Fig. 2. Relationship between the proportion *m* of separated impurities in the section of the elevator apron (a) and the relative supply *q* of impurities (b), and the length *x* of the section at $k_1 = 4.83$ m^{-1}; $k_2 = 1.85$ m^{-1}

Выводы

1. Представленная математическая модель позволяет рассчитать полноту отделения примесей на элеваторе картофелеуборочного комбайна.

2. Полнота отделения примесей от картофеля на прутковом элеваторе зависит от длины участка полотна элеватора и двух коэффициентов, определяемых экспериментально по данным полноты отделения примесей на двух участках рабочей ветви элеватора.

3. На картофелеуборочном комбайне типа КПК-3 90%-ная полнота сепарации достигается при увеличении длины пруткового элеватора до 1800 мм при заданной доле отделившихся примесей 50% на участке длиной 600 мм, и 75% – на участке длиной 1000 мм.

Список использованных источников

1. Петров Г.Д. Картофелеуборочные машины. М.: Машиностроение, 1972. 400 с.

2. Бышов Н.В., Борычев С.Н., Костенко М.Ю., Рембалович Г.К., Байбобоев Н.Г., Жбанов Н.С. Влияние конструктивно-технологической схемы на показатели работы картофелеуборочной машины // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2019. № 1 (41). С. 108-114. EDN: WMFWRX.

3. Нефедов Б.А. и др. Новые технические решения сепарирующих органов картофелеуборочных машин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 124. С. 346-365. https://doi.org/10.21515/1990-4665-124-018

4. Аббасов Г.И. Исследование технологического процесса уборки и послеуборочной обработки картофеля // Аграрная наука. 2019. № 6. С. 33-35. https://doi.org/10.32634/0869-8155-2019-329-6-33-35

5. Бышов Н.В., Борычев С.Н., Рембалович Г.К., Безносюк Р.В., Савина О.А. Математическая модель технологического процесса картофелеуборочного комбайна при работе в условиях тяжелых

References

1. Petrov G.D. Potato harvesters. Moscow, Mashinostroenie, 1972. 400 p. (In Rus.)

2. Byshov N.V., Borychev S.N., Kostenko M.Yu., Rembalovich G.K., Bayboboev N.G., Zhbanov N.S. Influence of the constructive-technological scheme on the performance of a potato harvester. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva*. 2019; 1(41): 108-114 (In Rus.)

3. Nefedov B.A. et al. New technical solutions for separating organs of potato harvesters. *Politematicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016; 124(10): 346-365. https://doi.org/10.21515/1990-4665-124-018 (In Rus.)

4. Abbasov G.I. Study of the technological process of harvesting and post-harvest processing of potatoes. *Agrarnaya nauka*. 2019; (6): 33-35. https://doi.org/10.32634/0869-8155-2019-329-6-33-35 (In Rus.)

5. Byshov N.V., Borychev S.N., Rembalovich G.K., Beznosyuk R.V., Savina O.A. Mathematical model of the technological process of a potato harvester when working in difficult conditions. *Vestnik Ryazanskogo*

суглинистых почв // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2014. № 4 (24). С. 59-64. EDN: TGEQAT.

6. Lü J., Wang P., Liu Z., Li Z., Zou F., Yang D. Design and experiment of potato harvester potato stem separation equipment. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery. 2019; 50 (6): 100-109. http://www.nyjxxb.net/index.php/journal/article/view/829.

7. Xin L., Liang J. A dynamic analysis on the potato conveying and separation system considering the acting force of a material. Transactions of FAMENA. 2019; 43 (SI-1): 35-42. https://doi.org/10.21278/TOF.43Si104

8. Сорокин А.А. Теория и расчет картофелеуборочных машин. М.: ВИМ, 2006. 158 с.

9. Кушнир В.Г., Ким Н.П., Романюк Н.Н., Астрахан Б.М., Клавтусь П.В. Улучшение качества работы элеватора картофелеуборочного комбайна // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 3. С. 41-43. EDN: RZLOKR.

gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva. 2014; 4 (24): 59-64. (In Rus.)

6. Lü J., Wang P., Liu Z., Li Z., Zou F., Yang D. Design and experiment of potato harvester potato stem separation equipment. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. 2019; 50 (6): 100-109. http://www.nyjxxb.net/index.php/journal/article/view/829.

7. Xin L., Liang J. A dynamic analysis on the potato conveying and separation system considering the acting force of a material. *Transactions of FAMENA*. 2019; 43 (SI-1): 35-42. https://doi.org/10.21278/TOF.43Si104

8. Sorokin A.A. Theory and design analysis of potato harvesters. Moscow, VIM, 2006, 158 p. (In Rus.)

9. Kushnir V.G., Kim N.P., Romanyuk N.N., Astrakhan B.M., Klavtus P.V. Improving the quality of the potato harvester elevator. *Traktory i sel'khozmashiny*. 2014; 3: 41-43. (In Rus.)

Критерии авторства

Белов М.И., Гаджиев И.П., Шемякин А.В., Кабдин Н.Е., Мельников О.М. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов подготовили рукопись. Белов М.И., Гаджиев И.П., Шемякин А.В., Кабдин Н.Е., Мельников О.М. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 02.08.2022

Одобрена после рецензирования 13.09.2022

Принята к публикации 14.09.2022

Contribution

M.I. Belov, I.P. Gadzhiev, A.V. Shemyakin, N.E. Kabdin and O.M. Melnikov performed theoretical studies and, based on the results obtained wrote the manuscript. M.I. Belov, I.P. Gadzhiev, A.V. Shemyakin, N.E. Kabdin and O.M. Melnikov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 02.08.2022

Approved after reviewing 13.09.2022

Accepted for publication 14.09.2022

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.333.5
DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-47-53

РАЗРАБОТКА ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА РАЗБРАСЫВАТЕЛЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

ПАНФЕРОВ НИКОЛАЙ СЕРГЕЕВИЧ, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник* [1]
nikolaj-panfyorov@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0001-7431-7834; Researcher ID: CAF-7219-2022
КОСТЕНКО МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ, *д-р техн. наук, профессор* [2]
km340010@rambler.ru; https://orcid.org/0000-0003-3733-3717; Researcher ID: G-9926-2019
ТЕТЕРИН ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник* [1]
v.s.teterin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8116-723X; Researcher ID: G-7742-2019
ПЕХНОВ СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ, *старший научный сотрудник* [1]
pehnov@mail.ru, Researcher ID: CAF-7059-2022
СИБИРЁВ АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ, *д-р техн. наук, старший научный сотрудник* [1]
sibirev2011@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-9442-2276; Researcher ID: M-6230-2016
МОСЯКОВ МАКСИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ ✉***,*** *канд. техн. наук, доцент* [3]
Maks.Mosyakov@yandex.ru ✉; https://orcid.org/0000-0002-5151-7312; Researcher ID: A-8482-2019

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

[2] Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева; 390044, Российская Федерация, Рязанская область, г. Рязань, ул Костычева, д. 1

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

Аннотация. При дифференцированном внесении твердых минеральных удобрений (ТМУ) точно регулировать дозировку и равномерно распределять гранулы по полю позволяют рабочие органы центробежных распределителей удобрений. С целью выявления наиболее рациональных параметров и режимов распределителя ТМУ, влияющих на траекторию полета гранул и равномерность распределения удобрений по полю, проведены теоретические и экспериментальные исследования центробежного диска распределителя твердых минеральных удобрений, оснащенного поворотной разгонной камерой и набором сменных П-образных лопаток. Описано влияние длины лопаток на траекторию и дальность полета гранул удобрений, а также влияние поворота выходного окна разгонной камеры на факел распределения удобрений. На разработанном лабораторном стенде распределителя твердых минеральных удобрений проведен эксперимент по определению аэродинамических свойств гранул нитроаммофоски (60:60:60), который позволил определить физические параметры, влияющие на дальность и траекторию их полета – коэффициент парусности и критическую скорость. Установлено, что смещение выходного окна разгонной камеры распределяющего диска ведет к перемещению зоны интенсивного покрытия в направлении поворота выходного окна разгонной камеры. Это позволяет регулировать интенсивность и оказывает непосредственное влияние на зону рассева гранул твердых минеральных удобрений. Дано обоснование наиболее рациональной конструкции распределяющего диска. Установлено, что наибольшая равномерность распределения твердых минеральных удобрений достигается при использовании диска с 8 попарно соосно расположенными лопатками длиной 300, 250, 200, 100 мм.

Ключевые слова: распределитель твердых минеральных удобрений, центробежные рабочие органы, дифференцированное внесение, равномерность распределения, твердое минеральное удобрение, внесение удобрений, разгонная камера.

Формат цитирования: Панферов Н.С., Костенко М.Ю., Тетерин В.С., Пехнов С.А., Сибирёв А.В., Мосяков М.А. Разработка центробежного рабочего органа разбрасывателя минеральных удобрений // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 47-53. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-47-53.

© Панферов Н.С., Костенко М.Ю., Тетерин В.С., Пехнов С.А., Сибирёв А.В., Мосяков М.А., 2022

ORIGINAL PAPER

DESIGN OF A CENTRIFUGAL WORKING UNIT OF A MINERAL FERTILIZER SPREADER

NIKOLAY S. PANFEROV, *PhD (Eng), Senior Research* [1]
nikolaj-panfyorov@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0001-7431-7834; Researcher ID: CAF-7219-2022
MIKHAIL YU. KOSTENKO, *DSc (Eng), Professor* [2]
km340010@rambler.ru; https://orcid.org/0000-0003-3733-3717; Researcher ID: G-9926-2019

VLADIMIR S. TETERIN, *PhD (Eng), Senior Research* [1]
v.s.teterin@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-8116-723X; Researcher ID: G-7742-2019
SERGEY A. PEKHOV, *Senior Research* [1]
pehnov@mail.ru; Researcher ID: CAF-7059-2022
ALEKSEI V. SIBIRYOV, *DSc (Eng), Senior Research Engineer* [1]
sibirev2011@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-9442-2276; ResearcherID: M-6230-2016
MAKSIM A. MOSYAKOV ✉***,*** *PhD (Eng), Associate Professor* [3]
Maks.Mosyakov@yandex.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-5151-7312; ResearcherID: A-8482-2019
[1] Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation
[2] Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev; 1 Kostycheva Str., Ryazan 390044, Russian Federation
[3] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. In variable-rate application of solid mineral fertilizers (SMF), working units of centrifugal fertilizer distributors can regulate precisely the application rate and evenly distribute pellets over the field. To determine the most rational parameters and modes of a solid fertilizer distributor, influencing the flight path of pellets and the uniformity of their distribution over the field, the authors carried out theoretical and experimental research of a centrifugal disc of a solid fertilizer distributor equipped with a rotary acceleration chamber and a set of exchangeable U-shaped blades. The authors describe the influence of the blade length on the trajectory and the flight distance of the fertilizer pellets as well as the influence of the rotation of the dispersal chamber outlet window on the fertilizer distribution pattern. The experiment on determining aerodynamic properties of the nitroammonium phosphate pellets (60:60:60) was carried out using the developed laboratory bench of the solid fertilizer distributor. The experiment allowed determining the physical parameters of pellets influencing the range and trajectory of their flight – the winglet ratio and the critical speed. It was found that the rotation displacement of the dispersal chamber outlet window of the spreading disc leads to the displacement of the intensive coverage zone in the direction of the window rotation. This makes it possible to regulate the intensity and has a direct impact on the distribution zone of solid mineral fertilizers. The paper justifies the most rational design of the spreading disc. The research proved that the greatest uniformity of solid mineral fertilizer spreading is observed when using a disk with eight paired coaxially located blades with a length of 300, 250, 200, and 100 mm.

Keywords: distributor of solid mineral fertilizers, centrifugal working units, variable-rate application, uniformity of distribution, solid mineral fertilizer, fertilizer application, dispersal chamber

For citation: Panferov N.S., Kostenko M.Yu., Teterin V.S., Pekhov S.A., Sibiryov A.V., Mosyakov M.A. Design of a centrifugal working unit of a mineral fertilizer spreader. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(6): 47-53. (In Rus.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-47-53.

Введение. Современное сельскохозяйственное производство подразумевает не только использование энергоёмких многооперационных машин с автоматическим управлением и контролем выполняемой операции, но и эффективное использование агрономических ресурсов и современных агротехнологий, – в частности, приемов повышения урожайности за счёт рационального применения удобрений [1, 2].

В настоящее время большую часть вносимых удобрений составляют твердые (гранулированные и порошкообразные) минеральные удобрения (ТМУ). От качества, количества и своевременности их внесения зависит раскрытие сортового потенциала культуры в виде урожайности и качества конечного продукта [3-5].

Основные способы внесения ТМУ подразделяются по срокам внесения (основное, припосевное, подкормка), по характеру распределения (внутрипочвенное и поверхностное) и по точности внесения (равномерное и дифференцированное) (рис. 1). Однако большая часть вносимых удобрений приходится на поверхностное основное равномерное внесение (до 70%) [4, 6].

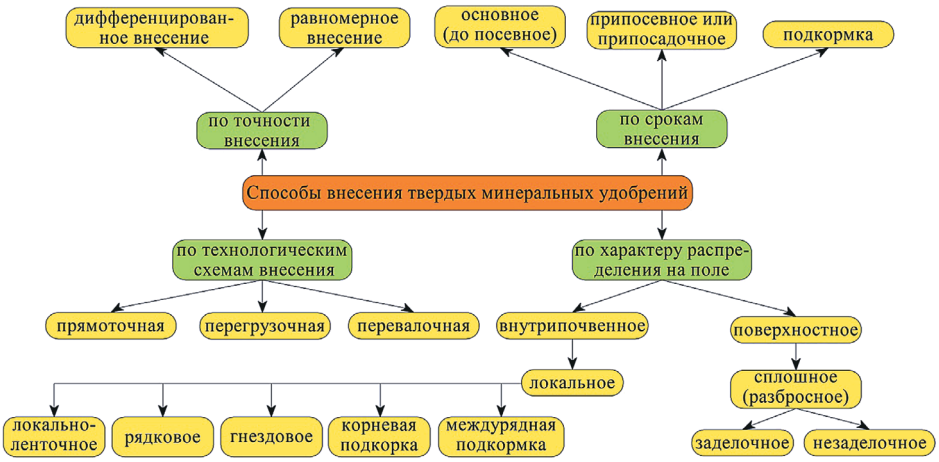


Рис. 1. Способы внесения минеральных удобрений

Fig. 1. Methods of applying mineral fertilizers

Для основного внесения ТМУ чаще всего используются навесные или прицепные распределители твердых минеральных удобрений с центробежными рабочими органами. Сплошное внесение ТМУ на всей площади поля происходит согласно заданной дозе (кг/га), рассчитанной агрономом исходя из текущих агрохимических условий (предшественников, выноса элементов, состава почвы, вида удобрений, количества действующего вещества т.д.) [7].

В последнее время широкое распространение получила технология дифференцированного внесения ТМУ машинами, оснащенными интеллектуальными системами исполнительных механизмов и датчиков, в том числе GPS или ГЛОНАСС, которые на основании химического анализа почвы и согласно карте заданий в автоматическом режиме выставляют дозу ТМУ, необходимую на данном участке поля [1, 8]. Преимуществами данной технологии являются экономия удобрений и их более эффективное использование в сравнении со сплошным внесением, повышение урожайности и качества конечной продукции, а также снижение антропогенной нагрузки на поля. Недостатками же данной системы являются сложность конструкции, высокая стоимость оборудования и компонентов для её применения и недостаток аналогов на отечественном рынке.

При дифференцированном внесении ТМУ лимитирующим фактором проведения данной операции является точная доставка удобрений в заданную площадь питания растений. На процесс дифференцированного распределения ТМУ наибольшее влияние оказывают конструктивные параметры рабочего органа, технологические параметры, а также сопротивление воздуха, возникающее в процессе полета гранулы и влияющее на её траекторию. Для разработки и создания системы дифференцированного внесения ТМУ необходимо определить, как происходит распределение ТМУ по площади поля и какие параметры оказывают наибольшее влияние на данный процесс [9-13].

Цель исследований: проведение теоретических и лабораторных работ, выявление наиболее рациональных параметров и режимов распределителя ТМУ, влияющих на траекторию полета гранул и равномерность распределения удобрений по полю.

Материалы и методы. Траектория полета гранул твердых минеральных удобрений зависит в большей степени от двух показателей:

– коэффициента парусности

$$k_{в} = \frac{2g \cdot \gamma_{г} \cdot d}{3\gamma \cdot V_{кр}^{2}}, \quad (1)$$

где g – ускорение силы тяжести, м/с^2; $\gamma_г$ – плотность гранулы, кг/м^3; γ – плотность воздуха, γ = 1,2 кг/м^3; $V_{кр}$ – критическая скорость гранул (скорость витания), м/с; *d* – диаметр гранул, мм;

– критической скорости

$$V_{кр.} = \sqrt{\frac{G}{k_{в} \cdot \gamma \cdot F}}, \quad (2)$$

где G – сила тяжести, Н; F – миделево сечение гранулы, то есть площадь её проекции на плоскость, перпендикулярную её воздушному потоку, м.

Для определения этих значений проведён лабораторный эксперимент по определению аэродинамических свойств ТМУ – в частности, нитроаммофоски (60:60:60). Отбиралась и взвешивалась проба удобрений массой 500 г с точностью до первого десятичного знака. Полученная проба просеивалась вручную через набор сит с размером ячеек 1…6 мм и частотой возвратно-поступательного перемещения 120 раз в 1 мин при амплитуде движений 70 мм. После просева остатки с каждого сита отбирались и взвешивались с точностью до первого десятичного знака. В результате в процентном соотношении получился следующий гранулометрический состав удобрения: фракция 6 мм и более – 0,1%; 5…6 мм – 5%; 4…5 мм – 30,3%; 3…4 мм – 54,5%; менее 3 мм – 10,1%.

Для определения аэродинамических показателей использовалась лабораторная установка (рис. 2).

На подставке *6* смонтирован отстойник *12* и вертикальный канал *11*. Включение установки производится при помощи пускателя *1*, подающего напряжение на электродвигатель *2*. В свою очередь, электродвигатель *2* приводит во вращение вентилятор *10*, который засасывает воздух через вертикальный канал *11*, отстойник *12*, трубопровод *13* и через выходной патрубок *4* выпускает его в окружающее пространство. Скорость воздушного потока регулируется с помощью механизма воздействия на воздушную заслонку *3*. Величина открытия заслонки определяется показателем стрелки на шкале *9*. Деление 100 соответствует полному закрытию заслонки, а деление 0 – полному открытию.

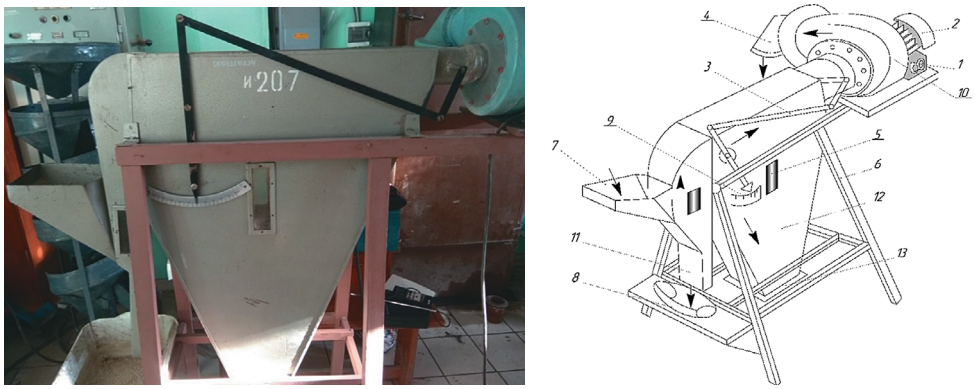


Рис. 2. Общий вид лабораторной установки по определению аэродинамических свойств гранул ТМУ:
1 – пускатель; 2 – электродвигатель; 3 – механизм регулировки воздушной заслонки; 4 – выходной патрубок; 5 – смотровое окно; 6 – подставка под очиститель; 7 – загрузочный бункер; 8 – ковш; 9 – шкала положения заслонки; 10 – вентилятор; 11 – вертикальный канал; 12 – отстойник; 13 – трубопровод

Fig. 2. General view of a laboratory installation for determining the aerodynamic properties of solid mineral fertilizer pellets:
1 – starter; 2 – electric motor; 3 – air damper adjustment mechanism; 4 – outlet pipe; 5 – viewing window; 6 – stand for a cleaner; 7 – loading hopper; 8 – bucket; 9 – damper position scale; 10 – fan; 11 – vertical channel; 12 – sump; 13 – pipeline

Для проведения эксперимента в пятикратной повторности было отсортировано по 500 г каждой из фракций удобрений. После осуществления пуска установки навеску гранул минеральных удобрений массой 100 г постепенно засыпали в загрузочный бункер. Поворотом заслонки *3* устанавливалась минимальная и максимальная скорость воздушного потока. Скорость, при которой начиналось выделение легкой фракции навески в отстойник *12*, принималась за минимальную, а при «поднятии» всей навески скорость считалась максимальной. Диапазон между максимальной и минимальной скоростью подразделяли на 10 интервалов, пользуясь показаниями шкалы регулировки заслонки. Через каждые 5 мин работы замеряли скорость воздушного потока, для чего использовался термоанемометр модели DT-8880. На основании полученных данных для каждой из фракций минеральных удобрений диапазон значений критической скорости $V_{кр}$ составил 3,7…11 м/с. После этого расчетным путем определялся коэффициент парусности гранул твердых минеральных удобрений $k_в$, который составил 0,07.

Лабораторный эксперимент проведён на разработанном компактном лабораторном стенде, который с помощью датчиков и широкого диапазона регулировок технологического процесса имеет возможность собирать данные о работе исследуемого узла [14]. Данный стенд включает в свой состав все элементы серийного распределителя ТМУ: распределяющий диск, дозирующее устройство, ворошители и др. [15, 16] (рис. 3а).

Работу по распределению ТМУ по полю осуществляет центробежный распределяющий диск с лопатками, а количество удобрений и доставка их на распределяющий диск определяется и осуществляется системой дозирования. Анализ конструкций распределяющего диска показал перспективность систем, оснащенных камерами разгона, имеющих более двух лопаток разной длины [8]. В таких системах происходит дозированное поступление гранул на диск распределителя, их сход с лопаток разной длины позволяет вносить удобрения «послойно», контролировать и регулировать данный процесс.

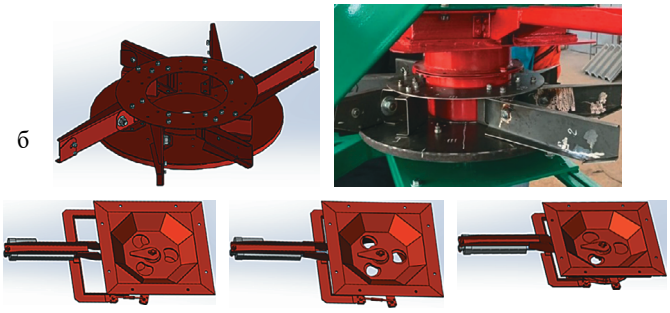
На лабораторный стенд распределителя ТМУ спроектирован и смонтирован диск с разгонной камерой, сменными лопатками и системой дозирования (рис. 3б) [17].

После определения гранулометрического состава и аэродинамических свойств гранул, учитывая площадь отведенной опытной делянки 150 м^2 и среднестатистическую дозу вносимых удобрений 400 кг/га ($N_{60}P_{60}K_{60}$), минеральное удобрение нитроаммофоски расфасовали на порции по 6 кг. Для определения равномерности распределения минеральных удобрений были применены лотки размером 500 х 500 мм согласно ГОСТ 28714-2007[1]. Изготовленные лотки расставлялись на площади 150 м^2 в ангаре согласно схеме, представленной на рисунке 4.

