



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

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научный журнал

Том 24. № 3 / 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. Лаверова
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](http://www.timacad.ru/about/struktura-universiteta/izdaniia/vestnik-mgau)

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

Подписано в печать 14.06.2022 г.
Формат 60 84/8
Тираж 500 экз.

© ФГБОУ 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., чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, доцент, заместитель директора по научно-организационной работе, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

Водяников 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>

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>

Панин А.В., д-р экон. наук, и.о. директора Института механики и энергетики, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация) <https://orcid.org/0000-0001-5431-7159>

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., чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, 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. Пушкирова, 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>



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 14.06.2022

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., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Associate 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>

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>

Panin Aleksandr V., DSc (Econ), Acting Director, the Institute of Mechanical and Power Engineering, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation)

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., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences DSc (Eng), Senior Research Associate, Head of the "Mechanization, Electrification and Automation" Section, Department of Agricultural Sciences, 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

Федоренко В.Ф., Петухов Д.А., Свиридова С.А., Юзенко Ю.А., Назаров А.Н. Ресурсосберегающая энергоэффективная технология производства кукурузы на зерно	4
Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В., Курбанов Р.К. Технические средства для химической защиты растений: состояние и перспективы развития.....	12
Сорокин К.Н. Математическая модель для разработки технологической линии по производству гуминовых удобрений на основе модульного оборудования	19
Андреев С.А., Дубов В.В. Определение рабочих параметров ленточного дражирователя	27
Камбулов С.И., Божко И.В., Бабенко О.С., Пархоменко Г.Г. Результаты исследований по определению оптимальных параметров рабочего органа для мелкой обработки почвы.....	33
ЩигOLEV С.В. Модернизация механизма копирования рельефа поля	40
Юфереv Л.Ю., Селезнева Д.М. Испытания комбинированной электроустановки для обеспыливания и обеззараживания воздуха в птичнике.....	45

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

Лазарь В.В. Особенности микрометража гильз цилиндров двигателей ЯМЗ	51
Нефедкин А.И., ОдинокOVA И.В., Гаевский В.В. Исследование влияния геометрических параметров абразивных зерен хонинговальных брусков на микрогеометрию поверхности деталей.....	56
Пикина А.М. Защита резьбовых соединений от термоокислительного схватывания	64
Мельников О.М., Казанцев С.П., Игнаткин И.Ю., Скороходов Д.М., Белов М.И. Совершенствование уплотнительных устройств подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники.....	68

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Сбитнев Е.А., Осокин В.Л., Жужин М.С. Исследование однофазного замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ с изолированной нейтралью	73
Сторчевой В.Ф., Кабдин Н.Е., Андреев С.А., Гуров Д.А. Моделирование рациональных режимов электроактиватора для обработки грубых кормов.....	80

CONTENTS

FARM MACHINERY AND TECHNOLOGIES

Vyacheslav F. Fedorenko, Dmitry A. Petukhov, Svetlana A. Sviridova, Yulia A. Yuzenko, Andrey N. Nazarov Resource-saving energy-efficient grain corn production technology	4
Aleksei S. Dorokhov, Ivan A. Starostin, Aleksandr V. Eshchin, Rashid K. Kurbanov Technical means for chemical protection of plants: current state and development prospects	12
Konstantin N. Sorokin Mathematical model of a technological line based on modular equipment for the production of humic fertilizers.....	19
Sergey A. Andreev, Vladimir V. Dubov Determining the operating parameters of the belt-type seed pelletizer	27
Sergey I. Kambulov, Igor V. Bozhko, Olga S. Babenko, Galina G. Parkhomenko Research results on determining the optimal parameters of the working tool for shallow tillage.....	33
Sergey V. Shchigolev Modernized version of the field relief copying mechanism	40
Leonid Yu. Yuferev, Darya M. Selezneva Testing a combined electrical installation for dust separation and air disinfection in a poultry house	45

TECHNICAL SERVICE IN AGRICULTURE

Vera V. Lazar Micrometry of cylinder liners of YaMZ engines.....	51
Anatoliy I. Nefedkin, Irina V. Odinkova, Vitaliy V. Gaevskiy Influence of the geometric parameters of abrasive grains of honing sticks on the surface microgeometry of machine parts.....	56
Anna M. Pikina Improving the corrosion resistance of threaded joints by using lubricants.....	64
Oleg M. Melnikov, Sergey P. Kazantsev, Ivan Yu. Ignatkin, Dmitry M. Skorokhodov, Mikhail I. Belov Improving sealing elements of the bearing assembly of agricultural machinery	68

POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

Evgeniy A. Sbitnev, Vladimir L. Osokin, Maksim S. Zhuzhin Study of single-phase earth fault in electrical networks of 6-35 kV with an isolated neutral	73
Vladimir F. Storcheyov, Nikolay E. Kabdin, Sergey A. Andreev, Dmitriy A. Gurov Simulating rational modes of electric activator for rough forage processing.....	80

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК: 631.331

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-4-11

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА КУКУРУЗЫ НА ЗЕРНО

ФЕДОРЕНКО ВЯЧЕСЛАВ ФИЛИППОВИЧ✉, академик РАН, д-р техн. наук, профессор¹
vim@vim.ru✉

ПЕТУХОВ ДМИТРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ, канд. техн. наук²
dmitripet@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8193-1293>

СВИРИДОВА СВЕТЛАНА АЛЕКСЕЕВНА, заведующий лабораторией²
S1161803@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2331-7006>

ЮЗЕНКО ЮЛИЯ АНАТОЛЬЕВНА, научный сотрудник²
yulek.com@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9731-2163>

НАЗАРОВ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ, научный сотрудник²
naz.and.nik.1969@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0238-3717>

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

² Новокубанский филиал ФГБНУ «Росинформагротех» (КубНИИТиМ); 352243, Российская Федерация, Краснодарский край, г. Новокубанск, ул. Красная, 15

Аннотация. С целью оценки эффективности технологии возделывания кукурузы на зерно, основанной на минимальной обработке почвы и внесении органических удобрений, в сравнении с традиционной технологией с отвальной вспашкой проведены полевые исследования в двух хозяйствах Новокубанского района Краснодарского края. Проведен расчет показателей экономической эффективности посевных агрегатов, машинно-тракторного парка и технологии в целом. Сравнительный анализ показателей экономической оценки пропашной сеялки прямого посева Optima TFmaxi в агрегате с трактором John Deere 8310RT, используемых в технологии Mini-till, и посевных агрегатов традиционной технологии показал, что посев кукурузы на зерно сеялкой прямого посева по сравнению с традиционной позволяет снизить трудоемкость механизированных работ на 0,15 чел.-ч/га (43%) и потребность в топливе на 0,2 кг/га (7%), но при этом удельные эксплуатационные затраты в 3 раза выше. Сравнительный анализ использования машинно-тракторного парка в двух технологиях показал, что в технологии Mini-till по сравнению с традиционной применяется меньшее количество техники (на 18 ед., или на 62%), но при этом в минимальной технологии – вся техника зарубежного производства, а в традиционной – только 24% ее. Установлено, что затраты ресурсов на обработку почвы в технологии Mini-till по сравнению с традиционной снизились: трудоемкость механизированных работ – на 0,58 чел.-ч/га (46%); расход топлива – на 9,1 кг/га (18%); удельные эксплуатационные затраты денежных средств – на 1227 руб/га (17%). При применении технологии Mini-till урожайность кукурузы на зерно составила 10 т/га, что выше урожайности, полученной при использовании традиционной технологии, на 3 т/га, или на 43%. Полученные научно-практические результаты позволяют рекомендовать применение минимальной технологии Mini-till для экономически устойчивых сельскохозяйственных предприятий всех форм собственности Южного федерального округа.

Ключевые слова: минимальная технология, кукуруза на зерно, сеялка прямого посева, органические удобрения, эксплуатационно-технологическая оценка, экономическая оценка, эффективность.

Формат цитирования: Федоренко В.Ф., Петухов Д.А., Свиридова С.А., Юзенко Ю.А., Назаров А.Н. Ресурсосберегающая энергоэффективная технология производства кукурузы на зерно // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 3. С. 4-11. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-4-11>.

© Федоренко В.Ф., Петухов Д.А., Свиридова С.А., Юзенко Ю.А., Назаров А.Н., 2022



ORIGINAL PAPER

RESOURCE-SAVING ENERGY-EFFICIENT GRAIN CORN PRODUCTION TECHNOLOGY

VYACHESLAV F. FEDORENKO✉, Deputy Director, DSc (Eng), Member of the Russian Academy of Sciences¹
vim@vim.ru✉

DMITRY A. PETUKHOV, Deputy Director, PhD (Eng)²
dmitripet@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8193-1293>

SVETLANA A. SVIRIDOVA, Head of the Laboratory²

S1161803@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2331-7006>

YULIA A. YUZENKO, Research Engineer²

yulek.com@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9731-2163>

ANDREY N. NAZAROV, Research Engineer²

naz.and.nik.1969@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0238-3717>

¹ Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1st Institutsky Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation

² Novokubansk Branch of Federal State Budgetary Scientific Institution "Rosinformagrotech" (KubNIITiM); 15, Krasnaya Str., Novokubansk, 352243, Russian Federation

Abstract. To assess the effectiveness of corn cultivation technology based on the minimum tillage technology (*Mini-till*) and organic fertilizers, and compare it with the conventional technology including mouldboard ploughing, the authors conducted field studies in two farms of the Novokubansk district of the Krasnodar region. They analyzed economic efficiency indicators of seeders, the machine-tractor fleet, and the technology applied as a whole. The comparative analysis of economic indicators of an Optima TFmaxi direct seeder coupled with a John Deere 8310RT tractor used in the *Mini-till* technology and seeders used in the conventional technology have shown that using a direct seeder for seeding corn reduces mechanized work input by 0.15 man-h/ha (43%) and fuel consumption by 0.2 kg/ha (7%) as contrasted to the conventional one. However, specific operating costs are 3 times higher. The comparative analysis of the use of machinery and tractors in both technologies has shown that the *Mini-till* technology, as compared with the conventional one, uses less machinery (by 18 units, or 62%). But at the same time, the *Mini-till* technology uses 100% imported machinery, while the conventional one – only 24%. It has been established that the cost of resources for soil tillage in the *Mini-till* technology decreased as compared to the conventional one: mechanized work input – by 0.58 man-h/ha (46%), fuel consumption – by 9.1 kg/ha (18%), and specific operating costs – by 1227 rub./ha (17%). While using the *Mini-till* technology, the farmers recorded a grain corn yield of 10 t/ha, which is higher than that gathered with the conventional technology by 3 t/ha (43%). The obtained scientific and practical results prove the use of the *Mini-till* technology for economically sustainable agricultural enterprises of all ownership forms in the Southern Federal District of Russia.

Key words: minimum tillage technology (mini-till), grain corn, direct seeder, organic fertilizers, operational and technological assessment, economic assessment, efficiency.

For citation: Fedorenko V.F., Petukhov D.A., Sviridova S.A., Yuzenko Yu.A., Nazarov A.N. Resource-saving energy-efficient grain corn production technology. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(3): 4-11. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-4-11>.

Введение. Одними из действенных инструментариев перевода производства продукции растениеводства на новый технологический уровень при возделывании сельскохозяйственных культур являются технологии прямого посева *No-till* и посева с минимальной обработкой почвы *Mini-till*.

Интерес сельхозтоваропроизводителей к прямому посеву и посеву с минимальной обработкой почвы сельскохозяйственных культур обусловлен высоким уровнем финансовых издержек на содержание технического парка интенсивных технологий возделывания культур, процессами машинной деградации почв, снижением почвенного плодородия и запасов почвенной влаги, неравномерностью выпадения осадков в период вегетации, обусловленными текущими климатическими изменениями [1-3].

Кукуруза на зерно является одной из важнейших продовольственных, кормовых и технических культур. Посевные площади культуры в Российской Федерации за последние 20 лет увеличились более чем в 3 раза¹.

В Краснодарском крае кукуруза ежегодно занимает около 500 тыс. га, из них на зерно – 300...400 тыс. га [4]. В 2020-2021 гг. средняя урожайность кукурузы на зерно в условиях Краснодарского края составила 47...54 ц/га².

¹ Россия в цифрах, 2020 год. М.: Государственный комитет Российской Федерации по статистике. [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 16.03.2022).

² Доклад о социально-экономическом положении Краснодарского края, 2021 год. М.: Федеральная служба государственной статистики. [Электронный ресурс]. URL: <https://gks.ru/region/doc11103/IssWWW.exe/Stg/d054/i058007r.htm> (дата обращения: 18.03.2022).

Традиционная технология производства культуры включает в себя основную и предпосевную обработку почвы, посев, системы удобрения и защиты растений и уборку. При этом обработка почвы (основная и предпосевная) является самой затратной статьёй в структуре эксплуатационных затрат денежных средств технологии возделывания культуры ввиду высокой доли затрат топлива, живого труда и издержек на содержание парка почвообрабатывающих орудий [5].

Системами земледелия Краснодарского края под кукурузу на зерно наряду с традиционным применением технологий отвальной основной обработки почвы повсеместно рекомендованы поверхностные, минимальные и нулевые системы обработки.

Прямой посев при возделывании сельскохозяйственных культур позволяет полностью исключить применение дисковой бороны, плуга, культиватора, а использование технологии с минимальной обработкой почвы – измельчить и равномерно распределить по поверхности поля пожнивные остатки, сформировав верхний мульчирующий слой, который будет способствовать сбережению и накоплению влаги.

Научные исследования, проводимые с целью сравнения эффективности возделывания кукурузы на зерно при применении различных технологий обработки почвы и посева, зачастую показывают противоречивые результаты. Ряд исследователей говорит о снижении урожайности кукурузы при применении минимальной и нулевой обработок почвы или прямом посеве [6-9]. Данные других экспериментальных опытов подтверждают, что внедрение энергосберегающих технологий возделывания кукурузы на зерно с применением

минимальной и нулевой видов обработки почвы способствует повышению энергетической и экономической эффективности при сохранении высокой урожайности [10, 11].

Цель исследований: проведение полевых исследований и оценка экономической эффективности минимальной технологии *Mini-till* в сравнении с традиционной технологией возделывания кукурузы на зерно.

Материалы и методы. Метод проведения исследований основан на комплексном анализе технологических процессов возделывания кукурузы на зерно с использованием элементов стандартизованных методов испытаний сельскохозяйственной техники и сравнительной оценки показателей экономической эффективности.

Показатели экономической оценки посевных агрегатов и машинно-тракторных парков определены по данным эксплуатационно-технологической оценки, полученным по результатам испытаний агрегатов, в соответствии с ГОСТ 34393³. Расчеты проведены с помощью программного обеспечения «Экономическая оценка» [12] на следующие площади возделывания кукурузы на зерно:

- традиционная технология – 549 га;
- технология с минимальной обработкой почвы – 1000 га.

Цена на сельскохозяйственную технику взята без учета налога на добавленную стоимость (НДС).

Результаты и их обсуждение. Минимальная технология возделывания и уборки кукурузы на зерно *Mini-till* в течение 7 лет применяется в К(Ф)Х «Деревянко», традиционная – на валидационном полигоне КубНИИТиМ, расположенных в одной агроклиматической зоне, в Новокубанском районе Краснодарского края. Система минимальной обработки почвы в К(Ф)Х под кукурузу на зерно состоит из лущения дисковой бороной на глубину до 8 см после рано убираемых колосовых озимых ячменя и пшеницы, внесения перегноя на основе птичьего помета и заделки его культиватором (до 15 см), зяблевой обработки глубокорыхлителем (до 25 см).

Существуют следующие значимые отличия технологии возделывания кукурузы на зерно с минимальной обработкой почвы от традиционной:

– базовый набор последовательных технологических операций возделывания кукурузы, состоящий из 8 основных и 1-2 факультативных операций;

– машинно-тракторный парк, базирующийся на применении техники исключительно зарубежного производства (самоходная техника: опрыскиватель, тракторный и комбайновый парк – «John Deere» (США), почвообрабатывающие орудия – «Köckerling» (Германия), прочая техника – фирм Италии, Австрии и Германии), причем возраст технических средств не превышает 10 лет;

– система обработки почвы – минимальная осенняя *Mini-till*, отсутствие весенних почвообрабатывающих операций – весенний прямой посев культуры;

– система удобрения – отказ от применения гранулированных минеральных удобрений в пользу ежегодного внесения по всей площади пашни твердого органического (перегной на основе птичьего помета) и жидких минеральных (КАС и ЖКУ) удобрений;

– система защиты растений, основанная на применении гербицидов зарубежного производства;

– использование семян зарубежной селекции и экспортно ориентированная продажа урожая;

– организация производства с круглосуточным режимом работы механизаторов в период выполнения полевых работ.

Применение весеннего прямого посева кукурузы на зерно в данном случае не приводит к полному или резкому снижению числа почвообрабатывающих операций (четыре операции обработки почвы в традиционной технологии и три – в изучаемой с минимальной обработкой почвы). Принципиальным является лишь отказ от основной зяблевой обработки в виде отвальной вспашки и предпосевной культивации. Изменяется и назначение почвообрабатывающих операций: второе дискование предназначено для заделки органического удобрения (перегной на основе птичьего помета), а последующее глубокое рыхление выступает в качестве альтернативы отвальной вспашки.

Все вышеуказанные факторы определяют производственно-экономическую результативность исследуемой технологии.

Характеристика и основные отличительные признаки сравниваемых технологий производства кукурузы на зерно представлены в таблице 1.

Сеялка, предназначенная для прямого посева, должна обеспечивать оптимальную глубину заделки семян независимо от того, какое количество растительных остатков находится на поверхности почвы после предшествующей культуры. При этом она должна как можно меньше нарушать строение почвенного профиля, то есть сделать разрез почвы на необходимую глубину, оставляя нетронутой основную площадь поля [13].

В К(Ф)Х для посева кукурузы на зерно применяется сеялка точного высева «Optima TFmaxi (HD II + e-drive)» производства «Kverneland» (Германия), предназначенная для посева в мульчу и обычного сева кукурузы, с одновременным внесением удобрений (рис.).



Рис. Сеялка точного высева «Optima TFmaxi» в агрегате с трактором «John Deere 8310RT»

Fig. “Optima TFmaxi” precision seeder coupled with a “John Deere 8310RT” tractor

Сеялка состоит из телескопической рамы, на которую установлен центральный бункер для удобрений и дополнительное оборудование для внесения ЖКУ, высевающих секций, дисковых и зубчатых сошников, спицевых дисков опорных колес, V-образных катков, основного шасси размером 250 × 450 мм, электрооборудования и гидросистемы для поднятия боковых секций [2]. Дополнительно сеялка оборудована устройством «LF 600 M1», предназначенным для внесения жидких удобрений и биостимуляторов.

³ ГОСТ 34393-2018. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. М.: Стандартинформ, 2018. 12 с.

Таблица 1

Сравнительная характеристика технологий возделывания кукурузы на зерно

Table 1

Comparative characteristics of corn cultivation technologies for grain

Наименование элемента технологии <i>Name of the technology element</i>	Содержание элемента в хозяйстве <i>Content of the technological element on the farm</i>	
	КубНИИТыМ <i>KubNIITyM</i>	К(Ф)Х <i>Personal Farm Enterprise</i>
Семена и урожай <i>Seeds and harvest</i>	Семена – отечественная селекция; урожай – продажа внутри страны <i>Seeds – domestic selection; harvest – domestic market sale</i>	Семена – зарубежная селекция; урожай – экспортно ориентированная продажа <i>Seeds – foreign selection; harvest – export-oriented sale</i>
Обработка почвы <i>Tillage</i>	Осенняя – двукратное дискование, вспашка, культивация; весенняя – предпосевная культивация <i>Autumn- double disking, plowing, cultivation; spring – pre-sowing cultivation</i>	Осенняя – дискование, культивация, глубокое рыхление, культивация <i>Autumn – disking, cultivation, deep loosening, cultivation</i>
Система удобрения <i>Fertilizer system</i>	Основное внесение – аммиачная селитра 150 кг/га перед посевом; подкормка (по листу) – цинк сернокислый (1,0 кг/га) + гумат калия (0,5 л/га) <i>Main application – ammonium nitrate 150 kg/ha before sowing; top dressing – Zinc sulphate (1,0 kg/ha) + Potassium humate (0,5 l/ha)</i>	Основное внесение – органическое удобрение 5 т/га ежегодно; подкормка – внутрпочвенное внесение КАС-32 <i>Main application – organic fertilizer 5 t/ha annually; top dressing: intra-soil application of CAS-32</i>
Посев <i>Sowing</i>	8-рядные сеялки <i>8-row seeders</i>	16-рядная сеялка; внесение жидких минеральных удобрений <i>16-row seeder; introduction of liquid mineral fertilizers</i>
Агротехнический уход <i>Agrotechnical care</i>	Довсходовое боронование, междурядная культивация с подкормкой; применение гербицидов зарубежного производства <i>Pre-emergence harrowing, row-to-row cultivation with top dressing; use of a foreign-made herbicide</i>	Междурядная культивация с подкормкой; применение гербицидов зарубежного производства <i>Inter-row cultivation with top dressing; use of foreign-made herbicides</i>
Схема уборки <i>Harvesting scheme</i>	Прямоточная двухзвенная (комбайн-автомобиль) <i>Direct-flow two-stage (harvester-car)</i>	Прямоточная двухзвенная (комбайн-большегрузный автомобиль); перегрузочная трехзвенная (комбайн-бункер-перегрузчик-большегрузный автомобиль) <i>Direct-flow two-stage (combine harvester-heavy-duty vehicle); three-link reloading (combine-hopper-reloader-heavy-duty vehicle)</i>
Парк технических средств <i>Fleet of technical means</i>	Разномарочный: - тракторы – в основном отечественные; - сельхозорудия – отечественные и зарубежные; - комбайны – отечественные. Возраст техники – от 7 до 20 лет <i>Consisting of different makes: - tractors – mainly domestic, - agricultural equipment – domestic and foreign-made; - combines are domestic. The age of the equipment is from 7 to 20 years</i>	Использование на обработке почвы и посеве гусеничного трактора, опрыскиватель – самоходный. Основные энергосредства, машины и сельхозорудия – зарубежного производства (США, ФРГ, Италия). Возраст техники не превышает 10 лет <i>Use of a crawler tractor for tillage and sowing and a self-propelled sprayer. Main power means, machinery and agricultural equipment are of foreign production (USA, Germany, Italy). Age of the equipment does not exceed 10 years</i>
Персонал <i>Staff</i>	Высокая и средняя квалификация <i>High and medium qualifications</i>	Высокая квалификация <i>High qualifications</i>
Технологическая дисциплина и культура земледелия <i>Production discipline and farming standards</i>	Средний уровень <i>Average level</i>	Высокий уровень <i>High level</i>

Посев кукурузы производится по минимально обработанной с осени почве (сплошная культивация с целью заделки органического удобрения и глубокое рыхление). Основными предшественниками являются озимая пшеница и кукуруза на зерно, а также озимый ячмень и соя [2].

В производственных условиях сеялка агрегируется с гусеничным трактором «John Deere 8310RT»

с двигателем мощностью 320 л.с. Управляет трактором и работой сеялки высококвалифицированный механизатор.

Сравнительный анализ показателей экономической оценки посевных агрегатов проведен по данным, представленным в таблице 2.

Трудоемкость механизированных работ на посеве кукурузы на зерно в минимальной технологии *Mini-till* ниже показателя традиционной на 0,15 чел.-ч/га, на или 43%.

Таблица 2

Показатели экономической оценки посевных агрегатов

Table 2

Indicators of economic evaluation of sowing aggregates

Показатели <i>Indicators</i>	Значение показателя по посевному агрегату <i>Economic assessment indicators of a seeder</i>	
	базовый <i>basic</i>	предлагаемый <i>proposed</i>
Затраты труда, чел.-ч: / <i>Labor input, man-h:</i> всего / total на 1 га / per one ha	190 0,35	200 0,20
Необходимая потребность: / <i>Required number:</i> в технике, шт. / <i>technical means, pcs.</i> механизаторах, чел. / <i>machine operators, people.</i> топливе, кг: / <i>fuel, kg:</i> всего / total на 1 га / per one ha капитальных вложений, тыс. руб. / <i>capital investments, thousand rubles</i>	3 3 1516 2,8 9770	1 1 2600 2,6 36600
Эксплуатационные затраты денежных средств, тыс. руб.: <i>Operating costs of technical means, thousand rubles:</i> всего / total на 1 га / per one ha	606 1,1	3345 3,3

При применении минимальной технологии *Mini-till* в расчете на 1000 га необходим 1 посевной комплекс, при традиционной технологии на 549 га требуются 3 разных по составу посевных агрегата. Потребность в механизаторах – на 2 человека больше для традиционной технологии.

Потребность в топливе на технологической операции посева кукурузы на зерно при применении минимальной технологии ниже традиционной на 0,2 кг/га, или 7%.

Удельные эксплуатационные затраты денежных средств на посеве при применении технологии *Mini-till* в 3 раза выше показателя традиционной технологии.

Структура машинно-тракторных парков (МТП) представлена в таблице 3.

Машинно-тракторный парк, используемый в минимальной технологии, по сравнению с традиционным МТП содержит на 18 ед. (62%) меньше техники и полностью состоит из техники зарубежного производства. Традиционный МТП состоит в основном из отечественной техники, техника зарубежного производства составляет 24%.

Проведем сравнительный анализ показателей экономической оценки использования МТП (табл. 4).

При применении МТП в минимальной технологии трудоемкость механизированных работ

при возделывании кукурузы на зерно ниже, чем при применении традиционного МТП, на 1,6 чел.-ч/га, или на 49%.

Необходимая потребность в обслуживающем персонале при применении МТП в технологии *Mini-till* – 2 механизатора, что на 14 чел. ниже по сравнению с потребностью традиционного МТП. Столь значительная потребность в персонале при традиционной технологии обусловлена совпадением агротехнических сроков проведения четырех весенних технологических операций: внесения минеральных удобрений, предпосевной культивации с их заделкой, посева и довсходового боронования.

При применении МТП в минимальной технологии потребность в топливе составляет 70,8 кг/га, что значительно выше аналогичного показателя при применении традиционного МТА: на 0,8 кг/га, или на 1,3%.

Стоимость МТП для технологии *Mini-till* на 84,4 млн руб., или на 93%, выше стоимости традиционного МТП. Удельные эксплуатационные затраты денежных средств при использовании МТП в минимальной технологии выше аналогичного показателя при применении традиционного МТП на 11,4 тыс. руб/га, или на 69%.

Таблица 3

Структура машинно-тракторных парков

Table 3

Structure of machine and tractor parks

Показатели <i>Indicators</i>	Значение показателя по технологии / <i>Value of the technological indicator</i>	
	традиционная / <i>conventional</i>	минимальная / <i>minimum</i>
Потребность в технике, шт. <i>Required number of technical means, pcs.</i>	29	11
Тракторы, всего, шт. / <i>Tractors, total, pcs.</i> в том числе тяговых классов / <i>including traction classes:</i> 1,4...2 4 5 и выше / <i>5 and above</i>	7 4 (2 – Беларус-1025.2, 2 – МТЗ-82) 1 – John Deere 8420 2 (1 – Versatile 2375, 1 – К-744Р1)	3 1 – John Deere 7730, 2 (1 – John Deere 8430, 1 – John Deere 8310 RT)
Плуги, шт. <i>Plows, pcs.</i>	3 1 – ПНУ-8×40П 1 – ПСК-8 1 – ПС-6/60	1 Vector 460
Бороны, шт. <i>Harrow, pcs.</i>	3 1 – Catros 6001-2 1 – Challenger-1435 1 – БШ-12	1 Rebell 500
Машины для внесения удобрений, опрыскиватели, шт. <i>Fertilizer applicators, Sprayers, pcs.</i>	2 1 – Bogballe M 2 1 – ОПГ-3000/24 МК	2 1 – John Deere M 4030, 1 – TSW 6240 S
Культиваторы, шт. <i>Cultivators, pcs.</i>	7 1 – Корунд 900 L 1 – КДК-9 1 – КПМ-10 3 – КРН-5,6 1 – КШМ-10,8	1 SKM
Сеялки, шт. <i>Seeders, pcs.</i>	3 1 – Gaspardo SP 1 – Kuhn Planter 1 – УПС-8-02	1 Optima TFmaxi
Зерноуборочные комбайны, шт. <i>Combine harvesters, pcs.</i>	2 2 – КЗС-1218 GS-12	1 John Deere S770i
Жатки, шт. <i>Harvesters, pcs.</i>	2 1 – OptiCorn-870 1 – ППК-81	1 Drago GT 8-70

Таблица 4

Показатели экономической оценки использования машинно-тракторного парка

Table 4

Indicators of economic assessment of the use of the machine and tractor fleet

Показатели <i>Indicators</i>	Значение показателя по МТП <i>Value of the machine and tractor fleet indicator</i>	
	традиционный / <i>conventional</i>	новый / <i>new</i>
Площадь, га / <i>Acreage, ha</i>	549	1000
Затраты труда, чел.-ч / <i>Labor costs, man-h/ha:</i> всего / <i>total</i> на 1 га / <i>per one ha</i>	1 777 3,24	1 640 1,64
Потребность / <i>Required number::</i> в обслуживающем персонале / <i>service personnel:</i> механизаторах / <i>machine operators</i> вспомогательных рабочих / <i>auxiliary workers</i> топливе / <i>fuel:</i> всего, т / <i>total, t</i> на 1 га, кг / <i>per one ha, kg</i> капитальных вложениях, млн руб. / <i>capital investments, million rubles</i>	8 8 38,4 69,9 90,8	2 0 70,8 70,8 175,2
Эксплуатационные затраты денежных средств, тыс. руб. <i>Operating costs of technical means, thousand rubles</i> Всего/ <i>total</i> на 1 га / <i>per one ha</i>	9 077 16,5	27 889 27,9

Сравнительный анализ показателей экономической эффективности исследуемых технологий представлен в таблице 5.