После расстановки лотков лабораторный стенд подключался к источнику питания и персональному компьютеру с установленной на нем интеллектуальной системой управления технологическими процессами внесения твердых минеральных удобрений. Затем на нем монтировался экспериментальный диск разбрасывателя центробежного типа с выбранными числом, длиной и формой лопаток. В процессе исследования использовались прямые лопатки «П-образной» формы длиной от 100 до 300 мм. Высота установки распределяющего диска от земли составила 0,7 м, угол наклона относительно горизонта – 0°, частота вращения – 550 об/мин.

В бункер лабораторного стенда загружалась порция минеральных удобрений. При выходе двигателя на заданную частоту вращения производился выбор необходимого расстояния выдвижения штифта актуатора для открытия шиберных заслонок на нужную величину и начинался процесс распределения удобрений. После завершения каждой повторности происходил сбор и проводилось взвешивание образцов из каждого лотка.

а



б

Рис. 3. Разработанный лабораторный стенд распределителя твердых минеральных удобрений:
а – общий вид; б – система дозирования и распределяющий диск

Fig. 3. Developed laboratory bench of the distributor of solid mineral fertilizers:
a – general view; b – dosing system and distributing disk

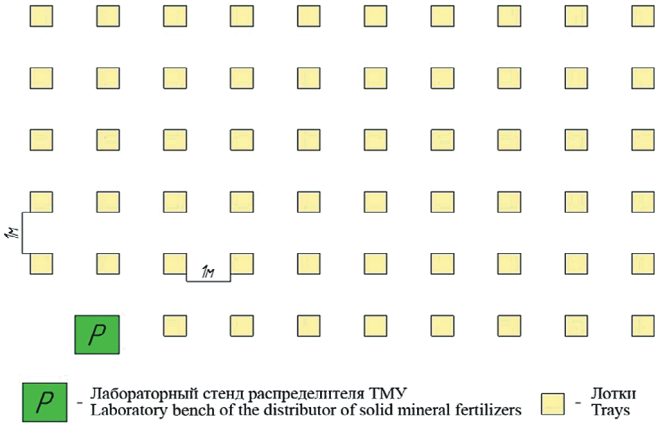


Рис. 4. Схема расположения лотков

Fig. 4. Layout of the trays

[1] ГОСТ 28714-2007. Машины для внесения твердых минеральных удобрений. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2008. 69 с.

Результаты и их обсуждение. Одним из факторов, наиболее влияющих на равномерность внесения твердых минеральных удобрений, является траектория их полета после схода с лопаток центробежного разбрасывающего диска. На траекторию полета гранул минеральных удобрений влияют не только технические и технологические параметры лабораторного стенда разбрасывателя центробежного типа, но и абсолютная скорость схода частицы с диска, высота расположения диска над поверхностью земли и аэродинамические свойства самих гранул твердых минеральных удобрений. Проведенные теоретические исследования [18, 19] позволили определить относительную скорость движения частиц по лопатке распределяющего диска (3) и дальность полета гранул (4):

$$V_R = \frac{R_0 \cdot \omega^2 \cdot (\cos\varphi_0 - \sin\varphi_0) + S_Л \cdot \omega^2 - f \cdot g}{f \cdot \omega} + \left(V_0 - \frac{R_0 \cdot \omega^2 (\cos\varphi_0 - f\sin\varphi_0) + S_Л \cdot \omega^2 - f \cdot g}{f \cdot \omega}\right) \cdot e^{-f\omega t}, \quad (3)$$

где V_R – относительная скорость движения частицы по лопатке, м/с; R_0 – расстояние начала лопатки от центра диска, м; φ_0 – начальное значение угла φ, рад; $S_Л$ – путь, пройденный частицей по лопатке, м; ω – угловая скорость вращения диска, рад/с; *f* – коэффициент трения удобрения по металлу; V_0 – скорость частицы на выходе из разгонной камеры, м/с;

$$l_x = \frac{\ln(k_в V_{нач} t + 1)}{k_в}, \quad (4)$$

где $V_{нач}$ – скорость гранулы в момент схода её с лопатки, м/с; t – время полета гранулы, с; l_x – дальность полета гранулы, м.

Полученный коэффициент парусности позволил рассчитать траекторию полета гранул удобрений в зависимости от длины установленных на распределяющем диске лопаток и угла расположения окна разгонной камеры лабораторного стенда распределителя ТМУ (рис. 5).

Отметим, что изменение положения разгонной камеры позволяет изменять направление факела распределения ТМУ в направлении, соответствующем направлению поворота. При длине лопаток 0,3 м ширина зоны распределения составляет примерно 16 м, а дальность зоны распределения – 8 м (рис. 5а). В то же время при длине лопаток 0,1 м ширина зоны распределения снижается примерно до 12 м, а дальность – до 6 м (рис. 5б).

Можно предположить, что для максимального увеличения зоны покрытия и сохранения высокой равномерности на всем удалении от распределяющего диска рациональным является использование разбрасывающего диска с комплектом лопаток разной длины.

Для подтверждения теоретических зависимостей на лабораторном стенде по представленной выше методике проведены лабораторные исследования по определению рационального угла опережения выходного окна разгонной камеры.

Проекции распределения гранул ТМУ диском с четырьмя парами лопаток разной длины в зависимости от угла опережения выходного окна разгонной камеры распределяющего диска представлены на рисунке 6.

Установлено, что смещение выходного окна разгонной камеры распределяющего диска ведет к перемещению зоны интенсивного покрытия в направлении поворота выходного окна разгонной камеры, что позволяет регулировать интенсивность рассева гранул ТМУ.

Теоретические исследования показали влияние длины лопаток на скорость и дальность полёта гранул удобрений. Для проверки теоретических данных проведена серия экспериментов, в которой варьировались длина лопаток, частота вращения диска, положение выходного окна разгонной камеры. В ходе проведения экспериментальных исследований подтверждено влияние на дальность полёта гранул и их распределение по площади рассева длины лопаток (рис. 7, 8).

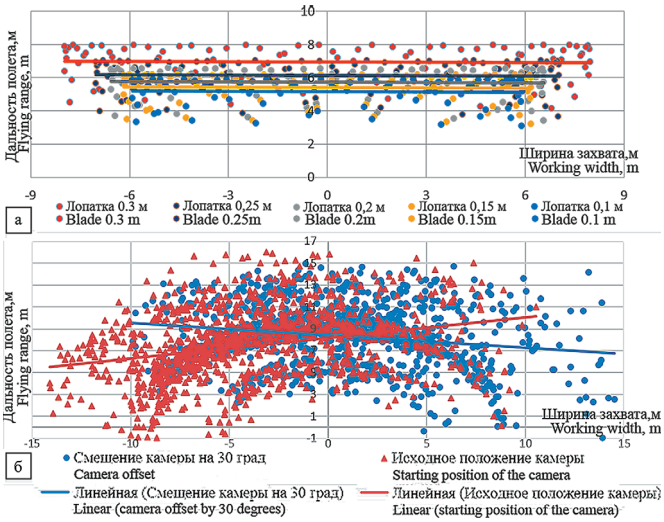


Рис. 5. Распределение гранул удобрения диском с различной длиной лопаток (а) и поворотом разгонной камеры на 30° (б)

Fig. 5. Fertilizer distribution zone for different blade lengths (a), displacement of the distribution pattern when the acceleration chamber is rotated by 30° (b)

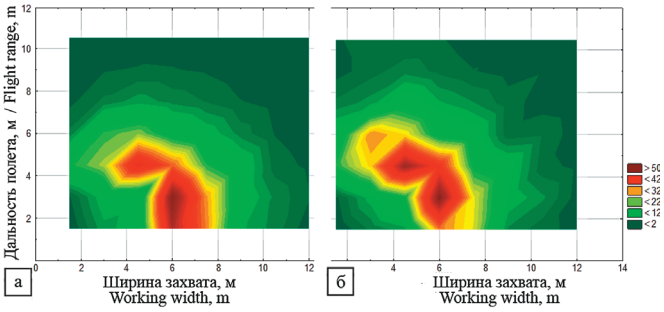


Рис. 6. Проекция распределения гранул минеральных удобрений при угле опережения выходного окна разгонной камеры +30° (а) и 0° (б)

Fig. 6. Projection of the distribution of mineral fertilizer pellets when using a disk with pairs of blades of different lengths and the advance angle of the dispersal chamber output window +30° (a) end 0° (b)

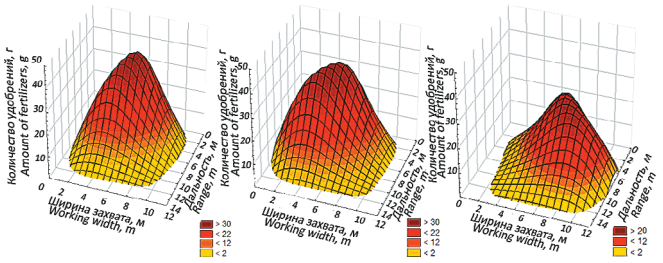


Рис. 7. График поверхности распределения ТМУ по площади рассева диском с 6 одинаковыми лопатками длиной 200 мм (а), 250 мм (б) и 300 мм (в)

Fig. 7. Using distributing discs with a different set of blades: a) with six blades with a length of 200 mm b) with six blades with a length of 250 mm c) with six blades with a length of 300 mm

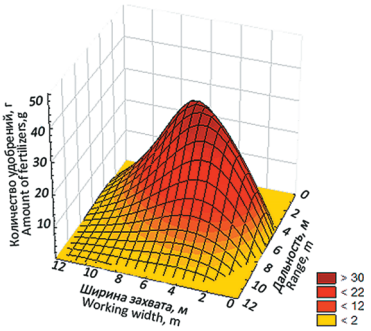


Рис. 8. График поверхности распределения ТМУ по площади рассева диском с 8 соосно расположенными лопатками:
1 пара – 100 мм; 2 пара – 200 мм; 3 пара – 250 мм; 4 пара – 300 мм

Fig. 8. Graph of the surface of the distribution of solid mineral fertilizers over the despersion area when using a disk with pairs of blades of different lengths:
100 mm; 200 mm; 250 mm; 300 mm

В результате экспериментальных исследований установлено, что длина лопаток оказывает существенное влияние на дальность полёта гранул и их распределение по площади рассева. Так, с увеличением длины лопаток возрастают ширина захвата и дальность полёта гранул. При сравнении результатов установлено, что максимальное количество удобрений на единицу площади снижается с 35 г при длине лопатки 200 мм до значения менее 20 г при длине лопатки 300 мм. При этом наблюдается перераспределение ТМУ по площади рассева, а также увеличивается ширина захвата с 10 м до 12 м соответственно. Наблюдаются перераспределение частиц по площади и смещение зоны рассева относительно центра по ходу вращения диска.

Выводы

1. Для возможности регулировки равномерности распределения твердых минеральных удобрений разбрасывателями центробежного типа необходимо зону с наибольшей дозой внесения удобрений располагать по центру ширины захвата.

2. Смещение выходного окна разгонной камеры, оказывающее влияние на зону рассева гранул ТМУ, может использоваться для корректировки внесения минеральных удобрений.

3. Наибольшая равномерность распределения твердых минеральных удобрений достигается при использовании диска с комбинацией 8 лопаток разной длины: 2 шт. – 300 мм; 2 шт. – 250 мм; 2 шт. – 200 мм; 2 шт. – 100 мм (при попарном соосном расположении лопаток одной длины).

Список использованных источников

1. Личман Г.И., Белых С.А., Марченко А.Н. Способы внесения удобрений в системе точного земледелия // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12, № 4. С. 4-9. https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-4-4-9

2. Тетерина О.А., Костенко Н.А. Совершенствование машин для внесения минеральных удобрений // Юность и знания – гарантия успеха-2017: Сборник научных трудов 4-й Международной молодежной научной конференции. Курск, 2017. Т. 2. С. 202-205. EDN: XDHTHX.

3. Li Z.X., Chi F.Q., Zhang J.M., Kuang E.J., Su Q.R. Effects of long-term localized fertilization on nutrient balance and dynamic change of humic acid molecular structure in black soil. Spectroscopy and spectral analysis. 2018; 38 (12): 3875-3882.

4. Romanenkov V., Belichenko M., Petrova A., Raskatova T., Jahn G., Krasilnikov P. Soil organic carbon dynamics in long-term experiments with mineral and organic fertilizers in Russia. Geoderma Regional. 2019; 17: e00221. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00221

5. Дорохов А.С., Новиков Н.Н., Митрофанов С.В. Интеллектуальная технология формирования системы удобрения // Техника и оборудование для села. 2020. № 7 (277). С. 2-5. EDN: QFDQTX.

6. Zhang X., Dong W., Dai X., Schaeffer S., Yang F., Radosevich M., Xu L., Liu X., Sun X. Responses of absolute and specific soil enzyme activities to long term additions of organic and mineral fertilizer. Science of The Total Environment. 2015; 536: 59-67. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.043

7. Андреев К.П. Направление совершенствования машин для поверхностного внесения минеральных удобрений // Принципы и технологии экологизации производства в сельском, лесном и рыбном хозяйстве: Материалы 68-й Международной научно-практической конференции. Рязань: РГАТУ им. П.А. Костычева, 2017. С. 17-21. EDN: ZFFMOX.

8. Панферов Н.С., Тетерин В.С., Митрофанов С.В., Благов Д.А., Пехнов С.А., Сухоруков Д.Г. Тенденции развития машин с центробежными рабочими органами для поверхностного внесения твердых минеральных удобрений // Техника и оборудование для села. 2021. № 12 (294). С. 18-24. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-12-18-24

9. Пигорев И.Я., Солошенко В.М., Наумкин В.Н., Наумкин А.В., Хлопяников А.М., Хлопяникова Г.В. Об инновационных технологиях в земледелии // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 3. С. 32-36. EDN: WLAQLJ.

10. Андреев К.П., Костенко М.Ю., Шемякин А.В., Макаров В.А. Терентьев, В.В. Совершенствование центробежных разбрасывателей для поверхностного внесения минеральных удобрений // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2017. № 1 (33). С. 54-59. EDN: YTORGT.

References

1. Lichman G.I., Belykh S.A., Marchenko A.N. Methods of fertilization in precision farming. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2018; 12(4): 4-9. https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-4-4-9 (In Rus.)

2. Teterina O.A., Kostenko N.A. Improving machines for applying mineral fertilizers. *Yunost' i znaniya – garantiya uspekha – 2017*: *sb. nauch. tr. 4-y Mezhdunar. molodezhnoy nauch. konf. In two vol.* 2017: 202-205. (In Rus.)

3. Li ZX., Chi FQ., Zhang JM., Kuang EJ., Su QR. Effects of Long-Term Localized Fertilization on Nutrient Balance and Dynamic Change of Humic Acid Molecular Structure in Black Soil. *Spectroscopy and spectral analysis*. 2018; 38(12): 3875-3882.

4. Romanenkov V., Belichenko M., Petrova A., Raskatova T., Jahn G., Krasilnikov P. Soil organic carbon dynamics in long-term experiments with mineral and organic fertilizers in Russia. Geoderma Regional. 2019; 17: e00221. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00221

5. Dorokhov A.S., Novikov N.N., Mitrofanov S.V. Intelligent technology for establishing a fertilizer system. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2020; 7 (277): 2-5. (In Rus.)

6. Zhang X., Dong W., Dai X., Schaeffer S., Yang F., Radosevich M., Xu L., Liu X., Sun X. Responses of absolute and specific soil enzyme activities to long term additions of organic and mineral fertilizer. *Science of The Total Environment.* 2015; 536: 59-67. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.043

7. Andreev K.P. Ways of improving machines for the surface application of mineral fertilizers. *Printsipy i tekhnologii ekologizatsii proizvodstva v sel'skom, lesnom i rybnom khozyaystve*: sb. Ryazan': RGATU im. P.A. Kostycheva. 2017: 17-21. (In Rus.)

8. Panferov N.S., Teterin V.S., Mitrofanov S.V., Blagov D.A., Pekhnov S.A., Sukhorukov D.G. Trends in the development of machines with centrifugal working elements for the surface application of solid mineral fertilizers. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2021; 12(294): 18-24. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-12-18-24 (In Rus.)

9. Pigorev I.Ya., Soloshenko V.M., Naumkin V.N., Naumkin A.V., Khlopyanikov A.M., Khlopyanikova G.V. On innovative technologies used in agriculture. *Vestnik Kurskoy GSKHA*. 2016; 3: 32-36. (In Rus.)

10. Andreev K.P., Kostenko M.Yu., Shemyakin A.V., Makarov V.A., Improving centrifugal spreaders for surface application of mineral fertilizers. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva*. 2017; 1(33): 54-59. (In Rus.)

11. Andreev K.P. Influence of the uneven application of fertilizers on the yield. *Printsipy i tekhnologii ekologizatsii proizvodstva v sel'skom,*

11. Андреев К.П. Влияние неравномерности внесения удобрений на урожайность // Принципы и технологии экологизации производства в сельском, лесном и рыбном хозяйстве: Материалы 68-й Международной научно-практической конференции. Рязань: РГАТУ им. П.А. Костычева, 2017. С. 13-17. EDN: ZEYNKX.

12. Shemyakin A.V., Borychev S.N., Uspenskiy I.A., Andreev K.P., Terentyev V.V. Improvement of the technological process of surface application of mineral fertilizers. BIO Web of Conferences. International Scientific-Practical Conference «Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources» (FIES2019). 2020: 00192. https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700192

13. Andreev K., Terentyev V., Shemyakin A. Technological process of application of mineral fertilizers by self-loading machine. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science // XII International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, 2019; 403: 012180.

14. Лабораторный стенд для исследования физико-механических свойств различных видов твердых минеральных удобрений и рабочих органов разбрасывателей центробежного типа: Патент RU2748068 C1, МПК A01C15/00, A01C17/00 / В.С. Тетерин, С.А. Пехнов, Н.С. Панферов и др.; заяв. № 2020136018 от 02.11.2020; опубл. 19.05.2021. EDN: UZFOHM.

15. Панферов Н.С., Тетерин В.С., Пехнов С.А., Сухоруков Д.Г. Разработка лабораторного стенда для исследования рабочих органов распределителей удобрений центробежного типа // Техника и оборудование для села. 2020. № 7 (277). С. 26-29. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-7-26-29

16. Интеллектуальная система управления лабораторным стендом для исследования рабочих органов разбрасывателей центробежного типа: Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ RU2020667366 / Н.С. Панферов, Н.Н. Новиков, В.С. Тетерин и др.: заяв. № 2020664608 от 19.11.2020; опубл. 23.12.2020. EDN: GGIZXT.

17. Рабочий орган для центробежного разбрасывателя удобрений и мелиорантов: Патент RU2744735 C1, МПК A01C17/00 / В.С. Тетерин, Н.Н. Новиков, С.А. Пехнов и др.; заяв. № 2020131770 от. 28.09.2020; опубл. 15.03.2021. EDN: WKBYAF.

18. Костенко М.Ю., Тетерин В.С., Панферов Н.С., Пехнов С.А., Сухоруков Д.С., Пехнов А.С. Теоретическое обоснование движения гранул минеральных удобрений после схода с разбрасывающего диска // Техника и оборудование для села. 2021. № 12 (294). С. 25-28. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-12-25-28

19. Костенко М.Ю., Гайбарян М.А., Тетерин В.С., Панферов Н.С., Митрофанов С.В., Гапеева Н.Н. Теоретическое обоснование параметров рабочих органов разбрасывателя центробежного типа // Техника и оборудование для села. 2021. № 2 (284). С. 16-20. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-2-16-20

lesnom i rybnom khozyaystve: sb. Ryazan': RGATU im. P.A. Kostycheva. 2017: 13-17. (In Rus.)

12. Shemyakin A.V., Borychev S.N., Uspenskiy I.A., Andreev K.P., Terentyev V.V. Improvement of the technological process of surface application of mineral fertilizers. *BIO Web of Conferences. International Scientific-Practical Conference «Agriculture and Food Security*: *Technology, Innovation, Markets, Human Resources»* (FIES2019). 2020: 00192. https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700192

13. Andreev K., Terentyev V., Shemyakin A. Technological process of application of mineral fertilizers by self-loading machine. *IOP Conference Series*: *Earth and Environmental Science. XII International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry*, 2019; 403: 012180.

14. Teterin V.S., Pekhnov S.A., Panferov N.S. et al. Laboratory bench for the study of the physical and mechanical properties of various types of solid mineral fertilizers and the working elements of centrifugal type spreaders: Patent No. 2748068 C1 Rossiyskaya Federaciya, MPK A01C15/00, A01C17/00, 2021. (In Rus.)

15. Panferov N.S., Teterin V.S., Pekhnov S.A., Sukhorukov D.G. Design of a laboratory bench for the study of the working elements of centrifugal-type fertilizer distributors. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2020; 7(277): 26-29. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-7-26-29 (In Rus.)

16. Panferov N.S., Novikov N.N., Teterin V.S. et al. Intelligent control system of a laboratory bench for the study of the working elements of centrifugal-type spreaders: Certificate of state registration of a computer program RU No. 2020667366 Rossiyskaya Federaciya. No. 2020664608. 2020. (In Rus.)

17. Teterin V.S., Novikov N.N., Pekhnov S.A. et al. Working element for a centrifugal-type spreader of fertilizers and ameliorants: Patent RU No. 2744735 C1 Rossiyskaya Federaciya, MPK A01C17/00: No. 2020131770, 2021. (In Rus.)

18. Kostenko M.Yu., Teterin V.S., Panferov N.S. Pekhnov S.A., Sukhorukov D.S., Pekhnov A.S. Theoretical rationale for the movement of mineral fertilizer pellets after leaving the spreading disk. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2021; 12(294): 25-28. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-12-25-28 (In Rus.)

19. Kostenko M.Yu., Gaybaryan M.A., Teterin V.S. Panferov N.S., Mitrofanov S.V., Gapeeva N.N. Theoretical rationale for the parameters of the working elements of the centrifugal-type spreader. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela.* 2021; 2(284): 16-20. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-2-16-20 (In Rus.)

Критерии авторства

Панферов Н.С., Костенко М.Ю., Тетерин В.С., Пехнов С.А., Сибирёв А.В., Мосяков М.А. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Панферов Н.С., Костенко М.Ю., Тетерин В.С., Пехнов С.А., Сибирёв А.В., Мосяков М.А. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 11.07.2022

Одобрена после рецензирования 29.08.2022

Принята к публикации 19.10.2022

Contribution

N.S. Panferov, M.Yu. Kostenko, V.S. Teterin, S.A. Pekhov, A.V. Sibiryov and M.A. Mosyakov performed theoretical studies and, based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. N.S. Panferov, M.Yu. Kostenko, V.S. Teterin, S.A. Pekhov, A.V. Sibiryov and M.A. Mosyakov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 11.07.2022

Approved after reviewing 29.08.2022

Accepted for publication 19.10.2022

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 622.882 : 633.72
DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-54-58

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЧАЙНЫХ ПЛАНТАЦИЙ

ДИДМАНИДЗЕ РЕМЗИ НАЗИРОВИЧ✉***,*** *канд. экон. наук, доцент*
rdidmanidze@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-9432-7797
БУТУЗОВ АНТОН ЕВГЕНЬЕВИЧ, *старший преподаватель*
abutuzov@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-1222-391X
МАЙСТРЕНКО НИКОЛАЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ, *канд. техн. наук, доцент*
nmaystrenko@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-1268-713X
Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. На сегодняшний день в Краснодарском крае существует потребность в восстановлении заброшенных плантаций чая и рекультивации низкоэффективных старых плантаций. С целью разработки мероприятий реконструкции чайных плантаций в Краснодарском крае проведен анализ зарубежного опыта технологии возделывания чая. Рассмотрены случаи применения подрезки чайных кустов (легкая, глубокая, тяжелая и подрезка под корень) и алгоритм их проведения. Экспериментальными исследованиями, проведенными в 2016-2021 гг. в Республике Грузия, установлена зависимость урожайности чайной плантации от вида подрезки. Результаты исследований показали, что в первый год после тяжёлой подрезки урожайность чайной плантации снижается на 70,6%, однако в последующие 5 лет средняя урожайность повышается на 122,6%. На второй год после полутяжелой и тяжелой подрезки чайные кусты вступили в вегетацию на 6-12 дней раньше. Сделан вывод о том, что выбор оптимального способа подрезки зависит от состояния чайного куста, стратегии аграриев, технического и технологического потенциала чаепроизводителя. Отмечено, что для старых чайных плантаций возрастом 40-60 лет наиболее рациональной операцией является тяжелая подрезка на высоте не более 10…15 см от корневой шейки. В случае применения полутяжёлой подрезки на высоте 25…40 см от корневой шейки под верхними узлами в последующие годы на таких кустах проводят шпалерную подрезку. При перезакладке следует использовать только новые сорта семян, делая акцент на сорте Колхида. Предложена оптимальная технологическая карта по закладке чайных плантаций, включающая в себя плантажную обработку и окультуривание почвы, внесение органических удобрений, разбивку плантации на участки 5…10 га, подготовку посадочных ям. Использование технологической карты с внедрением перспективных мероприятий по подрезке и омолаживанию чайного куста обеспечивает качественное восстановление чайных плантаций с высокими характеристиками урожайной массы чайного материала.

Ключевые слова: изреженность, восстановление чайных плантаций, технологическая карта, подрезка чайных кустов, качество чайного листа.

Формат цитирования: Дидманидзе Р.Н., Бутузов А.Е., Майстренко Н.А. Перспективный способ восстановления чайных плантаций // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 54-58. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-54-58.

© Дидманидзе Р.Н., Бутузов А.Е., Майстренко Н.А., 2022

ORIGINAL PAPER

PROMISING METHOD FOR THE RESTORATION OF TEA PLANTATIONS

REMZI N. DIDMANIDZE✉***,*** *PhD (Econ), Associate Professor*
rdidmanidze@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-9432-7797
ANTON E. BUTUZOV, *Senior Lecturer*
abutuzov@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-1222-391X
NIKOLAY A. MAYSTRENKO, *PhD (Eng), Associate Professor*
nmaystrenko@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-1268-713X
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. Today, in the Krasnodar Krai, there is a need for the restoration of abandoned tea plantations and the reclamation of inefficient old ones. To develop measures for the reconstruction of tea plantations in the Krasnodar Krai, the authors analyzed foreign experience in the tea cultivation technology. In particular, they considered some cases of pruning tea plants (light, deep, heavy, and root pruning) and the algorithm for their implementation. Experimental studies conducted in 2016-2021 in the Republic of Georgia established the dependence of the tea plantation yield on the type of pruning. The research results showed that in the first year after heavy pruning, the tea plantation yield decreased by 70.6%, however, in the next 5 years, the average yield increased by 122.6%. In the second year after light-heavy and heavy pruning, tea plants came into vegetation 6-12 days earlier. Thus it can be concluded that the choice

of the optimal pruning method depends on the state of a tea plant, the strategy of farmers, the technical and technological capacities of tea producers. It is noted that for old tea plantations aged 40-60 years, the most rational operation is heavy pruning at a height of no more than 10…15 cm from the root collar. In the case of using semi-heavy pruning at a height of 25…40 cm from the root collar, under the upper nodes in subsequent years, trellis pruning is recommended. When re-laying the plantation, only new varieties of seeds should be used, with an emphasis on the Kolkhida variety. An optimal technological map for establishing tea plantations has been proposed, including trench plowing and soil cultivation, the application of organic fertilizers, the plantation division into plots of 5…10 ha, and the preparation of planting pits. The use of a technological map with the introduction of promising measures for the pruning and rejuvenation of tea plants provides a high-quality restoration of tea plantations with high quality characteristics of the tea yield.

Keywords: sparseness, restoration of tea plantations, process flow chart, pruning of tea plants, tea leaf quality

For citation: Didmanidze R.N., Butuzov A.E., Maystrenko N.A. Promising method for the restoration of tea plantations. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(6): 54-58. (In Rus.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-54-58.

Введение. На территории Краснодарского края чай выращивается на 30% общей площади. Существует потребность в восстановлении заброшенных плантаций и рекультивации низкоэффективных старых посадок. По данным краевого Министерства сельского хозяйства, в регионе действует программа восстановления чайных плантаций. К 2020 г. удалось восстановить 36 га, при этом эксплуатационная площадь увеличилась всего на 34,3 га. К 2023 г. на Кубани планируется восстановить свыше 450 га чайных плантаций[1].

Опыт различных стран показывает, что самым лучшим агроприемом является систематическое обновление старых насаждений, что, однако, сопряжено с большими финансовыми расходами и тяжелой работой[2].

Изреженная плантация не может быть высокоурожайной. Высокая изреженность чайных плантаций является следствием ненадлежащего ухода (отсутствия ремонта), закладки насаждений на неподготовленных полях, ухудшения водно-физических свойств почвы. К примеру, на некоторых плантациях Грузии за 10 лет урожайность снизилась в 6 раз (с 1700 до 280…350 кг/га). В таких случаях восстановление и реконструкция невозможны, но перезакладка старых неурожайных плантаций в большинстве хозяйств помогла достичь урожайности 15…20 ц/га и окупить затраты [1, 2].

Плантации Краснодарского края являются старыми и достигают 40-60-летнего возраста. Как правило, с 50-летнего возраста наблюдается снижение урожайности чайных кустов. При этом собранный с них и переработанный на фабриках чайный лист не будет иметь высокое качество. Применение кислых удобрений негативно сказывается на долговечности чайного куста возрастных плантаций. Повышение урожайности достигается не только с помощью тяжелой подрезки [1] [3, 4]. На сегодняшний день для Краснодарского края актуальным является предложение перспективного способа восстановления чайных плантаций, включающего в себя реконструкцию устаревших чайных плантаций посредством тяжелой подрезки, внесения органических удобрений, орошения и раскорчёвки насаждений (на сильно амортизированных плантациях).

Цель исследований: разработка мероприятий реконструкции чайных плантаций

Материалы и методы. Типовая технология возделывания чая включает в себя следующие операции:

1. Выкос междурядий и окраин плантации.
2. Корчёвка кустарных сорняков.
3. Шпалерная подрезка плантации.
4. Расчистка дренажных каналов.
5. Борьба с вредителями и болезнями чайных растений.
6. Перекопка междурядий.
7. Транспортировка азотного удобрения.
8. Внесение азотного удобрения.
9. Ручной сбор чайного листа.
10. Транспортировка чайного листа к сдаче на фабрику.
11. Первичная переработка.
12. Вторичная переработка.
13. Фасовка.
14. Реализация.

Рекультивация земель чайного производства подразумевает комплекс инженерно-технических мелиоративных, агротехнических мероприятий, направленных на восстановление продуктивности чая.

Одним из важных мероприятий является ликвидация изреженности чайной плантации. Заполнение изреженных мест на чайной плантации (ремонт) можно проводить посевом семян, высадкой саженцев, пересадкой взрослых кустов. Перед ремонтом в первую очередь должны быть ликвидированы причины, вызвавшие изреженность плантаций.

Подрезка – ведущее агротехническое мероприятие в культуре чая – придает растению желаемую форму и усиливает его развитие, повышает урожайность более молодых побегов-плешей [5]. В зависимости от возраста, ухода, состояния и характера эксплуатации могут применяться различные виды подрезки чайных кустов: легкая, глубокая, тяжелая и подрезка под корень (рис. 1) [2].

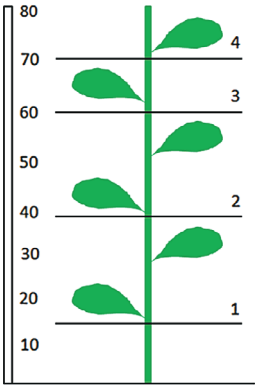


Рис. 1. Типы подрезки чайных кустов:
1 – подрезка под корень (омолаживающая);
2 – тяжелая подрезка; 3 – глубокая подрезка (полутяжелая);
4 – легкая подрезка (шпалерная)

Fig. 1. Types of pruning tea bushes:
1 – pruning at the root (rejuvenating); 2 – heavy pruning;
3 – deep pruning (semi-heavy); 4 – light pruning (trellis)

[1] Возрождение «Краснодарского чая». URL: https://krasnodar.bezformata.com/listnews/vozrozhdenie-krasnodarskogo/89612357 (дата обращения: 15.11.2022).

[2] Масленников А.А., Гвасалия В.П. Прогрессивные приемы возделывания чая. М.: Колос, 1980. 127 с.

С целью ускорения роста почек у молодых деревьев, улучшения ветвления, в том числе укрепления боковых ветвей, проводят моделирующую подрезку. Следует отметить, что большое количество боковых веток обеспечивает поддержку чайного куста, а также способствует сопротивлению морозу [2, 4]. При легкой подрезке чайные кусты буквально «бреют», срезая с веток листья на 10…15 см, чтобы растения смогли легко пережить стресс и достаточно быстро восстановиться.

Для омолаживания каждый год осуществляется шпалерная подрезка на высоте 45…50 см. Глубокую подрезку производят на высоте 40 см, после чего в последующие годы выполняют шпалерную подрезку. Для выравнивания геометрии чайного куста применяют плоскую или полуовальную формы подрезки.

При достижении определенного возраста и наличии симптомов старения используется тяжелая подрезка: с куста срезается 40…60 см, а в случае достаточно высокого куста – около половины растения. Если чайный куст серьезно заболел или перерос, то его срезают под корень, оставляя максимум 10 см над землей. Тяжелая подрезка и подрезка под корень дают растению вторую жизнь [2] (рис. 2) [6].

Рис. 2. Тяжелая подрезка

Fig. 2. Heavy pruning

Необходимо раз в 10 дней наблюдать за ростом прироста, измерять его длину и 1 раз в месяц определять площадь 4,3 и 4,2 листов (значение длины листа умножается на его ширину) [7, 8].

Сроки проведения подрезки чайного куста имеют особое значение. Оптимальный срок для подрезки – март. Для верхних ростовых почек ранняя подрезка (в ноябре) достаточно опасна в связи с возможностью повредить даже при небольших морозах, что может затянуть начало сбора чайного листа.

Результаты и их обсуждение. В зарубежных чаепроизводящих странах подрезку осуществляют в периоды биологически высокой продуктивности и длительной жизнедеятельности чайного куста. В Индии подрезка чайных растений проводится ежегодно в октябре – в период спада ростовых процессов [3].

Исследования, проведённые в течение 5 лет (с 2016 по 2021 гг.) в селе Марадиди Аджария Республики Грузия, показали, что наиболее рационально проводить тяжелую омолаживающую подрезку в ноябре и марте.

По рекомендациям В.П. Гвасалия, для условий Краснодарского края с 15 февраля до 15 апреля необходимо проводить омолаживающую подрезку чайных кустов на высоте 10…15; 15…28; 35…40 см в течение 8 лет [5, 7, 8].

Для условий Краснодарского края и Грузии в первый год после тяжелого омолаживания шпалер происходит восстановление растений только на 50…60%. Лишь на 4-5 годы после тяжелой подрезки шпалеры достигают изначального размера, а ещё через год происходит восстановление до уровня неподрезанной шпалеры.

При шпалерной подрезке средняя длина прироста за год, площадь и аналогичные показатели фона значительно ниже значений показателей при полутяжелой подрезке. Лучшее развитие побегов и наиболее интенсивное накопление химических веществ в чайном листе при шпалерной подрезке отмечены для её плоской формы. В Грузии считают полутяжелую подрезку плоской формы наилучшим вариантом.

Экспериментальные исследования по влиянию разных видов подрезки на урожайность чайной плантации проводились в период 2016-2021 гг. в ООО «АджарЧайИнвест», село Марадиди Аджария Республики Грузия. В таблице представлена урожайность чайных кустов в зависимости от увеличения длины его срезанной части.

Таблица

Влияние разных видов подрезки на урожайность чайной плантации

Table

Influence of different types of pruning on the yield of a tea plantation

Наименование *Name*	**Урожайность чайного листа в год закладки опыта** *Tea leaf yield per year*		**Средняя урожайность за 5 лет** *Average yield for 5 years*	
	кг/га *kg/ha*	%	**кг/га** *kg/ha*	%
Шпалерная подрезка / *Trellis pruning*	1882	100	2273	100
Полутяжелая подрезка (с полным удалением одно двухлистного прироста) *Semi-heavy pruning (with complete removal of one-two-leaf increment)*	1433	76	2442	105
Полутяжелая подрезка (под верхними узлами) *Light-heavy undercut (under upper joints)*	1300	69	2828	117
Тяжелая подрезка (10…15 см от корневой шейки) *Heavy pruning (10…15 cm from the root collar)*	1249	66	2755	115
Тяжелая подрезка у корневой шейки (омоложение) *Heavy pruning at the root collar (rejuvenation)*	553	29	2786	116

Увеличение срезанной части ведёт к снижению урожайной массы чая в первый год закладки опытов (рис. 3) [8].

В последующие 5 лет с момента заложения опыта более сильная подрезка даёт больший урожай чая (рис. 4).

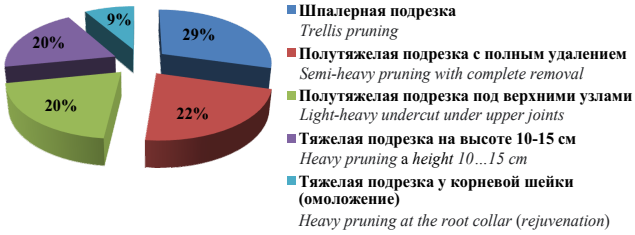


Рис. 3. Повышение урожайность чайного листа в год закладки

Fig. 3. Increasing the yield of tea leaves in the year of laying

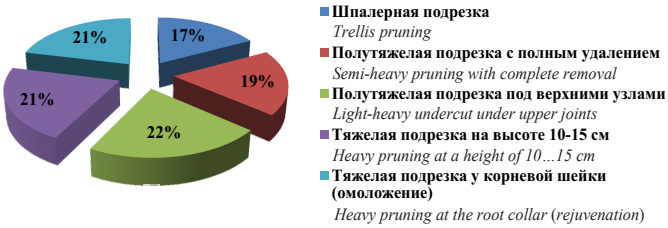


Рис. 4. Средняя урожайность за 5 лет после выполнения подрезок

Fig. 4. Diagram of the average yield for 5 years

Отметим, что начиная со второго года после полутяжелой и тяжелой подрезки, чайные кусты весной вступают в вегетацию раньше на 6-12 дней [2].

Благодаря правильному применению различных видов подрезки удается добиться высокой урожайности, создать наиболее благоприятные условия ухода за плантациями, повысить качество и производительность труда сборщиков, а оставленная в междурядьях подрезанная масса обеспечивает почву органическими веществами [9].

Для большинства чайных плантаций Грузии и Краснодарского края в зависимости от возраста и состояния кустов требуется их полутяжелая подрезка на высоте 25…40 см от корневой шейки, под верхними узлами, а в последующие годы необходимо проведение шпалерной подрезки. Рекомендуется, за редким исключением, тяжелая подрезка на высоте не более 10…15 см от корневой шейки.

Виды подрезки чередуют в следующем порядке. После полутяжелой подрезки под верхними узлами через 6-7 или 10 лет проводят полутяжелую подрезку с удалением 3-5-летнего прироста. Поскольку полутяжелая и тяжелая подрезка в первый год сокращает урожай, то ее проводят периодически только на 5…10% плантации. Отметим, что сбор 2- и 3-листных нежных плешей с омоложенного куста начинается при достижении им высоты 40…50 см. В зависимости от вида омолаживающей подрезки на пенках оставляют 4…5 листов [10].

В период проведения реконструкции диференцированный сбор чайного листа – важный путь восстановления отрасли [4, 7].

Своевременность и качество реконструкции чайных плантаций зависят от организационных мероприятий. В первый год проводится раскорчёвка и глубокая обрезка. На следующий год появляются молодые побеги, и лишь на третий год можно собирать урожай. Необходимо соблюдать планы по реконструкции и перезакладке чайных плантаций. При перезакладке следует использовать только новые сорта семян, делая акцент на сорте Колхида. К сожалению, в регионе отсутствуют питомники, выращивающие молодые чайные кусты [11].

За 20-30 дней до посадки саженцев целесообразно проводить повторную перекопку (с боронованием) с одновременным внесением фосфорных удобрений в количестве 500 кг/га на красноземах и 300 кг/га на других почвах. Для механизации процесса ухода за насаждениями (особенно в молодом возрасте) при закладке плантации кусты размещают так, чтобы была возможность перемещения техники [1, 2]. Способ посадки и количество кустов на 1 га оказывают большое влияние на развитие корневой системы. Высокая приживаемость и возможность высаживать чайные растения в любое время года достигаются благодаря использованию саженцев.

На основе анализа перспективных технологий и агротехнологических требований к выполнению производственных процессов возделывания чая определён ключевой перечень работ и сформулированы агротехнические требования к реализации технологии возделывания чая [12]:

1. Плантажная обработка почвы.
2. Окультуривание почвы.
3. Внесение органических удобрений.
4. Разбивка на участки от 5 до 10 га.
5. Подготовка посадочных ям глубиной 30 см, шириной 25…30 см с одновременным внесением органических удобрений. Весной необходимо применять луночный (гнездовой) посев с внесением фосфорного удобрения в количестве 200…300 кг/га.

Выводы

1. Выбор оптимального способа подрезки зависит от возраста чайной плантации. Возраст кустов более 50 лет негативно сказывается на продуктивности и качестве продукции. Для плантаций 40-60-летнего возраста наиболее рациональной операцией является тяжелая подрезка.

2. Урожайность чайной плантации зависит от вида подрезки. В первый год закладки опытов тяжёлая подрезка приводит к снижению урожайности чайной плантации на 70,6%, но в последующие 5 лет после такой подрезки средняя урожайность повышается на 122,6%.

3. Использование технологических карт с внедрением перспективных мероприятий по подрезке и омолаживанию чайного куста обеспечивает качественное восстановление чайных плантаций с высокими характеристиками урожайной массы чайного материала.

Список использованных источников

1. Дараселия М.К., Воронцов В.В., Гвасалия В.П., Цанава В.П. Культура чая в СССР. Тбилиси: Мецниереба, 1989. 560 с.

2. Дидманидзе Р.Н. Технологии закладки и ухода за чайными плантациями // Агроинженерия. 2021. № 6 (106). С. 38-42. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-6-38-42

3. Рудакова И.Е., Розанова Н.М., Клепач А.Н. и др. Современный рынок: природа и развитие / Под ред. Э.П. Дунаева, И.Е. Рудаковой. М.: Изд-во МГУ, 1992. 132 с.

References

1. Daraselia M.K., Vorontsov V.V., Gvasalia V.P., Tsanava V.P. Tea culture in the USSR. Tbilisi, Metsniereba, 1989. 560 p. (In Rus.)

2. Didmanidze R.N. Technologies for laying and caring for tea plantations. *Agricultural Engineering*. 2021; 6 (106): 38-42. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-6-38-42 (In Rus.)

3. Rudakova I.E., Rozanova N.M., Klepach A.N. et al. Modern market: nature and development; Ed. by E.P. Dunaeva, I.E. Rudakova.

4. Дидманидзе Р.Н. Факторы, влияющие на качество чайного листа // Международный технико-экономический журнал. 2020. № 4. С. 87-93. EDN: QXNNYB.

5. Чхаидзе Г.И., Миколадзе А.Д. Чаеводство. М.: Агропромиздат, 1991. 206 с.

6. Гвасалия М.В. Продуктивность сортов и форм чая разного происхождения в условиях влажных субтропиков // Вестник РАСХН. 2013. № 4. С. 16-18. EDN: QJEGDL.

7. Дидманидзе О.Н., Дидманидзе Р.Н. Повышение эффективности процессов производства и реализации чая. М.: УМЦ «Триада», 2003. 120 с.

8. Дидманидзе Р.Н., Алдошин Н.В. Контроль качества производства чайного листа // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2021. № 25 (188). С. 65-71. EDN: AFMTJU.

9. Малюкова Л.С., Притула З.В., Козлова Н.В., Липова О.В. Оптимизация доз минеральных удобрений на плантациях чая // Садоводство и виноградарство. 2007. № 1. С. 20-23. EDN: HYJYZF.

10. Малюкова Л.С., Козлова Н.В. Эффективность применения минеральных удобрений под чай в условиях длительного многофакторного полевого опыта // Совершенствование организации и методологии агрохимических исследований в географической сети опытов с удобрениями: Материалы Всероссийской научно-методической конференции. М.: ВНИИА, 2006. С. 128-129.

11. Дидманидзе Р.Н., Бутузов А.Е. Перспективы применения малогабаритной техники при восстановлении чайных плантаций // Чтения академика В.Н. Болтинского. М.: ООО «Сам Полиграфист», 2022. С. 252-257. EDN: KRFKSB.

12. Татарченко И.И., Мохначев И.Г., Касьянов Г.И. Технология субтропических и пищевкусовых продуктов. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 384 с.

Критерии авторства

Дидманидзе Р.Н., Бутузов А.Е., Майстренко Н.А. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Дидманидзе Р.Н., Бутузов А.Е., Майстренко Н.А. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 17.06.2022

Одобрена после рецензирования 20.07.2022

Принята к публикации 14.11.2022

Moscow, Publishing House of Moscow State University, 1992. 132 p. (In Rus.)

4. Didmanidze R.N. Factors affecting the quality of the tea leaf. *International Technical and Economic Journal*. 2020; 4: 87-93. (In Rus.)

5. Chkhaidze G.I., Mikoladze A.D. Tea growing. Moscow, Agroproizdat, 1991. 206 p. (In Rus.)

6. Gvasalia M.V. Productivity of varieties and forms of tea of different origin in the conditions of humid subtropics. *Vestnik Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk*. 2013; 4: 16-18. (In Rus.)

7. Didmanidze O.N., Didmanidze R.N. Increasing the efficiency of tea production and sales. Moscow, UMTs "Triada", 2003. 120 p. (In Rus.)

8. Didmanidze R.N., Aldoshin N.V. Quality control of tea leaf production. *Izvestiya sel'skokhozyaystvennoy nauki Tavridy*. 2021; 25 (188): 65-71. (In Rus.)

9. Malyukova L.S., Pritula Z.V., Kozlova N.V., Lipova O.V. Optimizing doses of mineral fertilizers applied in tea plantations. *Sadovodstvo i vinogradarstvo*. 2007; 1: 20-23. (In Rus.)

10. Malyukova L.S., Kozlova N.V. Effectiveness of the use of mineral fertilizers for tea under conditions of a long-term multifactorial field experiment'. *Sovershenstvovanie organizatsii i metodologii agrokhimicheskikh issledovaniy v geograficheskoy seti opytov s udobreniyami*: *Materialy Vserossiyskoy nauchno-metodicheskoy konferentsii*. Moscow, VNIIA, 2006. Pp. 128-129. (In Rus.)

11. Didmanidze R.N., Butuzov A.E. Prospects for the use of small-sized equipment in the restoration of tea plantations. In: Chteniya akademika V.N. Boltinskogo. Moscow, Sam Polygraphist LLC, 2022. Pp. 252-257. (In Rus.)

12. Tatarchenko I.I., Mokhnachev I.G., Kasyanov G.I. Technology of subtropical and food flavoring products. Moscow, Izdatel'skiy tsentr "Akademia", 2004. 384 p. (In Rus.)