Себестоимость возделывания кукурузы на зерно при применении технологии *Mini-till* выше себестоимости при использовании традиционной технологии на 711 руб/т, или на 16%.

Таблица 5

Показатели экономической эффективности технологий

Table 5

Indicators of the economic efficiency of technologies

Показатели <i>Indicators</i>	Значение показателя по технологии <i>Value of the technological indicator</i>	
	традиционная / <i>conventional</i>	минимальная / <i>minimum</i>
Себестоимость производства продукции, тыс. руб. <i>Cost of production, thousand rubles</i>	17 423	52 350
Оборотные фонды (всего), тыс. руб. <i>Current assets (total), thousand rubles</i>	10 416	28 740
В том числе / <i>Including:</i>		
топливо / <i>fuel</i>	2 071	4 280
семена / <i>seeds</i>	5 310	12 040
удобрения / <i>fertilizers</i>	1 515	4 400
средства защиты растений / <i>plant protection products</i>	1 520	8 020
Урожайность, т/га / <i>Yield, t/ha</i>	7,0	10,0
Стоимость реализованной продукции, тыс. руб. <i>Cost of products sold, thousand rubles</i>	56 950	180 000
Прибыль / <i>Profit:</i>		
всего, тыс. руб. / <i>total, thousand rubles</i>	39 527	127 650
в расчете на 1 га, руб. / <i>per one ha, rub.</i>	71 998	127 650
в расчете на 1 т продукции, руб. / <i>per one ton of product output, rub.</i>	10 272	12 765
Рентабельность культуры, % / <i>Crop cultivation profitability, %</i>	227	244
Затраты труда, чел.-ч/т / <i>Labor input, people-h/t</i>	0,46	0,16

При применении минимальной технологии урожайность кукурузы на зерно составила 10 т/га, что выше по сравнению с урожайностью, полученной при использовании традиционной технологии, на 3 т/га, или на 43%.

Погектарная прибыль при применении технологии *Mini-till* значительно выше величины погектарной прибыли, полученной при применении традиционной технологии, на 55,7 млн руб., или на 77%.

Рентабельность реализованной продукции при применении минимальной технологии получена на уровне 244%, что выше показателя традиционной технологии на 17 п.п.

Выводы

1. В К(Ф)Х на прямом весеннем посеве кукурузы на зерно успешно применяется пропашная сеялка «Optima

TFmaxi». Это дает возможность в комплексе с ежегодным внесением органического удобрения в дозе 5 т/га на всей площади пашни добиваться урожайности на уровне 100 ц/га.

2. Использование органики не позволяет полностью отказаться от обработки почвы в связи с необходимостью её заделки. При этом по сравнению с традиционной технологией снижение затрат труда на почвообработку составило 46%, расхода топлива – 18%, удельных эксплуатационных затрат – 17%.

3. В целом по технологии с минимальной обработкой почвы *Mini-till* обеспечивается практически трехкратное снижение затрат труда на единицу произведенной продукции по сравнению с традиционной технологией, а уровень рентабельности продаж кукурузы на зерно получен на уровне 244%.

4. Обоснованные выводы позволяют рекомендовать применение минимальной технологии *Mini-till* для экономически устойчивых сельскохозяйственных предприятий всех форм собственности Южного федерального округа.

Библиографический список

1. Кириллов Н.А., Волков А.И. Энергосберегающие технологии возделывания кукурузы на зерно // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 3 (18). С. 125-130.
 2. Назаров А.Н., Юзенко Ю.А. Техническое обеспечение и эксплуатационно-технологические показатели прямого посева кукурузы на зерно // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы XIII Международной научно-практической интернет-конференции (8-10 июня 2021 г.). М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2021. С. 125-131.
 3. Беленков А.И., Сабо У., Кунафин Р.И. Теория и практика основной обработки почвы в современных системах

References

1. Kirillov N.A., Volkov A.I. Energosberegayushchie tekhnologii vozdelvaniya kukuruzy na zerno [Energy-saving technology of grain corn cultivation]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*, 2016; 3 (18): 125-130. (In Rus.)
 2. Nazarov A.N., Yuzenko Yu.A. Tekhnicheskoe obespechenie i ekspluatatsionno-tekhnologicheskie pokazateli pryamogo poseva kukuruzy na zerno [Technical support and operational and technological indicators of direct grain corn sowing]. *Nauchno-informatsionnoe obespechenie innovatsionnogo razvitiya APK: Materialy XIII Mezhdunar. nauch.-prakt. internet-konf., June 08-10, 2021*. Moscow, FGBNU "Rosinformagrotekh", 2021: 125-131. (In Rus.)
 3. Belenkov A.I., Sabo U., Kunafin R.I. Teoriya i praktika osnovnoy obrabotki pochvy v sovremennykh sistemakh zemledeliya [Theory

земледелия // Владимирский земледелец. 2017. № 1 (79). С. 8-11.

4. Система земледелия Краснодарского края на агроландшафтной основе / А.Н. Коробка, С.Ю. Орленко, Е.В. Алексеев и др. Краснодар: ООО «Просвещение-Юг», 2015. 352 с.

5. Федоренко В.Ф. Машинно-технологическое обеспечение возделывания кукурузы: Аналитический обзор / В.Ф. Федоренко, Н.П. Мишуров, В.Я. Гольяпин, Д.А. Петухов. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. 96 с.

6. Несмеян А.Ю., Галаян А.Г. Влияние системы обработки почвы на эффективность технологий возделывания кукурузы // Вестник аграрной науки Дона. 2015. № 3 (31). С. 5-12.

7. Кильдюшкин В.М., Солдатенко А.Г., Животовская Е.Г., Бычков О.Б. Влияние систем удобрений на урожайность озимой пшеницы и кукурузы на зерно в зернопропашном севообороте // Применение удобрений в современном земледелии: Сборник материалов Международной научно-практической конференции (6 июля 2018 г.). Минск: УП «ИВЦ Минфина», 2018. С. 9-12.

8. Мнатсаканян А.А. Изменение почвенного плодородия и урожайности кукурузы в зависимости от систем основной обработки // Таврический вестник аграрной науки. 2021. № 2 (26). С. 155-166. <https://doi.org/10.33952/2542-0720-2021-2-26-155-164>

9. Найденов А.С., Бардак Н.И., Терехова С.С., Кравцова Н.Н. Минимализация обработки почвы и ее влияние на агрофизические показатели чернозема выщелоченного и урожайность полевых культур // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2018. № 140. С. 112-122. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-140-026>

10. Кириллов Н.А., Волков А.И. Энергосберегающие технологии возделывания кукурузы на зерно // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 3 (18). С. 125-130.

11. Кравченко Р.В. Эффективность минимализации основной обработки почвы на различных гербицидных фонах при возделывании кукурузы // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 82. С. 657-671.

12. Свиридова С.А., Попелова И.Г. Современное программное обеспечение для экономической оценки сельскохозяйственной техники // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса: Сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции в рамках XXII Агропромышленного форума юга России и выставки «Интерагромаш» / Донской государственный технический университет, Аграрный научный центр «Донской». Р-н/Д, 2019. С. 869-871.

13. Гольяпин В.Я. Инновационные технологии прямого посева зерновых культур: Научный аналитический обзор. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. 80 с.

Критерии авторства

Федоренко В.Ф., Петухов Д.А., Свиридова С.А., Юзенко Ю.А., Назаров А.Н. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели обобщение и подготовили рукопись. Федоренко В.Ф., Петухов Д.А., Свиридова С.А., Юзенко Ю.А., Назаров А.Н. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 27.02.2022

Одобрена после рецензирования 11.04.2022

Принята к публикации 14.04.2022

and practice of main tillage in modern farming systems]. *Vladimirskiy fermer*, 2017; 1(79): 8-11. (In Rus.)

4. Korobka A.N., Orlenko S.Yu. Alekseenko E.V. et al. Sistema zemledeliya Krasnodarskogo kraya na agrolandschaftnoy osnove [Farming system of the Krasnodar Krai on the agrolandscape basis]. Krasnodar, Prosveshchenie-Yug, 2015. 352 p. (In Rus.)

5. Fedorenko V.F., Mishurov N.P., Golyapin V.Ya., Petukhov D.A., Davydova S.A., Kovalenko L.Yu. Mashinno-tekhnologicheskoe obespechenie vozdelvaniya kukuruzy: analit. obzor. [Machine-and-technology support of corn cultivation: analytical review]. Moscow, FG-BNU "Rosinformagrotekh", 2020. 96 p. (In Rus.)

6. Nesmeyan A.Yu., Galoyan A.G. Vliyanie sistemy obrabotki pochvy na effektivnost' tekhnologiy vozdelvaniya kukuruzy [Effect of the tillage system on the efficiency of corn cultivation technologies]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*. 2015; 3 (31): 5-12. (In Rus.)

7. Kildyushkin V.M., Soldatenko A.G., Zhivotovskaya E.G., Bychkov O.B. Vliyanie sistem udobreniy na urozhaynost' ozimoy pshenitsy i kukuruzy na zernopropashnom sevooborote [Effect of fertilizer systems on the yield of winter wheat and grain corn in the grain crop rotation]. *Primenenie udobreniy v sovremennom zemledelii: Sb. mater. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. July 6, 2018*. Minsk, IVTS Minfina, 2018: 9-12. (In Rus.)

8. Mnatsakanyan A.A. Izmenenie pochvennogo plodorodiya i urozhaynosti kukuruzy v zavisimosti ot sistem osnovnoy obrabotki [Changes in soil fertility and corn productivity depending on the main tillage systems]. *Tavrisheskiy vestnik agrarnoy nauki*, 2021; 2 (26): 155-166. <https://doi.org/10.33952/2542-0720-2021-2-26-155-164> (In Rus.)

9. Naydenov A.S., Bardak N.I., Terekhova S.S., Kravtsova N.N. Minimalizatsiya obrabotki pochvy i ee vliyanie na agrofizicheskie pokazateli chernozema vyschelochennogo i urozhaynost' polevykh kul'tur [Minimization of tillage and its impact on the agrophysical indicators of leached chernozem and the yield of field crops]. *Politematicheskiy setevoy elektronniy nauchniy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2018; 140: 112-122. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-140-026> (In Rus.)

10. Kirillov N.A., Volkov A.I. Energoberegayushchie tekhnologii vozdelvaniya kukuruzy na zerno [Energy-saving technologies of grain corn cultivation]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*, 2016; 3 (18): 125-130. (In Rus.)

11. Kravchenko R.V. Effektivnost' minimalizatsii osnovnoy obrabotki pochvy na razlichnykh gerbitsidnykh fonakh pri vozdelvaniy kukuruzy [Effectiveness of minimizing the main tillage on various herbicidal backgrounds in corn cultivation]. *Politematicheskiy setevoy elektronniy nauchniy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2012; 82: 657-671. (In Rus.)

12. Sviridova S.A., Popelova I.G. Sovremennoe programmnnoe obespechenie dlya ekonomicheskoy otsenki sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Modern software for the economic evaluation of agricultural machinery]. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya agropromyshlennogo kompleksa: Sb. nauch. trudov XII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. v ramkakh XXII Agropromyshlennogo foruma yuga Rossii i vystavki "Interagromash". Donskoy gos. tekhn. univ., Agrarniy nauchniy tsentr "Donskoy"*. Rostov-on-Don, 2019: 869-871. (In Rus.)

13. Golyapin V.Ya. Innovatsionnye tekhnologii pryamogo posava zernovykh kul'tur: nauch. analit. obzor [Innovative technologies of direct sowing of grain crops: scientific. analytical review]. Moscow, FGBNU "Rosinformagrotekh", 2019. 80 p. (In Rus.)

Contribution

V.F. Fedorenko, D.A. Petukhov, S.A. Sviridova, Yu.A. Yuzenko, A.N. Nazarov performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. V.F. Fedorenko, D.A. Petukhov, S.A. Sviridova, Yu.A. Yuzenko, A.N. Nazarov 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 27.02.2022

Approved after reviewing 11.04.2022

Accepted for publication 14.04.2022

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.348.4:632.08:632.982.1:632.982.2

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-12-18

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ:
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ****ДОРОХОВ АЛЕКСЕЙ СЕМЕНОВИЧ**, член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессорdorokhov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>; Researcher ID: H-4089-2018**СТАРОСТИН ИВАН АЛЕКСАНДРОВИЧ**, канд. техн. наук**ЕЩИН АЛЕКСАНДР ВАДИМОВИЧ** ✉, канд. техн. наук, доцент

vim@vim.ru ✉

КУРБАНОВ РАШИД КУРБАНОВИЧ, канд. техн. наук

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

Аннотация. Без применения средств защиты растений, способствующих получению высоких урожаев, невозможно ведение интенсивного сельскохозяйственного производства. Сельхозтоваропроизводителями наиболее востребован химический метод защиты растений как более эффективный и производительный, для реализации которого широко используют опрыскиватели. Анализ современных опрыскивателей показал, что в их конструкции преобладают тенденции увеличения производительности, ширины захвата и вместимости рабочих баков, улучшения качественных показателей работы, совершенствования основных узлов и оборудования, использования различных средств автоматизации с целью уменьшения экологической нагрузки на окружающую среду. В более далекой перспективе прослеживаются тенденции по развитию автономных роботизированных машин и беспилотных летательных аппаратов, объединенных в единую интеллектуальную систему точного земледелия. Отмечено, что в наибольшей степени на показатели качества химической обработки растений влияют следующие рабочие параметры опрыскивателя: скорость движения агрегата; высота установки штанги и ее стабильность в процессе работы; давление в системе подачи рабочей жидкости и параметры работы форсунки (диаметр формируемых капель, степень износа и засоренности). Существенное влияние оказывают также параметры окружающей среды: относительная влажность и температура воздуха, скорость ветра и наличие осадков. Для обеспечения высокого качества, эффективности и экологической безопасности технологического процесса химической защиты растений необходимы: совершенствование технических средств защиты растений в направлении оптимизации основных рабочих параметров; внедрение передовых технических решений, направленных на увеличение показателей эффективности технологического процесса; внедрение систем автоматизации и роботизации технических средств защиты растений; развитие автономных роботизированных машин и беспилотных летательных аппаратов, объединенных в единую интеллектуальную систему точного земледелия.

Ключевые слова: химическая защита растений, опрыскиватель, техническое средство для защиты растений, перспективы развития опрыскивателей, точное земледелие, беспилотный летательный аппарат.

Формат цитирования: Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В., Курбанов Р.К. Технические средства для химической защиты растений: состояние и перспективы развития // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 3. С. 12-18. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-12-18>.

© Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В., Курбанов Р.К., 2022



ORIGINAL PAPER

**TECHNICAL MEANS FOR CHEMICAL PROTECTION OF PLANTS:
CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS****ALEKSEI S. DOROKHOV**, RAS Corresponding Member, DSc (Eng), Professordorokhov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>; Researcher ID: H-4089-2018**IVAN A. STAROSTIN**, PhD (Eng)**ALEKSANDR V. ESHCHIN** ✉, PhD (Eng), Associate Professor

vim@vim.ru

RASHID K. KURBANOV, PhD (Eng)Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Bld 5, 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract. Intensive agricultural production is impossible without the use of plant protection products that contribute to high yields. Agricultural producers highly evaluate the chemical method of plant protection based on the wide use of sprayers as a more efficient and productive one. The analysis of modern sprayers has shown that their design is subject to the dominating trend of increasing productivity, a working width and a tank capacity, improving the quality of work, improving the main components and equipment, using various

automation tools to reduce the environmental impact. There are also some long-term trends in the development of autonomous robotic machines and unmanned aerial vehicles, combined into a single intelligent precision farming system. It is noted that the following operating parameters of the sprayer greatly influence the quality indicators of the chemical treatment of plants: the unit speed; the rod installation height and its stability during operation; pressure in the working fluid supply system and nozzle operation parameters (the diameter of droplets formed, the degree of wear and clogging). Environmental parameters also have a significant impact: relative humidity and air temperature, wind speed and the amount of precipitation. To ensure high quality, efficiency, and environmental safety of chemical plant protection, it is necessary to improve the technical means of plant protection through optimizing the main operating parameters, introducing advanced technical solutions aimed at increasing the technological process efficiency; introducing automation and robotization systems of technical means used for plant protection; designing autonomous robotic machines and unmanned aerial vehicles, combined into a single intelligent system of precision farming.

Key words: chemical plant protection, sprayer, technical means for plant protection, development prospects of sprayers, precision farming, unmanned aerial vehicle.

For citation: Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eshchin A.V., Kurbanov R.K. Technical means for chemical protection of plants: current state and development prospects. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(3): 12-18. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-12-18>.

Введение. Защита растений – это система мероприятий по предотвращению и устранению ущерба, причиняемого растениям вредными организмами, основанная на их подавлении.

Современное интенсивное сельскохозяйственное производство невозможно без применения средств защиты растений, которые обеспечивают стабильное развитие сельскохозяйственных культур и способствуют получению высоких урожаев.

Применение современных технических средств для химической защиты растений позволяет обеспечить качественную обработку сельскохозяйственных культур от вредителей и болезней и при этом снизить нормы расхода химических средств, минимизировать их потери в процессе эксплуатации и, соответственно, снизить нагрузку на окружающую среду.

Цель исследований: оценить состояние и выявить тенденции развития технических средств для химической защиты растений, дать рекомендации по направлениям их дальнейшего совершенствования в нашей стране.

Материалы и методы. Работа основывается на анализе данных о современных технических средствах для химической защиты растений, приведенных в научных статьях, аналитических обзорах, данных Росстата,

на официальных сайтах производителей соответствующей техники. Исходная информация при проведении исследований обработана экспертно-аналитическим методом.

Результаты и их обсуждение. Качественная организация защиты растений подразумевает в первую очередь выполнение комплекса мероприятий по обеспечению сохранности посевов от вредителей и болезней и борьбе с сорняками в течение всего вегетационного периода при правильном и своевременном применении средств защиты растений, наносящих минимальный вред здоровью человека и окружающей среде [1].

Среди сельхозтоваропроизводителей наиболее востребован химический метод защиты растений как наиболее эффективный. При его реализации используется комплекс различных механизмов и машин (опрыскивателей, опылителей, аэрозольных генераторов, протравливателей семян и др.), установленных на автомашинах, тракторах, самоходных шасси или летательных аппаратах [2].




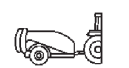

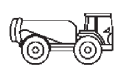
Наиболее широко для защиты растений используют опрыскиватели, которые имеют отличительные особенности, обусловленные спецификой их конструкции и способом эксплуатации (табл. 1).

Таблица 1

Сводные характеристики сельскохозяйственных опрыскивателей

Table 1

Summary characteristics of agricultural sprayers

Параметр <i>Parameter</i>	Навесные опрыскиватели <i>Mounted sprayers</i>		Прицепные опрыскиватели <i>Trailed sprayers</i>		Самоходные опрыскиватели <i>Self-propelled sprayers</i>	
	Штанговые <i>Rod sprayers</i>	Вентиляторные <i>Fan sprayers</i>	Штанговые <i>Rod sprayers</i>	Вентиляторные <i>Fan sprayers</i>	Штанговые <i>Rod sprayers</i>	Вентиляторные <i>Fan sprayers</i>
						
Площадь сельскохозяйственных угодий, на которой рационально применение данного вида опрыскивателя, га <i>Crop area recommended for the rational use of the sprayer type, ha</i>	< 1000		1000...10000		>10000	
Объем бака, л / <i>Tank volume, l</i>	500...1500	200...3150	1700...11200	500...4000	2000...9000	2000...4000
Ширина захвата, м / <i>Capture width, m</i>	6...30	-	12...45	-	24...45	-
Собственная масса, кг / <i>Unit weight, kg</i>	600...1800	290...2100	2000...8300	700...2500	6800...16400	3500...5500

Навесные опрыскиватели рационально применять на площадях сельскохозяйственных угодий до 1000 га ввиду их невысокой производительности, обусловленной необходимостью частых заправок бака рабочей жидкостью и, как правило, небольшой шириной захвата штанги (для штанговых опрыскивателей). Навесные опрыскиватели отличаются простотой конструкции и невысокой стоимостью.

Прицепные опрыскиватели наиболее востребованы сельхозтоваропроизводителями, поскольку совмещают в себе относительную доступность по цене и достаточно высокую производительность. Такие агрегаты рационально использовать на площадях от 1000 га, и тогда срок окупаемости техники будет незначительным. Применяемые в прицепных опрыскивателях передовые технические решения позволяют повысить производительность, качество выполнения технологического процесса и способствуют повышению экологической безопасности.

При обработке площади более 10 тыс. га рекомендуется использовать самоходные опрыскиватели, имеющие высокую производительность и обладающие высоким клиренсом (до 1,75 м), что позволяет обрабатывать практически все сельскохозяйственные культуры на любой стадии вегетации, не травмируя их.

В конструкции современных опрыскивателей для повышения производительности агрегата наблюдаются тенденции увеличения ширины захвата и вместимости рабочих баков, для улучшения качественных показателей работы совершенствуются основные узлы и оборудование, с целью уменьшения потерь пестицидов и экологической нагрузки на окружающую среду используются различные средства автоматизации. Наиболее пристальное внимание обращается на совершенствование конструкций распылителей, механизмов стабилизации высоты установки штанг, процессы наполнения, опорожнения и промывки опрыскивателей, а также на оснащение их современными средствами электроники^{1,2} [3].

Практически все производимые штанговые опрыскиватели оборудуются маятниковой подвеской штанги, позволяющей снизить ее вертикальные колебания. В новейших конструкциях подвески, помимо пружинных элементов и демпферов, устанавливается электронная система контроля, включающая в себя гироскоп и набор управляемых электрическими гидрораспределителями гидроцилиндров, обеспечивающих дополнительную гидравлическую амортизацию и компенсацию колебаний.

В опрыскивателях фирмы Amazone за счет применения интегрированной системы демпфирования сводятся к минимуму горизонтальные колебания наружных зон штанги. Достигается это за счет совместной работы датчиков, измеряющих ускорение в секциях штанги и системы гидравлических цилиндров².

Маятниковая подвеска штанги может оснащаться системами автоматического ведения, обеспечивающими автоматический контроль высоты положения крыльев штанги относительно обрабатываемой поверхности. Системы оснащаются двумя, четырьмя или шестью ультразвуковыми датчиками, связанными с быстродействующей

гидравлической системой, обеспечивающей оптимальное автоматическое ведение штанги по вертикали и автоматическое одностороннее или двустороннее отклонение секций штанги вверх или вниз в зависимости от рельефа поля.

Некоторые модели опрыскивателей оборудованы системой с замкнутой циркуляцией рабочей жидкости в трубопроводах, питающих форсунки. Система позволяет осуществлять постоянное заполнение форсунок по всей ширине захвата штанги в периоды начала работы агрегата и при прохождении разворотной полосы, предотвращать образование отложений и засорений трубок опрыскивателя и облегчает промывку системы чистой водой.

Оснащение каждой форсунки электромагнитным клапаном позволяет отключать подачу рабочей жидкости при перекрытии зон обработки. При этом перекрываемый участок уменьшается с размера секции штанги, имеющей ширину от 3 до 5 м, до расстояния между форсунками в 0,5 м.

Фирмой Amazone реализована система, в которой каждая форсунка оснащена специализированными высокоточными электромагнитными клапанами, работающими по принципу широтно-импульсной частотной модуляции в интервале до 50 Гц. В процессе работы система позволяет регулировать соотношение закрытой и открытой форсунок (длительность импульсов) и промежутки между включениями (частоту импульсов). В результате имеется возможность бесступенчатого варьирования нормы внесения от 30 до 100% на каждой отдельной форсунке или отключения форсунки полностью. Давление и размер капель при таком регулировании остаются постоянными, что дает экономию препарата и увеличивает точность внесения без потери качества².

Особые требования предъявляются к распылителям, используемым в конструкции штанговых опрыскивателей. Они должны обеспечивать качественное опрыскивание всей поверхности растений с минимальными потерями. Для быстрой перестановки форсунок на другой типоразмер штанговые рабочие органы комплектуются револьверными головками с набором из трех или четырех форсунок, которые могут оснащаться приводом для автоматического переключения форсунок на нужный типоразмер.

Современные опрыскиватели оборудуются бортовыми компьютерами, способными полностью обеспечивать автоматическую поддержку предварительно установленной нормы расхода жидкости независимо от рабочей скорости агрегата. Они дают возможность оператору или в автоматическом режиме контролировать все основные параметры опрыскивания и в случае необходимости отключать подачу рабочей жидкости к штанге, или отключать отдельные секции штанги. Блок компьютера устанавливается в кабине и оборудован дисплеем, на котором отображаются основные показатели работы агрегата: норма внесения рабочей жидкости, скорость движения агрегата, обработанная площадь, время работы, пройденный путь, уровень жидкости, расход рабочей жидкости, рабочее давление в системе и др.

Компьютер, дополнительно оборудованный GPS навигатором и соответствующим программным обеспечением, позволяет контролировать обработанные и необработанные участки поля и автоматически отключать секции штанги или отдельные форсунки при перекрытии уже обработанных участков, что предотвращает повторную обработку.

В целях быстрой перенастройки агрегата для обработки сельскохозяйственных культур с различной шириной

¹ Официальный сайт фирмы Máquinas Agrícolas Jacto S.A. [Электронный ресурс]. URL: <https://jacto.com> (дата обращения: 07.10.2021).

² Официальный сайт ООО «Казаньсельмаш». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kazansm.ru> (дата обращения: 14.10.2021).

междурядий и высотой стеблестоя основная масса самоходных и некоторые прицепные опрыскиватели имеют возможность бесступенчатого централизованного изменения ширины колеи и клиренса прямо в процессе работы агрегата, что увеличивает его производительность.

Современные опрыскиватели комплектуются отдельными промывочными баками со встроенной системой промывки, миксером для приготовления рабочего раствора, бачком для мытья рук. Модели опрыскивателей ведущих мировых производителей отличаются высокой степенью технического дизайна, рациональной внешней компоновкой сборочных узлов, качеством изготовления и сборки. Применение коррозионностойких материалов и покрытий позволяет обеспечить долгий срок службы опрыскивателей [3].

На развитие технических средств и технологий защиты растений существенное влияние оказывает технологическая политика, формирующаяся в процессе тесного взаимодействия специалистов, ученых и законодателей.

Ужесточение законодательства стимулирует производителей технических средств для защиты растений к разработке и внедрению новых технических решений и средств автоматизации, обеспечивающих качественное внесение средств защиты растений с соблюдением условий их эффективного и безопасного применения. Так, самоходный опрыскиватель Uniport 3030 Eletro Vortex бразильской фирмы Máquinas Agrícolas Jacto оснащен технологией Eletro Vortex, использующей

электростатический заряд капель в сочетании с подачей на форсунку вертикального потока воздуха. Заряженные отрицательным зарядом капли аэрозоля притягиваются растениями, имеющими нейтральный заряд. При этом улучшается качество осаждения и, следовательно, распыления¹.

Установленные на опрыскивателе вентиляторы нагнетают в воздушный рукав, проходящий вдоль штанг, воздух со скоростью 110 км/ч. Отдельные воздухопроводы концентрируют весь воздух только на форсунках. Это способствует лучшему проникновению капель аэрозоля в посе- вы, уменьшает снос и позволяет опрыскивателю работать при скорости ветра до 10 м/с.

Компанией Amazone разработан прицепной опрыскиватель UX AmaSpot с интеллектуальной системой сенсорных форсунок AmaSpot. В опрыскивателе для определения наличия сорняков на поле применяются флуоресцентные датчики GreenSense, которые распознают флуоресцентный пигмент хлорофилла². Если датчик GreenSense определил наличие зеленого растения, мгновенно включаются специализированные высокоточные форсунки, и процесс внесения средств гербицидов выполняется с точностью до 1 см, на высоких рабочих скоростях, вплоть до 20 км/ч, в любое время суток.

Взаимосвязь технических решений, применяемых в современных опрыскивателях, рабочих параметров опрыскивателей, параметров окружающей среды и показателей качества технологического процесса представлена на рисунке 1.

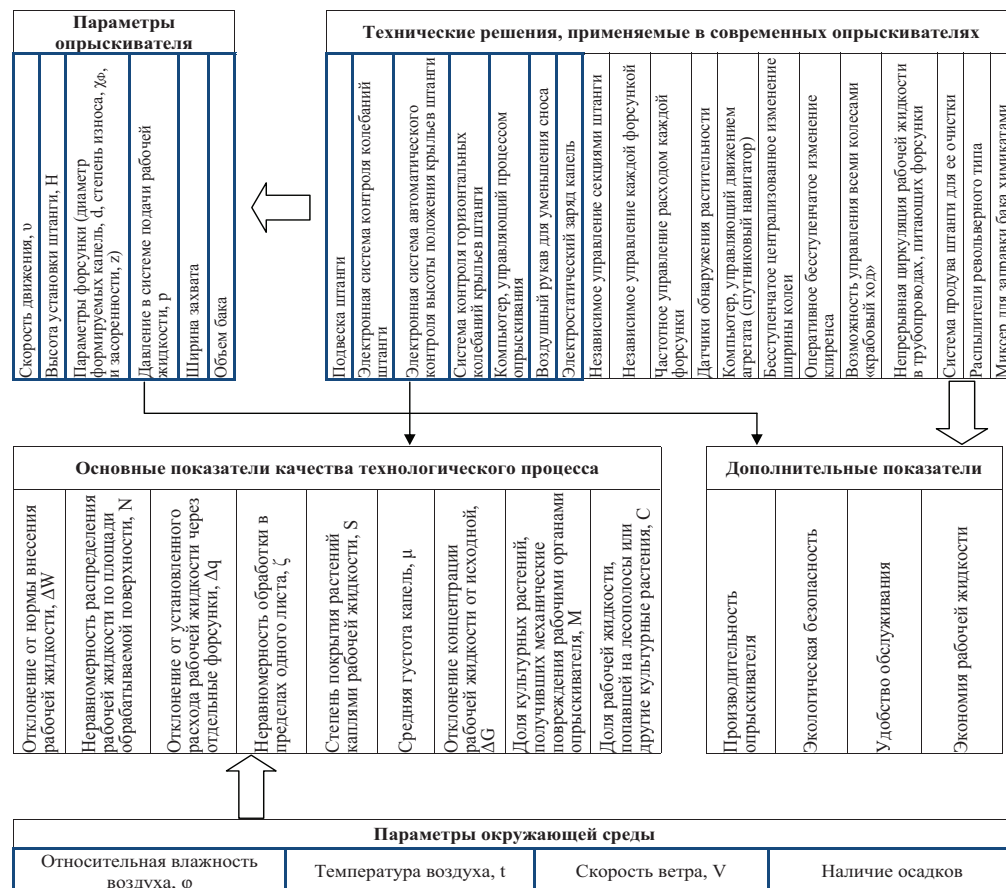


Рис. 1. Параметры и технические решения, влияющие на показатели качества технологического процесса химической обработки растений:
 — параметры и технические решения, в наибольшей степени влияющие на показатели качества технологического процесса

Fig. 1. Parameters and technical solutions affecting the quality indicators of the chemical treatment of plants:
 — parameters and technical solutions that have the greatest impact on the quality indicators of the technological process

Часть технических решений, таких, как подвеска штанги, электронная система контроля колебаний штанги, электронная система автоматического контроля высоты положения крыльев штанги, система контроля горизонтальных колебаний крыльев штанги, оказывает непосредственное влияние на важнейший параметр работы опрыскивателя, – стабильность положения штанги на заданной высоте.

Качество технологического процесса химической защиты растений можно представить в виде сводного показателя качества K :

$$K = f(\Delta W, N, \Delta q, \zeta, S, \mu, \Delta G, M, C),$$

где ΔW – отклонение от нормы внесения рабочей жидкости, %; N – неравномерность распределения рабочей жидкости по площади обрабатываемой поверхности, %; Δq – отклонение от установленного расхода рабочей жидкости через отдельные наконечники, %; ζ – неравномерность обработки в пределах одного листа, %; S – степень покрытия растений каплями рабочей жидкости, %; μ – средняя густота капель, шт/м²; ΔG – отклонение концентрации рабочей жидкости от исходной, %; M – доля культурных растений, получивших механические повреждения рабочими органами опрыскивателя, %; C – доля рабочей жидкости, попавшей на лесополосы или другие культурные растения, %.

Зависимость сводного показателя качества технологического процесса от рабочих параметров опрыскивателя (рис. 2а) можно записать как

$$K = f(v, \Delta H, \Delta d, \chi, z, \Delta p),$$

где v – скорость движения опрыскивателя, м/с; ΔH – отклонение высоты установки штанги от оптимальной, м; Δd – отклонение диаметра капель от оптимального, м; χ – степень износа форсунок, %; z – степень засоренности форсунок, %; Δp – отклонение давления в системе подачи рабочей жидкости от оптимального, Па.

Зависимость сводного показателя качества технологического процесса от параметров окружающей среды (рис. 2б) представлена как

$$K = f(\varphi, t, V),$$

где φ – относительная влажность воздуха, %; t – температура воздуха, °С; V – скорость ветра, м/с.

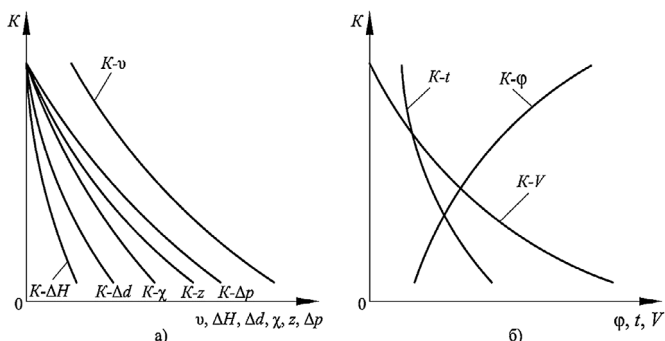


Рис. 2. Зависимость сводного показателя качества технологического процесса от основных параметров работы опрыскивателя (а) и параметров окружающей среды (б)

Fig. 2. Relationship between the summary indicator of the technological process quality and the main parameters of the sprayer (a) and the environment (b)

Таким образом, чтобы обеспечить высокое качество, эффективность и экологическую безопасность технологического процесса химической защиты растений, необходимо совершенствовать технические средства защиты растений в направлении оптимизации основных рабочих параметров и внедрения передовых технических решений, направленных на увеличение показателей эффективности технологического процесса.

Ведущие производители постоянно работают над совершенствованием и разработкой принципиально новых моделей опрыскивателей. John Deere разработал автономный беспилотный роботизированный опрыскиватель, способный самостоятельно или вместе с более крупным «пилотируемым» опрыскивателем производить обработку полей (рис. 3).



Рис. 3. Автономный опрыскиватель JohnDeere
Fig.3. John Deere self-contained sprayer

Прототип оборудован бензиновым двигателем мощностью 37 л.с., 560-литровым баком, 9-метровой штангой для опрыскивания и множеством датчиков и камер³. Он передвигается на четырех резиновых гусеницах, имеет максимальный дорожный просвет в 1,9 м и вес около 2,7 т.

Одним из последних мировых трендов является применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в сельском хозяйстве, которые служат средством сбора изображений, полученных при дистанционном зондировании, образцов тканей и воды. Набирает популярность внесение с помощью БПЛА химических средств защиты растений [4, 5]. По состоянию на начало 2019 г. в США было около 1,3 млн зарегистрированных беспилотных летательных аппаратов и более 116 тыс. зарегистрированных операторов БПЛА в коммерческом секторе.

В настоящее время в сельском хозяйстве Японии используется почти 3 тыс. беспилотных вертолетов и выдано около 10 тыс. лицензий на управление БПЛА. Около 40% всех рисовых полей обрабатывается с помощью беспилотной авиации. Беспилотное опрыскивание также считается наиболее эффективным и безопасным способом обработки сельскохозяйственных культур, выращиваемых на крутых склонах и в труднодоступных для крупногабаритной техники местах [6].

Первый большой БПЛА, адаптированный для сельскохозяйственного использования, разработан компанией John

³ Steven Vale. John Deere shows autonomous sprayers. [Электронный ресурс]. Profi. The farm machinery magazine: 30 Nov 2019 / KELSEY Media Lt. URL: <https://www.profi.co.uk/news/john-deere-shows-autonomous-sprayers> (дата обращения: 04.09.2021).

Deere в сотрудничестве с немецкой фирмой Volocopter. Он имеет 18 роторов со встроенными электродвигателями, диаметр аппарата составляет 9,2 м. Один заряд батареи позволяет БПЛА находиться в воздухе до 30 мин и нести максимальную полезную нагрузку в 250 кг. Аппарат оборудован двумя 60-литровыми резервуарами для жидкости, насосом и 10-метровой штангой, позволяющей обрабатывать до 6 га в течение одного часа³.

Компанией John Deere представлена автоматическая роботизированная, полностью автономная система распыления. Она представляет собой специальный бокс, в котором размещаются несколько БПЛА весом по 25 кг, 1000-литровый резервуар для воды, три 60-литровых химических резервуара, система автоматической зарядки и замены аккумуляторов, компьютер (рис. 4). При размещении на поле системой автоматически выпускается беспилотник-разведчик, который производит сканирование поля на наличие сорняков. После его возвращения в бокс информация передается другим БПЛА, которые, как и первый, могут разведывать, обнаруживать и уничтожать отдельные сорняки³.



Рис. 4. Автономная система распыления компании John Deere

Fig. 4. John Deere self-contained spray system

Время полета с полностью заряженным аккумулятором составляет 30 мин. Когда аппарат нуждается в зарядке или 10,6-литровый бак нуждается в пополнении, БПЛА автоматически возвращается к боксу и приземляется на посадочную площадку. Посадочная площадка втягивается в бокс, где автоматически происходят замена батареи, наполнение бака и обмен информацией с другими аппаратами об обнаруженных и уничтоженных сорняках.

Разработанный в ФНАЦ ВИМ комплекс для мониторинга и обработки сельхозугодий (рис. 5) позволяет формировать цифровые карты, оценивать состояние сельхозкультур, выполнять контроль технологических операций, вносить средства защиты растений, что в итоге позволит сократить потери и прогнозировать урожайность [7].

Библиографический список

1. Каменева И.С., Каменева И.С. Анализ способов защиты растений в РФ // Новости науки в АПК. 2019. № 3 (12). С. 363-368. <https://doi.org/10.25930/2218-855X/092.3.12.2019>
2. Юрий М. Защита растений. Подходы и методы. [Электронный ресурс] // Защита растений: онлайн газета. № 03/2017. URL: <https://www.agroxxi.ru/>

Автоматизация и роботизация технических средств защиты растений позволяет обеспечивать максимально эффективное применение пестицидов и снижение вреда для окружающей среды. Системы автоматизации и роботизации позволяют реализовать:

- контроль и автоматическую корректировку основных параметров работы агрегата с учетом текущих погодных условий, вида сельскохозяйственной культуры, фазы ее развития и других важных технологических параметров;
- минимальное участие оператора и устранение ошибок, возникающих в результате влияния человеческого фактора;
- совместную работу разных видов машин для химической защиты растений в единой интеллектуальной системе точного земледелия.



Рис. 5. Комплексное решение для мониторинга и обработки сельхозугодий

Fig. 5. Comprehensive solution for farmland monitoring and cultivation

Выводы

1. Совершенствование средств для химической защиты растений направлено не только на модернизацию конструкции машины и ее отдельных систем и механизмов, но и на автоматизацию и цифровизацию агрегата для обеспечения максимально эффективного применения пестицидов и снижения их потерь. Прослеживаются тенденции развития автономных роботизированных машин и беспилотных летательных аппаратов, объединенных в единую интеллектуальную систему точного земледелия.

2. При производстве технических средств защиты растений необходимо внедрять новые наукоемкие технические решения, направленные на оптимизацию основных рабочих параметров агрегатов, оказывающих непосредственное влияние на качество и эффективность технологического процесса химической защиты растений.

3. Проектирование и производство технических средств защиты растений должны производиться с учетом баланса между уровнем сложности механизмов и систем, эффективностью работы агрегата и экономической целесообразностью.

References

1. Kameneva I.S., Kameneva I.S. Analiz sposobov zashchity rasteniy v RF [Analysis of plant protection methods used in Russia]. *Novosti nauki v APK*, 2019; 3 (12): 363-368. <https://doi.org/10.25930/2218-855X/092.3.12.2019> (In Rus.)
2. Yuri M. Zashchita rasteniy. Podkhody i metody [Plant protection. Approaches and methods] [Electronic resource]. *Zashchita rasteniy* (Online issue): No. 03/2017 URL: <https://www.agroxxi.ru/>

gazeta-zaschita-rastenii/zrast/zaschita-rastenii-podhody-i-metody.html (дата обращения: 01.09.2021).

3. Черноиванов В.И., Ежевский А.А., Федореко В.Ф. Мировые тенденции машинно-технологического обеспечения интеллектуального сельского хозяйства: Научное издание. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2012. 283 с.

4. Измайлов А.Ю., Годжаев З.А., Афанасьев Р.А. Перспективы роботизации агрохимических работ // *Плодородие*. 2016. № 5 (92). С. 9-13.

5. Измайлов А.Ю. Интеллектуальные технологии и роботизированные средства в сельскохозяйственном производстве // *Вестник Российской академии наук*. 2019. Т. 89. № 5. С. 536-538. <https://doi.org/10.31857/S0869-5873895536-538>

6. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние / Под ред. В.С. Фетисова. Уфа: ФОТОН, 2014. 217 с.

7. Смирнов И.Г., Курбанов Р.К., Марченко Л.А., Горшков Д.В. Дифференцированная обработка сельхозугодий с помощью БПЛА // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. № 4 (37). С. 30-35.

Критерии авторства

Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В., Курбанов Р.К. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели обобщение и подготовили рукопись. Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В., Курбанов Р.К. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 17.01.2022

Одобрена после рецензирования 31.03.2022

Принята к публикации 05.04.2022

gazeta-zaschita-rastenii/zrast/zaschita-rastenii-podhody-i-metody.html (Access date: 01.09.2021). (In Rus.)

3. Chernoiivanov V.I., Ezhevskiy A.A., Fedoreko V.F. Mirovye tendentsii mashinno-tekhnologicheskogo obespecheniya intellektual'nogo sel'skogo khozyaystva [World trends in machine-technological support of intelligent agriculture]: scientific edition. Moscow, FGBNU "Rosinformagrotekh", 2012. 283 p. (In Rus.)

4. Izmaylov A.Yu., Godzhaev Z.A., Afanasiev R.A. Perspektivy robotizatsii agrokhimicheskikh rabot [Prospects for the robotization of agrochemical works]. *Plodородие*, 2016; 5 (92): 9-13. (In Rus.)

5. Izmaylov A.Yu. Intellektual'nye tekhnologii i robotizirovannyye sredstva v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [Intellectual technologies and robotic means used in agricultural production]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2019; 89(5): 536-538. <https://doi.org/10.31857/S0869-5873895536-538> (In Rus.)

6. Bepilotnaya aviatsiya: terminologiya, klassifikatsiya, sovremennoe sostoyanie [Unmanned aircraft: terminology, classification, current state]. Edited by V.S. Fetisov. Ufa, FOTON, 2014. 217 p. (In Rus.)

7. Smirnov I.G., Kurbanov R.K., Marchenko L.A., Gorshkov D.M. Differentsirovannaya obrabotka sel'khozugodiy s pomoshch'yu BPLA [Differentiated treatment of farmland with UAVs]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*, 2019; 4(37): 30-35. (In Rus.)

Contribution

A.S. Dorokhov, I.A. Starostin, A.V. Eshchin, R.K. Kurbanov performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. A.S. Dorokhov, I.A. Starostin, A.V. Eshchin, R.K. Kurbanov 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 17.01.2022

Approved after reviewing 31.03.2022

Accepted for publication 05.04.2022

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.333:631.878

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-19-26

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ГУМИНОВЫХ УДОБРЕНИЙ НА ОСНОВЕ МОДУЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**СОРОКИН КОНСТАНТИН НИКОЛАЕВИЧ**, канд. техн. наук

7623998@mail.ru

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

Аннотация. Развитие органического сельскохозяйственного производства в России сдерживается по причине отсутствия необходимых органических удобрений, производство которых не обеспечено современными технологическими линиями по переработке торфа, бурого угля, сапропеля и биогумуса. В связи с потребностью в таких технологических линиях разработана математическая модель, описывающая гидромеханические и механические процессы, позволяющая сделать выбор параметров режима работы технологической линии. Впервые предложенная модель может быть использована при формировании суспензии с необходимой дисперсностью в гидромеханическом очистителе и реакторе. Предложена методика по сборке технологических линий по переработке органического сырья на основе модульного оборудования, обеспечивающих производительность и качество гуминовых удобрений в промышленных объемах. Показано, что представленная математическая модель хорошо согласуется с реальным технологическим производством и может быть использована для теоретических и инженерных расчетов. Совершенствование математической модели процесса работы технологической линии по переработке органического сырья с применением теории искусственных нейронных сетей может в дальнейшем использоваться в системе автоматизации технологических операций и мониторинга показателей качества работы модульного оборудования, при переработке органического сырья, что обеспечит новый уровень синтеза сложных технических систем в интересах сельскохозяйственного производства.

Ключевые слова: математическая модель, режимы работы технологической линии, переработка органического сырья, апробация системы уравнений, модульное оборудование.

Формат цитирования: Сорокин К.Н. Математическая модель для разработки технологической линии по производству гуминовых удобрений на основе модульного оборудования // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 3. С. 19-26. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-19-26>.

© Сорокин К.Н., 2022



ORIGINAL PAPER

MATHEMATICAL MODEL OF A TECHNOLOGICAL LINE BASED ON MODULAR EQUIPMENT FOR THE PRODUCTION OF HUMIC FERTILIZERS**KONSTANTIN N. SOROKIN**, PhD (Eng)

7623998@mail.ru

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

Abstract. The development of organic agricultural production in Russia is hampered by the lack of the necessary organic fertilizers as modern technological lines processing peat, brown coal, sapropel, and biohumus are still unavailable. Because of the need for such technological lines, a mathematical model has been developed to describe the hydromechanical and mechanical processes, enabling operators to select the operating mode parameters of the technological line. For the first time, the proposed model can be used to form a suspension with the required fineness in a hydromechanical cleaner and reactor. The authors propose a technique for assembling technological lines based on modular equipment to process organic raw materials that ensures the industrial productivity and quality of humic fertilizers. It is shown that the presented mathematical model fully complies with the real technological production requirements and can be used for theoretical and engineering analysis. The mathematical model of the technological line processing organic raw materials is based on the theory of artificial neural networks. The model can be further improved to be used in the system for automatizing technological operations and monitoring the quality indicators of modular equipment in the processing of organic raw materials. This will provide a new level of synthesizing complex technical systems, which will be beneficial for agricultural production.

Key words: mathematical model, operating modes of the technological line, processing of organic raw materials; proof of the system of equations, modular equipment.

For citation: Sorokin K.N. Mathematical model of a technological line based on modular equipment for the production of humic fertilizers. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(3): 19-26. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-19-26>.

Введение. Развитие органического сельскохозяйственного производства в России в соответствии с Указом Президента от 3 августа 2018 г. № 280 сдерживается ввиду отсутствия необходимых органических удобрений, производство которых не обеспечено современными технологическими линиями по переработке торфа, бурого угля, сапропеля и биогумуса. Ежегодная потребность в технологических линиях на основе модульного оборудования составляет 120...130 шт. Существуют проблемы и у машиностроителей относительно качества и производительности предлагаемого оборудования для производства гуминовых удобрений из органического сырья.

Цель исследования: разработать математическую модель выбора параметров режима работы технологической линии по переработке органического сырья; на основе математической модели предложить методику по сборке технологических линий по переработке органического сырья, обеспечивающих производительность и качество гуминовых удобрений в промышленных объемах.

Материалы и методы. Объектом исследования являются свойства и особенности функционирования промышленных технологических линий в регионах России и за рубежом на основе математической модели; оптимизация параметров функционирования оборудования в составе технологических линий.

Предметом исследования является особенность работы оборудования технологических линий, влияющей на организацию технологических процессов по производству органических удобрений. Рассматриваются математические модели и критерии оптимальности по выбору параметров режима работы технологических линий с учетом использования модульного оборудования при их сборке (модернизации), методы и алгоритмы решения задач.

Методика исследования основана на использовании методов системного анализа, математического моделирования и условной оптимизации оборудования в схеме технологической линии.

Результаты и их обсуждение

Определение математической модели, описывающей технологическую линию по производству комплексных удобрений из органического сырья (торф, бурый уголь, сапропель и биогумус). Математическую модель, описывающую взаимосвязи процессов работы модульного оборудования в составе технологической линии при производстве удобрений, на основании которого можно изучать закономерности его развития и давать прогноз разработки технологических линий на будущее, можно представить следующим образом:

$$S = (V, X, \sigma, F), \quad (1)$$

где $V \in E_m$ – внешние переменные и параметры (формируются на выходе из математической модели), которые зависят от требований заказчика и, как правило, являются требованиями к производимым комплексным удобрениям; $X \in E_n$ – внутренние переменные и параметры (такие, как производительность отдельных модульных агрегатов); $\sigma = (\sigma_1, \dots, \sigma_m)$ – функции связи внешних и внутренних переменных и параметров; $F = (F_1, \dots, F_n)$ – передаточная функция.

Выражение (1) может быть переписано как

$$\sigma(V, X) = 0, \quad (2)$$

$$X = F(V, X^0).$$

Переменные V и X не являются функциями времени, в связи с чем задача (2) является балансовой и нединамической. Графическое представление показано на рисунке 1.

Входными данными математической модели являются характеристики исходного органического сырья (торф, бурый уголь, сапропель, биогумус), используемого для производства комплексных удобрений.

Архитектура технологического процесса по производству комплексных удобрений зависит также от ассортимента выпускаемых комплексных удобрений I (комплексы удобрений для с.-х. культур или поддержания плодородия почв) и уровня автоматизации технологического процесса, Av .

Массив входных и выходных данных математической модели примет следующий вид:

$$V = (Q_{tech}, P, K_{ин}, C_1, \delta_2),$$

$$X = (\delta_1, T_b, I, Av).$$

Математическое описание пооперационной последовательности действий при производстве комплексных удобрений. Технологическая линия работает в периодическом режиме. Технологический процесс обеспечивается работой модулей в таком составе:

1) модуль весового дозирования и сепарирования. Предназначен для осуществления доставки со складского участка необходимого количества органического сырья, предварительно подсушенного до 25...30% влажности, размерностью частиц сырья не более 5...7 мм и механизированной загрузки его на лоток вибросепаратора, входящего в состав гидромеханического модуля;

2) гидромеханический модуль. Производит очистку суспензии органического сырья от песка и других включений с предварительным разрушением твердых частиц в сырье до размерности 200...250 мкм перед подачей в реактор;

3) модуль по переработке суспензии (реактор-дисмембратор-реактор). При помощи дисмембратора и кавитатора производятся диспергация и гомогенизация суспензии до получения необходимых качественных показателей по дисперсности от 0 до 100 мкм, по измельчению остаточных твердых частиц, с добавлением щелочи (или без щелочи) перед подачей ее на модуль тонкой фильтрации органических удобрений;

4) модуль тонкой фильтрации органических удобрений. Предназначен для очистки удобрений, поступающих из реактора, до размерности 100 мкм перед подачей их в следующий модуль.

5) модуль внесения и смешивания минеральных добавок. Предназначен для обеспечения автоматизированного дозирования микроэлементов в органические удобрения после фильтрации при подаче их в накопительную емкость;

6) модуль накопительной емкости и разлива органических удобрений. Предназначен для приема и хранения готовой продукции, расфасовки и отпуска ее покупателям.

На рисунке 2 представлен структурный вид математической модели технологического процесса на технологической линии.

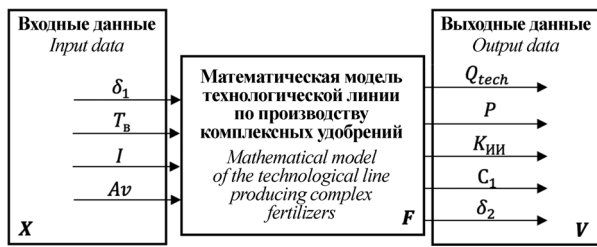


Рис. 1. Общий вид математической модели технологической линии по производству комплексных удобрений различного типа:

- T_b – тип органического сырья;
- δ_1 – дисперсность органического сырья, мкм;
- I – ассортимент выпускаемых комплексных удобрений;
- Av – уровень автоматизации технологического процесса;
- Q_{tech} – производительность технологической линии по производству комплексных удобрений, л/ч;
- P – потребляемая мощность электроэнергии технологической линии, кВт/ч;
- $K_{ин}$ – коэффициент искусственного интеллекта модульного оборудования;
- C_1 – концентрация гуминовых солей, г/л;
- δ_2 – дисперсность готового продукта, мкм

Fig. 1. General view of a mathematical model of the technological line producing complex fertilizers of various types:

- T_b – the type of organic raw materials;
- δ_1 – the dispersion of organic raw materials, microns;
- I – the range of manufactured complex fertilizers;
- Av – the level of technological process automation;
- Q_{tech} – the productivity of the technological line producing complex fertilizers, l/h;
- P – the power consumption of the technological line, kW/h;
- $K_{ин}$ – the artificial intelligence coefficient of modular equipment;
- C_1 – the concentration of humic salts, g/l;
- δ_2 – the dispersion of the finished product, microns

Каждый модуль на выходе имеет переменные, которые являются результирующими в математической модели, а именно: в модуле весового взвешивания – $P_1, K_{ин1}$; в гидромеханическом модуле – $P_2, K_{ин2}$; в модуле по переработке суспензии (реакторе) – $P_3, K_{ин3}$; в модуле тонкой фильтрации органических удобрений – $P_4, K_{ин4}, \delta_2, C_1$; в модуле внесения и смешивания минеральных добавок – $P_5, K_{ин5}$; в модуле накопительной емкости и розлива органических удобрений – $P_6, K_{ин6}$.

Согласно данным рисунка 2 каждое модульное устройство текущего технологического процесса имеет свою производительность q_i . Таким образом, объем выпускаемого комплексного оборудования можно описать как экстремум функции и записать как

$$Q_{tech} = \min_{i \rightarrow m} (q_1, q_2, \dots, q_m),$$

где m – количество модульного оборудования, используемого в технологической линии по производству комплексных удобрений. При этом справедливо по производительности неравенство $q_1 \geq q_2 \geq \dots \geq q_m$ (в отдельных случаях, при добавлении щелочи в модуль по переработке суспензии, производительность модуля может быть выше предыдущего).

Конституция самой технологической линии налагает ограничения на объем выпускаемого комплексного удобрения V_M за цикл работы всего технологического оборудования в связи с наличием ограничений по загрузке отдельных модульных агрегатов технологической линии. Данный объем варьируется в пределах $0 < V_M < V_{Mmax}$, где V_{Mmax} – максимальный объем производимых комплексных удобрений за цикл работы технологической линии. Также по требованиям заказчика может быть предусмотрена линия по выпуску ассортимента I комплексных удобрений за цикл работы технологической линии. Можно представить объем выпускаемого ассортимента комплексных удобрений как

$$V_M = \sum_{j=1}^I V_{Mj}, j = \overline{1, I},$$

где I – ассортимент комплексных удобрений.

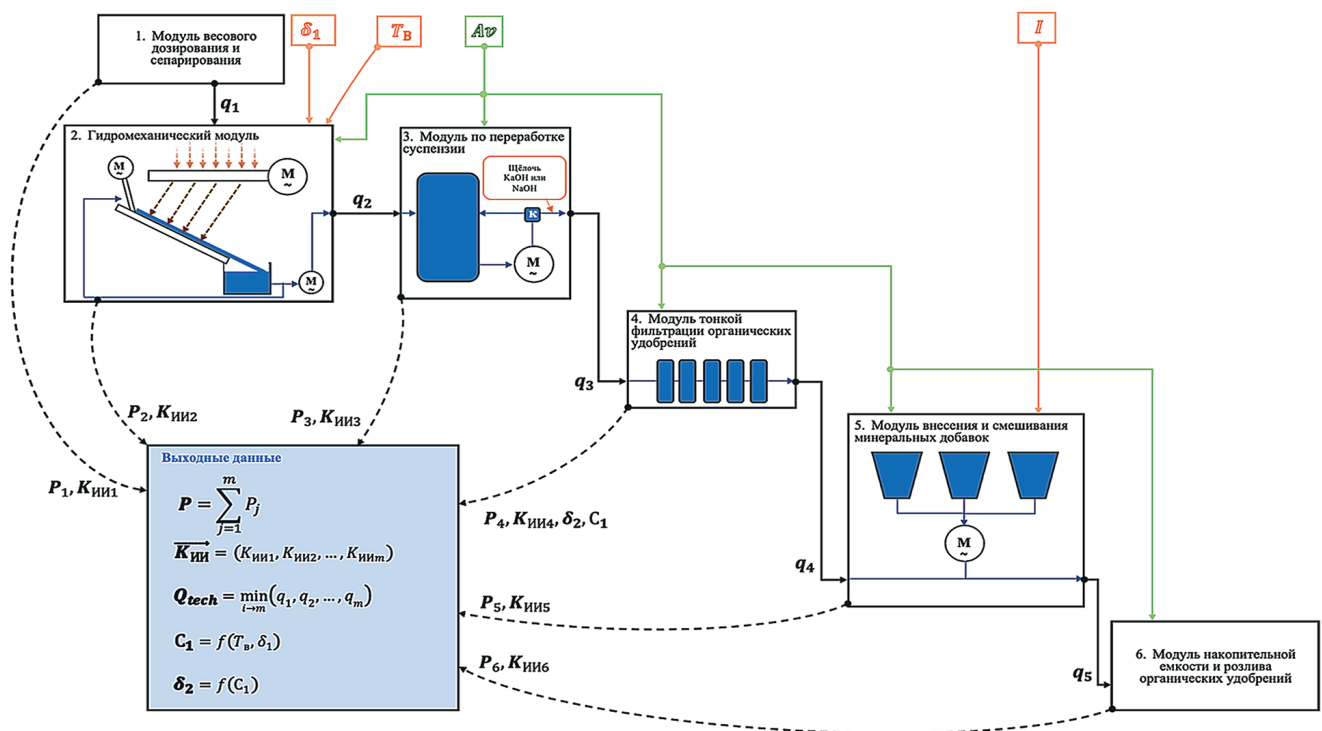


Рис. 2. Структурный вид математической модели технологического процесса на технологической линии
Fig. 2. Structural view of the mathematical model of the production line operation

Ассортимент комплексных удобрений достигается путем дозирования необходимых микроэлементов в соответствии с заказом покупателя. При этом производительность технологической линии не превышает $V_{M \max}$. Соответственно производительность технологической линии также составляет:

$$Q_{tech} = \frac{V_M}{T},$$

где T – время работы технологической линии, представляющее собой вектор-столбец $T = (t_1, t_2, \dots, t_m)$; t – время работы отдельного модуля.

Процесс производства комплекса удобрений, его интенсивность зависят от уровня автоматизации Av всей технологической линии. Допустим, уровень автоматизации характеризуется конечным множеством базисных технологических способов $Av = 1, 2, \dots, m$, каждому из которых соответствует интенсивность его использования y_k на базе модульных установок. Интенсивность работы модульного оборудования рассматриваемого технологического процесса можно представить одномерным вектором $Y = (y_1, y_2, \dots, y_{Av})$, компоненты которого являются неотрицательными и характеризуют интенсивность использования соответствующей модульной установки. Для характеристики системы с технологической стороны следует указать также векторные функции [1]:

$$V_M(Y) = (V_{M1}(Y), \dots, V_{Mi}(Y));$$

$$r(Y) = (r_1(Y), \dots, r_m(Y)),$$

где $V_M(Y)$ – вектор объемов выпускаемых комплексных удобрений при поддержании технологического процесса на уровне интенсивности Y ; $r(Y)$ – вектор затрат ресурсов, необходимых для обеспечения соответствующего уровня автоматизации технологического процесса с интенсивностью Y . Тогда рассматриваемая система полностью характеризуется векторами $Y, V_M(Y), r(Y)$.