Contribution

R.N. Didmanidze, A.E. Butuzov and N.A. Maystrenko performed theoretical studies and, based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. R.N. Didmanidze, A.E. Butuzov and N.A. Maystrenko have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 17.06.2022

Approved after reviewing 20.07.2022

Accepted for publication 14.11.2022

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 658.562.64 : 621.43
DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-59-63

ВЫБОР СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ДЕФЕКТАЦИИ КОРЕННЫХ ОПОР ДВИГАТЕЛЯ ЯМЗ

ЛЕОНОВ ОЛЕГ АЛЬБЕРТОВИЧ✉***,*** *д-р техн. наук, профессор*
oaleonov@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-8469-8052; Scopus Autor ID: 57209748174; Researcher ID: ABC-5873-2020
ГОЛИНИЦКИЙ ПАВЕЛ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ, *канд. техн. наук, доцент*
gpv@ rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7303-1658; Scopus Autor ID: 57216809753; Researcher ID: AAD-6305-2022
АНТОНОВА УЛЬЯНА ЮРЬЕВНА, *канд. техн. наук, доцент*
uantonova@ rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-0126-3550; Scopus Autor ID: 57216809631; Researcher ID: AAD-5690-2022
ЛЕОНОВ ДМИТРИЙ ОЛЕГОВИЧ, *магистрант*
msau.l@yandex.ru
ЗИМОГОРСКИЙ ВЛАДИСЛАВ КИРИЛЛОВИЧ, *магистрант*
zimogorskij@rgau-msha.ru
Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Надежность при ремонте двигателей определяется множественными факторами. При этом важным критерием является сохранение геометрических параметров деталей двигателя в заданных пределах. Подшипник коленчатого вала является высоконагруженным соединением в двигателе. При износе или деформации отверстий под вкладыши коренных подшипников возможен проворот вкладышей, что приводит к отказу и внеочередному дорогостоящему ремонту. Установлено, что рекомендуемые средства измерений в нормативно-технической документации назначаются без связи с допусками контролируемых величин и имеют погрешность, значительно превышающую допускаемую погрешность измерения. Рассмотрена степень влияния погрешности измерений на зону рассеяния размеров коренных опор двигателя при дефектации. Теоретически доказаны критерии выбора средств измерений для контроля отверстий под вкладыши коренных подшипников. Определены предельные значения допускаемых погрешностей измерения и погрешности средств измерений для контроля износа или деформации отверстий под вкладыши коренных подшипников, поступающих на дефектацию. Рассмотрено влияние погрешности измерения на формирование вероятности ошибок при принятии решения о годности деталей. При измерении средством, рекомендуемым к применению руководством по ремонту двигателя, количество неправильно забракованных опор было на 6,9% больше, а количество неправильно принятых опор на 3,5% больше по сравнению с более точным нутромером с погрешностью ±3,5 мкм. Уменьшение погрешности измерений приводит к значительному снижению количества неправильно принятых и неправильно забракованных опор, что отражается на качестве последующей сборки соединения и на объёме внешних потерь от брака.

Ключевые слова: контроль, дефектация, точность, допуск, погрешность средства измерений, коренная опора

Формат цитирования: Леонов О.А., Голиницкий П.В., Антонова У.Ю., Леонов Д.О., Зимогорский В.К. Выбор средств измерений для дефектации коренных опор двигателя ЯМЗ // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 59-63. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-59-63.

© Леонов О.А., Голиницкий П.В., Антонова У.Ю., Леонов Д.О., Зимогорский В.К., 2022

ORIGINAL PAPER

CHOOSING MEASURING INSTRUMENTS FOR THE FAULT DETECTION OF THE MAIN BEARING SUPPORTS OF THE YAMZ ENGINE

OLEG A. LEONOV✉***,*** *DSc (Eng), Professor*
oaleonov@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-8469-8052; Scopus Autor ID: 57209748174; Researcher ID: ABC-5873-2020
PAVEL V. GOLINITSKIY, *PhD (Eng), Associate Professor*
gpv@ rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7303-1658; Scopus Autor ID: 57216809753; Researcher ID: AAD-6305-2022
ULIANA YU. ANTONOVA, *PhD (Eng), Associate Professor*
uantonova@ rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-0126-3550; Scopus Autor ID: 57216809631; Researcher ID: AAD-5690-2022

DMITRIY O. LEONOV, *MSc student*
msau.l@yandex.ru
VLADISLAV K. ZIMOGORSKY, *MSc student*
zimogorskij@rgau-msha.ru
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. Multiple factors determine the reliability in the engine repair, while an important criterion is the preservation of the geometric parameters of engine parts within the specified limits. The crankshaft bearing is a highly loaded unit in an engine. If the holes for the main bearing shells are worn or deformed, the shells may rotate, which will lead to failure and unscheduled repairs. The authors found out that measuring instruments typically recommended in the normative and technical documentation are assigned without regard to the tolerances of controlled quantities and have an error that significantly exceeds the permissible measurement error. The purpose of the work is to study the degree of influence of the measurement error on the dispersion zone of the dimensions of the mainbearing journals of the engine during fault detection. The authors have theoretically proven the criteria for choosing measuring instruments for monitoring holes for main bearing shells. The limit values of the permissible measurement errors and the errors of measuring instruments for monitoring wear or deformation of the holes for the liners of main bearings that are submitted for fault detection were also determined. The paper also considers the influence of the measurement error on the probability of errors when making a decision on the suitability of parts. When comparing the measuring instruments recommended for use by the engine repair manual, the number of incorrectly rejected parts is 6.9% more, and the number of incorrectly accepted parts is 3.5% more than when using a more accurate bore gauge with an error of ±3.5 microns. Reducing the error of measuring instruments will lead to a significant reduction in the number of incorrectly accepted and incorrectly rejected parts. This, in turn, will affect both the quality of the subsequent assembly of units, and the amount of external losses resulting from faulty parts.

Keywords: control, accuracy, tolerance, measurement instrument error, main bearing support

For citation: Leonov O.A., Golinitskiy P.V., Antonova U.Yu., Leonov D.O., Zimogorsky V.K. Choosing measuring instruments for the fault detection of the main bearing supports of the YAMZ engine. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(6): 59-63. (In Rus.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-59-63.

Введение. В настоящее время уровень качества единичного и мелкосерийного производства, к которому относится ремонтное производство, намного ниже уровня качества массового и крупносерийного производства [1]. Низкая рентабельность малых предприятий не позволяет закупать новое станочное оборудование и проводить техническое обслуживание имеющегося [2, 3], в связи с чем не достигается требуемая точность при изготовлении деталей, а также узлов и агрегатов машин [4-6].

Для предотвращения брака при сборке для поступающих деталей должны обеспечиваться единство измерений и требуемая точность. Повышением точности контроля можно снизить количество внешнего и внутреннего брака, а следовательно, снизить затраты на производстве [7, 8].

Ремонт двигателя внутреннего сгорания является одним из наиболее технически сложных видов ремонта узлов машин. У двигателя ЯМЗ-238 и его модификаций, устанавливаемых на различные виды техники, одной из дорогостоящих деталей является блок цилиндров.

При проведении дефектации коренных опор блока цилиндров для снижения числа неправильно принятых и неправильно забракованных деталей необходим рациональный выбор средств измерений.

Цель исследований: изучить влияние погрешности измерений на зону рассеяния отверстий коренных опор двигателя ЯМЗ при дефектации и на количество неправильно принятых и неправильно забракованных опор; определить вероятность выхода за границу дефектации у неправильно принятых опор.

Материалы и методы. При контроле выбор средств измерений линейных размеров необходимо осуществлять согласно ГОСТ 8.051-81 и РД 50-98-86 [9].

Средство измерений (СИ) выбирается так, чтобы предельная погрешность измерения (Δlim) не превышала допускаемой погрешности измерения ($\delta_{изм}$) [9]:

$$\Delta lim \le \delta_{изм}. \quad (1)$$

При отсутствии рекомендаций в нормативно-технической документации допускаемая погрешность измерения принимается как 1/3 от допуска контролируемого параметра [10]:

$$\delta_{изм} = 0,33 \cdot T, \quad (2)$$

где T – допуск контролируемого параметра.

Исходными данными при выборе СИ являются указанные в нормативно-технической документации размеры физической величины (наименьшие и наибольшие), а также допуск контролируемого параметра [11, 12]. Так, для коренной опоры двигателя ЯМЗ-238 с номинальным размером $116^{+0.021}$ мм, допуском 21 мкм и допускаемой погрешностью $\delta_{изм}$ = 6,93 мкм выбраковка в результате дефектации наступает при превышении наибольшего предельного размера D > 116,021 мм.

Влияние погрешности измерений на результаты дефектации оценивают при помощи трех параметров: процента неправильно принятых отверстий опор, процента неправильно забракованных отверстий опор, вероятностной величины выхода диаметра за границу допуска у неправильно забракованных опор (рис. 1) [13].

При определении вышеперечисленных параметров наиболее рационально применять коэффициент точности измерения:

$$A_{мет} = (\sigma_{мет} / T) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $\sigma_{мет}$ – среднеквадратическое отклонение погрешности измерения ($\sigma_{мет}$ = lim/ 2), мм; T – допуск контролируемого параметра, мм.

Коренные подшипники тракторных и комбайновых двигателей при микрометраже измеряют по внутреннему диаметру в двух сечениях и в трех плоскостях – перпендикулярно к плоскости разъема (S1) и под углом 45° от этого направления в обе стороны (S2 и S3) (рис. 2). Определяется средний размер, принимаемый как действительный.

Дефектация для данных отверстий проводилась так же, как и микрометраж. Это позволит исключить сборку блоков с бракованными коренными опорами, проворачивание вкладышей, полную переборку двигателя и значительные потери для ремонтного предприятия.

Результаты и их обсуждение. При проведении дефектации исследовались 100 коренных опор 20 блоков цилиндров двигателя ЯМЗ-238, подлежащих ремонту. В технической документации по ремонту данного двигателя для проведения контроля отверстий под вкладыши коренных подшипников рекомендован нутромер НИ 100-160 с ценой деления индикатора 0,01 мм. При настройке по концевым мерам первого класса погрешность прибора составляет Δlim = ±10 мкм, а при настройке по концевым мерам второго класса Δlim = ±12 мкм. Применение такого средства измерения являетя нецелесообразным, так как не выполняется принцип (2), согласно которому средство измерений должно быть точнее (в три раза и более), чем допуск контролируемого параметра.

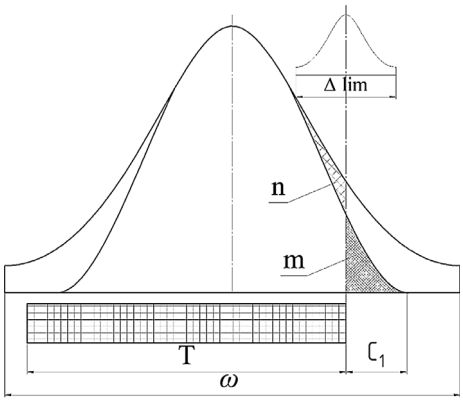


Рис. 1. Формирование брака при дефектации:
m – процент неправильно принятых отверстий опор;
n – процент неправильно забракованных отверстий опор;
C_1 – вероятностная величина выхода диаметра за границу допуска у неправильно забракованных опор;
T – допуск контролируемого параметра;
Δlim– погрешность средств измерений;
ω – зона рассеяния действительных размеров

Fig. 1. Fault detection through measurements:
m – percentage of incorrectly accepted support holes;
n – percentage of incorrectly rejected support holes;
C_1 – probabilistic value of the output of the diameter beyond the tolerance limit for incorrectly rejected supports;
T – the tolerance of the controlled parameter;
Δlim– error of measuring instruments;
ω – scattering zone of real dimensions

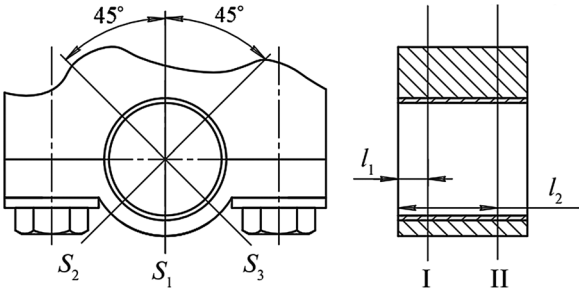


Рис. 2. Расположение сечений и плоскостей при микрометраже коренных подшипников дизельных двигателей

Fig. 2. Arrangement of sections and planes while taking micrometric measurements of main bearings of diesel engines

Для анализа формирования рассеяния диаметров отверстий под вкладыши коренных подшипников в процессе контроля с целью сокращения количества неправильно принятых и неправильно забракованных опор были выбраны следующие средства измерений:

1. СИ 1 – нутромер индикаторный с ценой деления головки 0,001 мм при настройке по концевым мерам 1 класса, lim = ±6,5 мкм;

2. СИ 2 – нутромер с ценой деления головки 0,001 мм при настройке по установочным кольцам lim = ±3,5 мкм.

Для оценки рассеяния произведен контроль коренных опор блоков цилиндров двигателей ЯМЗ-238, бывших в эксплуатации. В каждом блоке измерялось по 5 опор. Результаты обработки статистических данных контроля отражены в формах гистограммы, полигона и теоретической кривой рассеяния диаметров отверстий опор (рис. 3).

Анализ рассеяния показал, что неисправимый брак составил 8% (табл. 2). В целом из 20 блоков цилиндров будет забраковано 6, так как у четырех блоков выявлено по одной бракованной опоре из пяти, вышедшей за границы поля допуска, а у двух блоков – две такие опоры с элементами фреттинга на поверхности под вкладыши.

Определение параметров *n*, *m* и *c*, характеризующих уровень брака от наличия погрешности измерений, производилось по методике [9] (табл. 3).

При использовании нутромера с погрешностью Δlim = ±6,5 мкм количество неправильно забракованных опор на 4,2% больше, а количество неправильно принятых опор на 2% больше, чем при использовании нутромера с погрешностью Δlim_2 = ±3,5 мкм (табл. 2). При использовании

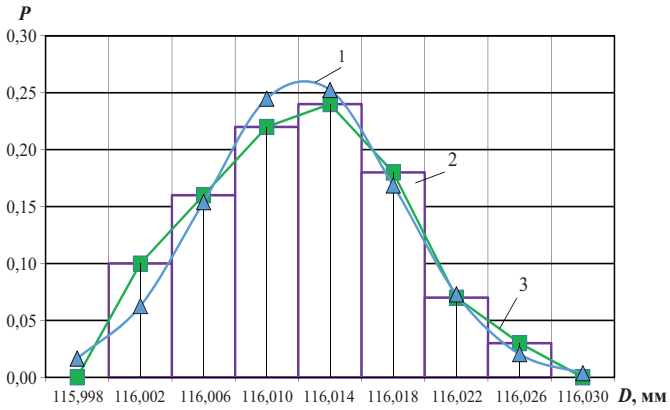


Рис. 3. Рассеяние изношенных размеров отверстий коренных опор двигателя ЯМЗ-238 $D = 116^{+0,021}$ мм:
1 – теоретическая кривая; 2 – гистограмма; 3 – полигон

Fig. 3. Scattering of the hole sizes of the main bearings of the YaMZ-238 engine $D = 116^{+0,021}$ mm:
1 – theoretical distribution curve; 2 – histogram; 3 – polygon

нутромера НИ-160, рекомендуемого к применению руководством по ремонту двигателя ЯМЗ-238, количество неправильно забракованных опор больше на 6,9%, а количество неправильно принятых опор больше на 3,5% по сравнению с нутромером с погрешностью $\Delta lim_2 = \pm 3{,}5$ мкм. Следовательно, научно обоснована и практически доказана рациональность применения наиболее точного прибора, позволяющего снизить процент потерь в виде отправки в лом дорогостоящих блоков цилиндров, стоимость которых гораздо больше стоимости предлагаемого средства измерений.

Таблица 2

Распределение размеров коренных опор двигателя ЯМЗ при дефектации

Table 2

Distribution of the sizes of the main bearing supports of the YaMZ engine during fault detection

Параметр *Parameter*	**Размер, мм** *Size, mm*	**Процент деталей, %** *Percentage of parts, %*	**Теоретическая вероятность** *Theoretical probability*
Количество годных деталей / *Number of accepted partss*	$116^{+0{,}021}$	92	0,9927
Количество брака / *Number of faulty parts*	**Свыше 116,021** / *Over 116.021*	8	0,0037

Таблица 3

Параметры при дефектации коренных опор двигателя ЯМЗ при использовании нутромера с различной погрешностью измерений

Table 3

Parameters for fault detection of the main bearing supports of the YaMZ engine when using a bore gauge with different measurement errors

Параметр *Parameter*	**Средство измерений** *Measuring instrument*		
	СИ1 *MI1*	**СИ2** *MI2*	**НИ 100-160** *CI 100-160*
Контролируемый размер, *D,* мм / *Controlled size*	$116^{+0{,}021}$		
Предельная погрешность СИ, Δlim, мкм / *Limit error of MI*	±6,5	±3,5	±10
СКО погрешности измерения, σ_{met}, мкм / *Standard deviation of measurement error,* σ_{met}, *mkm*	3,25	1,75	5
Коэффициент точности измерения, A_{met}, % / *Measurement accuracy factor,* A_{met}, %	15,5	8,3	23,8
Количество неправильно принятых опор, *m, %* / *Number of incorrectly received supports*, *m, %*	3,3	1,3	4,8
Количество неправильно забракованных опор, *n*, % / *Number of incorrectly accepted supports*	7,5	3,3	10,2
Величина выхода измеряемого параметра за границу допуска у неправильно забракованных опор, *c,* мкм *Extent to which the measured parameter exceeds the tolerance limit for incorrectly rejected bearing supports c, mkm*	2,94	1,47	5,04
Итого брака, % / *Total number of faulty parts, %*	10,8	4,6	15

Выводы

1. С целью обеспечения качества процесса дефектации отверстия коренных опор блоков цилиндров двигателя ЯМЗ 238 должны измеряться в двух плоскостях и двух сечениях, расположенных под 45° от плоскости разъема.

2. При выборе средств измерений для контроля диаметров отверстий коренных подшипников при дефектации рекомендовано использовать более точные приборы. Для коренных опор двигателей ЯМЗ наименьшая погрешность измерений $\Delta lim = \pm 3{,}5$ мкм будет у нутромера индикаторного с ценой деления измерительной головки 0,001 мм при настройке по установочным кольцам

Список использованных источников

1. Игнатов В.И., Катаев Ю.В., Герасимов В.С., Андреева Д.В. Состояние и перспективы развития ремонтно-обслуживающей базы АПК РФ // Вестник машиностроения. 2021. № 5. С. 84-88. https://doi.org/10.36652/0042-4633-2021-5-84-88

2. Черноиванов В.И., Денисов В.А., Катаев Ю.В., Соломашкин А.А. Новая стратегия технического обслуживания и ремонта машин // Техника и оборудование для села. 2021. № 9 (291). С. 33-36. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-9-33-36

3. Голубев И.Г., Фадеев А.Ю., Макуев В.А. Оценка качества технического сервиса тракторов // Техника и оборудование для села. 2010. № 7. С. 40-41. EDN MWGQBR.

4. Дорохов А.С. Определение остаточного ресурса изделия по его размерам в поле допуска // Техника в сельском хозяйстве. 2011. № 3. С. 22-23. EDN VYGHJJ.

5. Дорохов А.С. Влияние размеров в поле допуска на ресурс изделий // Грузовик. 2013. № 8. С. 34-37. EDN RSDRGX.

References

1. Ignatov V.I., Kataev Yu.V., Gerasimov V.S., Andreeva D.V. State and development prospects of the repair and maintenance facilities of the agro-industrial sector of the Russian Federation. *Vestnik mashinostroeniya*. 2021; 5: 84-88. https://doi.org/10.36652/0042-4633-2021-5-84-88 (In Rus.)

2. Chernoivanov V.I., Denisov V.A., Kataev Yu.V., Solomashkin A.A. New strategy for the maintenance and repair of machines. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2021; 9(291): 33-36. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-9-33-36 (In Rus.)

3. Golubev I.G., Fadeev A.Yu., Makuev V.A. Quality assessment of the technical service of tractors. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2010; 7: 40-41. (In Rus.)

4. Dorokhov A.S. Determination of the residual resource of the product by its dimensions in the tolerance field. *Tekhnika v sel'skom khozyaystve*. 2011; 3: 22-23. (In Rus.)

5. Dorokhov A.S. Influence of dimensions in the tolerance field on the service life of products. *Gruzovik*. 2013; 8: 34-37. (In Rus.)

6. Скороходов Д.М., Краснящих К.А., Катаев Ю.В. и др. Контроль качества запасных частей редуктора конечной передачи МТЗ-82.1 // Сельский механизатор. 2020. № 7. С. 30-32. EDN FJAXIL.

7. Шкаруба Н.Ж. Влияние погрешностей измерения на результаты разбраковки при дефектации деталей машин // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 2. С. 41-43. EDN VKWHQX.

8. Шкаруба Н.Ж., Левщанова Е.А. Место и роль метрологической службы в системе менеджмента измерений // Международный научный журнал. 2014. № 6. С. 56-61. EDN TDOUZD.

9. Шкаруба Н.Ж. Технико-экономические критерии выбора универсальных средств измерений при ремонте сельскохозяйственной техники: Монография. М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2009. 118 с.

10. Шкаруба Н.Ж., Леонов О.А. Обоснование допускаемой погрешности измерений при контроле отклонений формы и расположения поверхностей деталей // Вестник машиностроения. 2020. № 12. С. 42-45. https://doi.org/10.36652/4633-0042-2020-12-42-45

11. Шкаруба Н.Ж. Разработка комплексной методики выбора средств измерений линейных размеров при ремонте сельскохозяйственной техники: Дис. … канд. техн. наук. М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2006. 156 с.

12. Бондарева Г.И., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. и др. Обоснование замены индикаторных головок на цифровые при контроле ремонта машин // Сельский механизатор. 2022. № 4. С. 26-27. https://doi.org/10.47336/0131-7393-2022-4-26-27

13. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Антонова У.Ю. Метрологическое обеспечение контроля гильз цилиндров при ремонте дизелей // Вестник Барановичского государственного университета. Серия «Технические науки». 2018. № 6. С. 104-109. EDN: USTKZC.

Критерии авторства

Леонов О.А., Голиницкий П.В., Антонова У.Ю., Леонов Д.О., Зимогорский В.К. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Леонов О.А., Голиницкий П.В., Антонова У.Ю., Леонов Д.О., Зимогорский В.К. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 27.07.2022

Одобрена после рецензирования 21.09.2022

Принята к публикации 21.10.2022

6. Skorohodov D.M., Krasnyashchikh K.A., Kataev Yu.V. [et al.] Quality control of spare parts of the MTZ-82.1 final drive reduction gear. *Selskiy mekhanizator*. 2020; 7: 30-32. (In Rus.)

7. Shkaruba N.Zh. Influence of measurement errors on the sorting results during fault detection of machine parts. *Traktory i sel'khozmashiny.* 2016; 2: 41-43. (In Rus.)

8. Shkaruba N.Zh., Levshchanova E.A. Place and role of the metrological service in the measurement management system. *Mezhdunarodniy nauchniy zhurnal*. 2014; 6: 56-61. (In Rus.)

9. Shkaruba N.Zh. Technical and economic criteria for the selection of universal measuring instruments for the repair of agricultural machinery: monograph. Moscow, FGOU VPO MGAU, 2009. 118 p. (In Rus.)

10. Shkaruba N.Zh., Leonov O.A. Justification of the permissible error of measurements when controlling shape deviations and the location of surfaces of parts. *Vestnik mashinostroeniya.* 2020; 12: 42-45. https://doi.org/10.36652/4633-0042-2020-12-42-45 (In Rus.)

11. Shkaruba N.Zh. Development of an integrated methodology for the selection of measuring instruments for linear dimensions in the repair of agricultural machinery: PhD (Eng) thesis. Moscow, FGOU VPO MGAU, 2006. 156 p. (In Rus.)

12. Bondareva G.I., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. [et al.] Rationale for replacing indicator heads with digital ones when monitoring machine repairs. *Selskiy mekhanizator*. 2022; 4: 26-27. https://doi.org/10.47336/0131-7393-2022-4-26-27 (In Rus.)

13. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Antonova U.Yu. Metrological provisions for the control of cylinder liners during the repair of diesel engines. *Vestnik Baranovichskogo gosudarstvennogo universiteta. Series*: *Tekhnicheskie nauki*. 2018; 6: 104-109. (In Rus.)

Contribution

O.A. Leonov, P.V. Golinitskiy, U.Yu. Antonova, D.O. Leonov and V.K. Zimogorsky performed theoretical studies and, based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. O.A. Leonov, P.V. Golinitskiy, U.Yu. Antonova, D.O. Leonov and V.K. Zimogorsky have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 27.07.2022

Approved after reviewing 21.09.2022

Accepted for publication 21.10.2022

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 621.791.79
DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-64-69

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ПРИВАРКИ. ЧАСТЬ 2

СЕРОВ АНТОН ВЯЧЕСЛАВОВИЧ✉**,** *канд. техн. наук, доцент* [1]
av_serov@vk.com✉; https://orcid.org/0000-0001-6114-7354
ЛАТЫПОВ РАШИТ АБДУЛХАКОВИЧ, *д-р техн. наук, профессор* [2]
latipov46@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-9988-2765
БУРАК ПАВЕЛ ИВАНОВИЧ, *д-р техн. наук, доцент* [3]
paveliburak@gmail.com
СЕРОВ НИКИТА ВЯЧЕСЛАВОВИЧ, *канд. техн. наук* [3]
n.serov@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-7676-4344

[1] Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет); 105505, Российская Федерация, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

[2] Московский политехнический университет; 107203, Российская Федерация, г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38

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

Аннотация. Электроконтактная приварка (ЭКП) является перспективной ресурсосберегающей технологией получения функциональных покрытий из отходов инструментального и машиностроительного производства. Для выбора применяемых материалов, оборудования и инструментов, порядка и описания выполняемых операций (переходов), технологических режимов (параметров) необходима разработка четкой методики. С целью разработки методики получения, упрочения и восстановления деталей машин исследовались функциональные покрытия, полученные электроконтактной приваркой на установке 011-1-10 «Ремдеталь». Длительность сварочного импульса и паузы задавалась при помощи регулятора РВИ-501. Тарирование силы сварочного тока проводилось через полосу, изготовленную из меди марки ММ толщиной 5 мм, с помощью прибора ИСТ-02. Анализ сопротивления зоны соединения при ЭКП показал, что для стальной ленты У12 оптимальное значение усилия сжатия сварочных электродов на лемех плуга из стали 65Г составит 1,7 кН. Для обеспечения наибольшей производительности процесса ЭКП и полного перекрытия сварочных площадок (с учётом взаимного перемещения электродов и детали) представлены зависимости, позволяющие назначать для всех схем и вариантов оборудования основные параметры электроконтактной приварки: силу сварочного тока, время его протекания и паузу между импульсами, усилие сжатия сварочных электродов, скорость приварки, коэффициенты перекрытия сварочных точек, расход охлаждающей жидкости. Рассмотрено их влияние на протекание процесса и качество получаемых покрытий. Представленный алгоритм расчёта и назначения режимов приварки позволяет упростить использование технологии и повысить качество получаемых покрытий за счёт минимизации брака, возникающего вследствие ошибок при назначении параметров приварки. Алгоритм может быть использован в машиностроительном и, в частности, ремонтном производстве при проектировании технологических процессов получения функциональных покрытий при упрочнении и восстановлении деталей машин.

Ключевые слова: функциональные покрытия, назначение параметров режима электроконтактной приварки, сила сварочного тока, пауза между импульсами, усилие сжатия сварочных электродов, скорость приварки, коэффициенты перекрытия сварочных точек

Формат цитирования: Серов А.В., Латыпов Р.А., Бурак П.И., Серов Н.В. Технологические процессы получения функциональных покрытий методом электроконтактной приварки. Часть 2 // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 64-69. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-64-69.

© Серов А.В., Латыпов Р.А., Бурак П.И., Серов Н.В., 2022

ORIGINAL PAPER

TECHNOLOGICAL PROCESSES OF OBTAINING FUNCTIONAL COATINGS BY ELECTRIC CONTACT WELDING. PART 2

ANTON V. SEROV✉**,** *PhD* (*Eng*)*, Associate Professor* [1]
av_serov@vk.com✉; https://orcid.org/0000-0001-6114-7354
RASHIT A. LATYPOV, *DSc* (*Eng*)*, Professor* [2]
latipov46@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9988-2765

PAVEL I. BURAK, *DSc (Eng), Associate Professor*[3]
paveliburak@gmail.com
NIKITA V. SEROV, *PhD (Eng)*[3]
n.serov@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-7676-4344
[1] Bauman Moscow State Technical University; p 1, 5, 2nd Baumanskaya Str., Moscow, 105505, Russian Federation
[2] Moscow Polytechnic University; 16, Avtozavodskaya Str., 111280, Moscow, Russian Federation
[3] Russian State Agrarian University – Moscow TimiryazevAgricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., 127434, Moscow, Russian Federation

Abstract. Electric contact welding (ECW) is a promising resource-saving technology for obtaining functional coatings from the waste of tool-making and machine-building production. A clear methodology is a pre-requisite for selecting the materials, equipment, and tools used; stating the order and describing the operations (transitions) performed; and choosing technological modes (parameters). To develop a technique for obtaining, strengthening, and restoring machine parts, the authors studied functional coatings obtained by electric contact welding at the 011-1-10 "Remdetal" installation. The duration of the welding pulse and pauses was set using the RVI-501 controller. The welding current strength was calibrated through a strip made of 5 mm thick copper grade with the welding current meter IST-02. Based on the analysis of the ECW zone resistance, he authors found that, for the steel belt U12, the optimal value of the compression force of the welding electrodes on the plowshare made of 65G steel will be 1.7 kN. To ensure the highest efficiency of the ECW process and complete overlap of welding sites, and taking into account the mutual movement of electrodes and parts, the authors present the relationships that help pre-set the main parameters of electrical contact welding for all circuits and equipment options: the strength of welding current, its flow time and the pause between pulses, the compression force of welding electrodes, welding speed, overlap coefficients of welding points flow rate of the cooling liquid and their influence on the process flow and the quality of coatings obtained. The presented algorithm can be used in machine-building production and, in particular, repair production for designing technological processes of obtaining functional coatings during the hardening and restoration of machine parts..

Keywords: functional coatings, parameter settings for electric contact welding mode, welding current, pulse interval, welding electrode clamping force, welding speed, welding point overlap ratios

For citation: Serov A.V., Latypov R.A., Burak P.I., Serov N.V. Technological processes of obtaining functional coatings by electric contact welding. Part 2. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(6): 64-69. (In Rus.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-64-69.

Введение. При проектировании технологических процессов получения функциональных покрытий электроконтактной приваркой необходимы выбор, расчет и назначение материалов, оборудования, инструментов, приспособлений и технологических параметров (режимов), влияющих на свойства и качество получаемых данным методом покрытий[1,2] [1-7].

На механические и эксплуатационные свойства функциональных покрытий, получаемых электроконтактной приваркой (ЭКП), влияют контролируемые (задаваемые) и неконтролируемые (незадаваемые) факторы.

Неконтролируемые факторы – это температура, влажность и давление окружающей среды, температура холодной сетевой воды, величина, стабильность и частота напряжения в сети электроснабжения установки.

К контролируемым факторам, задаваемым в процессе приварки, относятся: сила сжатия сварочных электродов, задаваемая давлением в пневмоцилиндрах сварочной головки; сила сварочного тока; время протекания импульса сварочного тока и паузы между импульсами; подача или скорость движения подачи сварочных электродов (заготовки) в зависимости от схемы процесса ЭКП; величина расхода охлаждающей жидкости (сетевой холодной воды), скорость сварки, которая так же, в зависимости от схемы процесса и типа используемого оборудования, задаётся частотой вращения заготовки в случае обработки тел вращения либо скоростью продольной подачи заготовки относительно электрода (или наоборот) при обработке плоских деталей [8]. Именно контролируемые параметры оказывают наибольшее влияние на свойства и качество получаемых покрытий и являются параметрами режима приварки. Их рациональный и обоснованный выбор на основе накопленного экспериментального опыта и проведённых теоретических исследований позволит управлять свойствами (программировать) и качеством получаемых функциональных покрытий. Для расчёта основного времени приварки, используемого для оценки экономических показателей процесса ЭКП, необходимо определение производительности процесса.

Цель исследований: разработка методики выбора, расчета и назначения параметров режима ЭПК при проектировании технологических процессов упрочения и восстановления деталей машин.

Материалы и методы. Исследование проводилось на оборудовании «011-1-10» производства ВНПО «Ремдеталь». Определение величины сварочного тока осуществлялось измерителем сварочного тока ИСТ-02. Длительность сварочного импульса и паузы задавалась при помощи регулятора РВИ-501. Тарирование силы сварочного тока проводили через полосу, изготовленную из меди марки ММ толщиной 5 мм.

Порядок тарировки: на сварочном регуляторе РВИ, последовательно изменяя значения тиристорного регулятора от «1» до «9», измеряли амплитудные и действующие значения силы тока, а также напряжение на сварочных электродах при прохождении тока через медную полосу и плужный лемех из стали 65Г. Величины электрического сопротивления в зоне контакта рассчитывали по формуле, определяющей напряжение вторичной цепи трансформатора: $U_2 = I_2R$. При этом расчётное сопротивление увеличивалось с 0,00022 Ом при «1» на тиристорном регуляторе до 0,00024 Ом при установке значения «9». Измерение силы тока и напряжения при приварке ленты из стали У12 к лемеху плуга, изготовленному из стали 65Г, производилось при различных значениях тиристорного регулятора и усилия сжатия сварочных электродов, постоянном значении времени импульса $t_и$ = 0,12 с и времени паузы $t_п$ = 0,80 с. Значения сопротивления рассчитывались по закону Ома $U_2 = I_2R$.

Давление воздуха в пнемоцилиндре, осуществляющем сжатие сварочных электродов, регулировалось редуктором

[1] Бурак П.И. Интенсификация электроконтактной приварки лент при восстановлении деталей: Монография. М.: МГАУ им. В.П. Горячкина, 2012. 330 с.

[2] Агеев Е.В., Агеева Е.В., Кругляков О.В., Королев М.С. Электроэрозионный порошок, полученный из отходов сплава Т5К10: Монография. Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2022. 231 с

установки и контролировалось по манометру ТМ-310 ГОСТ 2405-88. Определение силы сжатия электродов проводилось при помощи динамометра ДОСМ-3-10У ISO 376:2011.

Результаты и их обсуждение. Для получения качественного покрытия при ЭКП необходимо обеспечить контакт соединяемых поверхностей и их активацию. При этом процесс соединения возможен, если суммарная передаваемая энергия U больше энергии активации $E_а$ [9]:

$$E_а \le U = U_д + U_м + U_т, \quad (1)$$

где $E_а$ – энергия активации, Дж; $U_д$ – энергия, выделяющаяся (запасаемая) при пластической деформации присадочного и основного материала, Дж; $U_м$ – энергия, образующаяся при упругой деформации соединяемых материалов, Дж; $U_т$ – тепловая энергия, выделяющаяся преимущественно при прохождении электрического тока, Дж.

Количество теплоты Q, выделяющейся при протекании электрического тока во вторичной цепи трансформатора источника сварочного тока, определяется по формуле:

$$Q = \int_0^{tи} I_2^2(t)R(t)dt, \quad (2)$$

где R – полное электрическое сопротивление вторичной цепи, Ом; I_2 – действующая величина силы сварочного тока во вторичной цепи трансформатора, А; t – время, с.

Величина силы сварочного тока $I_{св}$ при ЭКП рассчитывается по формуле [7]:

$$I_{ср} = 4,2d_э\sqrt{\frac{T_к\lambda}{\eta_т\rho_э}}, \quad (3)$$

где $d_э$ – диаметр сварочной точки, м; λ – теплопроводность вещества, Вт/(м · К); $T_к$ – температура в зоне соединения при приварке, K; $\eta_т$ – термический коэффициент полезного действия; $\rho_э$ – удельное электрическое сопротивление, Ом · м.

Время протекания импульса сварочного тока $t_и$ можно определить выражением [8]:

$$t_и = \frac{K_\tau \delta h_п}{\lambda}, \quad (4)$$

где δ – толщина присадочного материала, м; $h_п$ – глубина прогрева; K_τ – коэффициент жесткости режима (для жесткого режима $K_\tau = 1,5$, для среднего – 2,5, для мягкого – 4).

Расход охлаждающей жидкости при ЭКП тел вращения и плоских деталей определяется аналитическим выражением [8]:

$$G = \frac{\alpha F(T_к - t_н)}{ac(t_к - t_н) + (1-a)r} = \frac{\overline{Nu_{жд}}\lambda(T_к - t_н)\pi l}{ac(t_к - t_н) + (1-a)r}, \quad (5)$$

где $t_к$ – температура охлаждающей жидкости после контакта с поверхностью, °С; $t_н$ – температура воды, подаваемой из городской сети холодного водоснабжения, или другой охлаждающей жидкости, °С; r – удельная теплота парообразования, Дж/кг; α – коэффициент теплоотдачи; F – площадь поверхности, омываемой водой (охлаждающей жидкостью) при ЭКП, м^2; a – доля неиспарившейся воды (охлаждающей жидкости); c – удельная теплоёмкость вещества, Дж/(кг · К); $\overline{Nu_{жд}}$ – число Нуссельта.

Число Нуссельта для тел вращения (цилиндра) –

$$\overline{Nu_{жд}} = 0,5\,\mathrm{Re}_{жд}^{0,5}\,\mathrm{Pr}_ж^{0,38}\left(\frac{\mathrm{Pr}_ж}{\mathrm{Pr}_с}\right)^{0,25}, \quad (6)$$

где $\mathrm{Re}_{жд}^{0,5}$ – число Рейнольдса; $Pr_ж$ и $Pr_с$ – число Прандтля для жидкости и стенки.

При ЭКП плоских поверхностей –

$$\overline{Nu_{жд}} = 0,664\,\mathrm{Re}_{жд}^{0,5}\,\mathrm{Pr}_ж^{0,333}\left(\frac{\mathrm{Pr}_ж}{\mathrm{Pr}_с}\right)^{0,25}. \quad (7)$$

Фактором, оказывающим влияние как на механическую, так и на тепловую (электрическую составляющую) энергию, передающуюся к зоне контакта для активации взаимодействия соединяемых поверхностей (присадочного и материала основы), является усилие сжатия электродов P, обеспечивающее прижатие присадочного материала к поверхности заготовки для обеспечения электрического контакта и пластического деформирования зоны соединения. От усилия сжатия сварочных электродов зависят протекание процесса приварки и качество получаемых покрытий. Схема зоны контакта соединяемых поверхностей при ЭКП представлена на рисунке 1.

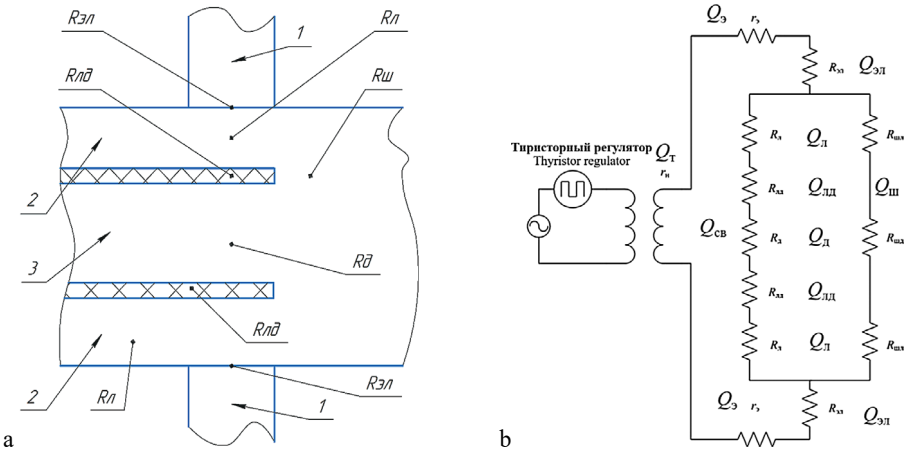


Рис. 1. Схема формирования электрического сопротивления зоны контакта (а) и расчётная схема (b):
1 – электроды; 2 – стальная лента; 3 – заготовка; $R_{эл}$ – сопротивление зоны «Электрод-заготовка»; $R_л$ – сопротивление присадочного материала (ленты); $R_{лд}$ – сопротивление зоны соединения «Лента-заготовка»; $R_д$ – сопротивление заготовки; $R_ш$ – сопротивление шунта; $R_{шл}$ – сопротивление шунтирования через ленту; $R_{шд}$ – сопротивление шунтирования через заготовку; $r_э$ – сопротивление электродов; $r_и$ – сопротивление вторичной обмотки трансформатора и шин

Fig. 1. Diagram of the formation of the electrical resistance of the contact zone (a) and the design scheme (b):
1 – electrodes; 2 – steel tape; 3 – part; $R_{эл}$ – resistance of the electrode- part zone; $R_л$ – resistance of the filler material (tape); $R_{лд}$ – resistance of the tape – part connection zone; $R_д$ – resistance of the part (workpiece); $R_ш$ – shunt resistance; $R_{шл}$ – shunt resistance through the tape; $R_{шд}$ – shunt resistance through the part; $r_э$ – electrode resistance; $r_и$ – resistance of the secondary winding of the transformer and the bus

Отметим, что в процессе ЭКП часть электрического тока вторичной цепи трансформатора шунтируется через предыдущие точки в ряду и через предыдущие ряды приварки ($R_ш$).

На каждом из рассматриваемых участков зоны соединения (рис. 1) будет выделяться теплота Q_i, пропорциональная сопротивлению этой зоны:

$$Q = Q_т + Q_э + Q_{св}; \quad (8)$$

$$Q_{св} = 2Q_{эл} + 2Q_л + 2Q_{лд} + Q_д + Q_ш, \quad (9)$$

где $Q_т$, $Q_э$, $Q_ш$, $Q_{св}$, $Q_{эл}$, $Q_л$, $Q_{лд}$, $Q_д$, – теплота, выделяемая во вторичной обмотке трансформатора (количество энергии, теряемое на реактивное сопротивление обмотки), в электродах, на шунте через соседние точки, в зоне соединения, на участке «Электрод-лента», в ленте, в зоне контакта и в заготовке соответственно, Дж.

Из представленных на рисунке 2 графиков следует, что максимальная сила тока и соответственно минимальное электрическое сопротивление зоны сварки достигаются при усилии сжатия роликовых электродов P, равном 1,7 кН. При этом дальнейшее увеличение силы сжатия снижает ток и увеличивает электрическое сопротивление. Полученный результат можно объяснить тем, что именно при этом усилии сжатия в зоне соединения выделяется достаточно тепла для активации межфазного взаимодействия основного и присадочного материалов, с образованием сварного соединения. Падение сопротивления происходит, вероятно, вследствие исчезновения зоны контакта и образования сплошного сварочного шва с сопротивлением, изменяющимся по градиенту от материала с бóльшим до материала с меньшим электрическим сопротивлением, которое меньше начального сопротивления зоны контакта этих материалов.

Рост сопротивления при дальнейшем увеличении усилия сжатия можно объяснить отсутствием схватывания поверхностей (сварки). Начальное сопротивление зоны соединения уменьшается вследствие лучшего электрического контакта увеличенной фактической площади контакта, обусловленной деформацией микронеровностей, разрушением оксидных плёнок, удалением загрязнений, и уменьшения его удельного электросопротивления. Это должно приводить к увеличению тепловыделения, интенсификации процесса схватывания поверхностей. Однако когда сопротивление зоны контакта снижается и приближается по своим значениям к сопротивлению основного и присадочного металлов, тепловыделение не локализуется в зоне соединения, а рассеивается во всём объёме материалов, находящихся между электродами установки. В результате для схватывания материалов становится недостаточно теплоты, выделяющейся непосредственно в зоне сварки. Следовательно, и дальнейшее падение электросопротивления не происходит.

Фактором, оказывающим влияние на количество тепловой энергии, выделяемой и затрачиваемой, в том числе, на образование соединения, является время протекания сварочного импульса тока $t_и$. При ЭКП за время прохождения импульса тока $t_и$ происходит взаимное перемещение электродов и заготовки $l_и$, поэтому площадь зоны контакта, через которую ток проходит в течение всего времени $t_и$, будет уменьшаться пропорционально скорости сварки. С учётом взаимного перемещения электрода и заготовки площадь сварочной точки будет равна удвоенной площади сегмента окружности (эллипса), отсекаемого общей хордой пересекающихся сварочных точек в начале протекания импульса тока и в его конце (рис. 3).

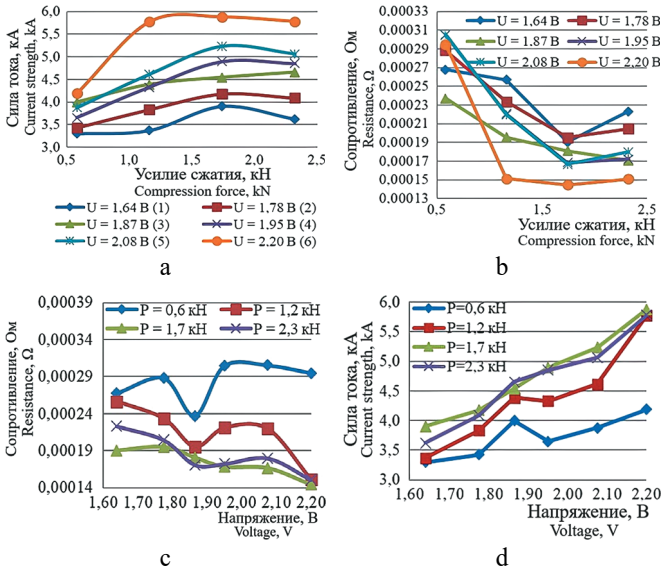


Рис. 2. Влияние усилия сжатия электродов на параметры ЭКП:
a – на силу сварочного тока; b – на сопротивление зоны соединения; c – влияние установленной силы сварочного тока на характер изменения электрического сопротивления зоны соединения; d – вольтамперная характеристика зоны «Электрод-заготовка-присадочный материал-электрод»

Fig. 2. Effect of the compression force of the electrodes on the parameters of electric contact welding (ECW):
a) the effect of the compression force on the strength of the welding current; b) the relationship between the resistance of the connection zone and the compression force of the electrodes; c) the effect of the installed welding current on the nature of changes in the electrical resistance of the connection zone; d) the voltage-current characteristic of the "electrode-part-part-electrode zone"

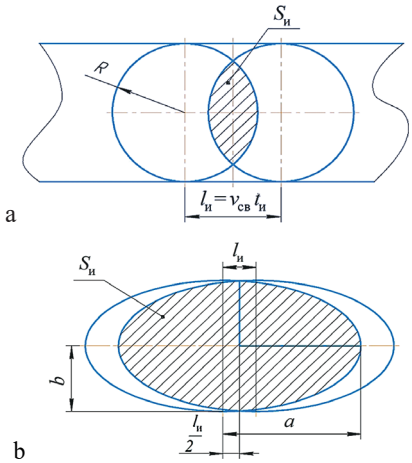


Рис. 3. Геометрические параметры сварочной точки округлой (a) и эллиптической формы (b):
$S_и$ – площадь присадочного материала, через которую ток проходит в течение всего импульса; $l_и$ – взаимное перемещение электрода и заготовки за время импульса в направлении главного движения; $v_{св}$ – скорость сварки; $t_и$ – продолжительность импульса сварочного тока; R – радиус сварочной точки; a и b – большая и малая полуоси эллипса, описанного вокруг сварочной точки

Fig. 3. Geometric parameters of the rounded welding point (a) and the elliptical shape (b):
$S_и$ – the area of the filler material through which the current passes during the entire pulse; $l_и$ – mutual movement of the electrode and the workpiece during the pulse in the direction of the main movement; $v_{св}$ – welding speed; $t_и$ – duration of the welding current pulse; R – radius of the welding point; a and b – the major and minor semi-axes of the ellipse described around the welding point

С учётом этого производительность процесса электроконтактной приварки W при взаимном перемещении электродов и заготовки за время протекания импульса сварочного тока с заданными коэффициентами перекрытия сварочных точек в ряду $k_{\text{П}n}$ и между рядами приварки $k_{\text{П}S}$ можно рассчитать по формуле [9]:

$$W = \frac{k_{\text{П}n} d_{\text{т}} k_{\text{П}S} d_{\text{т}}}{t_{\text{п}} + t_{\text{и}} k_{\text{П}n}} = \frac{k_{\text{П}n} k_{\text{П}S} d_{\text{т}}^{\,2}}{t_{\text{п}} + t_{\text{и}} k_{\text{П}n}}, \qquad (10)$$

где $d_{\text{т}}$ – диаметр приваренной точки или ширина валика приварки ($2b$), мм; $t_{\text{п}}$ – время паузы, с.