Пусть критерий эффективности системы определяется объемом выпускаемых комплексных удобрений и выражается соотношением [2]:

$$(\bar{W}, \bar{V}_M(\bar{Y})) = \sum_{i=1}^l W_i V_{Mi}(\bar{Y}), \quad (3)$$

где \bar{W} – вектор коэффициентов критерия эффективности. Тогда задача управления технологическим процессом заключается в отыскании уровня интенсивностей $Y = (y_1, y_2, \dots, y_{Av})$, доставляющего экстремум функционалу (3):

$$\min_{\bar{Y}} \sum_{i=1}^l W_i V_{Mi}(\bar{Y}). \quad (4)$$

Зависимость уровня автоматизации технологического процесса Av от коэффициента искусственного интеллекта модульного оборудования $K_{ин}$ представляет собой функцию $Av = f(K_{ин})$. Зависимость дисперсности готового продукта δ_2 от концентрации гуминовых солей C_1 представляет собой функцию $\delta_2 = f(C_1)$. Концентрация гуминовых солей в комплексных удобрениях зависит от характеристик исходного сырья, используемого для приготовления удобрений – таких, как тип органического сырья T_b и дисперсность органического сырья δ_1 ,

и представляет собой зависимость $C_1 = f(T_b, \delta_1)$. Итоговая система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} P = \sum_{j=1}^m P_j, \\ K_{ин} = (K_{ин1}, K_{ин2}, \dots, K_{инm}), \\ Q_{tech} = \min_{i \rightarrow m} (q_1, q_2, \dots, q_m), \\ C_1 = f(T_b, \delta_1), \\ \delta_2 = f(C_1). \end{cases} \quad (5)$$

Полученная математическая модель представляет собой систему уравнений, при решении которой необходимо использовать общеизвестные численные методы (например, метод Ньютона). Для решения поставленной задачи целесообразно использовать программные обеспечения с модульным подходом – такие, как MatLab или MathCad. Данные программные обеспечения предназначены для выполнения инженерных и научных расчетов и высококачественной визуализации получаемых результатов. Эти системы применяются в математике, вычислительном эксперименте, имитационном моделировании.

Система (5) представляет собой перечень математических зависимостей, характеризующих влияние различных технологических параметров рассматриваемых модулей на производственный процесс. Данный математический подход при усовершенствовании самого математического аппарата (системы) позволит в дальнейшем обосновать оптимальную структуру линии производства органических удобрений исходя из индивидуальных требований каждого заказчика. Усовершенствование математического аппарата должно коснуться динамического описания самих гидромеханических и механических процессов, проходящих в рассматриваемых модулях. Описание гидромеханического процесса в гидромеханическом модуле представлено ниже.

Апробация системы уравнений (5). Моделирование работы технологической линии позволяет рассчитать дисперсность суспензии на различных этапах работы рассматриваемого технологического процесса производства комплексного удобрения. При моделировании в качестве единицы измерения геометрических размеров и массы частиц приняты соответственно микрометр и миллиграмм.

Рост дисперсности приводит к снижению массы частиц органического сырья (рис. 3).

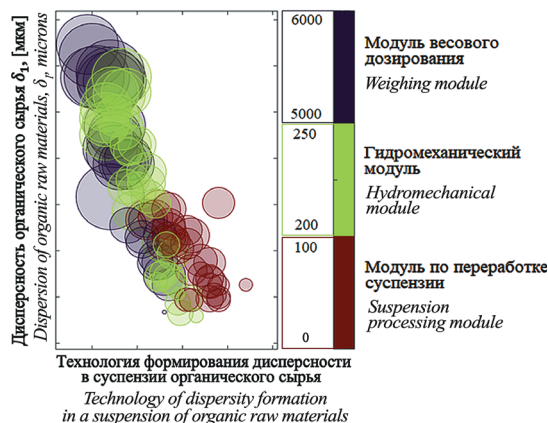


Рис. 3. Дисперсность органического сырья на этапах приготовления комплексного удобрения
Fig. 3. Dispersion of organic raw materials for various lines of complex fertilizer preparation

На рисунке 3 слева направо схематично представлены частицы органического сырья. На первом этапе в модуль весового дозирования поступает органическое сырье с дисперсностью 5000...6000 мкм, далее на гидромеханическом модуле дисперсность возрастает до 200...250 мкм, в модуле по переработке суспензии дисперсность достигает 0...100 мкм. Это обусловлено наличием гидромеханического модуля и модуля по переработке суспензии,

предназначенных для повышения дисперсности органического сырья. Данный эксперимент доказывает, что разработанная математическая модель хорошо согласуется с реальным технологическим производством и может быть использована для теоретических и инженерных расчетов. На рисунке 4 представлена зависимость дисперсности органического сырья δ_1 для четырех различных типов органического сырья.

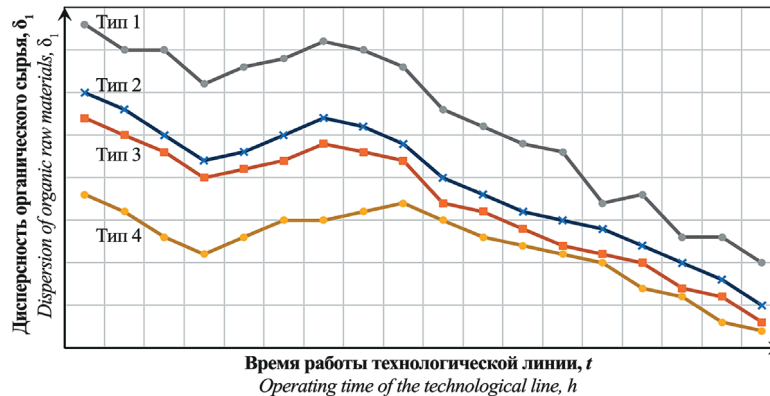


Рис. 4. Зависимость дисперсности органического сырья от времени работы технологической линии:

Тип 1 – торф; Тип 2 – бурый уголь; Тип 3 – сапропель; Тип 4 – биогумус

Fig. 4. Relationship between the dispersion of organic raw materials and the operating time of the technological line:

Type 1 – peat; Type 2 – brown coal; Type 3 – sapropel; Type 4 – biohumus

Из рисунка 4 следует, что дисперсность суспензии органического сырья увеличивается в течение работы технологической линии. Вышеуказанная закономерность сохраняется независимо от используемого типа органического сырья.

Разработанная математическая модель может быть использована для выбора параметров режимов востребованного технологического оборудования для сборки технологических линий по производству удобрений. Для этого были разработаны алгоритм и программа ЭВМ по выбору промышленных модулей для разработки новых

технологических линий на основе модульного оборудования и цифровых технологий. В основе программы ЭВМ лежит «База данных инновационного оборудования», формирование (обучение) которой производится за счет моделирования различных технологических процессов производства комплексных удобрений. На рисунке 5 представлена структурная схема обучения «Базы данных инновационного оборудования» программы ЭВМ математической моделью. Благодаря представленной программе ЭВМ оборудование выбирается с учетом его универсальности и модульности.

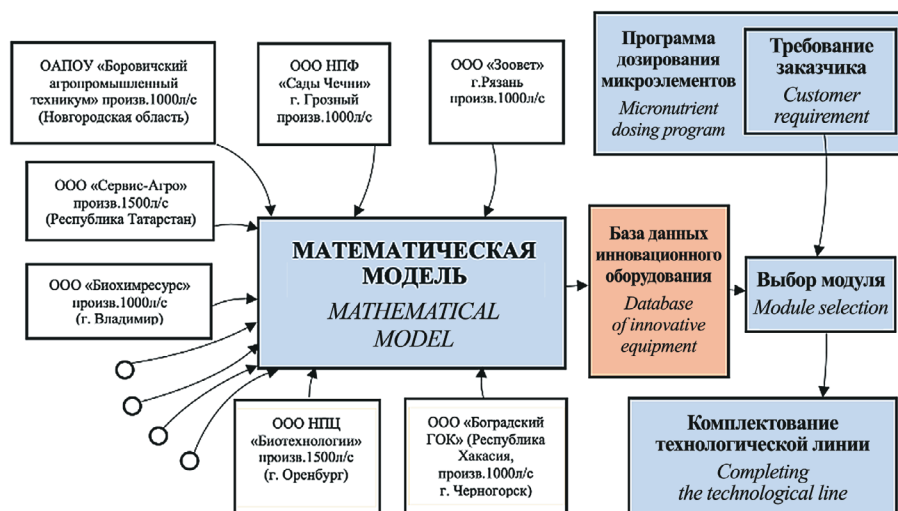


Рис. 5. Структурная схема обучения «Базы данных» программы ЭВМ математической моделью

Fig. 5. Structural diagram of training the computer “Database” software by the mathematical model

Инновационность представленного подхода заключается в том, что разработанная программа ЭВМ

на основе апробированной математической модели позволяет создавать новые или проводить модернизацию

старых производств комплексных удобрений с экономией денежных и временных ресурсов за счет использования модульного оборудования, предлагаемого на рынке машиностроительными предприятиями. Программа дозирования элементов не взаимосвязана с математической моделью и является полностью автономной системой.

Математическое описание гидромеханических процессов в гидромеханическом модуле. Для составления гидромеханических зависимостей движения потока теплой воды и суспензии органического сырья необходимо задаться местом взаимодействия этих исходных величин. При работе гидромеханического модуля и модуля переработки суспензии частички органического сырья и весь объем теплой воды находятся в постоянном движении за счет таких механизмов, как рассекатель, нагнетающий патрубок, смеситель, циркуляционный насос и дисмембратор. В потоке воды основной движущей силой является сдвигающая проекция силы тяжести. Ей противодействуют две силы, обуславливающие сопротивление потока со стороны самой жидкости (вязкость) и со стороны дна или поверхности трубопровода. Отметим, что вклад этих сил в скорость движения потока является различным.

Наибольший вклад в уменьшение скорости движения потока привносит сила, обусловленная неровностями поверхности и силами, возникающими со стороны архитектуры модульных устройств технологического процесса приготовления комплексных удобрений. В двух- и трехмерных гидродинамических моделях необходимо вводить функцию взаимодействия между вертикальными и горизонтальными слоями жидкости, что дает возможность учета обмена импульсами между слоями жидкости, создаваемыми, в том числе, смесителем в гидромеханической установке и дисмембратором в модуле переработки суспензии. Именно эти импульсы участвуют в разрушении целостности органического сырья, превращая его в суспензию. Выражение для силы трения между слоями движущейся жидкости может быть представлено в виде формулы Ньютона [3]:

$$F = \mu S \frac{\partial \vartheta}{\partial h},$$

где μ – динамический коэффициент вязкости, кг/(м·с); S – площадь соприкосновения слоев, м²; $\partial \vartheta / \partial h$ – градиент скорости, (м/с)/м.

При взаимодействии движущегося потока и поверхности возникает сила трения (или касательное напряжение, если силу трения отнести к площади взаимодействия). Для оценки касательных напряжений воспользуемся зависимостью Антуана Шези:

$$\tau = \rho g \frac{\vartheta^2}{C^2},$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; ϑ – средняя скорость потока, м/с; C – коэффициент Шези, м^{0,5}/с.

Коэффициент Шези определяется многими факторами, поэтому существуют несколько сотен эмпирических формул расчета коэффициента Шези и множество способов оценки шероховатости поверхностей, входящей в формулу расчета этого коэффициента. Однако исследователи отмечают, что в целом течение воды на поверхности не влияет на сопротивление движения воды в условиях гладких

поверхностей. Сопротивление формы в открытых потоках может быть описано посредством формулы Буссинеска [4, 5]:

$$I_f = -\beta \frac{\partial \vartheta^2}{2g \partial l},$$

где I_f – отнесенная к единице веса жидкости фиктивная сила добавочного сопротивления расширяющихся водоводов, (кг·м/с²)/кг; β – коэффициент добавочного сопротивления расширяющихся объемных потоков, м/с²; ϑ – средняя скорость в поперечном сечении, м/с; l – продольная координата, м, причем $\beta > 0$ при $(\partial \vartheta^2 / \partial l) < 0$ и $\beta = 0$ при $(\partial \vartheta^2 / \partial l) \geq 0$.

Математическое представление гидравлического сопротивления в гидродинамических моделях, как правило, сводится к коэффициенту трения между подстилающей поверхностью (в нашем случае – покров органического сырья, расстилающийся на емкости подготовки органического сырья) и потоком. Это представление, с одной стороны, удобно тем, что в одном члене уравнения, в одном множителе сведена вся информация о взаимодействии всех неровностей и потока. С другой стороны, очевидно, что эта связь является многофакторной и нелинейной, поэтому сводить ее описание в один коэффициент трения представляется некорректным. Одним из вариантов описания взаимодействия потока и неровностей покрова органического сырья на дне емкости подготовки органического сырья может быть сравнительно детализированное представление механики этого процесса. При этом важно принимать во внимание, что:

- процесс следует рассматривать в рамках принятого пространственно-временного масштаба;
- количественную оценку силы сопротивления дна емкости подготовки органического сырья потоку можно получить непосредственно из физико-механических свойств загружаемого органического сырья.

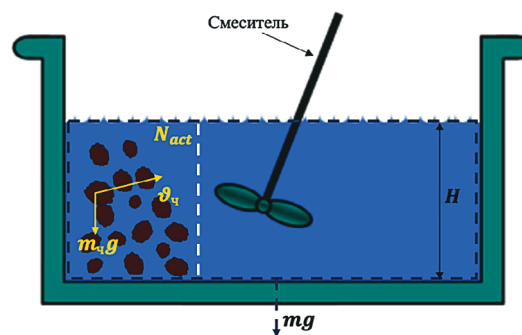


Рис. 6. Графическое представление емкости подготовки органического сырья гидромеханического модуля

Fig. 6. Graphical view of the tank for organic raw materials of the hydromechanical module

Такой подход проиллюстрирован в математической модели движения воды и твердого вещества [6-8]. Основное уравнение модели получено на основании баланса сил, действующих в потоке. Параметры модели – угол внутреннего трения и сила сцепления частиц органического сырья между собой – определяются физико-механическими свойствами покрова, а величины этих параметров представлены в строго определенных диапазонах.

Основное уравнение математической модели движения воды и частиц органического сырья в потоке имеет вид [6, 7, 9] (рис. 6):

$$(1 - f) \left(mg \left[I - \frac{\partial H}{\partial L} \right] \right) - N_{act} m_{ch} \frac{d\vartheta_{ch}}{dt} + N_{act} m_{ch} g - cS = 0, \quad (6)$$

где f – коэффициент внутреннего трения; m – масса объема воды, заключенного между двумя расчетными створами емкости подготовки органического сырья, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; I – уклон поверхности; H – глубина потока, м; L – расстояние, м; ϑ – средняя скорость потока, м/с; t – время, с; N_{act} – количество перемещаемых частиц в потоке; m_{ch} – масса частицы, кг; ϑ_{ch} – скорость движения частицы, м/с; c – сцепление частиц органического сырья при сдвиге, кг/(м · с²); S – площадь приложения силы, м².

Уравнение движения воды и частиц органического сырья замыкается уравнениями неразрывности потока, равнодействующей скорости движения частиц и баланса кинетической энергии потока воды и твердого вещества. В рассматриваемой модели все процессы считаются как квазистационарные, при которых во всех точках объема полости одинаковые параметры (давление, температура и плотность). На рисунке 7 представлено распределение скоростей согласно принадлежности слоев к потоку.

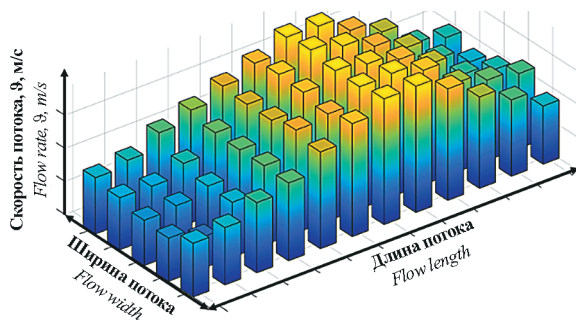


Рис. 7. Распределение скорости движения потока воды

Fig. 7. Distribution of the water flow speed

Из рисунка 7 следует, что поток, который находится ближе к стенкам емкости подготовки органического сырья, имеет наименьшую скорость, нежели поток воды, который удален от нее. Для упрощения задачи пренебрегаем теплообменом с окружающей средой. Традиционной системой дифференциальных уравнений, описывающих движение жидкости, является система на базе уравнений Навье-Стокса. В рамках рассматриваемой модели система уравнений состоит из уравнения движения и уравнения неразрывности.

В векторном виде они записываются следующим образом [10]:

$$\frac{\partial \vec{\vartheta}}{\partial t} = -(\vec{\vartheta} \cdot \nabla) \vec{\vartheta} + \varepsilon \cdot \vec{\vartheta} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f},$$

где ∇ – оператор набла; Δ – векторный оператор Лапласа; t – время; ε – коэффициент кинематической вязкости; ρ – плотность; p – давление; $\vec{\vartheta} = (\vartheta_1, \dots, \vartheta_n)$ – векторное поле скорости; \vec{f} – векторное поле массовых

сил. Неизвестные p и $\vec{\vartheta}$ являются функциями времени t и координаты $x \in \Omega$, где $\Omega \in R^n$, $n = 2$ или 3 – плоская или трехмерная область, в которой движется жидкость. С учетом того, что поток жидкости сообщен с атмосферой, следует систему уравнений дополнить уравнением несжимаемости:

$$\nabla \cdot \vec{\vartheta} = 0.$$

Баланс сил в потоке расписывается следующим образом:

$$F_{тн} - F_c - F_b = 0,$$

где $F_{тн}$ – сдвигающая проекция силы тяжести потока, Н; F_c – сила сопротивления частиц органического сырья сдвигу, Н; F_b – сила вязкости, Н.

Уравнение (6) примет вид:

$$(1 - f) mgI - cS - \mu S \frac{\partial \vartheta}{\partial h} = 0. \quad (7)$$

С учетом вышесказанного система уравнений, описывающая процесс движения потока воды в емкости подготовки органического сырья и взаимодействия с твердыми частицами органического сырья, примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} F = \mu S \frac{\partial \vartheta}{\partial h}, \\ \tau = \rho g \frac{\vartheta^2}{C^2}, \\ I_f = -\beta \frac{\partial \vartheta^2}{2g \partial l}, \left\{ \begin{array}{l} \beta > 0 \text{ при } \frac{\partial \vartheta^2}{\partial l} < 0, \\ \beta = 0 \text{ при } \frac{\partial \vartheta^2}{\partial l} \leq 0, \end{array} \right. \\ (1 - f) mgI - cS - \mu S \frac{\partial \vartheta}{\partial h} = 0, \\ \frac{\partial \vec{\vartheta}}{\partial t} = -(\vec{\vartheta} \cdot \nabla) \vec{\vartheta} + \varepsilon \cdot \vec{\vartheta} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}, \text{ при } \nabla \cdot \vec{\vartheta} = 0, \\ F_{тн} - F_c - F_b = 0. \end{array} \right. \quad (8)$$

Система (8) представляет собой набор зависимостей и уравнений на базе формул Ньютона, Антуана Шези, Буссинеска, Навье-Стокса и законов гидромеханики, которые в совокупности представляют собой систему, описывающую механику движения потока воды и ее взаимодействие с твердыми частицами органического сырья в гидромеханическом очистителе и реакторе.

Выводы

1. С помощью представленной математической модели, описывающей гидромеханические и механические процессы, можно математически описать реальный объект и воспользоваться для анализа его свойств математическим аппаратом, не зависящим от конкретной природы данного объекта. Модель может быть использована при рассмотрении формирования суспензии с необходимой дисперсностью в гидромеханическом очистителе и реакторе.

2. Представленная математическая модель, основанная на некотором упрощении, хорошо согласуется с реальным технологическим производством и может быть использована для теоретических и инженерных расчетов.

3. Совершенствование математической модели процесса работы технологической линии по переработке органического сырья с применением теории искусственных нейронных сетей может в дальнейшем использоваться в системе автоматизации технологических

операций и мониторинга показателей качества работы модульного оборудования, при переработке органического сырья, что обеспечит новый уровень синтеза сложных технических систем в интересах сельскохозяйственного производства.

Библиографический список

1. Dym C.L. Engineering Design: A Synthesis of Views. 1st Edition, Cambridge University Press, New York, 1994.
2. Алпатов Ю.Н. Моделирование процессов и систем управления: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2018. 140 с. [Электронный ресурс]: URL: <https://e.lanbook.com/book/106730>.
3. Дмитриевский В.И. Гидромеханика. М.: Морской транспорт, 1962. 296 с.
4. Гришанин К.В. Гидравлическое сопротивление естественных русел. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 184 с.
5. Петров А.В. Моделирование процессов и систем: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2015. 288 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://e.lanbook.com/book/68472>.
6. Шмакова М.В. Теория и практика математического моделирования речных потоков. СПб.: Лема, 2013. 142 с.
7. Шмакова М.В. Расчет заносимости русловых карьеров // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2012. № 26. С. 71-75.
8. Эрозионные процессы / Под ред. Н.И. Маккавеева и Р.С. Чалова. М.: Мысль, 1984. 256 с.
9. Горлач Б.А., Шахов В.Г. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация. СПб.: Лань, 2022. 292 с.
10. Cha P.D., Rosenberg J.J., Dym C.L. Fundamentals of Modeling and Analyzing Engineering Systems. Cambridge University Press, Cambridge, 2000. 466 pp.

Критерии авторства

Сорокин К.Н. выполнил теоретические исследования, на основании полученных результатов провел обобщение и подготовил рукопись. Сорокин К.Н. имеет на статью авторские права и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.03.2022

Одобрена после рецензирования 10.03.2022

Принята к публикации 05.04.2022

References

1. Dym C.L. Engineering Design: A Synthesis of Views. 1st Edition, Cambridge University Press, New York, 1994.
2. Alpatov Yu.N. Modelirovanie protsessov i sistem upravleniya [Modeling of processes and control systems]. St. Petersburg, Lan', 2018. 140 p. [Electronic resource]: URL: <https://e.lanbook.com/book/106730>. (In Rus.)
3. Dmitrievskiy V.I. Gidromekhanika [Hydromechanics]. Moscow, Morskoy transport, 1962. 296 p. (In Rus.)
4. Grishanin K.V. Gidravlichesкое soprotivlenie estestvennykh rusel [Hydraulic resistance of natural channels]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1992. 184 p. (In Rus.)
5. Petrov A.V. Modelirovanie protsessov i sistem [Modeling of processes and systems]: Study guide. St. Petersburg: Lan', 2015. 288 p. [Electronic resource]. URL: <https://e.lanbook.com/book/68472>. (In Rus.)
6. Shmakova M.V. Teoriya i praktika matematicheskogo modelirovaniya rechnykh potokov [Theory and practice of the mathematical modeling of river flows]. St. Petersburg, Lema, 2013. 142 p. (In Rus.)
7. Shmakova M.V. Raschet zanosimosti ruslovykh kar'yev [Drift calculation in open channel pits]. *Uchenye zapiski Rossiiskoi gosudarstvennogo meteorologicheskogo universiteta*, 2012; 26: 71-75. (In Rus.)
8. Eroziionnye protsessy [Erosion processes]. Ed. by N.I. Makkaveeva and R.S. Chalov. Moscow, Mysl', 1984. 256 p. (In Rus.)
9. Gorlach B.A., Shakhov V.G. Matematicheskoe modelirovanie. Postroyenie modeley i chislennaya realizatsiya [Mathematical modeling. Construction of models and their numerical implementation]. St. Petersburg, Lan', 2022. 292 p. (In Rus.)
10. Cha P.D., Rosenberg J.J., Dym C.L. Fundamentals of Modeling and Analyzing Engineering Systems. Cambridge University Press, Cambridge, 2000. 466 p.

Contribution

K.N. Sorokin performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. K.N. Sorokin has author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 01.03.2022

Approved after reviewing 10.03.2022


Accepted for publication 05.04.2022

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.22.013

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-27-32

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕНТОЧНОГО ДРАЖИРАТОРА

АНДРЕЕВ СЕРГЕЙ АНДРЕЕВИЧ , канд. техн. наук, доцентenergo-andreev@rgau-msha.ru *ДУБОВ ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ*, преподаватель

volodya.dubov.00@mail.ru

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

Аннотация. Традиционно дражирование семян осуществляется дражираторами с барабанным рабочим органом в циклическом режиме, что усложняет включение дражираторов в технологическую линию комплексной предпосевной обработки семян. Приведено обоснование эффективности ленточных дражираторов, обеспечивающих непрерывность дражирования и существенно повышающих производительность процесса. Сформулированы основные требования к процессу дражирования семян в непрерывном режиме. Определены условия скатывания драже по наклонной поверхности движущейся ленты транспортера и выявлена аналитическая взаимосвязь угла наклона транспортерной ленты дражиратора с коэффициентом трения, диаметром драже и скоростью их поступательного движения по ленте транспортера. Определены основные рабочие параметры ленточного дражиратора: длина, скорость движения и угол наклона ленты транспортера. Полученные математические выражения универсальны и позволяют произвести расчет рабочих параметров дражираторов при обработке семян сельскохозяйственных растений с различными исходными размерами, массой и триботехническими свойствами. При исследовании перемещения дражируемых семян по движущейся ленте наклонного транспортера приняты во внимание действующие на них сила трения, сила реакции опоры, скатывающая сила и сила тяжести. Исходя из аналогии поступательного движения семян по наклонной плоскости их движению по внутренней поверхности барабана бесконечно большого радиуса установлены численные значения рабочих параметров процесса дражирования в непрерывном режиме. Сделано заключение о возможности уменьшения габаритов ленточного дражиратора посредством реализации расчетной длины рабочей зоны ленты транспортера суммой длины нескольких лент, расположенных наклонно по отношению к земле в разных плоскостях.

Ключевые слова: дражиратор, параметры ленточного дражиратора, семена, непрерывный режим, скатывающая сила, угол наклона транспортера, скорость движения ленты.



Формат цитирования: Андреев С.А., Дубов В.В. Определение рабочих параметров ленточного дражиратора // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 3. С. 27-32. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-27-32>.

© Андреев С.А., Дубов В.В., 2022



ORIGINAL PAPER

DETERMINING THE OPERATING PARAMETERS OF THE BELT-TYPE SEED PELLETIZER

SERGEY A. ANDREEV , PhD (Eng), Associate Professorenergo-andreev@rgau-msha.ru *VLADIMIR V. DUBOV*, lecturer

volodya.dubov.00@mail.ru

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

Abstract. Conventional methods of seed pelleting involve using pelletizers with a drum-type working unit. In these devices, pelleting is carried out in a cyclic mode, which makes operational restrictions and complicates the use of pelletizers in the technological line of complex pre-sowing seed treatment. The authors evaluate the effectiveness of belt-type pelleting machines ensuring the continuity of pelleting and significantly increasing the performance. The paper provides some basic requirements to continuous seed pelleting. The conditions are determined to describe the pellets rolling down the inclined surface of the moving conveyor belt. Consequently, the analytical relationship is established between the inclination angle of the pelletizer belt and the friction coefficient, the pellet diameter and speed of their forward movement along the conveyor belt. The main operating parameters of the belt pelletizer are determined – length, speed, and the inclination angle of the conveyor belt. The obtained mathematical expressions are universal, since they allow analyzing the working parameters of the pelletizers when processing crop seeds with different initial size, weight, and tribotechnical properties. When studying the movement of the coated seeds along the moving belt of the inclined conveyor, the friction force acting on them, the reaction force of the support, the authors took into account the rolling force and the gravity force. Based on the analogy of the translational movement of seeds along an inclined plane to their movement along the inner surface of the drum of an infinitely large radius, the authors established the numerical values of the parameters of continuous pelleting. The paper

finishes with a conclusion about possible reducing the dimensions of the belt-type pelletizer. The estimated length of the working area of the conveyor belt is suggested to be the sum of the lengths of several belts inclined to the ground in different planes.

Key words: pelletizer, belt-type pelletizer parameters, seeds, continuous mode, rolling force, conveyor inclination angle, belt speed.

For citation: Andreev S.A., Dubov V.V. Determining the operating parameters of the belt-type seed pelletizer. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(3): 27-32. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-27-32>.

Введение. Прогрессивным приемом подготовки семян к посеву является дражирование – нанесение на поверхность семян инертной оболочки, которая существенно укрупняет исходные семена и позволяет прибегнуть к механизированному высеву [1]. Традиционно дражирование осуществляется в циклическом режиме с использованием барабанных дражировщиков. К сожалению, циклический режим является низкопроизводительным, требует активного участия опытного оператора и слабо автоматизирован [2]. Указанных недостатков лишена конструкция дражировщика с ленточным рабочим органом [3]. В этой конструкции дражируемые семена подаются из накопительного бункера на ленту в верхней части транспортера (рабочего органа), расположенного под некоторым углом к поверхности земли. По мере скатывания семян в нижнюю часть транспортера они обволакиваются смесями и превращаются в драже. При этом лента транспортера приводится в движение, направление которого противоположно направлению скатывания. Поскольку размеры драже при их перемещении в нижнюю часть транспортера увеличиваются, влияние шероховатости поверхности ленты на формирование силы трения уменьшается, и скорость скатывания возрастает.

Для успешного дражирования необходимо с достаточной точностью соблюсти основные рабочие параметры процесса, и в первую очередь – скорость вращательного движения драже и продолжительность их скатывания по ленте транспортера. При этом необходимо установить значения угла наклона транспортера и его длину.