Зная производительность W, можно найти основное время при ЭКП:

$$T_{\text{о}} = \frac{A}{60 \cdot W}, \qquad (11)$$

где A – площадь наносимого покрытия, мм^2.

Для нахождения коэффициента $k_{\text{П}S}$, при котором будет обеспечиваться полное перекрытие сварочных точек при различных коэффициентах $k_{\text{П}n} \neq k_{\text{П}S}$, необходимо воспользоваться следующими выражениями:

$$k_{\text{П}S} = \sqrt{1 - k_{\text{П}n}^{\,2}}\,; \qquad (12)$$

$$k_{\text{П}n} = \sqrt{1 - k_{\text{П}S}^{\,2}}. \qquad (13)$$

Максимальная производительность процесса ЭКП будет достигаться при таком коэффициенте перекрытия $k_{\text{П}n}$, при котором экстремум функции (6) будет равен нулю. Подставив (13) в (11), получим

$$W' = d_{\text{т}} \left(\frac{k_{\text{П}n} \sqrt{\quad k_{\text{П}n}}}{t_{\text{п}} \quad t_{\text{и}} k_{\text{П}}} \right) = 0. \qquad (14)$$

При решении уравнения (9) получено выражение для расчета коэффициента перекрытия $k_{\text{П}n}$, связывающее его с временными ($t_{\text{и}}$ и $t_{\text{п}}$) параметрами процесса ЭКП:

$$k_{\text{П}n} = \frac{2\sqrt[3]{2}\left(1 - t_{\text{и}}\sqrt{3}\right) t_{\text{п}}^{\,2}}{3\sqrt[3]{3\sqrt{3}\sqrt{-32t_{\text{п}}^4 - 27t_{\text{п}}^2} - 27t_{\text{п}}t_{\text{и}} - 16t_{\text{и}}t_{\text{п}}^{\,3}}} -$$

$$- \frac{\left(1 + t_{\text{и}}\sqrt{3}\right)\sqrt[3]{3\sqrt{3}\sqrt{-32t_{\text{п}}^4 - 27t_{\text{п}}^2} - 27t_{\text{п}}t_{\text{и}} - 16t_{\text{и}}t_{\text{п}}^{\,3}}}{6\sqrt[3]{2}} + \frac{2t_{\text{и}}t_{\text{п}}}{3}. \qquad (15)$$

Продолжительность паузы $t_{\text{п}}$, необходимой для перекрытия сварочных точек, находят по формуле [10]:

$$t_{\text{п}} = \frac{k_{\text{П}n} d_{\text{т}}}{v_{\text{св}}} - t_{\text{и}} k_{\text{П}n}, \qquad (16)$$

где $v_{\text{св}}$ – скорость сварки, м/мин.

Выразив скорость сварки $v_{\text{св}}$ из выражения (16), получим

$$v_{\text{св}} = \frac{k_{\text{П}n} d_{\text{т}}}{t_{\text{п}} + t_{\text{и}} k_{\text{П}n}}. \qquad (17)$$

Поскольку на практике продолжительность импульса $t_{\text{и}}$ и паузы $t_{\text{п}}$ устанавливается тиристорным регулятором, их величина всегда должна быть кратной периоду переменного тока сети электроснабжения, равного 0,02 с. Для обеспечения требуемой продолжительности включения (ПВ) источника сварочного тока и минимизации площади, разупрочняемой за счёт отпуска в процессе приварки следующей точки, должно соблюдаться условие $t_{\text{и}} < t_{\text{п}}$, причём в соответствии с выражением (11) уменьшение этих параметров ведёт к увеличению производительности процесса W. В связи с этим минимальным временем импульса $t_{\text{и}}$ может быть только 0,02 с, а максимальное время паузы $t_{\text{п}}$ на практике не превышает 0,1 с. Подставив в выражение (17) возможные рациональные сочетания продолжительности $t_{\text{и}}$ и $t_{\text{п}}$, а также оптимальные коэффициенты перекрытия $k_{\text{П}n}$, рассчитанные по формуле (15), получим значения скорости приварки для $d_{\text{т}} = 3$ мм. Результаты выполненных вычислений представлены в виде гистограммы на рисунке 4.

Площадь присадочного материала, через которую ток проходит в течение всего импульса для точек, форма которых близка к окружности (рис. 3а), определяется по формуле [8]:

$$S_{\text{и}} = \frac{1}{2}\left(d_{\text{т}}^2 \cos^{-1}\left(\frac{v_{\text{св}} t_{\text{и}}}{d_{\text{т}}}\right) - \sqrt{d_{\text{т}}^2 - (v_{\text{св}} t_{\text{и}})^2} \right). \qquad (18)$$

Для точек, форма которых близка к эллиптической (рис. 3б) [14], –

$$S_{\text{и}} = 4\frac{b}{a}\left(\frac{\pi a^2}{4} - \frac{v_{\text{св}} t_{\text{и}}}{4}\sqrt{a^2 - \frac{(v_{\text{св}} t_{\text{и}})^2}{4}} - \frac{a^2}{2}\sin^{-1}\left(\frac{v_{\text{св}} t_{\text{и}}}{2a}\right) \right). \qquad (19)$$

При нанесении функциональных покрытий на плоские поверхности [10] сварочная головка перемещается относительно заготовки (или наоборот). Тогда величина подачи в перпендикулярном направлении за полный ход составит:

$$S_{\text{х}} = k_{\text{П}S} d_{\text{т}}, \text{ мм / ход}. \qquad (20)$$

Если перемещение сварочной головки или заготовки связанно с вращением заготовки, подачу можно определить по формуле:

$$S_n = N_{\text{э}} k_{\text{П}S} d_{\text{т}}, \text{ мм / об}. \qquad (21)$$

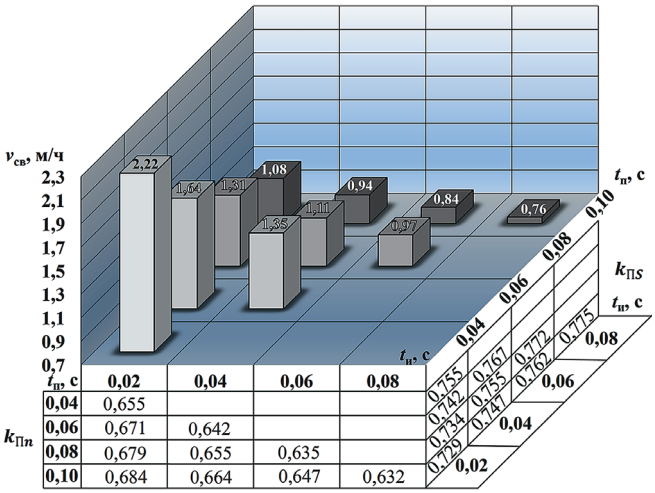
В случае, если подача заготовки не связанна с её вращением, минутная подача $S_{\text{м}}$ (скорость движения подачи v_S) определяется как

$$S_{\text{м}}(v_S) = \frac{N_{\text{э}} k_{\text{П}S} d_{\text{т}}}{T} = N_{\text{э}} k_{\text{П}S} d_{\text{т}} n, \text{ мм / мин}, \qquad (22)$$

где T – период одного оборота обрабатываемой заготовки, мин.

Подача сварочных электродов или заготовки без учёта частоты вращения заготовки –

$$S_{\text{м}}(v_S) = \frac{60 N_{\text{э}} k_{\text{П}S} k_{\text{П}n} d_{\text{т}}^2}{\pi D (t_{\text{п}} + t_{\text{и}} k_{\text{П}n})}, \ \frac{\text{мм}}{\text{мин}}. \qquad (23)$$



$t_{\text{п}}$, с	0,02	0,04	0,06	0,08
0,04	0,655			
0,06	0,671	0,642		
0,08	0,679	0,655	0,635	
0,10	0,684	0,664	0,647	0,632

Рис. 4. Скорость приварки ($v_{\text{св}}$) и коэффициенты перекрытия сварочных точек ($k_{\text{П}n}$ и $k_{\text{П}S}$) в зависимости от продолжительности импульса тока $t_{\text{и}}$ и пауз между ними $t_{\text{п}}$

Fig. 4. Welding speed ($v_{\text{св}}$, *m/h*) and the overlap coefficients of welding points ($k_{\text{П}n}$ and $k_{\text{П}S}$) at different combinations of values of the current pulse duration ($t_{\text{и}}$, *s*) and pauses between them ($t_{\text{п}}$, *s*)

Представленный алгоритм, позволяющий произвести подбор оборудования, инструментов, присадочных материалов, методов интенсификации процесса, а также технологических параметров, может использоваться при проектировании технологических процессов получения функциональных покрытий при упрочнении и восстановлении деталей машин в машиностроительном и ремонтном производстве.

Выводы

1. Протекание процесса приварки и качество получаемых покрытий зависят от усилия сжатия сварочных электродов. На основе анализа сопротивления зоны соединения при ЭКП показано, что для стальной ленты У12 оптимальное усилие сжатия сварочных электродов на плужный лемех, изготовленный из стали марки 65Г, составляет 1,7 кН.

2. Полученные выражения, позволяющие рассчитать оптимальные коэффициенты перекрытия и кинематические параметры электроконтактной приварки, позволяют проектировать технологические процессы упрочения и восстановления деталей машин.

3. Представленный алгоритм расчёта позволяет упростить использование технологии и повысить качество получаемых покрытий за счёт минимизации брака, возникающего вследствие ошибок при назначении параметров приварки.

Список использованных источников / References

1. Латыпов Р.А., Серов А.В., Серов Н.В., Игнаткин И.Ю. Утилизация отходов машиностроения и металлургии при упрочнении и восстановлении деталей машин. Ч. 2 // Металлург. 2021. № 6. С. 87-92. EDN: YVXZLL.

Latypov R.A., Serov A.V., Serov N.V., Ignatkin I.Yu. Disposal of mechanical engineering and metallurgy waste during hardening and restoration of machine parts. Part 2. *Metallurg.* 2021; 6: 87-92. http://dx.doi.org/10.52351/00260827_2021_06_87 (In Rus.)

2. Berezshnaya O.V., Gribkov E.P., Kuznestov V.D. Investigation of thermostressed state coating formation at electric contact surfacing of «shaft» type parts. Advances in Materials Science and Engineering. 2016: 6597317. http://dx.doi.org/10.1155/2016/6597317

3. Berezshnaya O.V., Gribkov E.P., Borovik P.V., Kassov V.D. The finite element modulation of thermostressed state of coating formation at electric contact surfacing of «shaft» type parts. Advances in Materials Science and Engineering. 2019; 2019: 38697313. https://doi.org/10.1155/2019/7601792

4. Nafikov M.Z. Formalized description of the process of formation of the welded joint in resistance welding of wires. Welding International. 2015; 29 (6): 466-470. https://doi.org/10.1080/09507116.2014.941670

5. Yunusbaev N.M., Gabitov I.I., Farkhshatov M.N., Nafikov M.Z., Saifullin R.N., Zagirov I.I., Insafuddinov S.Z. Perspective method of restoration of autotractor parts by electrocontact welding of powder materials in the magnetic field. Tribology in Industry. 2019; 41 (1): 115-125. https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.01.13

6. Pavlov A., Saifullin R., Farkhshatov M., Fayurshin A., Gaskarov I., Islamov L., Shaymukhametova D. Study of part restoration modes using electrocontact welding with gauze filler materials. International Journal on Engineering Applications. 2021; 9 (2): 62-70. https://doi.org/10.15866/irea.v9i2.19511

7. Сайфуллин Р.Н., Фархшатов М.Н., Гаскаров И.Р. Опыт восстановления изношенных деталей электроконтактной приваркой стальной ленты // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 125. С. 166-170. EDN: XHGAUD.

Sayfullin R.N., Farkhshatov M.N., Gaskarov I.R. Experience of restoring worn parts by electrocontact welding of steel tape. *Trudy GOSNITI*. 2016; 125: 166-170. (In Rus.)

8. Серов А.В., Серов Н.В., Бурак П.И. Определение технологических параметров электроконтактной приварки при восстановлении и упрочнении плоских поверхностей // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2017. № 1 (77). С. 35-40 EDN: XVDGKL.

Serov A.V., Serov N.V., Burak P.I. Determination of technological parameters of electrocontact welding during the restoration and hardening of flat surfaces. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2017; 1(77): 35-40. (In Rus.)

9. Серов А.В., Серов Н.В., Бурак П.И., Соколова В.М. Методика назначения оптимальных режимов электроконтактной приварки // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2019. № 6 (94). С. 35-39. https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-6-35-39

Serov A.V., Serov N.V., Burak P.I., Sokolova V.M. Method of choosing optimal modes of electrocontact welding. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2019; 6: 35-39. https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-6-35-39 (In Rus.)

10. Нафиков М.З., Загиров И.И., Сайфуллин Р.Н. Определение размеров ролика для электроконтактной наплавки валов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 2 (26). С. 21-22. EDN: HYVZFR.

Nafikov M.Z., Zagirov I.I., Sayfullin R.N. Determining the size of a roller for the electrocontact surfacing of shafts. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2007; 2: 21-22. (In Rus.)

Критерии авторства

Серов А.В., Латыпов Р.А., Бурак П.И., Серов Н.В. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов подготовили рукопись. Серов А.В., Латыпов Р.А., Бурак П.И., Серов Н.В. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 28.06.2022

Одобрена после рецензирования и доработки 27.09.2022

Принята к публикации 27.10.2022

Contribution

A.V. Serov, R.A. Latypov, P.I. Burak and N.V. Serov performed theoretical studies and, based on the results obtained wrote the manuscript. A.V. Serov, R.A. Latypov, P.I. Burak and N.V. Serov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 28.06.2022

Approved after reviewing 27.09.2022

Accepted for publication 27.10.2022

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 632.08
DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-70-75

ДИАГНОСТИКА НА ФАБРИКАХ РАСТЕНИЙ: ОБЗОР НЕИНВАЗИВНЫХ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ РАСТЕНИЙ ДЛЯ ЗАКРЫТЫХ РЕГУЛИРУЕМЫХ АГРОЭКОСИСТЕМ

БУРЫНИН ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ✉***,*** *аспирант*
burynin@gmail.com✉; https://orcid.org/0000-0003-3624-1474
СМИРНОВ АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник*
as984788@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-9236-2281
ПРОШКИН ЮРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник*
yproshkin@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-3566-2226
КАЧАН СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ, *младший научный сотрудник*
89263745692@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2726-2433
ДОЛГАЛЕВ АЛЕКСЕЙ ПАВЛОВИЧ, *главный специалист*
alexeie2006@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-6364-4346
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5

Аннотация. В условиях выращивания культур на фабриках растений своевременная информация о физиологическом состоянии растений позволяет поддерживать урожайность культуры на высоком уровне. В растениеводстве наибольшее распространение получили неинвазивные методы диагностики, позволяющие выявлять стрессовые состояния растения на ранней стадии. В теоретическом исследовании применительно к фабрикам растений проведено сравнение электрофизических методов мониторинга (измерения биопотенциала и биоимпеданса), термографических методов (метода регистрации ксилемного потока и инфракрасной термографии), оптических методов (измерения отражательных характеристик листьев, гипер- и мультиспектральной визуализации) и метода измерения флуоресценции хлорофилла. Исследуемые методы классифицировались и анализировались по нескольким критериям: измеряемые показатели, оценка параметров растений, портативность измерительного прибора, возможность сканирования на уровне полога. Сделан вывод о том, что неинвазивные методы диагностики физиологического состояния растений способны на ранней стадии сигнализировать о негативных изменениях, позволяют косвенно оценить стрессовое состояние растений, транспирацию, фотосинтез, пигментный и элементный состав, электрическое сопротивление тканей. Среди технологий неинвазивной диагностики физиологического состояния растений для закрытых регулируемых агроэкосистем эффективными являются метод спектрального анализа листьев растений – в частности, спектральная визуализация, и флуоресцентный метод. В дальнейших исследованиях для оценки фотосинтеза и составления «световых рецептов» планируется сравнить флуоресцентный метод и метод спектральной визуализации в практических условиях.

Ключевые слова: мониторинг растений, фотосинтез, биопотенциал, биоимпеданс, ксилемный поток, термография, флуоресценция, спектральная визуализация, флуоресцентный метод

Формат цитирования: Бурынин Д.А., Смирнов А.А., Прошкин Ю.А., Качан С.А., Долгалев А.П. Диагностика на фабриках растений: обзор неинвазивных методов мониторинга состояния растений для закрытых регулируемых агроэкосистем // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 70-75. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-70-75.

© Бурынин Д.А., Смирнов А.А., Прошкин Ю.А., Качан С.А., Долгалев А.П.

ORIGINAL PAPER

SCREENING IN PLANT FACTORIES: A REVIEW OF NON-INVASIVE PLANT MONITORING TECHNIQUES FOR CLOSED REGULATED AGROECOSYSTEMS

DMITRIY A. BURYNIN✉***,*** *postgraduate student*
burynin@gmail.com✉; https://orcid.org/0000-0003-3624-1474
ALEKSANDR A. SMIRNOV, *PhD (Eng), Senior Research Engineer*
as984788@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-9236-2281
YURIY A. PROSHKIN, *PhD (Eng), Senior Research Engineer*
yproshkin@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-3566-2226

SERGEY A. KACHAN, *Junior Research Engineer*
89263745692@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2726-2433
ALEKSEI P. DOLGALEV, *Chief Expert*
alexeie2006@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-6364-4346
Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1st Institutskiy Proezd Srt., Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract. Under the conditions of growing crops in plant factories, timely information about the physiological state of plants makes it possible to maintain crop yields at a high level. In crop production, non-invasive methods of plant diagnostics are most widely used, which helps identify plant stress conditions at an early stage. In the theoretical study applied to plant factories, the authors compared electrophysical monitoring methods (the measurement of biopotential and bioimpedance), thermography methods (the method of registration of xylem sap flow and infrared thermography), optical methods (the measurement of reflective characteristics of leaves, hyper- and multispectral imaging), and the method for measuring chlorophyll fluorescence. The studied methods were classified and analyzed according to several criteria: measurable indicators, the assessment of plant parameters, the portability of the measuring instrument, the ability to scan at the canopy level. It was concluded that non-invasive methods for diagnosing the physiological state of plants are capable of signaling negative changes at an early stage, provide for indirect assessing plant stress, transpiration, photosynthesis, pigment and elemental composition, and the electrical resistance of tissues. Among the technologies for non-invasive diagnostics of the physiological state of plants for closed regulated agroecosystems, the method of spectral analysis of plant leaves, in particular, spectral visualization, and the fluorescence method are particularly effective. In further studies to evaluate photosynthesis and compose "light recipes", the authors are planning to compare the fluorescence method and the spectral imaging method in practical conditions.

Keywords: plant monitoring, photosynthesis, biopotential, bioimpedance, xylem sap flow, thermography, fluorescence, spectral imaging, fluorescence method

For citation: Burynin D.A., Smirnov A.A., Proshkin Yu.A., Kachan S.A., Dolgalev A.P. Screening in plant factories: a review of non-invasive plant monitoring techniques for closed regulated agroecosystems. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(6): 70-75. (In Rus.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-70-75.

Введение. На фабриках растений контролируется ряд параметров: спектральный состав освещения, длительность светового дня, температура и влажность воздуха, водный и минеральный баланс питания растений, концентрация углекислого газа [1]. При этом на искусственное освещение выращиваемых растений расходуется более 80% всей потребляемой энергии [2].

Одним из способов повышения урожайности на фабриках растений является разработка так называемых световых рецептов выращивания растений. Поскольку в оптимальных климатических условиях производство биомассы зависит в первую очередь от интенсивности фотосинтеза, при управлении длиной светового дня, температурой, влажностью, доступностью воды и минеральных веществ основными параметрами выращивания становятся интенсивность и спектр облучения. Интенсивность фотосинтеза начинает возрастать от световой точки компенсации пропорционально росту интенсивности облучения, пока не достигнет максимума, то есть точки светового насыщения фотосинтеза [3].

В процессе повышения интенсивности фотосинтеза чем ближе к точке светового насыщения, тем более значительная часть энергии рассеивается посредством защитных механизмов растения, флуоресценции и нефотохимического тушения [4]. Следовательно, бесконтрольное облучение растений может приводить к значительным потерям энергоресурсов. Помимо интенсивности освещения, необходимо учитывать спектральное распределение фотосинтетически активной радиации, а также в зависимости от активности протекания фотосинтеза поддерживать приемлемую концентрацию углекислого газа.

Другим способом повышения урожайности является контроль здоровья растений. В растениеводстве наибольшее распространение получили неинвазивные методы диагностики, позволяющие выявлять стрессовые состояния растения на ранней стадии. Своевременная информация о физиологическом состоянии растения позволяет поддерживать урожайность культуры на неизменно высоком уровне, что является важным в условиях выращивания растений на фабриках.

Цель исследований: проанализировать современные неинвазивные, а также минимально инвазивные методы диагностики растений, основанные на физиологических признаках, в контексте использования на фабриках растений.

Материалы и методы. В исследованиях рассмотрены методы мониторинга растений, основанные на физиологических признаках, применительно к фабрикам растений, описаны особенности методов. Исследуемые методы классифицировались и анализировались по критериям: измеряемые показатели, оценка параметров растений, портативность измерительного прибора, возможность сканирования на уровне полога.

Результаты и их обсуждение. Традиционно физиологическое состояние растения оценивалось визуально и с помощью инвазивных методов анализа, которые являются трудозатратными и требуют наличия химической лаборатории. Для оценки физиологического состояния растений могут использоваться различные неинвазивные, а также минимально инвазивные методы.

К методам оценки физиологического состояния растений, основанным на электрофизическом воздействии, относится измерение биопотенциала, а также биоимпедансный анализ. Данные методы требуют установки электродов непосредственно в ткани растения – как правило, в лист или стебель, где между электродами проводятся измерения.

Импеданс биологической ткани в диапазоне частот 10 Гц…1 МГц зависит от сопротивления внутриклеточного содержимого, сопротивления межклеточного содержимого и импеданса клеточных мембран. При этом клеточная мембрана по своим электрическим свойствам напоминает конденсатор, емкость которого зависит от частоты [5].

Биоимпедансный анализ может использоваться для измерения комплексного электрического сопротивления биологических тканей и позволяет оценить водный статус растений [6], азотный статус растений [7], выявлять солевой стресс [8], проводить мониторинг корневой системы [9],

выявлять метаболические нарушения или структурные изменения тканей в растениях до появления видимых симптомов [10].