Цель исследований: определение основных рабочих параметров ленточного дражировщика (угла наклона, длины и скорости движения ленты транспортера), обеспечивающих заданную частоту вращения, скорость и продолжительность поступательного движения дражируемых семян.

Материалы и методы. В качестве исходного материала использованы известные параметры процесса дражирования, обеспечивающие получение качественных драже на барабанных дражировщиках. Эти параметры рассматривались как целевые функции нескольких переменных, определяющих процесс обволакивания семян компонентами оболочки на ленточных дражировщиках. В работе использовался метод абстрагирования, позволивший рассматривать дражируемые семена как твердые материальные тела шарообразной формы, скатывающиеся по движущейся наклонной плоскости.

Механизм образования оболочки драже и его количественные характеристики при замене барабанного рабочего органа на ленточный должны быть сохранены. Дражирование семян в непрерывном режиме предлагается рассматривать как аналогичный процесс в барабанном дражировщике с рабочим органом бесконечно большого радиуса. В таком случае образующая окружность рабочего органа вырождается в прямую линию, а его поверхность – в плоскость. Наиболее удобное исполнение рабочего органа может быть реализовано в виде ленточного транспортера с соответствующим электроприводом (рис. 1).

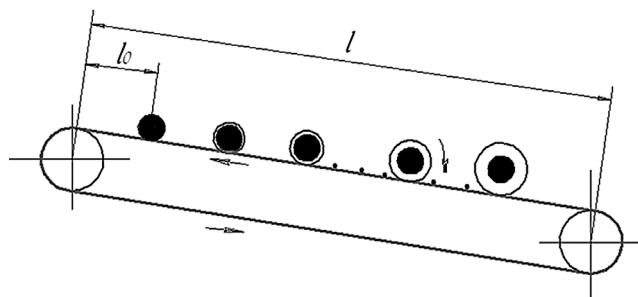


Рис. 1. Расположение семян на ленточном рабочем органе дражировщика
Fig. 1. Location of the seeds on the belt-type working unit of the pelletizer

Результаты и их обсуждение. Основными преимуществами дражировщика семян с ленточным рабочим органом являются непрерывность процесса (определяющая возможность существенного повышения производительности), возможность автоматизации и роботизации, возможность встраивания в линию по комплексной предпосевной обработке семян, включающей в себя сепарацию и электрофизическую стимуляцию.

Известно, что при дражировании семян на барабанном дражировщике наилучший результат достигается при таком сочетании радиуса рабочего органа, частоты его вращения и угла расположения относительно земли, при котором семена находятся в режиме интенсивного вращения относительно своих осей. Этот режим сопровождается перекачиванием семян (а на заключительном этапе – драже) друг по другу и по внутренней поверхности рабочего органа при их расположении под углом $30...45^\circ$ к поверхности земли [4]. Принимая во внимание известные рабочие параметры барабанных дражировщиков [5], в качестве исходных данных будем считать: D – диаметр барабана в рабочей зоне исходного дражировщика, $D = 40$ см; n – средняя частота вращения барабана исходного дражировщика, $n = 35$ м⁻¹, m – масса одного семени, для семян сахарной свеклы $m = 0,05$ г¹; t – средняя продолжительность дражирования, в исходном барабанном дражировщике $t = 20$ м.

Циклическая скорость вращения барабана и связанная с ней линейная скорость могут быть вычислены по формулам: $\omega = \frac{\pi n}{30}$; $v = \omega R$, где R – радиус барабана, $R = \frac{D}{2}$, см. Подставив численные значения, получим $v = 73,27$ см/с. Если лента транспортера будет двигаться со скоростью v , то при отсутствии проскальзывания между ней и исходными семенами последние будут оставаться на одном месте. Однако в таком случае дражирование не происходит. Необходимым условием реализации процесса является некоторое превышение поступательной скорости семян относительно скорости ленты,

¹ ГОСТ 22617.4-91. Группа С19. Межгосударственный стандарт. Семена свеклы. Методы определения массы 1000 семян и массы одной посевной единицы. Дата введения: 1992-01-01.

причем с увеличением диаметра драже и уменьшением силы трения движение семян становится ускоренным.

Рассмотрим векторную диаграмму сил, действующих на дражируемое семя, находящееся на ленте транспортера, представляемое наклонной плоскостью (рис. 2).

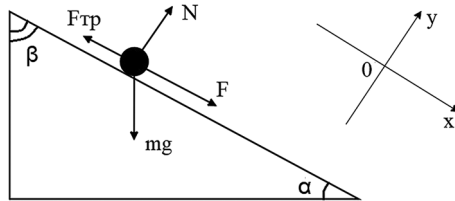


Рис. 2. Векторная диаграмма сил, действующих на семя:
F – сила скатывания; *F_{тр}* – сила трения;
N – сила реакции опоры; α – угол наклона ленты транспортера

Fig. 2. Vector diagram of the forces acting on the seed:
F – rolling force; *F_{fr}* – friction force;
N – reaction force of the support;
 α – inclination angle of the conveyor belt

В соответствии со вторым законом Ньютона сформируем систему уравнений:

$$\begin{cases} F + F_{тр} = ma_c; \\ N - mg = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где a_c – ускорение движения семени, см/с²; *m* – масса семени, кг; *g* – ускорение свободного падения, см/м².

Введем систему прямоугольных координат, в которой ось *Ox* параллельна направлению силы скатывания, а ось *Oy* параллельна направлению силы реакции опоры. Переходя к скалярной форме посредством нахождения проекций на оси этой системы и добавляя в систему (1) соотношение силы реакции опоры и силы трения, запишем:

$$\begin{cases} F - F_{тр} + mg \cdot \sin \alpha = ma_c; \\ N - mg \cdot \cos \alpha = 0; \\ F_{тр} = \mu N, \end{cases} \quad (2)$$

где μ – коэффициент трения.

Представим $F_{тр} = mg \cdot \cos \alpha$ и заменим $F_{тр}$ в первом уравнении системы на произведение $\mu mg \cdot \cos \alpha$ из ее третьего уравнения:

$$\begin{cases} F - \mu mg \cdot \cos \alpha = ma_c - mg \cdot \sin \alpha; \\ N = mg \cdot \cos \alpha; \\ F_{тр} = \mu mg \cdot \cos \alpha. \end{cases} \quad (3)$$

Дополним систему (3) уравнением, связывающим длину наклонной ленты транспортера с ускорением и продолжительностью скатывания драже:

$$\begin{cases} F = ma_c - mg \cdot \sin \alpha + \mu mg \cdot \cos \alpha; \\ N = mg \cdot \cos \alpha; \\ F_{тр} = \mu N = \mu mg \cdot \cos \alpha; \end{cases} \quad (4)$$

$$l = l_0 + v_0 t + \frac{a_c t^2}{2},$$

где *l* – длина ленты транспортера (гипотенуза прямоугольного треугольника), см; l_0 – расстояние от семени до верхней точки ленты, см (при подаче исходных семян в крайнюю верхнюю точку ленты $l_0 = 0$); v_0 – начальная

скорость семени (на практике $v_0 = 0$ см/с); a_c – ускорение, см/с²; *t* – продолжительность скатывания, с.

При $l_0 = 0$ и $v_0 = 0$ см/с $l = \frac{a_c t^2}{2}$. Подставим полученное из последнего выражения a_c в первое уравнение системы (4) и разделим все его члены на mg :

$$\begin{cases} \frac{F}{mg} = \frac{2l}{gt^2} - \sin \alpha + \mu \cdot \cos \alpha; \\ N = mg \cdot \cos \alpha; \\ F_{тр} = \mu N = \mu mg \cdot \cos \alpha. \end{cases} \quad (5)$$

При коэффициенте трения, равном единице [6],

$$\frac{F}{mg} - \frac{2l}{gt^2} = -\sin \alpha + \cos \alpha. \quad (6)$$

Принимая во внимание то, что треугольник, образуемый лентой транспортера, является прямоугольным, можно записать:

$$\frac{F}{mg} - \frac{2l}{gt^2} = -\sin \alpha + \cos \alpha. \quad (7)$$

Обозначим правую часть последнего равенства и на основании равенства $\sin \alpha = \cos \beta$ сформируем выражение: $f(\alpha) = -\sin \alpha + \cos \alpha = -\cos \beta + \cos \alpha$. Тогда

$$\frac{F}{mg} - \frac{2l}{gt^2} = -\cos \beta + \cos \alpha$$

$$\text{или } -\frac{F}{mg} + \frac{2l}{gt^2} = \cos \beta - \cos \alpha.$$

Запишем правую часть последнего равенства, используя формулу разности функций:

$$\cos \beta - \cos \alpha = -2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\beta - \alpha}{2},$$

где $\beta = 90^\circ - \alpha$. Поэтому

$$\begin{aligned} f(\alpha) &= -2 \sin \frac{\alpha + 90^\circ - \alpha}{2} \sin \frac{90^\circ - \alpha - \alpha}{2} = \\ &= -2 \sin \frac{90^\circ}{2} \sin \frac{90^\circ - 2\alpha}{2} = -2 \sin 45^\circ \sin (45^\circ - \alpha). \end{aligned}$$

С другой стороны, в соответствии с формулой разности аргументов² можно записать:

$$f(\alpha) = -2 \sin 45^\circ (\sin 45^\circ \cdot \cos \alpha - \cos 45^\circ - \sin \alpha).$$

Подставив значения тригонометрических функций угла 45°, получим $f(\alpha) = \sin \alpha - \cos \alpha$.

Произведем преобразование $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$, используя универсальную подстановку:

$$f(\alpha) = \sin \alpha - \cos \alpha = \frac{2tg \frac{\alpha}{2}}{1 + tg^2 \frac{\alpha}{2}} - \frac{1 - tg^2 \frac{\alpha}{2}}{1 + tg^2 \frac{\alpha}{2}} = \frac{2tg \frac{\alpha}{2} - 1 + tg^2 \frac{\alpha}{2}}{1 + tg^2 \frac{\alpha}{2}}.$$

Для нахождения нулей функции $f(\alpha)$ исследуем ее числитель:

$$2tg \frac{\alpha}{2} - 1 + tg^2 \frac{\alpha}{2} = 0. \quad (8)$$

² Панчишкин А.А., Шавгулидзе Е.Т. Тригонометрические функции в задачах: Учебное пособие. М.: Наука, 1986. 160 с.

С учетом обозначения $t = tg \frac{\alpha}{2}$ выражение (8) запишется в виде $t^2 + 2t - 1 = 0$, корнями которого будут $t_{1,2} = \frac{2 \pm \sqrt{8}}{-2} = -1 \pm \sqrt{2}$ или $tg \frac{\alpha_{1,2}}{2} = -1 \pm \sqrt{2}$;

$$\alpha_{1,2} = 2 \cdot arctg(-1 \pm \sqrt{2}) + 2\pi n, n \in Z. \quad (9)$$

Для нахождения экстремумов функции $f(\alpha)$ продифференцируем выражение (8) по $\frac{\alpha}{2}$ и приравняем полученную производную к нулю:

$$\left(2tg \frac{\alpha}{2} - 1 + tg^2 \frac{\alpha}{2}\right)' = -(1)' + \left(tg^2 \frac{\alpha}{2}\right)' + 2\left(tg \frac{\alpha}{2}\right)' = 0.$$

Вернемся к непрерывным функциям:

$$-\left(\frac{\sin^2 \frac{\alpha}{2}}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}\right)' - 2 \cdot \left(\frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\cos \frac{\alpha}{2}}\right)' = 0. \quad (10)$$

Принимая во внимание, что выражение (10) является сложной функцией, запишем:

$$\begin{aligned} & \frac{\left(\sin^2 \frac{\alpha}{2}\right)' \cdot \cos^2 \frac{\alpha}{2} - \left(\cos^2 \frac{\alpha}{2}\right)' \cdot \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{\left(\cos^2 \frac{\alpha}{2}\right)^2} + \\ & + 2 \cdot \frac{\left(\sin \frac{\alpha}{2}\right)' \cdot \cos \frac{\alpha}{2} - \left(\cos \frac{\alpha}{2}\right)' \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{\left(\cos \frac{\alpha}{2}\right)^2} = 0 \\ \text{или} & \frac{\left(\frac{1 - \cos \alpha}{2}\right)' \cdot \cos^2 \frac{\alpha}{2} - \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2}\right)' \cdot \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{\left(\cos^2 \frac{\alpha}{2}\right)^2} + \\ & + 2 \cdot \frac{\left(\sqrt{\frac{1 - \cos \alpha}{2}}\right)' \cdot \cos \frac{\alpha}{2} - \left(\sqrt{\frac{1 + \cos \alpha}{2}}\right)' \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{\left(\cos \frac{\alpha}{2}\right)^2} = 0; \\ & \frac{\left(\frac{2 \cdot (1 - \cos \alpha)'}{4}\right) \cdot \cos^2 \frac{\alpha}{2} - \left(\frac{2 \cdot (1 + \cos \alpha)'}{4}\right) \cdot \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{\left(\cos^2 \frac{\alpha}{2}\right)^2} + \\ & + 2 \cdot \frac{\left(\frac{\sqrt{2} \cdot (\sqrt{1 - \cos \alpha})'}{2}\right) \cdot \cos \frac{\alpha}{2} - \left(\frac{\sqrt{2} \cdot (\sqrt{1 + \cos \alpha})'}{2}\right) \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{\left(\cos \frac{\alpha}{2}\right)^2} = 0. \end{aligned}$$

Окончательный результат дифференцирования будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & \frac{2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos^2 \frac{\alpha}{2} + 2 \sin \alpha \cdot \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{4\left(\cos^2 \frac{\alpha}{2}\right)^2} + \\ & + 2 \cdot \frac{\frac{\sin \alpha \cdot \sqrt{2}}{2} \cdot \frac{\cos \alpha}{2} + \frac{\sin \alpha \cdot \sqrt{2}}{2} \cdot \frac{\sin \alpha}{2}}{\left(\cos \frac{\alpha}{2}\right)^2} = 0. \end{aligned}$$

В результате почленного деления получим:

$$\begin{aligned} & \frac{\sin \alpha \cdot \left(\cos^2 \frac{\alpha}{2} + \sin^2 \frac{\alpha}{2}\right)}{2\left(\cos^2 \frac{\alpha}{2}\right)^2} + 2 \frac{\sin \alpha \cdot \sqrt{1 + \cos \alpha}}{4 \cdot \sqrt{1 - \cos \alpha} \cdot \left(\cos \frac{\alpha}{2}\right)^2} - \\ & - \frac{\sin \alpha \cdot \sqrt{1 - \cos \alpha}}{4 \cdot \sqrt{1 + \cos \alpha} \cdot \left(\cos \frac{\alpha}{2}\right)^2} = 0. \quad (11) \end{aligned}$$

Упростим выражение (11), вынесем за скобки общий множитель. Одновременно преобразуем числитель первого члена этого выражения в соответствии с основным тригонометрическим тождеством и изменим форму записи знаменателя, воспользовавшись формулой косинуса половинного аргумента:

$$\begin{aligned} & \frac{4 \sin \alpha}{2(1 + \cos \alpha)^2} + \\ & + 2 \frac{\sin \alpha}{4} \cdot \left(\frac{\sin \alpha \cdot (\sqrt{1 + \cos^2 \alpha})}{\sqrt{1 - \cos \alpha} \cdot \left(\cos \frac{\alpha}{2}\right)^2} - \frac{\sin \alpha \cdot (\sqrt{1 - \cos^2 \alpha})}{\sqrt{1 + \cos \alpha} \cdot \left(\cos \frac{\alpha}{2}\right)^2} \right) = 0. \end{aligned}$$

Приведа к общему знаменателю, получим:

$$\frac{4 \sin \alpha}{2(1 + \cos \alpha)^2} + 2 \frac{\sin \alpha}{4} \cdot \frac{(1 + \cos \alpha + 1 - \cos \alpha)}{\left(\cos \frac{\alpha}{2}\right)^2} = 0.$$

Раскроем квадрат косинуса половинного угла во второй дроби:

$$\begin{aligned} & \frac{4 \sin \alpha}{2(1 + \cos \alpha)^2} + 2 \frac{\sin \alpha}{4} \cdot \frac{2}{\sin^2 \alpha} \cdot \frac{2}{1 + \cos \alpha} = 0 \text{ или} \\ & \frac{4 \sin \alpha}{2(1 + \cos \alpha)^2} + \frac{2}{\sin \alpha \cdot (1 + \cos \alpha)} = 0. \end{aligned}$$

Последнюю сумму можно представить в виде:

$$2 \left(\frac{\sin^2 \alpha + 1 + \cos \alpha}{\sin \alpha \cdot (1 + \cos \alpha)^2} \right) = 0.$$

Раскрывая скобки, получим:

$$\frac{2 \sin^2 \alpha + 2 + 2 \cos \alpha}{\sin \alpha \cdot (1 + \cos \alpha)^2} = 0. \quad (12)$$

Для определения значений углов α , при которых выражение (12) обращается в нуль, приравняем к нулю его числитель:

$$2 \sin^2 \alpha + 2 + 2 \cos \alpha = 0.$$

Заменим функцию $\sin^2 \alpha$ на $1 - \cos^2 \alpha$,

$$2 - 2 \cos^2 \alpha + 2 + 2 \cos \alpha = 0. \quad (13)$$

Разделим все члены уравнения (13) на -2 :

$$\cos^2 \alpha - \cos \alpha - 1 = 0. \quad (14)$$

В результате решения квадратного уравнения получаем два корня, из которых $\cos \alpha = 2$ не подходит ввиду несоответствия области значения функции косинуса, а $\cos \alpha = 1$ не может рассматриваться как имеющее физический смысл решение, поскольку не входит

в ограничения, предъявляемые знаменателем выражения (12).

Таким образом, $\sin \alpha \cdot (1 + \cos \alpha)^2 \neq 0$, а корнями его будут $\alpha_{01} \neq \pi n$, $n \in Z$ и $\alpha_{02} \neq \pi + 2\pi n$, $n \in Z$ при общем решении $\alpha_0 \neq \pi n$, $n \in Z$. Исходя из этого, делаем вывод о том, что рассматриваемая функция не имеет точек максимума и минимума или эти точки определены во множестве вещественных чисел.

Решениями сформулированного условия в соответствии с выражением (9) будут $\alpha_1 = 135^\circ + 2\pi n$, $n \in Z$ и $\alpha_2 = 47,4^\circ + 2\pi n$, $n \in Z$.

Решение α_1 , определяющее выполнение неравенства $\alpha_1 + 90^\circ > 180^\circ$, также подлежит исключению.

Таким образом, во внимание следует принять только $\alpha_2 = 47,4^\circ$.

Длина ленты транспортера при отсутствии поступательного движения драже может быть определена из условий аналогии с барабанным дражирователем. Фактически процесс дражирования семян в барабанном рабочем органе происходит на незначительной части его внутренней поверхности. Длина дуги L_0 , приходящейся на рабочую зону сферического сегмента, обычно не превышает $1/6 L$, где L – длина окружности барабана в рабочей зоне. Исходя из данных по процессу в исходном дражирате, $L_0 = \frac{1}{6} L = \frac{1}{6} \pi D = 21$ см. Такую же длину может иметь лента транспортера, однако технологический выигрыш при этом будет отсутствовать. Во-первых, конструкция транспортерного рабочего органа всегда сложнее барабанного; во-вторых, в процессе дражирования придется увеличивать скорость движения ленты транспортера; в-третьих, даже при незначительном нарушении режима некачественные или не участвующие в процессе драже будут самостоятельно исключаться из рабочей зоны (падать с ленты), что потребует их ручной подборки.

В связи с вышесказанным процесс дражирования должен быть организован таким образом, чтобы при его протекании семена либо равномерно, а лучше ускоренно, но достаточно медленно, перемещались по ленте вниз. При этом продолжительность нахождения драже в рабочей зоне должна составлять исходные 20 мин.

Определив ускорение движения драже выражением $a_c = m \frac{2L_0}{t^2}$ и подставив численные значения ($L_0 = 21$ см; $t = 1200$ с; $m = 0,05$ г, $\alpha = 47,4^\circ$; $\mu = 1$; $g = 1000$ см/с²) в первое уравнение системы (4), получим силу скатывания, действующую на драже: $F = 2,96$ Н. Если принять, что при попадании на ленту транспортера семя начинает двигаться со скоростью $v_n = 73,3$ см/с, а конечная масса драже составит $m_k = 0,35$ г, то к концу движения по ленте скатывающая сила достигнет значения $F_k = 21,3$ Н. При этом поступательная скорость драже будет определяться в соответствии с выражением

$$v_k = \sqrt{\left(\frac{F_k}{m_k g} + \cos \alpha - \sin \alpha\right) \cdot \frac{L_0 g}{2}} \quad (15)$$

и составит величину $v_k = 4,4$ см/с.

На основе полученных результатов определим ускорение, приобретаемое драже по мере их скатывания по ленте, движущейся вверх:

$$a_c = \frac{v_k - v_n}{t} \cdot a_c = 0,164 \text{ см/с}^2.$$

При этом длина ленты транспортера составит $l_a = \frac{a_c t^2}{2} = 14473$ см.

Интересно, что изменение угла наклона транспортера в диапазоне от 30° до 75° весьма слабо влияет на величину скорости v_k и длины ленты l_a . Некоторые колебания значения l_a в пределах от 14112 до 15435 см объясняются взаимодействием двух периодических функций в выражении (15). Не вызывает сомнения то, что полученное значение длины ленты для практической реализации в условиях подсобного или мелкого фермерского хозяйства является неудобным. Однако результаты расчета могут быть использованы при проектировании высокопроизводительных установок для дражирования больших количеств семян на специализированных предприятиях. Кроме того, существенный резерв уменьшения габаритов ленточного дражиратора заключается в разработке устройства с несколькими укороченными наклонными транспортерами. Эти транспортеры должны располагаться последовательно в разных направлениях внутри дражиратора, образуя общую технологическую линию. В то же время суммарная длина укороченных транспортеров должна соответствовать рассчитанному значению – 14473 см.

Предложенный алгоритм расчета, а также полученные результаты могут послужить основанием для дальнейших исследований процесса, в которых целесообразно принять во внимание изменение соотношения сил, действующих на драже, за счет изменения коэффициента трения по мере увеличения их диаметра.

Выводы

1. Рабочие параметры ленточного дражиратора могут быть определены из характеристик барабанной конструкции, обеспечивающих условия эффективного наращивания качественной оболочки драже. При определении рабочих параметров ленточного дражиратора вращательное движение внутренней поверхности барабана в рабочей зоне должно быть представлено поступательным движением ленты, а скатывающая сила, определяющая движение драже, рассмотрена как векторная сумма силы тяжести, силы реакции опоры и подъемной силы, обусловленной движением ленты.

2. Реализация эксплуатационных характеристик барабанной конструкции с диаметром рабочего органа в зоне дражирования 40 см, частотой его вращения 35 м^{-1} , массой исходных семян и готовых драже 0,05 и 0,35 г соответственно достигается на ленточном дражираторе при установке транспортера под углом $47,4^\circ$ к поверхности земли.

3. При смещении дражируемых семян в нижнюю часть рабочего органа барабанной конструкции на расстоянии 21 см в течение 7 мин конечная поступательная скорость драже на ленточном дражираторе составляет 4,4 см/с при ускорении $0,16 \text{ см/см}^2$ и протяженности поступательного движения 144 м.

Библиографический список

1. Чирков М.В., Чирков А.М. Агроэкологическая и экологическая эффективность применения технологии дражирования семян свеклы в сельскохозяйственном производстве Поволжского региона // Доклады ТСХА. 2004. Вып. 276. С. 326-330.
2. Михеев Д.А. Дражирование семян сахарной свеклы центробежным дражиратором с лопастным отражателем: Монография. Горки: БГСХА, 2017. 180 с.
3. Устройство для дражирования семян: Патент № 171156 РФ МПК А01С1/06 (2006.01) / С.А. Андреев, Ю.А. Судник, Д.В. Анашин, А.В. Балан. 2016136861, заявл. 14.09.2016; опубл. 23.05.2017. Бюл. № 15.
4. Андреев С.А., Балан А.В. Дражирование семян в непрерывном режиме // Инновационные научные исследования: теория, методология, практика: Сборник статей VII Международной научно-практической конференции: В 2 ч. Ч. 2. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2017. С. 35-40.
5. Шарков Г.А., Андреев С.А., Сабетов А.Н. Советуем: дражируйте семена // Приусадебное хозяйство. 1986. № 5. С. 33-34.
6. Попов В.Л., Пеахье С.Г., Шилько Е.В. и др. Исследование зависимости коэффициента трения в системе «рельс-колесо» как функции параметров материала и нагружения // Физическая мезомеханика. 2002. Т. 5. № 3. С. 17-25.

Критерии авторства

Андреев С.А., Дубов В.В. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели обобщение и подготовили рукопись. Андреев С.А., Дубов В.В. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 22.11.2021

Одобрена после рецензирования 21.04.2022

Принята к публикации 22.04.2022

References

1. Chirkov M.V., Chirkov A.M. Agroekologicheskaya i ekologicheskaya effektivnost' primeneniya tekhnologii drazhivaniya semyan svekly v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve Povolzhskogo regiona [Agroecological and ecological efficiency of applying the technology of pelleting beet seeds in agricultural production of the Volga region]. *Doklady TSKHA*, 2004; 276: 326-330. (In Rus.)
2. Mikheev D.A. Drazhivanie semyan sakharnoy svekly tsentrobezhnym drazhiratorom s lopastnym otrazhatelem: Monografiya [Pelleting of sugar beet seeds with a centrifugal pelletizer with a blade reflector. Monograph]. Gorki, BGSKhA. 2017. 180 p. (In Rus.)
3. Andreev S.A., Sudnik Yu.A., Anashin D.V., Balan A.V. Ustroystvo dlya drazhivaniya semyan [Seed pelletizer]. Patent No. 171156 Russian Federation IPC A01C1/06 (2006.01), 2017. Applied on September 14, 2016; issued on May 23, 2017. Bul. No. 15. (In Rus.)
4. Andreev S.A., Balan A.V. Drazhivanie semyan v nepreryvnom rezhime [Continuous seed pelleting]. *Innovatsionnye nauchnye issledovaniya: teoriya, metodologiya, praktika: Sbornik statey VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: In 2 Vol., Vol. 2*. Penza, MTsNS "Nauka i Prosveshcheniye", 2017: 35-40. (In Rus.)
5. Sharkov G.A., Andreev S.A., Sabetov A.N. Sovetuem: drazhiruyte semena [Our advice is to pellet the seeds]. *Priusadebnoe khozyaystvo*, 1986; 5: 33-34. (In Rus.)
6. Popov V.L., Peakhie S.G., Shilko E.V. et al. Issledovanie zavisimosti koeffitsiyenta treniya v sisteme "rel's-koleso" kak funktsii parametrov materiala i nagruzheniya [Study of the relationship between the friction coefficient in rail-wheel systems as a function of material and load parameters]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2002; 5(3): 17-25. (In Rus.)

Contribution

S.A. Andreev, V.V. Dubov performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. S.A. Andreev, V.V. Dubov 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 22.11.2021

Approved after reviewing 21.04.2022

Accepted for publication 22.04.2022



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.316.022

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-33-39

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ОРГАНА ДЛЯ МЕЛКОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ

КАМБУЛОВ СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ, *д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник¹, профессор²*
 kambulov.s@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8712-1478>

БОЖКО ИГОРЬ ВЛАДИМИРОВИЧ , *канд. техн. наук, старший научный сотрудник¹*
 i.v.bozhko@mail.ru ; <https://orcid.org/0000-0002-8423-4079>

БАБЕНКО ОЛЬГА СЕРГЕЕВНА, *ассистент²*
 lelya.babenko.90@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0563-8639>

ПАРХОМЕНКО ГАЛИНА ГЕННАДЬЕВНА, *канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник¹*
 parkhomenko.galya@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1944-216X>

¹ Аграрный научный центр «Донской»; 347740, Российская Федерация, Ростовская область, г. Зерноград, ул. им. Ленина, 14

² Донской государственный технический университет; 344003, Российская Федерация, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

Аннотация. Мелкая обработка почвы в технологическом процессе возделывания сельскохозяйственных культур является одной из ключевых операций по подготовке почвы к посеву. С целью установления оптимальных параметров рабочего органа для мелкой обработки почвы разработана конструкция с возможностью использования различных основных исполнительных элементов (плоскорезущей лапы и накладки стойки). Критерием оптимизации параметров рабочего органа являлось тяговое сопротивление. Проведены экспериментальные исследования в полевых условиях. Определение оптимальных параметров функционирования рабочего органа для мелкой обработки почвы производилось по стерневому фону озимой пшеницы после обработки дисками в один след. Методика проведения экспериментальных исследований основывалась на планировании многофакторного эксперимента. За основные изменяющиеся факторы в экспериментальных исследованиях приняты угол раствора лемехов плоскорезущей лапы рабочего органа, угол заточки стойки рабочего органа и глубина обработки почвы рабочим органом. В ходе обработки данных и проведения расчетов получено уравнение регрессии, позволяющее производить расчет тягового сопротивления в зависимости от заданных параметров рабочего органа и глубины обработки почвы. В результате экспериментальных исследований в диапазоне исследуемых скоростей 6,84...11,37 км/ч определены оптимальные параметры рабочего органа: угол раствора лемехов плоскорезущей лапы (104°) и угол заточки стойки рабочего органа (50°). При скорости обработки почвы 8,20 км/ч наименьшее тяговое сопротивление, создаваемое одним рабочим органом шириной захвата 0,5 м, на глубине обработки 8 см достигает 1,902 кН, при 12 см – 2,482 кН, а при 16 см – 4,758 кН. Полученные данные могут быть использованы при проектировании рабочих органов и сельскохозяйственных машин для мелкой обработки почвы.

Ключевые слова: оптимальные параметры, рабочий орган, мелкая обработка почвы, тяговое сопротивление, многофакторный эксперимент, угол заточки стойки, угол раствора лемехов плоскорезущей лапы.