Биопотенциал представляет собой тип биологических сигналов, вызванных переносом ионов – таких, как мембранный транспорт. Измерение биопотенциала позволяет определить стрессовое состояние растения [11].

Методы биоимпедансного анализа и измерения биопотенциала являются полезными инструментами для исследования биологических тканей и позволяют проводить быстрые измерения в течение вегетации растения. Однако инвазивное введение электродов изменяет свойства тканей на поврежденном участке и ведет к некрозу этих тканей. Измерения отражают не только физиологические, но и стрессовые процессы [12].

Известен неинвазивный метод измерения биоэлектрического потенциала [12]. Хлорофитум хохлатый был пророщен таким образом, что его корни касались сеток из нержавеющей стали, между которыми и измерялась разница потенциалов (рис. 1). Было установлено, что динамика изменений биоэлектрического потенциала между почвой и растением отражает меру засушливости почвы и статус водного стресса.

В качестве альтернативы возможно использование различных полимерных электродов (рис. 2), однако нет достаточной информации о конкретном практическом применении [13].

Метод измерения водного потока в ксилеме с помощью датчиков ксилемного потока (сокодвижения) позволяет оценить состояние водного обмена растений (рис. 3).

По водному обмену растения можно судить о скорости транспирации [14], а скорость потока сока ксилемы контролируется в первую очередь устьичной проводимостью [15]. Между фотосинтетической и транспирационной активностью листьев у растений существует взаимосвязь: например, коэффициент корреляции между фотосинтетической и транспирационной активностью у листьев растений сои составил 0,91 [16].

Для характеристики фотосинтетической активности листьев, а также физиологического состояния растения в целом одним из наиболее популярных методов является измерение флуоресценции с помощью импульсов света и датчика (рис. 4).

Установлена криволинейная зависимость интенсивности флуоресценции хлорофилла *a* от времени. После светового воздействия на адаптированные к темноте листья происходит резкое увеличение интенсивности флуоресценции, а затем следует ее медленное снижение. Флуоресценция является одним из трех конкурирующих процессов по растрате световой энергии, поглощенной хлорофиллом, наряду с фотохимическим и нефотохимическим тушением. Анализ изменения флуоресценции основан на явлении насыщения и закрытия всех реакционных центров фотосистемы II посредством импульса света высокой интенсивности и подавления при этом фотохимического тушения. Насыщающий импульс света должен быть достаточно коротким, чтобы не вызвать значительного увеличения нефотохимического тушения в момент вспышки. Для расчета коэффициентов тушения определяются минимальный и максимальный выход флуоресценции после адаптации к темноте, а также оценивается максимальный выход флуоресценции в условиях световой адаптации и постоянный уровень флуоресценции на свету перед вспышкой [17].

Вычисление параметров флуоресценции позволяет выявлять биотические стрессы [18], абиотические стрессы [19], в том числе нарушение метаболизма листьев, замедление роста проростков [18], фотоингибирование, водный стресс [20]. Метод измерения флуоресценции чувствителен к незначительным изменениям в метаболизме растений, что выделяет

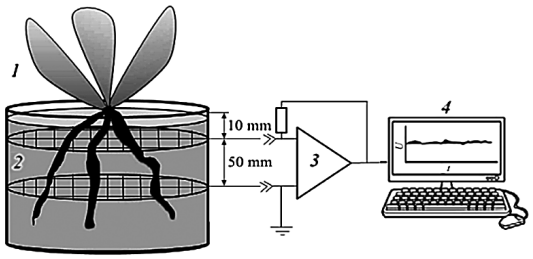


Рис. 1. Схема измерения биоэлектрического потенциала корней растения:
1 – исследуемый образец; 2 – электроды в виде сеток с выводами из емкости с субстратом; 3 – микроконтроллер; 4 – персональный компьютер [12]

Fig. 1. Scheme for measuring the bioelectric potential of plant roots:
1 – test sample; 2 – electrodes in the form of grids with leads from a container with a substrate; 3 – microcontroller; 4 – personal computer [12]

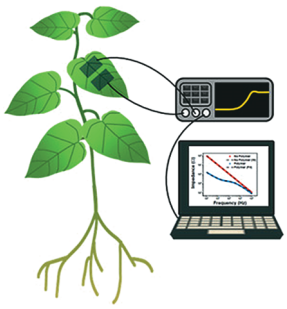


Рис. 2. Схема измерения импеданса биологической ткани с помощью полимерных электродов [13]

Fig. 2. Scheme for measuring the impedance of biological tissue using polymer electrodes [13]

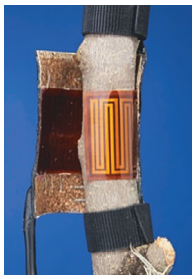


Рис. 3. Датчик ксилемного потока Dynamax[1]

Fig. 3. Dynamax xylem sap flow sensor[1]

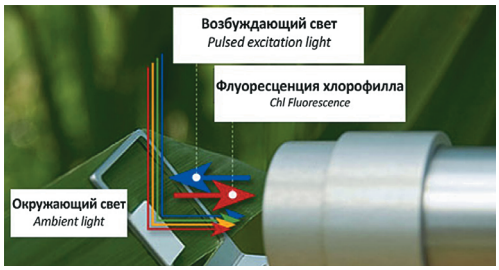


Рис. 4. Схема измерения флуоресценции хлорофилла[2]

Fig. 4. Scheme for measuring chlorophyll fluorescence[2]

[1] Transpiration Sap Flow. Patent US8590373 B1. URL: https://dynamax.com/products/transpiration-sap-flow/exo-skin-sap-flow-sensor (дата обращения: 30.09.2022).

[2] Chlorophyll fluorometer MONITORING-PAM. URL: https://ictinternational.com/products/monitoring-pam/monitoring-pam/ (дата обращения: 30.09.2022).

его среди других методов. Однако его недостатки заключаются в том, что ручные флуориметры обеспечивают только точечные измерения, а фотосинтетическая активность может изменяться от основания до кончика листа даже в благоприятных условиях. Стационарные системы визуализации флуоресценции могут охватывать некоторую площадь, однако возникает проблема равномерного освещения большой площади насыщающим импульсом высокой интенсивности, а также регистрации флуоресценции. Данные проблемы решены в системах фенотипирования, но стоимость таких систем является весьма высокой, чтобы использовать их в качестве коммерческого диагностического инструмента на фабриках растений.

Основным недостатком измерения параметров флуоресценции является необходимость затенять листья в течение как минимум 20 мин перед измерением. В связи с этим для коммерческого использования больше подходят измерения, которые можно проводить на свету. Измерение таких параметров флуоресценции, как скорость переноса электронов между фотосистемами (ETR) и квантовый выход электронного транспорта фотосистемы II (FPSII), стало возможным благодаря применению амплитудно-импульсной модуляции (PAM) – затенение при измерении данных параметров не требуется.

ETR оценивает скорость переноса электронов между фотосистемами:

$$ETR = FPSII \cdot PPFD \cdot 0{,}84 \cdot 0{,}5,$$

где PPFD – плотность фотосинтетического потока фотонов, являющаяся количеством поглощенного света (только 84% падающего света поглощается листом); 0,5 – коэффициент, учитывающий потребность в двух фотонах для переноса одного электрона через фотосистемы I и II [21].

Параметр FPSII отражает эффективность фотосистемы II, а именно долю поглощенного света, используемую в фотохимических реакциях [17]:

$$FPSII = (Fm' - Ft) / Fm',$$

где Fm' – максимальный выход флуоресценции; Ft – постоянный уровень флуоресценции.

Известно, что процессы связывания углерода напрямую влияют на рост растений. Скорость переноса электронов и фиксация углерода сильно коррелируют между собой в контролируемых условиях выращивания [22]. Поэтому на фабриках растений должны соблюдаться следующие условия: поддержание определенного уровня углекислого газа [23] и температурного режима; доступность воды и минеральных веществ; исключение как недостатка освещения, так и фотоингибирования.

Измерение ETR является точным, неинвазивным, быстрым и доступным средством оценки эффективности фотосинтеза для фабрик растений.

Отражательная способность листьев на различных длинах волн связана с их химическим составом, а именно с концентрацией пигментов и питательных элементов. В сельском хозяйстве широкое распространение получил метод диагностики растений на основе спектров отражения, пропускания, поглощения. Возможны как проведение точечных измерений листьев с помощью различных ручных приборов – таких, как различные спектрорадиометры [24] или измерители хлорофилла, например, хлорофиллметр SPAD-502 (KONICA MINOLTA, Япония), так и получение спектральной или гиперспектральной визуализации, что позволяет охватывать большие площади сельскохозяйственных угодий. Применительно к фабрикам растений данным методом можно проводить измерения на уровне как листьев, так и полога, используя спектральную визуализацию (рис. 5). Для повышения точности измерений необходима калибровочная пластина (эталон отражения).

Изначально метод диагностики растений с помощью измерения спектральной отражательной способности листьев сводился к вычислению вегетационных индексов растительности на основе кривой отражения. Для этого достаточно измерить значения интенсивности отражения на определенных длинах волн, их отношения описываются как вегетационные индексы.

Множество работ посвящено оценке хлорофилла [26], каротиноидов [27], антоцианов [28] в листьях с помощью различных индексов растительности. Для такой оценки используется видимая часть электромагнитного спектра (380…700 нм), а также дальний красный диапазон спектра. Количество хлорофилла или соотношение пигментов позволяют определить физиологическое состояние растения: например, увеличение содержания хлорофилла *b* по отношению к хлорофиллу *a* дает сигнал о стрессе [29]. Для оценки статуса азота, водного баланса растения, сухого вещества используется, как правило, коротковолновая инфракрасная область спектра. Спектральный анализ позволяет также выявить биотический стресс.

Отдельно стоит выделить такой вегетационный индекс растительности, как индекс фотохимического отражения (*PRI*):

$$PRI = (R531 - R570) / (R531 + R570).$$

Индекс PRI коррелирует с циклом ксантофилла, защищающим растение от фотоповреждения, и позволяет оценить эффективность использования света фотосинтетическим аппаратом растений [30]. Таким образом, индекс PRI можно использовать для подбора интенсивности облучения. Индекс PRI может служить еще одним средством, контролирующим эффективность облучения, однако чувствительность данного индекса к интенсивности фотосинтеза требует дальнейших исследований, так как PRI чувствителен также к общему соотношению пигментов хлорофилла и каротиноидов [30].

Метод измерения отражательной способности отдельных листьев с помощью различных спектрорадиометров достаточно точен, однако требуется несколько измерений даже на один лист для получения достоверного результата в связи с большой вариацией спектральных характеристик поверхности листа. Если рассматривать спектральную визуализацию на уровне полога, возникает множество нерешенных проблем относительно точности измерений. Спектр отражения в значительной мере зависит от содержания пигментов, однако такие факторы, как геометрия растительного покрова, фоновая отражательная способность почвы, неравномерность отражения излучения ввиду наклона или формы листьев, вносят ошибки в измерение. Эффект экранирования антоцианов иногда может затруднить получение достоверного результата [31].

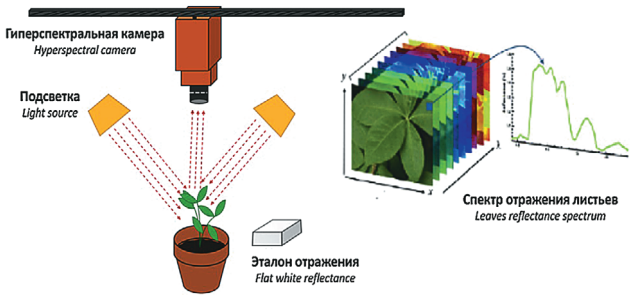


Рис. 5. Схема гиперспектральной визуализации для мониторинга растений [25]

Fig. 5. Scheme of hyperspectral visualization for plant monitoring [25]

Помимо узкополосных индексов растительности, применяются машинное обучение, модели RTM (модель переноса излучения), гибридные методы, использующие гиперспектральную визуализацию. Они более информативны, но требуют больших вычислительных мощностей и разработки сложных алгоритмов.

Методом термографии фиксируют изменения температуры растений, в том числе локальные, свидетельствующие об изменении транспирации листьев, а также определяют водный статус и выявляют потребность в поливе растений, что позволяет на ранней стадии обнаружить биотические и абиотические стрессы [32]. Однако данный метод имеет ряд недостатков: значительные колебания температуры между освещенными и затененными листьями не всегда позволяют дать верную оценку транспирации термографическим методом [33]; тепловое излучение фитосветильников, находящихся близко к растениям при стеллажном выращивании, также может вносить существенные погрешности в измерения; при выявлении биотических стрессов методу инфракрасной термографии присуща низкая специфичность; заболевания, незначительно влияющие на транспирацию, не могут быть обнаружены термографически [34].

Ведущие методы диагностики растений, основанные на физиологических признаках, которые могут применяться для использования на фабриках растений, представлены в таблице.

Таблица

Ведущие методы диагностики растений, основанные на физиологических признаках

Table

Main methods of plant diagnostics based on physiological traits

Метод измерения *Method*	**Измеряемая величина** *Measured value*	**Оценка параметров** *Parameters*	**Портативность** *Portability*	**Сканирование на уровне полога** *Scanning at the canopy level*	**Особенности** *Peculiarities*
Биопотенциал, биоимпеданс *Biopotential, bioimpedance*	**Электрическое сопротивление тканей растения** *Electrical resistance of plant tissues*	**Оценка водного статуса, выявление стрессов** *Assessment of water status, identification of stresses*	**Нет** *No*	**Нет** *No*	**Ввод электродов в ткани растения** *Inserting sensors into a plant*
Ксилемный поток *Sap flow*	**Тепло, переносимое соком растения** *Heat carried by plant sap*	**Оценка водного статуса, транспирация** *Water status assessment, transpiration*	**Нет** *No*	**Нет** *No*	**Установка датчиков на растение** *Placing sensors on a plant*
Флуоресценция (при измерении флуориметром) *Fluorescence (by fluorometer)*	**Свечение хлорофилла** *Light re-emitted by chlorophyll*	**Фотосинтез, выявление стрессов** *Photosynthesis, stress detection*	**Да** *Yes*	**Нет** *No*	**Ручной прибор, неинвазивное измерение** *Handheld device, non-invasive*
Флуоресцентная визуализация *Fluorescent Imaging*	**Свечение хлорофилла** *Light re-emitted by chlorophyll*	**Фотосинтез, выявление стрессов** *Photosynthesis, stress detection*	**Нет** *No*	**Да** *Yes*	**Неинвазивно** *Non-invasive*
Спектроскопия (при измерении спектрорадиометром) *Spectroscopy (by spectroradiometer)*	**Спектр отражения, поглощения, пропускания** *Spectrum of reflection, absorption and transmission*	**Относительное содержание пигментов, азота, водный статус, выявление стрессов** *Relative content of pigments, nitrogen, lignin, water status, stress detection*	**Да** *Yes*	**Нет** *No*	**Ручной прибор, неинвазивное измерение** *Handheld device, non-invasive*
Спектральная/Гиперспектральная визуализация *Spectral/Hyperspectral imaging*	**Спектр отражения** *Spectrum of reflection*	**Относительное содержание пигментов, азота, водный статус, выявление стрессов** *Relative content of pigments, nitrogen, lignin, water status, stress detection*	**Да** *Yes*	**Да** *Yes*	**Неинвазивно** *Non-invasive*
Инфракрасная термография *Thermography*	**Тепло, излучаемое объектами** *Heat emitted by objects*	**Оценка водного статуса, транспирация, выявление стрессов** *Water status assessment, transpiration, stress detection*	**Да** *Yes*	**Да** *Yes*	**Неинвазивно** *Non-invasive*

Выводы

1. Неинвазивные методы диагностики физиологического состояния растений способны на ранней стадии сигнализировать о негативных изменениях в растениях, позволяют косвенно оценивать стрессовое состояние растений, транспирацию, фотосинтез, пигментный и элементный состав, электрическое сопротивление тканей.

2. Среди современных технологий неинвазивной диагностики физиологического состояния растений для закрытых регулируемых агроэкосистем эффективными являются метод спектрального анализа листьев растений (в частности, спектральная визуализация) и флуоресцентный метод.

3. В дальнейших исследованиях для оценки фотосинтеза и составления «световых рецептов» планируется сравнить флуоресцентный метод и метод спектральной визуализации в практических условиях.

Список использованных источников / References

1. Kozai T. Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept, estimation and application to plant factory. Proceedings of the Japan Academy, Ser. B, Physical and Biological Sciences. 2013; 89(10). https://doi.org/10.2183/pjab.89.447

2. Graamans L., Baeza. E., van den Dobbelsteen A., Tsafaras I., Stanghellini C. Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. Agricultural Systems. 2018; 160: 31-43. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.003

3. Ahmad P., Ahanger M.A., Alyemeni M.N., Alam P. Effect of Light Intensity on Photosynthesis. Photosynthesis, Productivity and Environmental Stress. 2019: 65-73. https://doi.org/10.1002/9781119501800.ch4

4. Demmig-Adams B.; Adams III W.W. Photoinhibition. Encyclopedia of Applied Plant Sciences. 2017; 1: 78-85. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00093-9

5. Jócsák I., Végvári G., Vozáry E. Electrical impedance measurement on plants: a review with some insights to other fields. Theoretical and Experimental Plant Physiology. 2019; 31: 359-375.

6. Jamaludin D., Abd Aziz S., Ahmad D., Z.E. Jaafar, H. Impedance analysis of Labisia pumila plant water status. Information Processing in Agriculture. 2015; 2(3-4): 161-168. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.07.004

7. Muñoz-Huerta R.F., Ortiz-Melendez A. De J., Guevara-Gonzalez R.G. et al. An analysis of electrical impedance measurements applied for plant n status estimation in lettuce (Lactuca sativa). Sensors. 2014; 14(7): 11492-11503. https://doi.org/10.3390/s140711492

8. Ben Hamed K., Zorrig W., Hamzaoui A.H. Electrical impedance spectroscopy: A tool to investigate the responses of one halophyte to different growth and stress conditions. Computers and Electronics in Agriculture. 2016; 123: 376-383. https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.03.006

9. Ozier-Lafontaine H., Bajazet T. Analysis of root growth by impedance spectroscopy (EIS). Plant and Soil. 2005; 277: 299-313. https://doi.org/10.1007/s11104-005-7531-3

10. Repo T., Korhonen A., Laukkanen M., Lehto T., Silvennoinen R. Detecting mycorrhizal colonisation in Scots pine roots using electrical impedance spectra. Biosystems Engineering. 2014; 121: 139-149. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.02.014

11. Hasegawa Y., Puglisi D., Spetz A.L. Development of agriculture support system using plant bioelectric potential responses and gas sensor. International Journal of Food and Biosystems Engineering. 2017; 5(1): 44-51.

12. Кулешова Т.Э., Бушлякова А.В., Галль Н.Р. Неинвазивное измерение биоэлектрических потенциалов растений // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 5. С. 6-8. https://doi.org/10.21883/PJTF.2019.05.47387.17541

Kuleshova T.E., Bushlyakova A.V., Gall', N.R. Non-invasive measurement of plants' bioelectric potentials. *Pis'ma v ZHTF*. 2019; 45(5): 6-8. https://doi.org/10.21883/PJTF.2019.05.47387.17541 (In Rus.)

13. Taniguchi H., Akiyama K., Fujie T. Biopotential Measurement of plant leaves with ultra-light and flexible conductive polymer nanosheets. CSJ Journals. 2020; 93(8): 1007-1013. https://doi.org/10.1246/bcsj.20200064

14. Одинцова В.А. Фитомониторинг при изучении водного обмена и температурного режима растений черешни // Научные труды СКФНЦСВВ. 2017. Т. 13. С. 55-58. EDN: ZMWFMD

Odintsova V.A. Phytomonitoring in the study of water exchange and temperature regime of sweet cherry. *Nauchnye trudy SKFNTsSVV*. 2017; 13: 55-58. (In Rus.)

15. Thompson M.V., Zwieniecki M.A. 11 – The role of potassium in long distance transport in plants. Physiological Ecology. 2005: 221-240. https://doi.org/10.1016/B978-012088457-5/50013-7

16. Амелин А.В., Чекалин Е.И., Заикин В.В., Сальникова Н.Б. Интенсивность фотосинтеза и транспирации листьев у растений Glycine Max (L.) MERR // Вестник аграрной науки. 2017. № 6(69). С. 3-8 https://doi.org/10.15217/issn2587-666X.2017.6.3

Amelin A.V., Chekalin E.I., Zaikin V.V., Sal'nikova N.B. Intensity of photosynthesis and transpiration of leaves in plants Glycine Max (L.) MERR. *Vestnik agrarnoy nauki.* 2017; 6(69): 3-8. https://doi.org/10.15217/issn2587-666X.2017.6.3 (In Rus.)

17. Guidi L., Degl'Innocenti E. Imaging of chlorophyll a fluorescence: A tool to study abiotic stress in plants. Abiotic Stress in Plants – Mechanisms and Adaptations. 2010. https://doi.org/10.5772/22281

18. Perez-Bueno M.L., Pineda M., Baron M. Phenotyping plant responses to biotic stress by chlorophyll fluorescence imaging. Front. Plant Sci. 2019; 10: 1135. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01135

19. Kalaji H.M., Jajoo A., Oukarroum A. et al. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. Acta Physiologiae Plantarum. 2016; 38: 102. https://doi.org/10.1007/s11738-016-2113-y

20. Lichtenthaler H. Multi-colour fluorescence imaging of photosynthetic activity and plant stress. Photosynthetica. 2021; 59 (SI): 364-380. https://doi.org/10.32615/ps.2021.020

21. Kim C., van Iersel M.W. Morphological and physiological screening to predict lettuce biomass production in controlled environment agriculture. Remote Sens. 2022; 14 (2): 316. https://doi.org/10.3390/rs14020316

22. Seaton G.R., Walker D.A. Chlorophyll fluorescence as a measure of photosynthetic carbon assimilation. Proc. R. Soc. Lond. B. 1990; 242: 29-35. https://doi.org/10.1098/rspb.1990.0099

23. Zaiyou J., Xiuren Z., Jing T. Photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of Isodon rubescens (Hemsley) H. Hara. Scientific Reports. 2020; 10: 10043. https://doi.org/10.1038/s41598-020-67192-2

24. Бурынин Д.А., Смирнов А.А. Обзор технических средств неинвазивного мониторинга состояния растений, использующих методы гиперспектральной визуализации // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. № 68 (2). С. 54-61. EDN: PLYYEN

Burynin D.A., Smirnov A.A. Review of technical means for non-invasive monitoring of the state of plants using hyperspectral imaging methods. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2021; 68(2): 54-61. (In Rus.)

25. Mishra P., Lohumi S., Ahmad Khan H., Nordon A. Close-range hyperspectral imaging of whole plants for digital phenotyping: Recent applications and illumination correction approaches. Computers and Electronics in Agriculture. 2020; 178: 105780. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105780

26. Lichtenthaler H.K., Gitelson A., Lang M. Non-destructive determination of chlorophyll content of leaves of a green and an aurea mutant of tobacco by reflectance measurements. Journal of Plant Physiology. 1996; 148 (3-4): 483-493. https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80283-5

27. Hernández-Clemente R., Navarro-Cerrillo R.M., Zarco-Tejada P.J. Carotenoid content estimation in a heterogeneous conifer forest using narrow-band indices and PROSPECT + DART simulations. Remote Sensing of Environment. 2012; 127: 298-315. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.014

28. Gitelson A.A., Merzlyak M.N., Chivkunova O.B. Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. Photochemistry and Photobiology. 2001; 74 (1): 38-45. https://doi.org/10.1562/0031-8655(2001)074<0038: opaneo>2.0.co;2.