Формат цитирования: Камбулов С.И., Божко И.В., Бабенко О.С., Пархоменко Г.Г. Результаты исследований по определению оптимальных параметров рабочего органа для мелкой обработки почвы // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 3. С. 33-39. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-33-39>.



© Камбулов С.И., Божко И.В., Бабенко О.С., Пархоменко Г.Г., 2022



ORIGINAL PAPER

RESEARCH RESULTS ON DETERMINING THE OPTIMAL PARAMETERS OF THE WORKING TOOL FOR SHALLOW TILLAGE

SERGEY I. KAMBULOV, *DSc (Eng), Associate Professor, Chief Research Associate¹, Professor²*
 kambulov.s@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8712-1478>

IGOR V. BOZHKO , *PhD (Eng), Senior Research Associate¹*
 i.v.bozhko@mail.ru ; <https://orcid.org/0000-0002-8423-4079>

OLGA S. BABENKO, *Assistant²*
 lelya.babenko.90@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0563-8639>

GALINA G. PARKHOMENKO, *PhD (Eng), Lead Research Associate¹*
 parkhomenko.galya@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1944-216X>

¹ Agricultural Research Center “Donskoy”; 14, Lenina Str., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russian Federation

² Don State Technical University; 1 Gagarina Sq., Rostov-on-Don, Rostov Region, 344003, Russian Federation

Abstract. At present, shallow tillage plays a leading role in the technological process of cultivating agricultural crops, as it is one of the key operations in soil preparing for sowing. To establish the optimal parameters of the working tool for shallow tillage, the authors

designed the tool capable of using various main operating elements (a flat hoe and a post lining). The main criterion for optimizing the parameters of the working tool was the traction resistance. Experimental studies were carried out in the field conditions. The optimal operating parameters of the working tools for shallow tillage were determined against the stubble background of winter wheat after its disc plowing in one track. The experimental research methodology included planning a multi-factorial experiment. The main changing factors included: the share opening angle of the flat hoe of the working tool; the sharpening angle of the working tool post and the soil cultivation depth by the working tool. Based on data processing and analysis, the authors obtained a regression equation, which helps calculate the traction resistance depending on the specified parameters of the working tool and the soil cultivation depth. As a result of experimental studies, the optimal parameters of the working tool were determined: the share opening angle of the flat hoe $g = 104^\circ$, as well as the sharpening angle of the working tool post $f = 50^\circ$. At a tillage speed of 8.20 km/h, the minimum traction forces generated by a single working tool with an operating width of 0.5 m at the depth of 8 cm is 1.902 kN, at 12 cm – 2.482 kN and at 16 cm – 4.758 kN. The data obtained can be used in the design of working tools and agricultural machines for shallow soil cultivation.

Key words: optimal parameters, working tool, shallow tillage, traction resistance, multi-factorial experiment, sharpening angle of the working tool post, share opening angle of a flat hoe.

For citation: Kambulov S.I., Bozhko I.V., Babenko O.S., Parkhomenko G.G. Research results on determining the optimal parameters of the working tool for shallow tillage. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(3): 33-39. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-33-39>.

Введение. Мелкой обработкой почвы принято считать обработку поверхностного слоя почвы на глубину до 16 см. К операциям мелкой и поверхностной обработки почвы относятся лущение, боронование, культивация, прикатывание.

Тяговое сопротивление, создаваемое почвообрабатывающими машинами для мелкой обработки почвы, рассматривалось многими авторами. Результаты исследования [1] подтверждают наибольшее влияние глубины обработки почвы на тяговое сопротивление рабочего органа для мелкой обработки почвы по сравнению с углом установки и поступательной скоростью движения агрегата.

Существенная экономия энергозатрат может быть получена путём выбора энергоэффективных почвообрабатывающих орудий [2, 3]. Авторами [4] разработана модель для исследования взаимодействия рабочего органа с почвой в конкретных экспериментальных условиях.

Общее уравнение регрессии для определения тягового сопротивления с использованием двух независимых переменных (скорости и глубины) можно использовать для прогнозирования необходимой тяги энергосредства при проектировании почвообрабатывающих орудий [5]. По данным авторов, значительное увеличение тягового сопротивления при уровне

значимости 0,05 наблюдалось для почвообрабатывающих рабочих органов с увеличением глубины и скорости.

Авторами [6, 7] подтверждено значительное увеличение тягового сопротивления почвообрабатывающих рабочих органов с ростом глубины и скорости. Установлены [8-10] зоны рыхления культиваторных лап, а также качественные показатели рыхлительно-сепарирующих машин.

Необходимо проведение исследований по определению оптимальных параметров рабочих органов для мелкой обработки почвы. Определение оптимальных параметров рабочего органа для мелкой обработки почвы позволит сократить затраты энергоресурсов при проведении технологической операции обработки почвы, а также позволит более рационально использовать энергоресурсы тракторов различного класса тяги при проектировании почвообрабатывающих машин различной ширины захвата.

Цель исследований: определить оптимальные параметры рабочего органа для мелкой обработки почвы, обеспечивающие наименьшее тяговое сопротивление.

Материалы и методы. В отделе механизации растениеводства ФГБНУ «АНЦ «Донской» разработана конструкция рабочего органа для мелкой обработки почвы (рис. 1).

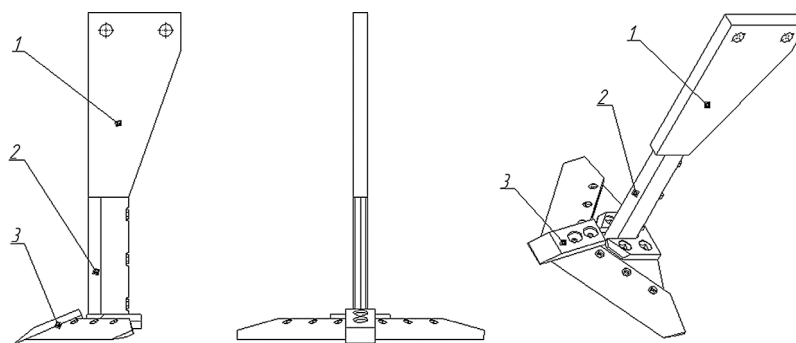


Рис. 1. Рабочий орган для мелкой обработки почвы:
1 – стойка рабочего органа; 2 – накладка; 3 – плоскорежущая лапа

Fig. 1. Working tool for shallow tillage:
1 – working tool post; 2 – lining; 3 – flat hoe

Основные исполнительные элементы рабочего органа, накладка и плоскорежущая лапа выполнены в различных конструктивных параметрах. Для установления оптимального угла заточки стойки рабочего органа накладки

выполнены в диапазоне $30...70^\circ$, для установления оптимального угла раствора лемехов плоскорежущей лапы – в диапазоне $94...114^\circ$ (рис. 2). Выбор данных диапазонов углов заточки стойки рабочего органа, а также углов

раствора лемехов плоскорежущей лапы основывался на многолетних исследованиях по разработке конструкций рабочих органов почвообрабатывающих машин, так

как эти параметры оказывают непосредственное влияние на показатель тягового сопротивления, создаваемого рабочим органом.

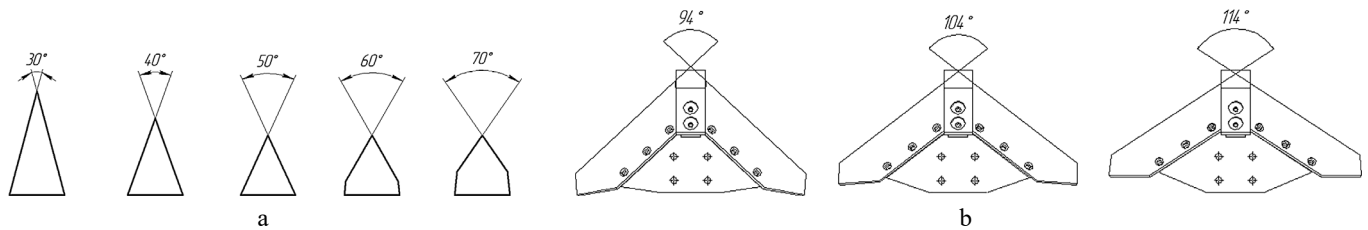


Рис. 2. Исполнительные элементы рабочего органа:

a – накладки с различными углами заточки; b – плоскорежущие лапы с различными углами раствора лемехов

Fig. 2. Operating elements of the working tool:

a – linings with different sharpening angles; b – flat hoes with different share opening angles

Накладка и плоскорежущая лапа рабочего органа выполнены с возможностью замены по мере износа, что в свою очередь указывает на высокий уровень ремонтпригодности предлагаемой конструкции и на снижение трудозатрат при его техническом обслуживании. Исследования по определению оптимальных параметров рабочего органа проводились на экспериментальной установке [11] (рис. 3).

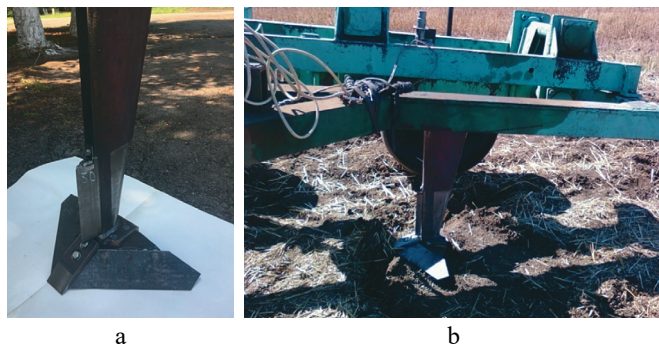


Рис. 3. Рабочий орган (а) и экспериментальная установка (б)

Fig. 3. Working tool (a) and experimental installation (b)

Экспериментальные исследования проводились для всех вариантов накладок и плоскорежущих лап. Определение оптимальных параметров функционирования рабочего органа для мелкой обработки почвы производилось по стерневому фону озимой пшеницы после дискования в один след на глубину до 8 см. Тип почвы по механическому составу: чернозем обыкновенный малогумусный на лессовидных глинах. Микрорельеф поля во время проведения исследований составил: 2,3 см – продольный; 2,4 см – поперечный. Влажность почвы на обрабатываемой глубине – до 30%; твердость почвы – до 2,8 МПа. Исследования проводились на установочных скоростях при работе с культиваторами и составляли: 6,84 км/ч; 8,20 км/ч; 11,37 км/ч.

В качестве измерительного датчика для определения тягового сопротивления используется шарнирное тензометрическое звено, самоустанавливающееся по линии тяги в направлении движения агрегата в механизме крепления экспериментальной установки (рис. 4).

За изменяющиеся факторы в эксперименте были приняты глубина обработки почвы рабочим органом, угол раствора лемехов плоскорежущей лапы рабочего органа и угол заточки стойки рабочего органа.

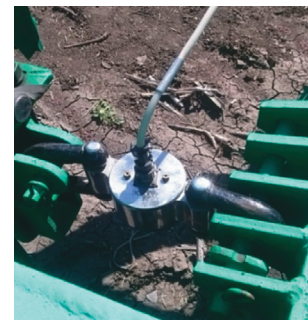


Рис. 4. Тензометрическое звено

Fig. 4. Strain gauge link

Методика экспериментального исследования влияния глубины обработки почвы, угла раствора лемехов плоскорежущей лапы и угла заточки стойки рабочего органа на создаваемое тяговое сопротивление рабочим органом, являющимся критерием оптимизации, основана на планировании многофакторного эксперимента^{1,2}.

Для получения квадратичной модели и нахождения оптимума принят трехуровневый план для трех факторов (план Бокса-Бенкина) (табл. 1).

Перед началом эксперимента факторы кодировались по формулам:

$$\chi_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\varepsilon_i}, \quad (1)$$

где χ_i – кодированное значение фактора; X_i – натуральное значение фактора; X_{0i} – натуральное значение фактора на нулевом уровне; ε_i – натуральное значение интервала варьирования фактора;

$$\varepsilon = \frac{X_{iв} - X_{iн}}{2}, \quad (2)$$

где $X_{iв}$ – натуральное значение фактора на верхнем уровне (+1); $X_{iн}$ – натуральное значение фактора на нижнем уровне (-1).

¹ Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

² Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Изд. второе, перераб. и доп. М.: Наука, 1976. 280 с.

Таблица 1

Обозначения факторов и интервалы варьирования

Table 1

Designations of factors and intervals of variation

Наименование фактора и обозначения <i>Factor name and designation</i>	Обозначение <i>Designation</i>	Уровни варьирования <i>Variation levels</i>			Интервал варьирования фактора <i>Factor variation interval</i>
		-1	0	+1	
Угол раствора лемехов плоскорезущей лапы <i>g</i> , град. <i>Share opening angle of the flat hoes g, degrees</i>	X ₁	94	104	114	10
Угол заточки стойки рабочего органа <i>f</i> , град. <i>Sharpening angle of the working tool post f, degrees</i>	X ₂	30	50	70	20
Глубина обработки почвы <i>h</i> , см / <i>Tillage depth h, centimeters</i>	X ₃	8	12	16	4

Матрица планирования эксперимента согласно плану Бокса-Бенкина в кодированном виде представлена в таблице 2.

Согласно плану эксперимента на установке фиксировалась глубина обработки почвы, а на стойке рабочего органа устанавливались углы заточки стойки и раствора лемехов плоскорезущей лапы, при которых

производились измерения тягового сопротивления при устойчивом режиме работы трактора.

Обработка полученных данных производилась с помощью программ Microsoft Excel и STATISTICA.

Результаты и их обсуждение. В результате проведения экспериментальных исследований были получены данные тягового сопротивления (табл. 2).

Таблица 2

Матрица планирования и результаты эксперимента

Table 2

Planning matrix and experiment results

№ опыта <i>Experiment No.</i>	Значения факторов в закодированном виде <i>Factor values in an encoded form</i>			Значения факторов в натуральном виде <i>Factor values in a natural form</i>			Отклик P _T , кН <i>Response P_T, kN</i>
	X ₁	X ₂	X ₃	<i>g</i> , °	<i>f</i> , °	<i>h</i> , см / <i>centimeters</i>	
1	-1	-1	0	94	30	12	3,87
2	+1	-1	0	114	30	12	4,09
3	-1	+1	0	94	70	12	3,98
4	+1	+1	0	114	70	12	4,49
5	-1	0	-1	94	50	8	2,49
6	+1	0	-1	114	50	8	3,27
7	-1	0	+1	94	50	16	5,36
8	+1	0	+1	114	50	16	6,42
9	0	-1	-1	104	30	8	2,86
10	0	+1	-1	104	70	8	2,49
11	0	-1	+1	104	30	16	4,89
12	0	+1	+1	104	70	16	5,85
13	0	0	0	104	50	12	2,60
14	0	0	0	104	50	12	2,57
15	0	0	0	104	50	12	2,63

Эмпирическое уравнение регрессии представим в виде полинома второй степени:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2.$$

Последующая обработка экспериментальных данных заключалась в определении значимости коэффициентов уравнения регрессии. Для этого доверительный интервал

рассчитывали при табличном значении критерия Стьюдента по формуле:

$$\pm \Delta b_i = \pm t \cdot (S_{b_i})^2, \tag{3}$$

где Δb – доверительный интервал для коэффициентов регрессии; t – табличное значение критерия Стьюдента; S_{b_i} – квадратичная ошибка коэффициентов уравнения регрессии.

Значения коэффициентов уравнения регрессии и проверка значимости коэффициентов по критерию Стьюдента представлены в таблице 3.

Анализ значимости коэффициентов математической модели по критерию Стьюдента при 5%-ном уровне

значимости (табл. 3) позволяет сделать вывод о том, что полученные расчетные значения показателей больше критического (квантиль), а число значимых коэффициентов в модели составляет 9, то есть все коэффициенты являются значимыми.

Таблица 3

Результаты проверки значимости коэффициентов математической модели по критерию Стьюдента

Table 3

Results of checking the significance of the coefficients of the mathematical model according to the Student's t-test

Коэффициент регрессии <i>Regression coefficient</i>	Значение коэффициента регрессии в закодированном виде <i>Value regression coefficient in an encoded form</i>	Расчетное <i>t</i> <i>Estimated t</i>	Табличное <i>t</i> _{кр} <i>Tabular t_{cr}</i>
b_0		4,1716	2,16
b_1		0,3202	
b_{11}		-0,4661	
b_2		0,1378	
b_{22}		-0,2854	
b_3		1,4262	
b_{33}		-0,4244	
b_{12}		0,0733	
b_{13}		0,0722	
b_{23}		0,3323	

Таким образом, математическая модель в закодированном виде представлена следующим образом:

$$y = 4,1716 + 0,3202X_1 + 0,1378X_2 + 1,4262X_3 + 0,0733X_{12} + 0,0722X_{13} + 0,3323X_{23} - 0,4661X_1^2 - 0,2854X_2^2 - 0,4244X_3^2. \quad (4)$$

Для оценки значимости уравнения регрессии произведем проверку гипотезы о равенстве нулю коэффициента детерминации $R^2 (b_1 = b_2 = \dots = b_m = 0)$ с использованием *F*-критерия Фишера, вычисленного через коэффициент детерминации, зависящего от данных исследуемого процесса. Расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии, дисперсия и коэффициент детерминации представлены в таблице 4.

Анализ данных таблицы 4 по критерию Фишера позволяет сделать заключение о том, что $F_{\text{расч.}} > F_{\text{табл.}}$. Следовательно, взаимосвязь между глубиной обработки почвы, углом раствора лемехов плоскорежущей лапы и углом заточки стойки значима на 5%-ном уровне значимости. Судя по коэффициенту детерминации $R^2 = 0,97596$ вариация тягового сопротивления на 97% связана с действием изучаемых факторов и 3% вариации не может быть объяснено влиянием этих переменных.

Таким образом, уравнение регрессии в натуральном виде выглядит следующим образом:

$$P_T = 113,3438 - 1,9471 \cdot g - 0,2237 \cdot f - 1,3121 \cdot h + 0,0004 \cdot g \cdot f + 0,0018 \cdot g \cdot h + 0,0042 \cdot f \cdot h + 0,0093 \cdot g^2 + 0,0014 \cdot f^2 + 0,0530 \cdot h^2, \quad (6)$$

где P_T – тяговое сопротивление, создаваемое рабочим органом, кН; g – угол раствора лемехов плоскорежущей лапы, град.; f – угол заточки стойки рабочего органа, град.; h – глубина обработки почвы, см.

Таблица 4
Расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии, дисперсия и коэффициент детерминации

Table 4

Calculated values of the regression equation coefficient, dispersion, and determination coefficient

Коэффициент регрессии <i>Regression coefficient</i>	Значение коэффициента регрессии <i>Value regression coefficient</i>	Дисперсия <i>Dispersion</i>
b_0	113,3438	
b_1	-1,9471	0,8205
b_{11}	0,0093	3,2092
b_2	-0,2237	0,1518
b_{22}	0,0014	1,2030
b_3	-1,3121	16,2735
b_{33}	0,0530	2,6601
b_{12}	0,0004	0,0215
b_{13}	0,0018	0,0209
b_{23}	0,0042	0,4416
$S_{\text{ал.}}^2$		0,0685
$S_{\text{воспр.}}^2$		0,0009
$F_{\text{расч.}}$		76,12
$F_{\text{табл.}}$		3,59
R^2		0,97596

Для определения значений факторов, при которых тяговое сопротивление имеет наименьшее значение (искомый оптимум), брали частные производные по X_i . Решением полученной системы уравнений являются текущие

значения факторов X_i , при которых тяговое сопротивление P_T достигает минимального значения. Расчеты показали, что при значениях факторов $g = 102,5615^\circ$, $f = 52,7848^\circ$ и $h = 8,5548$ см тяговое сопротивление составит: $P_T = 1,859$ кН.

Получившееся уравнение регрессии в виде трехмерной поверхности отклика от взаимодействия факторов представлено на рисунке 5.

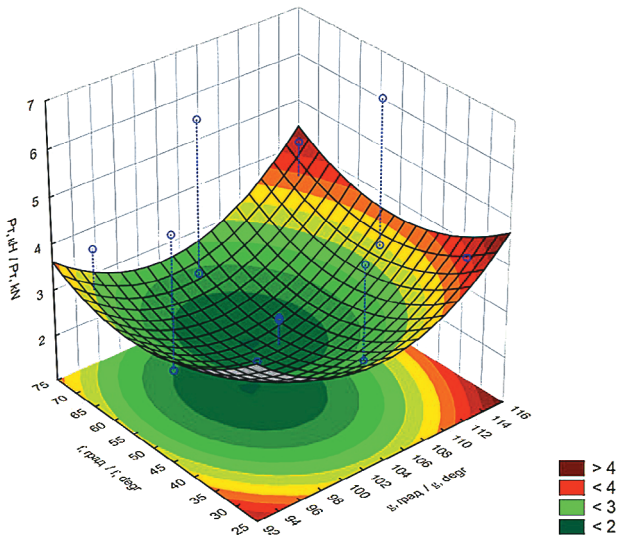


Рис. 5. Поверхность отклика тягового сопротивления, создаваемого рабочим органом

Fig. 5. Response surface of the traction resistance offered by the working tool

Для получения поверхности отклика при трех значимых факторах фактор глубины обработки почвы h фиксировался на уровне 8 см. Поверхность отклика построена для скорости 8,20 км/ч.

Библиографический список

1. Moeenifar A., Mousavi-Seyedi S.R., Kalantari D. Influence of tillage depth, penetration angle and forward speed on the soil/thin-blade interaction force. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2014; 16 (1): 69-74.
2. Ranjbarian S., Askari M., Jannatkah J. Performance of tractor and tillage implements in clay soil. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2017; 16 (2): 154-162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2015.05.003>
3. Askari M., Khalifahamzheghasem S. Draft force inputs for primary and secondary tillage implements in a clay loam soil. *World Applied Sciences Journal*, 2013; 21 (12): 1789-1794. <http://dx.doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.21.12.25>
4. Akbarnia A., Mohammadi A., Farhani F. et al. Simulation of draft force of winged share tillage tool using artificial neural network model. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2014; 16 (4): 57-65.
5. Okoko P., Ajav E.A., Olosunde W.A. Draft and power requirements for some tillage implements operating in clay loam soil. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2018; 20 (1): 95-102.
6. Shahgholi G., Kanyawi N., Kalantari D. Modeling the Effects of Narrow Blade Geometry on Soil Failure Draught and Vertical Forces Using Discrete Element Method. *Yuzuncu*

Стоит учесть, что данные значения факторов лежат в области средних интервалов варьирования параметров рабочего органа $g = 104^\circ$, $f = 50^\circ$ и принимаются за оптимальные значения. Поскольку мелкая обработка почвы выполняется на глубину 8...16 см в соответствии с агротехническими требованиями, то с учётом вышеуказанных параметров рабочего органа тяговое сопротивление составит: $P_T = 1,902$ кН при $h = 8$ см; $P_T = 2,482$ кН при $h = 12$ см; $P_T = 4,758$ кН при $h = 16$ см.

В ходе исследований также установлено, что рабочий орган с углом заточки стойки 50° и 70° и углом раствора лемехов плоскорежущей лапы 94° , 104° и 114° соответствует предъявляемым агротехническим требованиям по всем качественным показателям технологического процесса мелкой обработки почвы (8...16 см). Эти параметры рабочего органа рекомендуются в качестве рациональных значений.

Выводы

1. Наименьшее тяговое сопротивление, создаваемое рабочим органом для мелкой обработки почвы, наблюдается при угле раствора лемехов плоскорежущей лапы, равном 104° , и угле заточки стойки 50° , при всем диапазоне исследуемых скоростей 6,84...11,37 км/ч.
2. При данных параметрах на глубине обработки 8 см тяговое сопротивление составит 1,902 кН, на глубине 12 см – 2,482 кН, а при глубине обработки 16 см – 4,758 кН. Данные показатели тягового сопротивления установлены при скорости обработки почвы 8,20 км/ч. Данные тягового сопротивления получены для одного рабочего органа с шириной захвата 0,5 м.
3. Полученные данные оптимальных параметров рабочих органов могут быть использованы при проектировании почвообрабатывающих машин для мелкой обработки почвы.

References

1. Moeenifar A., Mousavi-Seyedi S.R., Kalantari D. Influence of tillage depth, penetration angle and forward speed on the soil/thin-blade interaction force. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2014; 16(1): 69-74.
2. Ranjbarian S., Askari M., Jannatkah J. Performance of tractor and tillage implements in clay soil. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2017; 16(2): 154-162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2015.05.003>
3. Askari M., Khalifahamzheghasem S. Draft force inputs for primary and secondary tillage implements in a clay loam soil. *World Applied Sciences Journal*, 2013; 21 (12): 1789-1794. <http://dx.doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.21.12.25>
4. Akbarnia A., Mohammadi A., Farhani F., Alimardani R. Simulation of draft force of winged share tillage tool using artificial neural network model. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2014; 16(4): 57-65.
5. Okoko P., Ajav E.A., Olosunde W.A. Draft and power requirements for some tillage implements operating in clay loam soil. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2018; 20(1): 95-102.
6. Shahgholi G., Kanyawi N., Kalantari D. Modeling the Effects of Narrow Blade Geometry on Soil Failure Draught and Vertical Forces Using Discrete Element Method. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*, 2019; 29(1): 24-33. <http://dx.doi.org/10.29133/yyutbd.429950>
7. Al-Suhaibani S.A., Al-Janobi A.A., Al-Majhadi Y.N. Development and evaluation of tractors and tillage implements instrumentation

Yil University Journal of Agricultural Sciences, 2019; 29 (1): 24-33. <http://dx.doi.org/10.29133/yutbd.429950>

7. Al-Suhaibani S.A., Al-Janobi A.A., Al-Majhadi Y.N. Development and evaluation of tractors and tillage implements instrumentation system. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2010; 3 (2): 363-371. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2010.363.371>

8. Василенко В.В., Василенко С.В., Борзило В.С. Зона рыхления почвы культиваторной лапой // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. № 4. С. 48-52. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-4-48-52>

9. Сыромятников Ю.Н. Показатели качества работы почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. № 3. С. 38-44. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-3-38-44>

10. Волик Б.А., Лепеть Є.І., Коновий А.В. Метод гідродинамічних аналогій в системі модельних досліджень ґрунтообробних машин // *Інженерія природокористування*. 2018. № 2 (10). С. 45-48.

11. Божко І.В., Пархоменко Г.Г., Громаков А.В., Максименко В.А., Камбулов С.І. Експериментальна установка для дослідження почвообрабатывающих рабочих органов // *Тракторы и сельхозмашины*. 2017. № 6. С. 37-42.

Критерии авторства

Камбулов С.И., Божко И.В., Бабенко О.С., Пархоменко Г.Г. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Камбулов С.И., Божко И.В., Бабенко О.С., Пархоменко Г.Г. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 19.11.2021

Одобрена после рецензирования 25.05.2022

Принята к публикации 26.05.2022

system. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2010; 3(2): 363-371. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2010.363.371>

8. Vasilenko V.V., Vasilenko S.V., Borzilo V.S. Zona rykhleniya pochvy kul'tivatornoj lapoy [Zone of soil loosening with a cultivator tine]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*, 2018; 12 (4): 48-52. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-4-48-52> (In Rus.).

9. Syromyatnikov Yu.N. Pokazateli kachestva raboty pochvoobrabatyvayushchey rykhlytel'no-separiruyushchey mashiny [Performance quality indicators of a soil-cultivating loosening-separating machine]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*, 2018; 12(3): 38-44. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-3-38-44> (In Rus.)

10. B.A. Volik, A.I. Lepet, A.V. Konovy. Metod hidrodynamichnykh analogiy v systemi model'nykh doslidzheny hruntoobrobnykh mashyn [Method of hydrodynamic analogies in the systems of model preliminaries of soil-tilling machines]. *Inzheneriya pryrodokorystuvannya*, 2018; 2 (10): 45-48. (In Ukr.).

11. Bozhko I.V., Parkhomenko G.G., Gromakov A.V., Maksimenko V.A., Kambulov S.I. Eksperimental'naya ustanovka dlya issledovaniya pochvoobrabatyvayushchikh rabochikh organov [Experimental installation for studying tillage working units]. *Traktory i sel'khoz mashiny*, 2017; 6: 37-42. (In Rus.).

Contribution

S.I. Kambulov, I.V. Bozhko, O.S. Babenko, G.G. Parkhomenko performed theoretical studies and, based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. S.I. Kambulov, I.V. Bozhko, O.S. Babenko, G.G. Parkhomenko 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 19.11.2021

Approved after reviewing 25.05.2022

Accepted for publication 26.05.2022

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.35

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-40-44

МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМА КОПИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ПОЛЯ

ЩИГОЛЕВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент

shchigolev@rgau-msha.ru

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

Аннотация. Значительная часть потерь при уборке урожая современными комбайнами обусловлена несовершенством систем копирования рельефа поля. В результате анализа и обзора патентов по механизмам копирования рельефа поля жатками комбайнов, выявления основных преимуществ и недостатков этих устройств автором предлагается вариант дооснащения наиболее распространённой рычажно-пружинной системы копирования, обеспечивающей автоматическую корректировку высоты среза при выходе за предусмотренные заводом-изготовителем пределы копирования. Устройство состоит из двух основных частей, одна из которых крепится на корпус наклонной камеры, а вторая – на верхний несущий брус жатки. В конструкции устройства имеются два магнитоконтактных датчика, подключаемых к электрической системе управления положением жатки. При работе жатки в пределах заложенного в её конструкцию диапазона копирования рычажно-пружинная система работает в обычном режиме, позволяя жатке огибать неровности поля и поддерживать заданное давление опорных башмаков на грунт. При смещении жатки к границе диапазона копирования происходит замыкание соответствующего датчика управления гидросистемой и выполняется автоматическое изменение высоты наклонной камеры, что исключает галопирование жатки или зарывание опорных башмаков в почву. Предлагаемый вариант модернизированного механизма копирования рельефа не требует значительных затрат, позволяет снизить трудоёмкость управления комбайном, способствует повышению его среднесменной производительности и снижению потерь урожая ввиду запоздалых реакций оператора на изменение рельефа местности.

Ключевые слова: рельеф поля, механизм копирования, потеря урожая, жатка комбайна.

Формат цитирования: Щиголев С.В. Модернизация механизма копирования рельефа поля // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 3. С. 40-44. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-40-44>.

© Щиголев С.В., 2022



ORIGINAL PAPER

MODERNIZED VERSION OF THE FIELD RELIEF COPYING MECHANISM

SERGEY V. SHCHIGOLEV, PhD (Eng), Associate Professor

shchigolev@rgau-msha.ru

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

Abstract. A significant part of the losses during harvesting by modern combines is caused by the imperfect systems for copying the field terrain. After analyzing and reviewing patents of the mechanisms for copying the field topography by harvester headers, identifying the main advantages and disadvantages of these devices, the author proposes a variant of retrofitting the most common lever-spring copying system that provides automatic adjustment of the cutting height when it goes beyond the copying limits provided by the manufacturer. The device consists of two main parts, one of which is attached to the body of the feeder house, and the second – to the upper bearing bar of the header. The device has two magnetic contact sensors connected to the electric control system of the header position. When the header is operating within the prescribed range of copying, the lever-spring system operates in the normal mode, allowing the header to go around field irregularities and maintain the specified pressure of the support shoes on the ground. When the header moves to the limit of the copy range, the corresponding hydraulic system control sensor is closed and the feeder house height is automatically changed, which prevents the header from galloping or digging the support shoes into the soil. The proposed version of the upgraded terrain copying mechanism does not require significant costs, reduces the complexity of the combine control, improves its average shift productivity and reduces crop losses due to the operator's belated reactions to changes in terrain.

Key words: field relief pattern, copying mechanism, crop loss, combine harvester.

For citation: Shchigolev S.V. Modernized version of the field relief copying mechanism. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(3): 40-44. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-40-44>.

Введение. Производство сельскохозяйственной продукции требует от организаторов и исполнителей выполнения работ в агросроки имеющейся в хозяйстве

техникой и штатным персоналом, обеспечения требуемого качества выполнения работ, снижения потерь урожая и т.п. Известно [1], что потери при уборке зависят

от биологических особенностей возделываемой культуры, условий проведения уборки, совершенства организации уборочного процесса и др.

Объем потерь при уборке во многом определяется эффективностью работы зерноуборочных комбайнов, выполняющих операции по отделению зерна от остальных частей растения. Современные модели этих машин характеризуются высокой производительностью, обусловленной совершенством конструкции элементов молотилки [2-4], но реализовать свои возможности комбайн сможет лишь в случае подачи в молотилку достаточного количества растительной массы, что возможно при уборке высокоурожайных культур, использовании широкозахватных жаток, работы на высоких скоростях [5]. Реализация этих условий часто усложнена ввиду низкой урожайности культур, недостаточной выравненности полей и сложной их конфигурации, слабой обеспеченности многих хозяйств техникой¹. Например, средняя урожайность зерновых и зернобобовых культур в Российской Федерации в 2015-2020 гг. составляла лишь 24...29 ц/га¹, доля полей с урожайностью выше 30 ц/га редко превышает 20% [6].

Известно, что требования на комбайновую уборку зерновых колосовых культур допускают до 2% потерь урожая, причём 1,5% – это потери за молотилкой, 0,5% – потери за жаткой [7]. В настоящее время указанные требования часто не соблюдаются. Значительная часть потерь у современного комбайна приходится именно на жатку [1], что обусловлено как работой на высоких скоростях, в результате чего наблюдаются значительные отклонения растений перед срезом и происходит усиление ударов планками мотвила по колосьям, так и несовершенством систем копирования рельефа поля [5].

Цель исследований: обоснование конструкции устройства автоматического управления работой рычажно-пружинного механизма копирования рельефа, снижающего нагрузку на комбайнера, а также способствующего сокращению потерь урожая ввиду запоздалых реакций оператора на изменение рельефа местности.

Материалы и методы. Проанализированы конструкции механизмов копирования рельефа поля, используемые на современных зерноуборочных комбайнах, и выявлены основные преимущества и недостатки этих устройств. Предложена конструкция механизма автоматического копирования рельефа поля.

Результаты и их обсуждение. У современных зерноуборочных комбайнов копирование рельефа поля жаткой выполняется как в продольном, так и в поперечном направлениях. Для этого машины оборудуются специальными механизмами, которые обеспечивают перемещение корпуса жатки относительно наклонной камеры в зависимости от особенностей рельефа поля.

На современных комбайнах зарубежного производства (Claas, John Deere и др.), а также на некоторых комплектациях отечественных комбайнов (Acros 595 Plus, Tolum 750/785) используют системы копирования рельефа, оснащённые многоконтурными гидравлическими системами с электрическим управлением, позволяющими регулировать наклон жатки и высоту среза. Жатки с такими

системами оказывают минимальное давление на почву, так как контактируют с ней лишь прутковыми датчиками, отслеживающими расстояние от днища до поверхности поля. В результате повторение жаткой изменяющегося рельефа поля происходит без галоирования или зарывания в грунт. Кроме того, рассматриваемые системы копирования позволяют облегчить труд комбайнера, особенно при использовании широкозахватных жаток, поскольку автоматически устанавливают жатку в оптимальное положение по отношению к наклонной камере. Но и эти устройства имеют недостатки, к которым относят значительную стоимость, сложность конструкции. Кроме того, в ряде случаев электрогидравлические механизмы не обеспечивают требуемое качество копирования при работе на высоких скоростях на полях с плохо выровненной поверхностью [5, 8].

На наиболее распространённых моделях отечественных и зарубежных комбайнов (Nova 320, Vector 410, Acros 550, КЗС-1218 и др.) применены рычажно-пружинные механизмы копирования рельефа поля [7, 9]. Эти механизмы состоят из блоков спиральных пружин, рычагов и подвесок, установленных на наклонной камере («Нива», «Vector», «Acros» и др.) или на жатке («Дон»). Такая конструкция путем натяжения блоков пружин позволяет уравновесить обе стороны жатки относительно шарнира её присоединения к наклонной камере и отрегулировать необходимое давление на опорные башмаки или колеса. При работе комбайна, оборудованного таким механизмом, жатка имеет возможность перемещения относительно центрального сферического шарнира наклонной камеры в продольном и поперечном направлениях, что позволяет обеспечить качественное копирование рельефа даже на полях с плохо выровненной поверхностью. Однако диапазон копирования рельефа в продольном направлении достаточно узок (как правило, ± 150 мм [5]) и ограничен упорами, при контакте с которыми жатка теряет возможность изменения положения, и тогда могут наблюдаться её вывешивание или зарывание опорных башмаков в почву. В связи с этим требуется повышенное внимание к рычажно-пружинному механизму комбайнера, который вынужден следить за оптимальным положением жатки относительно корпуса наклонной камеры и при необходимости корректировать положение последней, что позволит обеспечить нормальную работу жатки.

Обзор патентов по механизмам копирования рельефа поля жатками комбайнов позволил выявить два направления конструкторских работ: первое – применение управляемых гидравлических систем [10-12]; второе – дооборудование имеющихся рычажно-пружинных механизмов копирования за счёт автоматической корректировки высоты среза при выходе за заданные пределы копирования [13, 14].

Для сокращения потерь урожая ввиду запоздалых реакций оператора на изменение рельефа местности автором предлагается вариант дооснащения системы копирования [15], способный обеспечить автоматическую корректировку высоты среза при выходе за заданные пределы копирования. Кроме того, предложенная модернизация будет способствовать снижению нагрузки на комбайнера, что может положительно повлиять на величину сменной производительности комбайна [16], так как уменьшение количества контролируемых параметров снижает усталость оператора, увеличивая время его устойчивой работоспособности [17].

¹ Россия в цифрах. 2020: Краткий статистический сборник. М.: Росстат, 2020. 550 с.

В предлагаемой конструкции на корпус 1 наклонной камеры (рис. 1а) комбайна, оснащённого рычажно-пружинной системой копирования рельефа, установлено основание 2 (рис. 1б), в шарнирах 3 которого установлена планка 4 из немагнитного материала. В верхней части планки 4 с обеих сторон закреплены удерживающие магниты 5 и 6, а в центральной – два магнитоконтактных датчика 7 и 8, контакты которых разомкнуты при отсутствии воздействия на них магнитного поля. К нижней

части планки 4 с двух сторон прикреплены пружины 9 и 10, удерживающие её в перпендикулярном основанию 2 положении. На верхнем бруске жатки 11 закреплены две параллельные направляющие 12. В их пазах установлены металлические пластины 13 и 14, положение которых можно регулировать. В нижней части пластин 13 и 14 установлены постоянные магниты 15 и 16, обеспечивающие срабатывание магнитоконтактных датчиков 7 и 8 на всём диапазоне поперечного хода жатки.

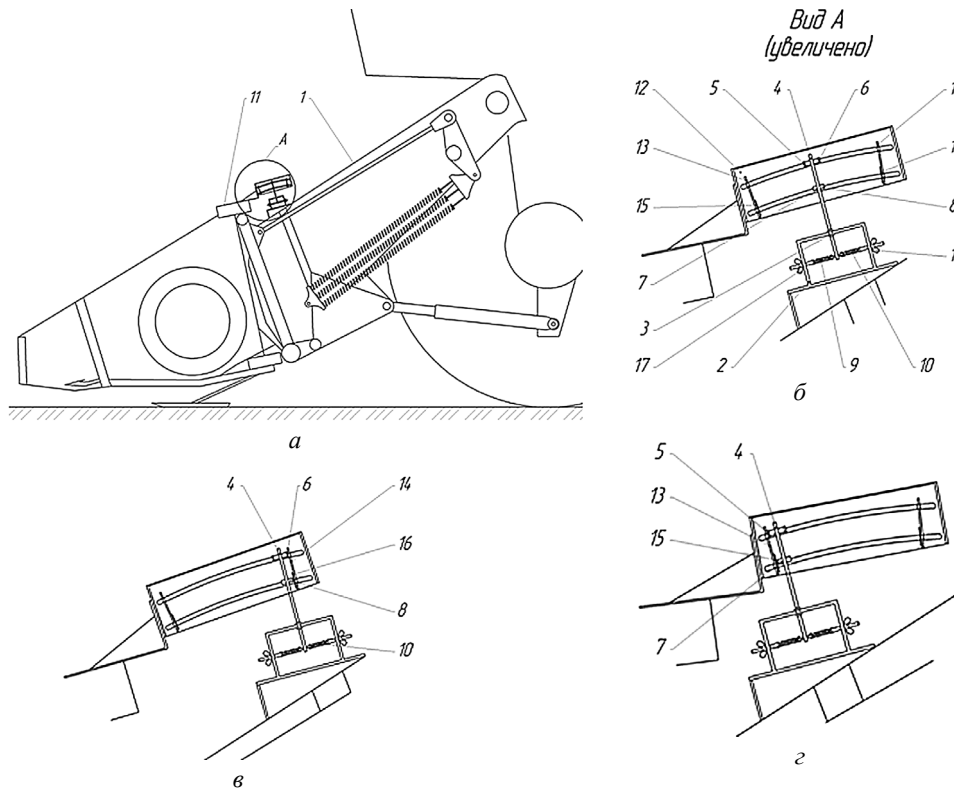


Рис. 1. Расположение механизма копирования рельефа на комбайне (а), начальное положение элементов устройства управления (б), положение элементов в нижнем (в) и верхнем (г) пределах диапазона копирования:

- 1 – корпус наклонной камеры; 2 – основание приспособления; 3 – шарнир; 4 – планка;
- 5 и 6 – удерживающие магниты; 7 и 8 – магнитоконтактные датчики; 9 и 10 – удерживающие пружины;
- 11 – брус жатки; 12 – направляющая; 13 и 14 – пластины; 15 и 16 – магниты; 17 и 18 – гайки

Fig. 1. Location of the terrain copying mechanism on the combine (a), the initial position of the elements of the control device (b), the position of the elements in the lower (c) and upper (d) limits of the copy range:

- 1 – body of the inclined chamber; 2 – base of the device; 3 – hinge; 4 – bar; 5 and 6 – holding magnets;
- 7 and 8 – magnetic contact sensors; 9 and 10 – holding springs; 11 – harvester bar; 12 – guide;
- 13 and 14 – plates; 15 and 16 – magnets; 17 and 18 – nuts

Модернизированный механизм копирования рельефа работает следующим образом. При выезде на убираемый участок поля комбайнер должен опустить жатку, оборудованную предлагаемым устройством, на его поверхность, причём зазор между упорами наклонной камеры и верхним брусом жатки должен уменьшиться вдвое от его величины при полностью поднятой жатке (рис. 1б). Такое положение жатки обеспечит ей возможность качания в продольной и поперечной плоскостях относительно центрального шарнира наклонной камеры на равный угол как вверх, так и вниз, позволяя тем самым копировать рельеф поля.

Далее комбайн начинает движение, при этом стандартный рычажно-пружинный механизм копирования обеспечивает срез растений на установленной высоте. При смещении жатки к нижней границе диапазона копирования

зазор между упором наклонной камеры и её верхним брусом увеличивается, стремясь к максимальному значению (рис. 1в). При этом планка 4 предлагаемого устройства приближается к пластине 14 и в итоге прикрепляется к ней удерживающим магнитом 6, а замкнутый полюс магнита 16 контакт датчика 8 включает цепь управления опусканием наклонной камеры, что не позволит опорным башмакам жатки оторваться от поверхности поля. Поскольку для смещения жатки на требуемое расстояние гидросистеме требуется некоторое время, то цепь управления не должна быть разомкнута сразу после начала опускания наклонной камеры, для чего используется магнит 6. Он удерживает планку 4 в прикрепленном к пластине 14 состоянии до тех пор, пока смещение наклонной камеры не вызовет натяжение пружины 10, достаточное для отрыва магнита 6 от пластины 14, что создаст необходимую задержку времени.

При смещении жатки к верхней границе диапазона копирования зазор между упором наклонной камеры и бруском жатки уменьшается, стремясь к минимальному значению (рис. 1з). При этом планка 4 предлагаемого устройства приближается к пластине 13 и прикрепляется к ней магнитом 5, а замкнутый по полю магнита 15 контакт датчика 7 включает цепь управления подъёмом наклонной камеры до тех пор, пока её корпус не займёт нужного положения.

Для обеспечения возможности использования предлагаемого устройства на жатках разного размера предусмотрена возможность регулирования положения пластин 13 и 14 путём перемещения их в пазах направляющих 12. Для установки удобного диапазона срабатывания устройства предусмотрена возможность изменения натяжения пружин 9 и 10 путём закручивания гаек 17 и 18 натяжных устройств.

Перед выполнением манёвров, связанных с принудительным подъёмом жатки (развороты, транспортные переезды, обслуживание комбайна), систему автоматического копирования следует выключить путём отключения подачи электрического сигнала на датчики. Для этого предлагается установить соответствующий выключатель в кабине.

Для настройки предлагаемого механизма копирования на рабочий режим необходимо выполнить следующие действия. Предварительно настроив рычажно-пружинную систему на требуемую высоту среза и давление на почву, при отключенной системе автоматического копирования

следует поднять жатку вверх до отрыва опорных башмаков от почвы. После этого необходимо переместить пластину 14 по пазам направляющих 12 до касания с магнитом 6. Далее при помощи гидравлики требуется опустить наклонную камеру до касания опорными башмаками жатки поверхности поля и натянуть пружину 10 до момента отрыва магнита 6 от пластины 14, при этом пружинной 9 следует обеспечивать ровное положение планки 4. Такая последовательность действий позволит настроить предложенный механизм для работы в нижнем пределе диапазона копирования.

Для настройки срабатывания устройства в верхнем диапазоне копирования нужно полностью опустить жатку на поле до сближения её верхнего бруса с отбойниками наклонной камеры. В таком положении следует отрегулировать положение пластины 13 по аналогии с вышеизложенным.

Выводы

Предлагаемый вариант модернизации имеет незначительную стоимость в сравнении с многоконтурными гидравлическими системами и позволит снизить трудоёмкость управления комбайном с рычажно-пружинным механизмом копирования рельефа поля. Это будет способствовать повышению его среднесменной производительности и снижению потерь в результате несвоевременной реакции комбайнера на критическое изменение рельефа поля.

References

Библиографический список

1. Шуринов В.А., Красневский Л.Г., Камко А.И., Гоман А.М., Леванцевич М.А. Выбор рациональных параметров механизмов уравновешивания жатки зерноуборочного комбайна КЗС-7, обеспечивающих копирование его рельефа почвы без галопирования // Вестник Белорусского национального технического университета. 2006. № 6. С. 21-26.
2. Золотов А.А., Щиголов С.В. Исследование работы очистки зерноуборочного комбайна // Горячкинские чтения: Сборник докладов 1-й Международной научно-практической конференции. М.: МГАУ, 2013. С. 75-80.
3. Щиголов С.В., Золотов А.А. Направления развития барабанно-дековых молотильно-сепарирующих систем современных зерноуборочных комбайнов // Горячкинские чтения: Сборник докладов 1-й Международной научно-практической конференции. М.: МГАУ, 2013. С. 70-75.
4. Бердышев В.Е., Ломакин С.Г., Шевцов А.В. Влияние типа дек на качество работы аксиально-роторной молотильно-сепарирующей системы // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2015. № 1 (65). С. 20-24.
5. Липовцев А.В., Следченко В.А. Проблемы повышения производительности зерноуборочного комбайна // Проблемы совершенствования машин, оборудования и технологий в агропромышленном комплексе: Сборник материалов Международной научно-технической конференции. Воронеж, 2019. С. 14-17.
6. Ломакин С.Г., Бердышев В.Е. Условия уборки зерна в Российской Федерации и обеспеченность сельскохозяйственных предприятий зерноуборочными комбайнами // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2016. № 4 (74). С. 20-24.
7. Кленин Н.И., Киселёв С.Н., Левшин А.Г. Сельскохозяйственные машины. М.: КолосС, 2008. 816 с.

1. Shurinov V.A., Krasnevskiy L.G., Kamko A.I., Goman A.M., Levantsevich M.A. Vybora ratsional'nykh parametrov mekhanizmov uravnovesivaniya zhatki zernouborochnogo kombayna KZS-7, obespechivayushchikh kopirovaniye eyu rel'efa pochvy bez galopirovaniya [Rationalizing the parameters of balancing mechanisms for harvester harvester KZS-7, providing copying of soil relief without galloping]. *Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006; 6: 21-26. (In Rus.)
2. Zolotov A.A., Shchigolev S.V. Issledovanie raboty ochistki zernouborochnogo kombayna [Study of the cleaning processes in a combine harvester]. *Goryachkinskie chteniya: Sbornik dokladov 1-oy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Moscow, MGAU, 2013: 75-80. (In Rus.)
3. Shchigolev S.V., Zolotov A.A. Napravleniya razvitiya barabanno-dekovykh molotil'no-separiruyushchikh sistem sovremennykh zernouborochnykh kombaynov [Development trends concerning drum-deck threshing and separating systems of modern combine harvesters]. *Goryachkinskie chteniya: Sbornik dokladov 1-oy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Moscow, MGAU, 2013: 70-75. (In Rus.)
4. Berdyshev V.E., Lomakin S.G., Shevtsov A.V. Vliyaniye tipa dek na kachestvo raboty aksial'no-rotornoy molotil'no-separiruyushchey sistemy [Influence of the deck type on the quality of the axial-rotary threshing-separating system]. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*, 2015; 1 (65): 20-24. (In Rus.)
5. Lipovtsev A.V., Sledchenko V.A. Problemy povysheniya proizvoditel'nosti zernouborochnogo kombayna [Problems of increasing the productivity of a grain harvester]. *Problemy sovershenstvovaniya mashin, oborudovaniya i tekhnologiy v agropromyshlennom komplekse: Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Voronezh, 2019: 14-17. (In Rus.)
6. Lomakin S.G., Berdyshev V.E. Usloviya uborki zerna v Rossiyskoy Federatsii i obespechennost' sel'skokhozyaystvennykh predpriyatiy zernouborochnymi kombaynami [Grain harvesting conditions in the Russian Federation and the availability of grain harvesters in agricultural enterprises]. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*, 2016; 4(74): 20-24. (In Rus.)

8. Ломакин С.Г. Зерноуборочные комбайны: потребности покупателей, предложения производителей // Аграрное обозрение. 2010. № 4 (20). С. 30-39.

9. Ключков А.В., Адаш А.В., Попов В.А. Зерноуборочные комбайны. Минск: ДизайнПРО, 2004. 240 с.

10. Жатка зерноуборочного комбайна: патент № 2118879 Российская Федерация, МПК А01D42/12, 34/04 / А.В. Шинделов, В.М. Медведчиков, В.И. Воробьев, В.П. Демидов, В.К. Дрожжин; заявл. 27.02.1997; опубл. 20.09.1998.

11. Плавающая система жатки для использования с сельскохозяйственным виндруюэром или комбайном: патент № 2504946 Российская Федерация, МПК А01D41/14(2006.01), А01D41/127(2006.01), А01D75/28(2006.01) / Слоан Чарльз Скотт, Бебернс Томас Д., Парсонз Стивен К., Уилльямс Лари, Николс Том, Ротоул Дэвид В.; заявл. 07.08.2009; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 3.

12. Сельскохозяйственная уборочная машина: патент № 2348 U Республика Беларусь, МПК А 01D41/02 / А.А. Дюжев, В.А. Жмайлик, И.В. Волков, М.А. Савков, Ю.В. Чупрынин; заявл. 31.05.2005; опубл. 30.12.2005; заявл. 03.07.2015; опубл. 27.10.2015, Бюл. № 30.

13. Механизм для копирования рельефа поля жаткой комбайна: патент № 1794370 Союз Советских Социалистических Республик, МПК А01D41/16 (2006.01), А01D41/12 (2006.01) / Н.С. Шмарин; заявл. 19.12.1989; опубл. 15.02.1993, Бюл. № 6.

14. Устройство для автоматического копирования рельефа поля жаткой: патент № 2529576 Российская Федерация, МПК А01D34/02 (2006.01), А01D41/12 (2006.01) / М.В. Канделя, Н.М. Канделя, П.А. Шилько, А.М. Емельянов, В.Н. Рябченко, П.В. Тихончук, С.В. Щитов; заявл. 14.05.2013; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27.

15. Механизм автоматического копирования рельефа поля: патент № 208052 U1 Российская Федерация, МПК А01B63/00 / С.В. Щиголов, И.Н. Гаспарян, А.И. Панов, В.И. Потапов, Б.А. Бицоев, М.А. Мехедов; заявл. 31.08.2021; опубл. 30.11.2021, Бюл. № 34.

16. Левшин А.Г. Инженерно-психологические аспекты определения производительности системы «человек-машина» // Повышение показателей ресурсосбережения машинно-тракторных агрегатов: Сборник научных трудов. М., 1995. С. 108-113.

17. Липкович И.Э., Петренко Н.В. Производительность зерноуборочных агрегатов как человекомашинных систем // Вестник Донского государственного технического университета. 2008. Т. 8. № 3 (38). С. 292-298.

Критерии авторства

Щиголов С.В. выполнил теоретические исследования, на основании полученных результатов провел обобщение и подготовил рукопись. Щиголов С.В. имеет на статью авторские права и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 27.01.2022

Одобрена после рецензирования 15.02.2022

Принята к публикации 19.02.2022

7. Klenin N.I., Kiselev S.N., Levshin A.G. Sel'skokhozyaystvennyye mashiny [Agricultural machines]. Moscow, KolosS, 2008. 816 p. (In Rus.)

8. Sloane Ch.S., Beburns T.D., Parsons S.K., Williams L., Nichols T., Rotoul D.V. Plavayushchaya sistema zhatki dlya ispol'zovaniya s sel'skokhozyaystvennym vindrouerom ili kombaynom [Floating header system to be used with an agricultural windrower or combine]: Patent No. 2504946 Russian Federation, IPC A01D41/14 (2006.01), A01D41/127 (2006.01), A01D75 / 28 (2006.01), 2014. (In Rus.)

9. Klochkov A.V., Adas A.V., Popov V.A. Zernouborochnyye kombayny [Grain harvesters]. Minsk, DesignPRO, 2004. 240 p. (In Rus.)

10. Shindelov A.V., Medvedchikov V.M., Vorobyov V.I., Demidov V.P., Drozhzhin V.K. Zhatka zernouborochnogo kombayna [Header of a grain harvester]: Patent No. 2118879 Russian Federation, MПК А01D42/12, 34/04, 1998. (In Rus.)

11. Sloane Ch.S., Beburns T.D., Parsons S.K., Williams L., Nichols T., Rotoul D.V. Plavayushchaya sistema zhatki dlya ispol'zovaniya s sel'skokhozyaystvennym vindrouerom ili kombaynom [Floating header system to be used with an agricultural windrower or combine]: Patent No. 2504946 Russian Federation, IPC A01D41/14 (2006.01), A01D41/127 (2006.01), A01D75 / 28 (2006.01), 2014. (In Rus.)

12. Dyuzhev A.A., Zhmailik V.A., Volkov I.V., Savkov M.A., Chuprynin Yu.V. Sel'skokhozyaystvennaya uborochnaya mashina [Agricultural harvester]: Patent No. 2348 U Republic of Belarus, IPC A 01D41/02, 2015. (In Rus.)

13. Shmarin N.S. Mekhanizm dlya kopirovaniya rel'yefa polya zhatkoy kombayna [Mechanism for copying the field relief with a harvester header]: Patent No. 1794370 Union of Soviet Socialist Republics, МПК А01D41/16 (2006.01), А01D41 / 12 (2006.01), 1993. (In Rus.)

14. Kandel M.V., Kandel N.M., Shilko P.A., Emelyanov A.M., Ryabchenko V.N., Tikhonchuk P.V., Shields S.V. Ustroystvo dlya avtomaticheskogo kopirovaniya rel'yefa polya zhatkoy [Mechanism for automatic copying of the field relief by the header]: Patent No. 2529576 Russian Federation, IPC А01D34/02 (2006.01), А01D41/12 (2006.01), 2014. (In Rus.)

15. Shchigolev S.V., Gasparyan I.N., Panov A.I., Potapov V.I., Bitsoev B.A., Mekhedov M.A. Mekhanizm avtomaticheskogo kopirovaniya rel'efa polya [Mechanism for the automatic copying of the field relief]: Patent No. 208052 U1 Russian Federation, IPC А01B63/00, 2021. (In Rus.)

16. Levshin A.G. Inzhenerno-psikhologicheskiye aspekty opredeleniya proizvoditel'nosti sistemy "chelovek-mashina" [Engineering and psychological aspects of determining the performance of the "man-machine" system]. *Povysheniye pokazateley resursosberezheniya mashinno-traktornykh agregatov: Sbornik nauchnykh trudov*. Moscow, 1995: 108-113. (In Rus.)

17. Lipkovich I.E., Petrenko N.V. Proizvoditel'nost' zernouborochnykh agregatov kak chelovekomashinnykh sistem [Performance of grain harvesters as human-machine systems]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008; 8 (3): 292-298. (In Rus.)

Contribution

Shchigolev S.V. performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. Shchigolev S.V. has author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 27.01.2022

Approved after reviewing 15.02.2022

Accepted for publication 19.02.2022

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.95

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-45-50

**ИСПЫТАНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ
ДЛЯ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОЗДУХА В ПТИЧНИКЕ****ЮФЕРЕВ ЛЕОНИД ЮРЬЕВИЧ**, *д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник*¹

leouf@yandex.ru

СЕЛЕЗНЕВА ДАРЬЯ МИХАЙЛОВНА , *старший преподаватель*²energo-dms@rgau-msha.ru ¹ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Проблема загрязнения воздуха помещений сельскохозяйственного назначения ведет к уменьшению привеса живой массы животных и птиц, росту заболеваемости, а также к ухудшению санитарных условий труда работников. В воздухе птичников содержатся как пылевые частицы различного происхождения и размеров, так и болезнетворные микроорганизмы и вредные газы. Поэтому к очистке воздуха в птицеводческих помещениях необходимо подходить комплексно. Для решения данной проблемы предложено использовать комбинированную электроустановку для очистки воздуха, в которой используются два метода очистки воздуха: электрофильтрация и ультрафиолетовое излучение. Испытания проводились на двух группах птенцов перепелок по 35 шт. в каждой группе. Содержание птенцов – клеточное в боксе. Концентрацию пылевых частиц в воздухе птичника определяли с помощью ПК-ГТА 0,3-002, параметры и химических состав воздуха – приборами «Метеоскоп-М», «Testo 440» и газоанализатором Н-320. Замер проводился после 3-х ч работы установки в центре помещения на высоте 1 м от пола. Достоверность результатов подтверждена многократной повторностью исследований и воспроизводимостью полученных сведений, использованием общепринятых методов, приборов и математической обработкой результатов. Проведено исследование зависимостей концентрации пылевых частиц, количества газовых составляющих от времени работы комбинированной электроустановки для очистки воздуха, определено влияние санации воздуха на живую массу птиц. Экспериментально установлено, что использование комбинированной электроустановки в боксе с птенцами перепелов привело к уменьшению бактерицидной обсемененности помещения на 59%, снижению концентрации углекислого газа почти на 4% и аммиака на 45% по сравнению с контрольным боксом. Применение комбинированной электроустановки в течение месяца по 3 ч в день позволило увеличить прирост живой массы цыплят на 28-й день на 20,3%.

Ключевые слова: обеспыливание, обеззараживание, электрофильтр, озонирование, ультрафиолетовое излучение, бактерицидная лампа.

Формат цитирования: Юферев Л.Ю., Селезнева Д.М. Испытания комбинированной электроустановки для обеспыливания и обеззараживания воздуха в птичнике // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 3. С. 45-50. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-45-50>.