29. Pattanayak G., Biswal A., Reddy V.S., Tripathy B.C. Light-dependent regulation of chlorophyll b biosynthesis in chlorophyllide a oxygenase overexpressing tobacco plants. Biochemical and biophysical research communications. 2005; 326(2): 466-471. https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2004.11.049

30. Gamon J.A., Peñuelas J., Field C.B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. Remote Sensing of Environment. 1992; 41: 35-44. https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90059-S

31. Proshkin Y.A., Smirnov A.A., Semenova N.A., Dorokhov A.S., Burynin D.A., Ivanitskikh A.S., Panchenko V.A. Assessment of ultraviolet impact on main pigment content in purple basil (Ocimum basilicum L.) by the spectrometric method and hyperspectral images analysis. Applied Sciences. 2021; 11 (19): 8804. https://doi.org/10.3390/app11198804

32. Pineda M., Barón M., Pérez-Bueno M.-L. Thermal imaging for plant stress detection and phenotyping. Remote Sensing. 2021; 13 (1): 68. https://doi.org/10.3390/rs13010068

33. Jones H.G. Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. Advances in Botanical Research. 2004; 41: 107-163. https://doi.org/10.1016/s0065-2296(04)41003-9

34. Oerke E.-C., Steiner U. Potential of digital thermography for disease control. Precision Crop Protection – the Challenge and Use of Heterogeneity. 2010. P. 167-182. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9277-9_11

Критерии авторства

Бурынин Д.А., Смирнов А.А., Прошкин Ю.А., Качан С.А., Долгалев А.П. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов подготовили рукопись. Бурынин Д.А., Смирнов А.А., Прошкин Ю.А., Качан С.А., Долгалев А.П. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 09.06.2022

Одобрена после рецензирования 21.07.2022

Принята к публикации 30.09.2022

Contribution

D.A. Burynin, A.A. Smirnov, Yu.A. Proshkin, S.A. Kachan and A.P. Dolgalev performed theoretical studies and, based on the results obtained wrote the manuscript. D.A. Burynin, A.A. Smirnov, Yu.A. Proshkin, S.A. Kachan and A.P. Dolgalev have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 09.06.2022

Approved after reviewing 21.07.2022

Accepted for publication 30.09.2022

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 378.147:004.9
DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-76-79

СМЕШАННОЕ ОБУЧЕНИЕ КАК МЕХАНИЗМ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

НАЗАРОВА ЛЮДМИЛА ИВАНОВНА, *канд. пед. наук, доцент*
nazarova@rgau-msha.ru; http://orcid.org/0000-0001-5698-6284
ЧИСТОВА ЯНА СЕРГЕЕВНА, *канд. пед. наук, доцент*
energo-chistova@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-3713-8965
ГРИЦЕНКО НАТАЛИЯ СЕРГЕЕВНА, *аспирант*
nata131125@gmail.com; http://orcid.org/0000-0002-6425-6617
Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. В процессе цифровой трансформации профессионального образования ведущая роль отводится развитию теории и практики смешанного обучения, при котором в различных вариациях сочетаются аудиторная работа и электронное обучение в онлайн- и офлайн-форматах. Поиск эффективных инструментов реализации смешанного обучения является актуальной задачей педагогики профессионального образования. Цель исследований – выявление и обоснование дидактических возможностей применения смешанного обучения как механизма цифровой трансформации профессионального образования. Анкетирование 143 студентов показало их общее положительное отношение к активным и интерактивным методам обучения, к различным цифровым технологиям, применяемым на занятиях и для организации самостоятельной работы. Анкетирование 55 преподавателей продемонстрировало недостаточно высокий уровень их мотивации к применению смешанного обучения в связи с необходимостью существенной переработки методик преподавания учебных дисциплин, их трансформации в онлайн- и офлайн-форматы. Главным препятствием для эффективной реализации смешанного обучения является недостаточная сформированность цифровой и методической компетентности преподавателей. В связи с этим необходима систематическая работа по освоению преподавателями современных цифровых технологий и инновационных образовательных технологий, реализуемых в процессе смешанного обучения. Особое внимание в организации смешанного обучения следует уделить модели «Перевёрнутый класс», способствующей повышению качества образовательного процесса.

Ключевые слова: цифровая трансформация образования, смешанное обучение, модель «Перевёрнутый класс», цифровые технологии, цифровая компетентность, цифровая образовательная среда

Формат цитирования: Назарова Л.И., Чистова Я.С., Гриценко Н.С. Смешанное обучение как механизм цифровой трансформации профессионального образования // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 76-79. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-76-79.

© Назарова Л.И., Чистова Я.С., Гриценко Н.С., 2022

ORIGINAL PAPER

BLENDED LEARNING AS A MECHANISM OF DIGITAL TRANSFORMATION OF PROFESSIONAL EDUCATION

LIUDMILA I. NAZAROVA, *PhD (Ed), Associate Professor*
nazarova@rgau-msha.ru; http://orcid.org/0000-0001-5698-6284
YANA S. CHISTOVA, *PhD (Ed), Associate Professor*
energo-chistova@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-3713-8965
NATALIYA S. GRITSENKO, *postgraduate student*
nata131125@gmail.com; http://orcid.org/0000-0002-6425-6617
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127550, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49

Abstract. In the process of digital transformation of professional education, the leading role belongs to the development of the theory and practice of blended learning, which combines classroom work and e-learning in the online and offline formats.

Searching for effective tools for the implementation of blended learning is an urgent task of the methodologists of professional education. The purpose of this study is to identify and justify the didactic opportunities of using blended learning as a mechanism for the digital transformation of professional education. A survey of 143 students showed their general positive attitude to active and interactive teaching methods, various digital technologies used in the classroom and ways of organizing independent work. A survey of 55 teachers showed an insufficiently high level of their motivation to use blended learning due to the need for a significant revision of the methods of teaching academic subjects, and ways to transform them into the online and offline formats. The main obstacle to the effective implementation of blended learning is the lack of digital and methodological competence of teachers. In this regard, systematic work is required to arm teachers with tools of modern digital technologies and innovative educational techniques implemented in the process of blended learning. Particular attention in the organization of blended learning should be given to a Flipped Classroom model, which sigmificantly improves the quality of the educational process.

Key words: digital transformation of education, blended learning, Flipped Classroom model, digital technologies, digital competence, digital educational environment

For citation: Nazarova L.I., Chistova Ya.S., Gritsenko N.S. Blended learning as a mechanism of digital transformation of professional education. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(6): 76-79. (In Rus.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-76-79.

Введение. Цифровая трансформация образования требует от педагогов новых компетенций, связанных с применением современных инструментов, технологий и методов обучения [1, 2]. В 2020 г. пандемия Covid-19 вынудила систему образования перейти в дистанционный формат, тем самым ускорив процессы её цифровой трансформации. После такого «краш-теста» образование, видимо, уже не будет прежним. С одной стороны, выявилось множество проблем, связанных с технологической неготовностью образовательных организаций к дистанционному обучению, недостаточной цифровой компетентностью участников образовательного процесса, материальными факторами [3]. С другой стороны, эту стрессовую ситуацию с переходом на дистант можно рассматривать как выход за пределы зоны комфорта, который, как известно, является источником развития. Преподаватели и руководители образовательных организаций осознали важность превентивных мер, касающихся развития цифровой образовательной среды и повышения цифровой компетентности всех участников образовательного процесса [4]. На первый план вышли образовательные технологии, направленные на оптимизацию самостоятельной работы студентов (её организацию, упорядочение, мониторинг) и активизацию учебно-познавательной деятельности в процессе учебных занятий (и аудиторных занятий, и электронного обучения – синхронного и асинхронного). Актуальной научно-педагогической проблемой стал поиск действенных механизмов совершенствования образовательного процесса в новой цифровой реальности.

Цель исследований – выявление и обоснование дидактических возможностей применения смешанного обучения как механизма цифровой трансформации профессионального образования.

Материалы и методы. В исследованиях использованы анализ педагогической литературы и практики реализации смешанного обучения, наблюдение и анкетирование. Методология основана на полипарадигмальном подходе, объединяющем системный, личностно ориентированный и компетентностный подходы.

Результаты и их обсуждение. Цифровая трансформация образования характеризуется широкой востребованностью цифровых технологий в процессе решения образовательных задач – таких, как поиск, обработка, интерпретация, структурирование информации; создание электронных образовательных ресурсов; организация дистанционного обучения в онлайн- и офлайн-форматах, включая диагностику учебных достижений обучающихся с применением прокторинга, и др. Образовательный процесс в условиях новой цифровой реальности приобрёл черты так называемого смешанного обучения, под которым понимают сочетание аудиторного (непосредственного) обучения с обучением при помощи различных информационных и коммуникационных технологий, в том числе аудио- и видеоматериалов, компьютерной графики, интерактивных элементов и др. [5]. В смешанном обучении от 30 до 79% времени отводится на онлайн-формат.

В основу смешанного обучения положены следующие принципы: последовательность, когда для каждой формы смешанного обучения устанавливается очерёдность освоения элементов учебного материала, чередование самостоятельной работы студентов и аудиторных занятий; наглядность, когда классический принцип дидактики дополняется доступностью базы знаний благодаря возможностям электронного обучения; практико-ориентированность, при котором обязательно предусмотрено применение полученных знаний на практике, что необходимо для формирования профессиональных компетенций; непрерывность, когда обучение организовано методично и последовательно. Многим современным студентам свойственно «клиповое мышление», и поэтому они предпочитают микрообучение, при котором материал предъявляется небольшими блоками (главное – обеспечить целостность содержания обучения, избегая фрагментарности); фасилитация – организация методического сопровождения обучающихся, обеспечение оперативной обратной связи в смешанном обучении [5]. К основным преимуществам смешанного обучения относят: возможность обучения в удобное время, в удобном темпе и формате; осознание обучающимся планируемых результатов обучения; ведущая роль самостоятельной деятельности обучающегося; эффективное управление учебным процессом с помощью цифровых инструментов; снижение временных и финансовых затрат на обучение; активное взаимодействие обучающихся между собой и с преподавателем; возможность получить консультацию преподавателя вне учебного занятия; персонализация обучения (реализация индивидуального подхода) и др.

В настоящее время насчитывают около 40 разновидностей (моделей) смешанного обучения. К наиболее известным относятся модели «Перевёрнутый класс», «Ротация станций», «Ротация лабораторий», «Face-to-Face Driver»,

«Гибкая модель» и др. Объединяет их то, что в них так или иначе представлены три компонента: контактные занятия обучающихся с преподавателем; дистанционные, в том числе онлайн, коммуникации преподавателя и обучающихся; самостоятельная работа обучающихся, организованная преподавателем.

Проведённый теоретический анализ технологии смешанного обучения показал, что она является оптимальной организационной моделью образовательного процесса в условиях его цифровой трансформации. Но в то же время мы сочли необходимым выяснить мнение студентов о том, каким они хотели бы видеть образовательный процесс. Для этого была разработана анкета на выявление степени удовлетворенности студентов обучением и их пожеланий по совершенствованию учебного процесса. Студенты отметили, что больше всего во время обучения им не хватает: практических занятий в достаточном количестве, что отмечено большинством студентов (55,2%); просмотра образовательного контента (23,1%); лекций (9,8%); мотивации (2,1%); заинтересованности преподавателя (3,5%). «Всего достаточно», – так ответили 6,3% студентов. На предложение увеличить количество занятий с дискуссиями на различные темы 84,6% опрашиваемых отреагировали положительно; отрицательно отреагировали 9,8%; остальные (5,6%) высказали свою точку зрения, в том числе такую, как «…только если тема дискуссии будет интересна», «…если участие в дискуссии будет необязательным» и др. К предложению повысить уровень интерактивности на занятиях 93,6% опрошенных отнеслись положительно, 2,1% опрашиваемых не поддержали эту идею. Под интерактивными методами обучения подразумевается взаимодействие педагога и обучающихся, а также обучающихся друг с другом и обучающихся с электронными ресурсами в процессе решения различных учебных задач.

Таким образом, очевидна потребность студентов в том, чтобы обучение было более практико-ориентированным, интерактивным, интегрированным в современную цифровую образовательную среду. Студенты всё отчетливее осознают связь между качеством своей подготовки и будущим трудоустройством, поэтому поддерживают инициативу преподавателей по совершенствованию содержания и методики обучения, прежде всего на основе цифровых технологий. Более того, многие студенты выражают свою готовность принять участие в разработке образовательного контента для электронных курсов в составе авторского коллектива.

Для удовлетворения образовательных потребностей студентов необходима трансформация учебного процесса от преобладания нижних уровней усвоения учебного материала (запоминать, понимать, применять) к акцентированию верхних уровней (анализировать, оценивать, создавать). Однако на практике происходит увеличение доли самостоятельной работы и уменьшение доли аудиторной работы. До верхних уровней учебный процесс чаще всего не успевает дойти. Серьёзной проблемой становится снижение качества обучения, причём эта проблема усугубляется недостаточно высокой мотивацией преподавателей к освоению новых цифровых и образовательных технологий. Анкетирование 55 преподавателей РГАУ-МСХА об их цифровой компетентности показало, что при сравнительно высокой оценке когнитивной и деятельностной составляющих цифровой компетентности (в среднем 70,5 и 76,8% соответственно) преподаватели довольно низко оценили мотивационный компонент (в среднем – 53,2%). Причины такого явления схожи у разных преподавателей, зачастую это связано со стрессом и эмоциональным выгоранием. В связи с этим необходима комплексная работа по организации научно-методического и коучингового сопровождения профессионально-личностного развития педагогов. Только приняв и осознав значимость и сформировав для себя как мотив профессионального роста освоение цифровых технологий, педагог станет полноценным субъектом цифровой трансформации образования.

Многие преподаватели, изучавшие различные модели смешанного обучения на курсах повышения квалификации, выделяют в качестве одной из наиболее эффективных модель «Перевёрнутый класс». Однако широкого применения эта модель пока не получила ввиду трудоемкости разработки электронных образовательных ресурсов для портала и необходимости переработки методик проведения аудиторных занятий с применением интерактивных методов обучения. Несмотря на ряд трудностей, связанных с внедрением в практику, модель смешанного обучения «Перевёрнутый класс» приобретает всё большую популярность [6]. Если в традиционном обучении вначале преподаватель излагает теорию, затем обучающиеся закрепляют полученные знания, в том числе в процессе выполнения домашнего задания, то в модели «Перевёрнутый класс» эти этапы «меняются местами». Как правило, предусмотрено два этапа в изучении каждой темы: предаудиторный и аудиторный. При необходимости может быть и три этапа включая постаудиторный, если необходимо дополнительное закрепление изученного материала. Его целесообразность определяет сам преподаватель. На первом этапе студенты самостоятельно осваивают учебный материал на учебно-методическом портале, в сети Интернет, работая с мультимедиаконтентом, и проходят тестовый контроль на базовом уровне.

Основные задачи для первого этапа заключаются в оптимизации образовательного контента на учебно-методическом портале и способов его представления. Во многих вузах учебно-методический портал работает на основе платформы Moodle. В неё легко встраиваются модули, расширяющие её функциональные возможности. Эффективность применения модели «Перевёрнутый класс» во многом определяется современными цифровыми технологиями, позволяющими реализовать персонализированные образовательные траектории, подобрать оптимальный способ освоения материала в удобном для студента темпе. Для второго этапа необходим переход от объяснительно-иллюстративной технологии к активным и интерактивным технологиям, основанным на дискуссионных, игровых, тренинговых, проблемных, проектно-исследовательских методах [7], развивающих у студентов множество гибких навыков и профессионально важных качеств: критическое мышление, креативность, коммуникабельность, толерантность, умение работать в команде, тактичность, находчивость и др.

При использовании методов и форм организации интерактивного обучения от преподавателя требуется больше активности и творчества, чем при традиционном обучении. При изучении каждой конкретной темы можно использовать разные интерактивные формы и методы обучения или их комбинацию: мастер-классы, творческие лаборатории, кейс-анализ, деловые игры, проекты, дискуссии, мозговой штурм, синектику и др.

Выводы

Применение модели смешанного обучения «Перевёрнутый класс» позволяет сделать учебный процесс более результативным. Поскольку освоение базовых знаний по теме на низших уровнях (запоминание и понимание) перенесено на портал как самостоятельная работа, на аудиторных занятиях студенты осуществляют поисковую деятельность с выходом на высшие уровни усвоения материала: анализ, оценку, творчество. Главной проблемой в применении модели «Перевёрнутый класс» является недостаточно высокая мотивация преподавателей ввиду высокой трудоемкости разработки цифрового образовательного контента и необходимости переработки методик проведения аудиторных занятий с применением интерактивных методов. В этой связи требуется создание системы развития цифровой и методической компетентностей преподавателей.

Список использованных источников

1. Роберт И.В. Развитие информатизации образования в условиях цифровой трансформации // Педагогика. 2022. Т. 86, № 1. С. 40-50. EDN: FWHKKG.

2. Розин В.М. Цифровизация в образовании (по следам исследования «Трудности и перспективы цифровой трансформации образования») // Мир психологии. 2021. № 1-2 (105). С. 104-115. EDN: SQQGJP.

3. Вайндорф-Сысоева М.Е., Субочева М.Л. Дистанционное обучение в условиях пандемии: проблемы и пути их преодоления // Проблемы современного пед. образования. 2020. № 67-4. С. 70-74. EDN: BKQEVK.

4. Еприкян Д.О. Новые требования к профессионально-педагогическим кадрам в условиях информатизации образования // Наука без границ и языковых барьеров: Материалы Международной научно-практической конференции. Орёл: ОГАУ имени Н.В. Парахина, 2019. С. 63-67. EDN: YBCVAL.

5. Bonk C.J., Graham C.R. The Handbook of Blended Learning: Global Perspectives, local designs. San Francisco, CA: Pfeifer, 2006. 624 p.

6. Блинов В.И., Есенина Е.Ю., Сергеев И.С. Модели смешанного обучения: организационно-дидактическая типология // Высшее образование в России. 2021. Т. 30, № 5. С. 44-64. https://doi.org:10.31992/0869-3617-2021-30-5-44-64

7. Алипичев А.Ю. Специфика и перспективы применения технологии блочно-модульного обучения в контексте профессионально ориентированной подготовки по иностранному языку в вузе (на примере создания вторичных текстов) // Гуманитарный вестник. 2015. № 6 (32). С. 7. EDN: TXIYHN

References

1. Robert I.V. Development of the informatization of education in the context of digital transformation. *Pedagogika*, 2022; 86(1): 40-50. (In Rus.)

2. Rozin V.M. Digitalization in education (following the study "Difficulties and prospects of digital transformation of education"). *Mir psikhologii*, 2021; 1-2(105): 104-115. (In Rus.)

3. Vayndorf-Sysoeva M.E., Subocheva M.L. Distance learning in the pandemic: problems and ways to overcome them. *Problemy sovremennogo pedagogicheskogo obrazovaniya,* 2020; 67-4: 70-74. (In Rus.)

4. Eprikyan D.O. New requirements for professional and pedagogical staff in the context of the informatization of education. *Nauka bez granits i yazykovykh bar'erov*: *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii.* Orel, Orlovskiy gosudarstvenniy agrarniy universitet imeni N.V. Parakhina, 2019: 63-67. (In Rus.)

5. Bonk C.J., Graham C.R. The Handbook of Blended Learning: Global Perspectives, local designs. San Francisco, CA, Pfeifer, 2006: 624.

6. Blinov V.I., Esenina E.Yu., Sergeev I.S. Models of blended learning: organizational and didactic typology. *Vysshee obrazovanie v Rossii*, 2021; 30(5): 44-64. (In Rus.).

7. Alipichev A.Yu. Professional foreign language teaching at higher school: case-study of secondary text development. *Gumanitarniy vestnik,* 2015; 6 (32): 7. (In Rus.)

Критерии авторства

Назарова Л.И., Чистова Я.С., Гриценко Н.С. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Назарова Л.И., Чистова Я.С., Гриценко Н.С. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 24.08.2022 г.

Одобрена после рецензирования и доработки 14.09.2022

Принята к публикации 16.09.2022

Contribution

L.I. Nazarova, Ya.S. Chistova and N.S. Gritsenko performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. L.I. Nazarova, Ya.S. Chistova and N.S. Gritsenko have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received on 24.08.2022

Approved after reviewing 14.09.2022

Accepted for publication 16.09.2022

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ

К изданию принимается ранее не опубликованное автором (авторами) произведение (научно-техническая или обзорно-аналитическая статья), соответствующее основным направлениям журнала.

Структура

***Тематическая рубрика* (*УДК*)**

Название статьи без сокращений, но должно максимально точно отражать затронутую проблему.

Фамилия, имя, отчество (полностью), должность, ученая степень, ученое звание. Полное название организации – место работы (учебы) в именительном падеже без составных частей названий организаций, полный юридический адрес организации в следующей последовательности: индекс, страна, город, улица, дом; контактный телефон; e-mail; ORCID.

Аннотация (200-250 слов) – это самостоятельный законченный материал. Вводная часть минимальна. Нужно коротко и емко отразить актуальность и цель исследований, условия и схемы экспериментов, привести полученные результаты (с обязательным аргументированием на основании цифрового материала), сформулировать выводы. Нельзя использовать аббревиатуры и сложные элементы форматирования (например, верхние и нижние индексы).

Ключевые слова (7-10 слов или словосочетаний для поисковых систем и классификации статей по темам).

Статья должна быть структурирована, обязательно содержать следующие разделы:

- Введение (актуальность);
- Цель исследований;
- Материалы и методы;
- Результаты и обсуждение;
- Выводы.

Библиографический список должен быть составлен в соответствии с последовательностью ссылок в тексте.

Требования к оформлению статьи

1. ***Шрифт*** Times New Roman, размер – 14 пт, интервал – 1,5. Буквы Ё, ё обязательны. Буквы латинского алфавита выделяются курсивом, греческого и русского алфавитов, индексы и показатели степени, математические символы lim, lg, const, sin, cos, tg, min, max и др. приводятся в прямом начертании. Аббревиатуры должны быть пояснены. Диапазон любых значений указать (…) (13,25…13,50), кроме периода лет (тире) (5-6). Используются только «кавычки», а не “кавычки”.

2. ***Рисунки*** (иллюстрации, графики, диаграммы, схемы) должны иметь сквозную нумерацию, название и ссылку в тексте: (рис. 1), которую следует располагать в тексте после первого упоминания о рисунке. Каждый рисунок должен иметь подрисуночную подпись, в которой дается объяснение всех его элементов. Каждый график, диаграмма или схема вставляется в текст как объект MS Excel. Наименования осей, единицы измерения физических величин и прочие надписи должны быть выполнены на русском и английском языке.

3. ***Таблицы*** должны иметь сквозную нумерацию и заголовки. К таблицам и рисункам необходим англоязычный перевод подрисуночных подписей и заголовков. Сокращать слова в таблице не допускается.

4. Для набора ***формул*** необходимо использовать программы Math Type либо Equation. Нумеровать только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи. Простые математические выражения (не содержащие дробей, корней, сложных индексов и т.д.) размещаются в тексте. Формулы должны создаваться одним объектом, а не состоять из частей. Формулы и уравнения печатаются с новой строки и центрируются. Все обозначения в формулах должны быть объяснены с указанием единиц измерения в системе СИ.

5. ***Список литературы*** к статье необходимо составлять в порядке цитирования, библиографическое описание – согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008. Все ссылки должны быть оформлены единообразно: только с точкой, без тире между частями описания. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. В тексте статьи ссылки на источник цитирования приводятся в квадратных скобках, в конце предложения перед точкой и размещаются последовательно в тексте статьи по мере упоминания. Названия цитируемых журналов приводятся полностью, без сокращений. Необходимо также при наличии указывать DOI цитируемой статьи.

Перевод названия статьи, ФИО, аффилиации, аннотации, ключевых слов и списка литературы должен выполняться качественно (механический перевод недопустим!)

Автор несет юридическую и иную ответственность за содержание статьи.

Статьи присылать по адресу: agroeng@rgau-msha.ru