© Юферев Л.Ю., Селезнева Д.М., 2022



ORIGINAL PAPER

**TESTING A COMBINED ELECTRICAL INSTALLATION
FOR DUST DEPARATION AND AIR DISINFECTION IN A POULTRY HOUSE****LEONID YU. YUFEREV**, *DSc (Eng), Associate Professor, Chief Researcher*¹

leouf@yandex.ru

DARYA M. SELEZNEVA , *Senior Lecturer*²energo-dms@rgau-msha.ru ¹ Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1st Institutsky Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. The problem of air pollution in agricultural premises leads to a decrease in the weight gain of animals and poultry, an increase in morbidity, as well as a deterioration in the sanitary working conditions. The air in poultry houses contains dust particles of various origins and sizes, as well as pathogens and harmful gases. Therefore, air purification in poultry premises must be approached comprehensively. An analysis of the air purification installations used in agricultural premises showed that these installations do not have a high efficiency of dedusting and disinfection at the same time. To solve this problem, the authors propose to use a combined electrical installation for air purification, which uses two electrotechnological methods of air purification – electrofiltration and ultraviolet

radiation. Tests were carried out on two groups of 35 quail chicks in each group. The chicks were kept in a box according to the cage housing method. Concentration of dust particles in the air of the poultry house was determined with PC-GTA 0.3-002, air parameters and chemical composition – with Meteoroscope-M, Testo 440 and H-320 gas analyser. Measurements were taken after 3 hours of operation in the center of the room at a height of 1 m above the floor. The reliability of the results was confirmed by multiple repetitions of studies and reproducibility of the obtained data, the use of conventional methods, devices and mathematical processing of the results. The relationships between the concentration of dust particles, quantity of gas components, and the operating time of the combined electric air-cleaning unit were studied, the effect of air sanitation on the living weight of poultry was determined. It was experimentally established that the use of the hybrid electrical installation in a box with quail chicks led to a decrease in the bactericidal contamination of the room by 59%, the concentration of carbon dioxide by almost 4% and ammonia by 45% as compared with the control box. The use of the proposed installation increased the gain in the live weight of chicken by 20.3% on day 28.

Key words: dedusting, disinfection, electrostatic precipitator, ozonation, ultraviolet radiation, bactericidal lamp.

For citation: Yuferev L. Yu., Selezneva D.M. Testing a combined electrical installation for dust deparation and air disinfection in a poultry house. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(3): 45-50. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-45-50>.

Введение. Для крупных животноводческих и птицеводческих комплексов характерна высокая плотность посадки животных и птиц. Вследствие этого в закрытом помещении, а также за пределами животноводческих и птицеводческих комплексов в воздух выделяется значительное количество различных вредных составляющих (пыль, микроорганизмы, газы).

Концентрация пыли, микроорганизмов и вредодействующих газов (аммиак, сероводород, углекислый газ, кишечные газы и др.) в животноводческих и птицеводческих помещениях зависит от ряда факторов и, как правило, значительно превышает предельно допустимые концентрации (ПДК).

Установлено, что система вентиляции крупных птицеводческих комплексов выбрасывает за 1 ч в окружающую среду до 13,3 кг пыли, 175 млрд бактерий. Системой вентиляции комплекса на 10 тыс. телят за 1 ч в холодное время года удаляется до 6,2 кг пыли, 103,9 млрд микробных тел [1].

Превышение ПДК пыли, микробных тел и газов ведет к росту заболеваемости животных и птиц, нарушению гигиенических условий труда, также негативно влияет на окружающую среду и оборудование.

В большинстве случаев в сельском хозяйстве проблему очистки воздуха решают при помощи вентилирования воздуха. Но важно иметь в виду то, что, например, уровень аммиака пропорционален интенсивности вентиляции. В результате, если вентиляция снижается на 50% в ночное время, поскольку, как правило, работает по минимальному режиму, высока вероятность того, что концентрация аммиака может быть в два раза выше ночью, чем она была в течение дня. Тот факт, что качество воздуха может резко меняться от дня к ночи, может привести к нарушению санитарных норм воздушной среды сельскохозяйственных помещений [2-4]. Поэтому проблема очистки воздуха в животноводческих и птицеводческих помещениях является весьма актуальной для современного сельского хозяйства.

Цель исследований: исследовать зависимости концентрации пылевых частиц, количества газовых составляющих от времени работы комбинированной электроустановки для очистки воздуха, определить влияние санации воздуха на живую массу птиц.

Материалы и методы. Для обеспыливания и обеззараживания воздуха применена комбинированная электроустановка (рис. 1), в которой используются два электро-технологических метода очистки воздуха: электрофильтрация и ультрафиолетовое излучение [5-7]. Применение данных методов в определенной последовательности

в одной установке позволит повысить бактерицидную эффективность очистки вследствие уменьшения коэффициента пропускания излучения средой при прочих неизменных параметрах [6].

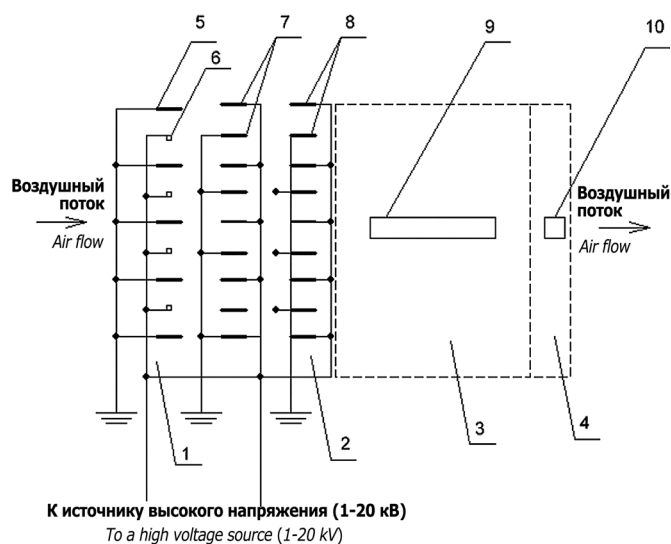


Рис. 1. Комбинированная электроустановка (вид сверху):

- 1 – ионизатор; 2 – осадитель;
- 3 – зона бактерицидного излучения;
- 4 – озоноразрушающая зона;
- 5 – заземленный электрод ионизатора;
- 6 – коронирующий электрод ионизатора;
- 7, 8 – электроды осадителя; 9 – бактерицидная лампа;
- 10 – озоноразрушающая лампа

Fig. 1. Combined electrical installation (top view):

- 1 – ionizer; 2 – precipitant; 3 – zone of bactericidal radiation;
- 4 – ozone depleting zone; 5 – grounded ionizer electrode;
- 6 – corona electrode of the ionizer; 7, 8 – precipitator electrodes;
- 9 – bactericidal lamp; 10 – ozone-depleting lamp

Основные элементы электроустановки (рис. 1):

1 – источник высокого напряжения по схеме генератора высоких импульсов, который позволит получать выпрямленное регулируемое напряжение на электродах установки от 3 до 6 кВ;

2 – зона осаждения, представляющая собой раму с металлическими пластинами 7 и 8;

6 – коронирующие металлические электроды, имеющие заостренные выступы на боковых поверхностях игл, что позволяет увеличить разность потенциалов между электродами (межэлектродное расстояние составляет 12 мм);

9 – лампа бактерицидная ультрафиолетовая Osram HNS, являющаяся лампой низкого давления из увиолевого стекла для обеззараживания воздуха и воды;

10 – лампа ДРТ-125. Максимальная спектральная мощность приходится на длину волны порядка 350 нм. Лампа имеет озоноразрушающее воздействие, что важно при работе электрофильтров в присутствии животных, птиц и человека [8, 9].

Производительность комбинированной электроустановки составляет 20 м³/ч. Расположение установки в опытном боксе представлено на рисунке 2.

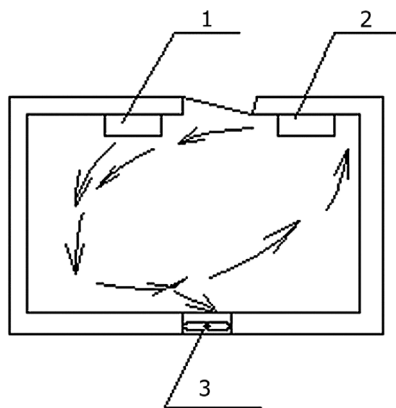


Рис. 2. Расположение электроустановки в опытном боксе (вид сверху):

1 – система вентиляции птичника; 2 – электроустановка; 3 – вытяжной вентилятор

Fig. 2. Location of the electrical installation in the experimental box (top view):

1 – poultry ventilation system; 2 – electrical installation; 3 – exhaust fan

Испытания комбинированной электроустановки в птицеводческом помещении было проведено на базе тимирязевского птичника. Испытания проводились на двух группах птенцов перепелок по 35 шт. в каждой группе. До посадки здоровых птенцов проводилась механическая дезинфекция, а именно: механическая очистка, мойка боксов и оборудования, далее проводилась аэрозольная обработка поверхностей и оборудования. Птенцы выращивались в клетках до возраста 28 дней. Содержание птенцов – клеточное в боксе размером 310 × 268 см высотой 280 см.

При микробиологическом исследовании поверхности в помещениях птичника делался смыв, полученный при помощи стерильной марлевой салфетки размером 5 × 5 см, смоченной стерильным физиологическим раствором. Затем салфетка встряхивалась в пробирке с определенным количеством физраствора в течение 10 мин для десорбции микробов с салфетки. Количество микроорганизмов в смывной жидкости определялось методом глубинного посева с последующим пересчетом колоний.

Концентрацию пылевых частиц в воздухе птичника определяли с помощью счетчика аэрозольных частиц ПК-ГТА 0,3-002, параметры и химического состава воздуха – приборами «Метеоскоп-М», «Testo 440» и газоанализатором Н-320. Достоверность результатов подтверждена многократной повторностью исследований и воспроизводимостью полученных сведений, использованием общепринятых методов, приборов и математической обработкой результатов.

Результаты и их обсуждение. Для определения оптимального режима работы электроустановки были произведены замеры концентрации пылевых частиц через 1 ч работы в течение 4-х ч. Исследования [5] показали, что оптимальный режим работы многозонного электрофильтра составляет 3 ч, затем эффективность обеспыливания возрастает незначительно.

На первом этапе производственного исследования был проведен эксперимент по выявлению запыленности птицеводческого помещения (рис. 3).



Рис. 3. Проведение испытаний комбинированной электроустановки в птицеводческом помещении

Fig. 3. Testing the combined electrical installation in a poultry house

Поскольку пыль в комбинированной электроустановке оседает на электродах, данные элементы нуждаются в очистке. С этой целью первые испытания были направлены на определение времени технического обслуживания данной установки. Концентрацию пылевых частиц замеряли в двух одинаковых боксах (опытный и контрольный) с 35 птенцами перепелок в каждом боксе на протяжении 28 дней. В опытном боксе замер делали после 3-х ч работы установки в центре помещения на высоте 1 м от пола. Результаты исследований представлены на рисунке 4.

Из рисунка 4 следует, что при работе комбинированной электроустановки в течение трех часов на протяжении 28 дней на 5-е сутки концентрация пылевых частиц менее 0,5 мкм возрастает. Это говорит о необходимости проведения очистки осадительных электродов от осевшей пыли. Также вне зависимости от размеров пылевых частиц в боксе с электроустановкой для обеспыливания и обеззараживания воздуха концентрация пыли снижается.

На втором этапе исследований определялось количество микроорганизмов и вредных газовых составляющих в опытном и контрольном боксах птичника.

На рисунке 5 представлены результаты исследований микроорганизмов (бактерий групп кишечных палочек, стафилококки), углекислого газа и аммиака в опытном и контрольном боксах. Пробы воздуха были проведены в центре помещений на высоте 1 м от пола на 4-й день работы электроустановки в опытном боксе. Время работы установки – 3 ч в сутки. Параметры микроклимата во время проведения опытов были следующими:

- температура воздуха в помещении $+18,51 \pm 0,2^\circ\text{C}$;
- влажность воздуха в помещении $- 71,3 \pm 3,0\%$;
- атмосферное давление $- 750 \pm 1 \text{ мм.рт.ст.}$

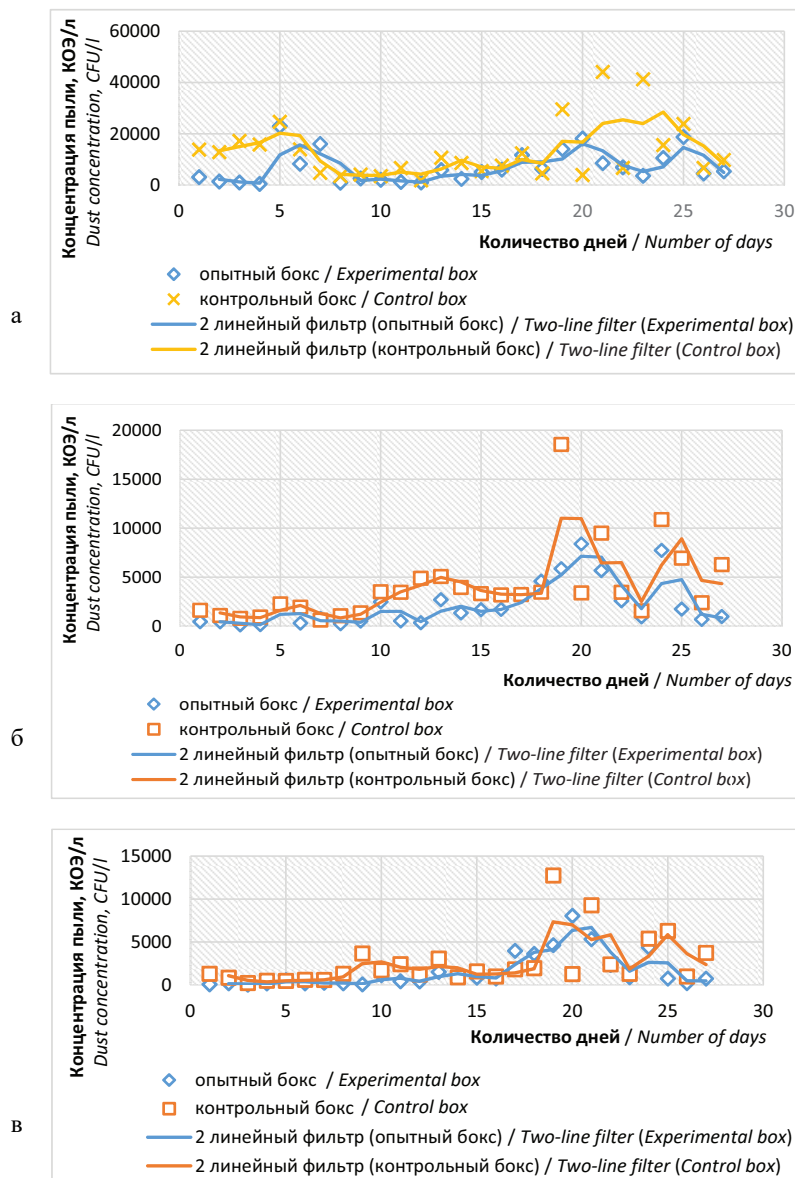


Рис. 4. Зависимость концентрации пыли от продолжительности работы электроустановки в опытном и контрольном боксах:

а – размер пыли 0,3 мкм; б – 0,5 мкм; в – 0,8 мкм

Fig. 4. Relationship between dust concentration 0.3 (a), 0.5 (b), 0.8 (c) μm the electrical installation operation time in the experimental and control boxes

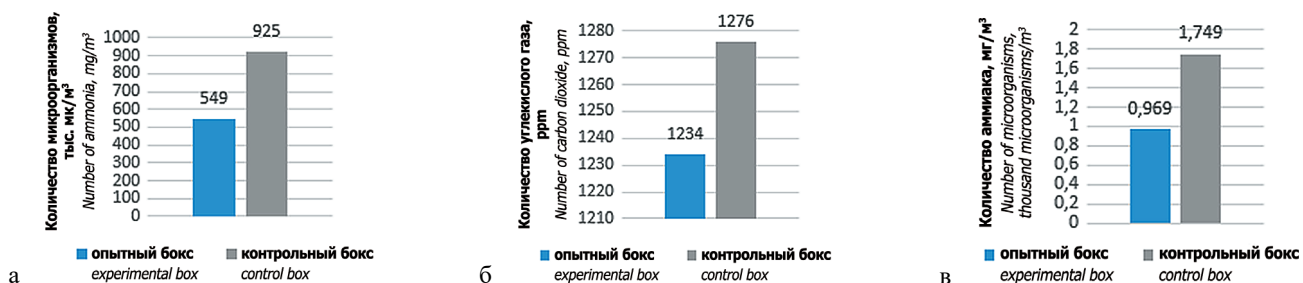


Рис. 5. Количество микроорганизмов (а), углекислого газа (б) и аммиака (в) в опытном и контрольном боксах
Fig. 5. Number of microorganisms (a), carbon dioxide (b), and ammonia (c) in the experimental and control boxes

Результаты эксперимента показали, что в опытном боксе бактерицидная обсеменённость снизилась на 59%, концентрация углекислого газа снизилась почти на 4%, концентрация аммиака снизилась на 3-й день работы электроустановки почти на 45%.

На третьем этапе исследований определяли влияние санации воздуха на живую массу птицы. Результаты прироста живой массы цыплят в боксе с использованием комбинированной электроустановки для очистки воздуха сельскохозяйственных помещений (на примере боксов

птичника) с анализом этапов увеличения живой массы в сравнении с контрольным боксом отражены на рисунке 6.

Перед посадкой в боксы живая масса цыплят практически равна: в опытном боксе с экспериментальной установкой средний вес цыплят составил 20,2 г; в контрольном боксе – 19,9 г. На 14-е сутки появились различия: в опытном боксе средний вес цыплят составил 61,16 г;

в контрольном боксе – 51,5 г. К концу эксперимента, на 28-й день, разница в живой массе возросла и составила в контрольном боксе 162,6 г, в контрольном боксе – 129,7 г.

Использование разработанной комбинированной электроустановки позволило увеличить прирост живой массы относительно прототипа на контрольных отметках: на 7-й день – на 5,03%; на 14-й день – на 14,5%; на 21-й день – на 16,65%; на 28-й день – на 20,3%.

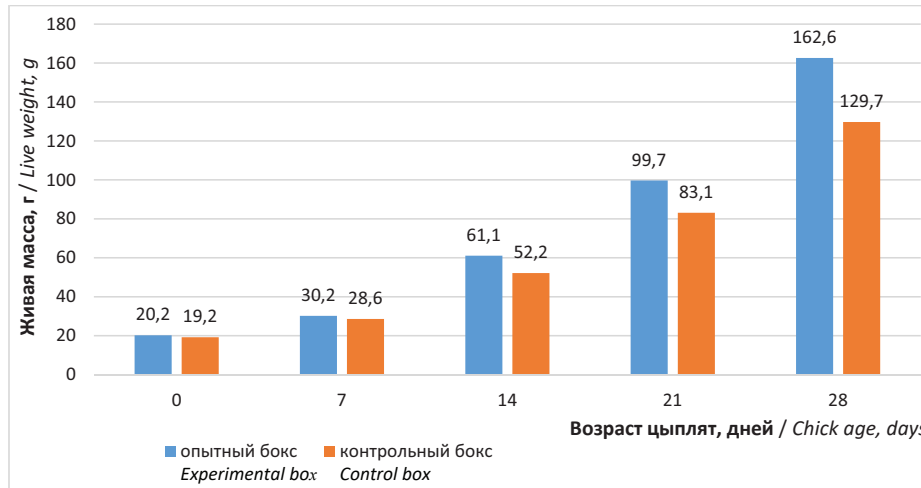


Рис. 6. Влияние санации воздуха на живую массу птенцов

Fig. 6. Influence of air sanitation on the live weight of chicks

Выводы

1. Применение комбинированной электроустановки в течение месяца по 3 ч в день позволило снизить бактерицидную обсеменённость бокса на 59%, снизить

концентрацию газа почти на 4% и снизить концентрацию аммиака на 3-й день работы электроустановки почти на 45%, увеличить прирост живой массы цыплят на 20,3%.

2. На 5-е сутки работы электроустановки необходима очистка осадительных электродов от осевшей пыли.

Библиографический список

1. Майорова Т.Л., Мусиев Д.Г., Абдурагимова Р.М., Гунашев Ш.А., Азаев Г.Х., Джабарова Г.А. Использование бактерицидной установки для улучшения экологической ситуации на птицеферме // Юг России: экология, развитие. 2016. Т. 11. № 3. С. 193-201.

2. Lysakov A., Nikitenko G., Grinchenko V., Avdeeva V. Calculation of electrostatic precipitator parameters for large poultry enterprise. *Engineering for Rural Development*. 19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, ERD2020, Jelgava, 20-22 May 2020, 2020; 19: 1157-1161.

3. Lysakov A., Nikitenko G., Konoplev E., Grinchenko V. Method to increase cleaning degree of electrostatic air cleaner. 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, ERD, 23-25 May 2018, Jelgava. 2018; 17: 554-559.

4. Cherkasova N.G., Chepelev N.I. Improving the technology of dust deposition from the air of livestock premises using an electrostatic precipitator. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. "International Science and Technology Conference "Earth Science" – Chapter 1", 2021: 022006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/2/022006>

5. Селезнева Д.М. Экспериментальное исследование комбинированной электроустановки для очистки воздушной среды сельскохозяйственных помещений // Всероссийская с международным участием научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 155-летию

References

1. Mayorova T.L., Musiev D.G., Abduragimova R.M., Gunashev Sh.A., Azaev G.Kh., Dzhabarova G.A. Ispol'zovanie bakteritsidnoy ustanovki dlya uluchsheniya ekologicheskoy situatsii na ptitseferme [Use of a bactericidal installation to improve the environmental situation on a poultry farm]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitiye*, 2016; 11(3): 193-201. (In Rus.)

2. Lysakov A., Nikitenko G., Grinchenko V., Avdeeva V. Calculation of electrostatic precipitator parameters for large poultry enterprise. *Engineering for Rural Development*. 19. Ser. "19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, Proceedings", 2020: 1157-1161.

3. Lysakov A., Nikitenko G., Konoplev E., Grinchenko V. Method to increase cleaning degree of electrostatic air cleaner. *Proceedings of International conference «Engineering for Rural Development»*, ERD, 23-25 May 2018, Jelgava. 2018; 17: 554-559.

4. Cherkasova N.G., Chepelev N.I. Improving the technology of dust deposition from the air of livestock premises using an electrostatic precipitator. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. "International Science and Technology Conference "Earth Science" – Chapter 1", 2021: 022006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/2/022006>

5. Selezneva D.M. Eksperimental'noe issledovanie kombinirovannoy elektroustanovki dlya ochistki vozduшной sredy sel'skokhozyaystvennykh pomeshcheniy [Experimental study of a hybrid electrical installation for farm in-door air cleaning]. *Materialy Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiyem nauchnoy konferentsii molodykh uchonykh i spetsialistov, posvyashchonnay 155-letiyu so dnya rozhdeniya N.N. Khudyakova*. 2021: 219-222. (In Rus.)

со дня рождения Н.Н. Худякова: Материалы Всероссийской с международным участием научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 155-летию со дня рождения Н.Н. Худякова. М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2021. С. 219-222.

6. Юферев Л.Ю., Селезнева Д.М., Овсянникова Е.А. Обеззараживание и обеспыливание воздуха в помещениях на основе электрофильтра // *Сельский механизатор*. 2020. № 4. С. 20-21.

7. Овсянникова Е.А., Сторчевой В.Ф., Кабдин Н.Е., Занфирова Л.В. Определение основных параметров и режимов работы комбинированного облучателя-озонатора воздуха в животноводческих помещениях // *Агротехника и энергообеспечение*. 2021. № 4 (33). С. 22-29.

8. Кривописин И.П. Озон в промышленном птицеводстве. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Росагропромиздат, 1988. 175 с.

9. Котельников С.Н. Основные механизмы взаимодействия озона живыми системами и особенности проблемы приземного озона для России // *Труды ИОФАН*. 2015. Т. 71. С. 10-41.

Критерии авторства

Юферев Л.Ю., Селезнева Д.М. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Юферев Л.Ю., Селезнева Д.М. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 17.02.2022

Одобрена после рецензирования 30.03.2022

Принята к публикации 04.04.2022

6. Yuferev L.Yu., Selezneva D.M., Ovsyannikova E.A. Obез-zarazhivanie i obespylivanie vozdukha v pomeshcheniyakh na os-nove elektrofil'tra [Disinfection and dedusting of indoor air using an electrostatic precipitator]. *Selskiy mekhanizator*, 2020; 4: 20-21. (In Rus.)

7. Ovsyannikova E.A., Storchevov V.F., Kabdin N.E., Zan-firova L.V. Opredelenie osnovnykh parametrov i rezhimov raboty kombinirovannogo obluchatelya-ozonatora vozdukha v zhivotno-vodcheskikh pomeshcheniyakh [Determination of the main param-eters and operation modes of a combined air irradiator-ozonator in livestock premises]. *Agrotekhnika i energoobespechenie*, 2021; 4(33): 22-29. (In Rus.)

8. Krivopishin I.P. Ozon v promyshlennom ptitsevodstve [Use of ozone in the poultry industry]. 2nd ed., reviewed and extended. Moscow, Rosagropromizdat, 1988. 175 p. (In Rus.)

9. Kotel'nikov S.N. Osnovnye mekhanizmy vzaimodeystviya ozona zhivymi sistemami i osobennosti problemy prizemnogo ozona dlya Rossii [Main mechanisms of ozone interaction by living systems and features of using surface ozone in Russia]. *Trudy IOFAN*, 2015; 71: 10-41. (In Rus.)

Contribution

L.Yu. Yuferev, D.M. Selezneva performed theoretical studies and, based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. L.Yu. Yuferev, D.M. Selezneva have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publica-tion of this paper.

The article was received 17.02.2022

Approved after reviewing 30.03.2022

Accepted for publication 04.04.2022

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.431

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-51-55

ОСОБЕННОСТИ МИКРОМЕТРАЖА ГИЛЬЗ ЦИЛИНДРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ЯМЗ

ЛАЗАРЬ ВЕРА ВЛАДИМИРОВНА, старший преподаватель

vera_lazar69@mail.ru

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет); 125993, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4

Аннотация. Гильза цилиндров является важнейшей деталью, лимитирующей ресурс двигателя. Перед дефектацией гильз цилиндров необходимо провести микрометраж ее поверхности с целью выявления мест наибольшего и наименьшего износа. С целью проведения микрометража и апробации его на новых и изношенных гильзах цилиндров проведены исследования 40 гильз цилиндров двигателей ЯМЗ. Рабочая поверхность гильзы цилиндров контролировалась по внутреннему диаметру, который измерялся в 8 сечениях и 2 плоскостях. Микрометраж проводился с помощью нутромера индикаторного с цифровой головкой повышенной точности с ценой деления 0,001 мм; 10 новых гильз цилиндров соответствовали требованиям технической документации. Микрометраж 30 гильз цилиндров показал, что наибольший износ составляет 253 мкм в плоскости качания шатуна, и 189 мкм – в перпендикулярной ей плоскости. Выявлено, что микрометраж гильз следует особенно тщательно проводить в верхней части гильз цилиндров. Наибольший износ проявляется в месте остановки верхнего поршневого кольца в начале такта расширения, причем износ больше в плоскости качания шатуна ввиду действия нормальной силы. Самая верхняя часть гильз цилиндров – это не поддаваемый механическому износу пояс, по диаметру которого можно судить о первоначальных размерах отверстия гильзы, но и здесь необходимо измерение размера ввиду влияния высоких температур, некоторого изменения кристаллической решетки материала, окисления и присутствия продуктов сгорания в виде нагара. Нижняя часть гильзы цилиндра подвержена износу по причине трения юбки поршня о ее поверхность. Но вследствие меньшей температуры, лучшей смазки, значительно большей площади контакта и соответственно меньшего давления повышенный износ здесь может наблюдаться только при перекосах в работе кривошипно-шатунного механизма: смещения оси коленчатого вала или изгиба шатуна.

Ключевые слова: гильза цилиндров, микрометраж, дефектация, износ, ремонтный размер, геометрические размеры.

Формат цитирования: Лазарь В.В. Особенности микрометража гильз цилиндров двигателей ЯМЗ // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 3. С. 51-55. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-51-55>.

© Лазарь В.В., 2022



ORIGINAL PAPER

MICROMETRY OF CYLINDER LINERS OF YAMZ ENGINES

VERA V. LAZAR, senior lecturer

vera_lazar69@mail.ru

Moscow Aviation Institute (National Research University); 4 Volokolamskoe Ave., 125993, Moscow, Russian Federation

Abstract. The most important part that limits the engine life is the cylinder liner. Before fault finding in the cylinder liners, it is necessary to carry out the micrometry of their surface to identify the areas of greatest and least wear. For carrying out the micrometry and testing it on new and worn cylinder liners, 40 cylinder liners of YaMZ engines were used. The working surface of the cylinder liners was controlled by the inner diameter, which was measured in eight sections and two planes. The micrometry was carried out with an indicating hole gauge with a digital head of increased accuracy with a sensitivity of 0.001 mm; ten new cylinder liners met the technical requirements. The micrometry of thirty cylinder liners showed that the greatest wear was 253 μm in the connecting rod oscillation plane and 189 μm in the perpendicular plane. It was found that liner micrometry should be particularly thoroughly carried out at the top of the cylinder liners. The greatest wear occurs at the top piston ring stop at the start of the expansion stroke, with more intensive wear in the connecting rod oscillation plane due to the normal force. The uppermost part of the cylinder liners is the wear-free liner flange, the diameter of which indicates the original dimensions of the liner bore. However, it must also be measured due to the effects of high temperatures, changes in the crystal pattern of the material, oxidation and the presence of combustion products in the form of carbon deposits. The lower part of the cylinder liner is subject to wear due to the friction of the piston skirt against its surface. However, due to the lower temperature, the better lubrication, the much larger contact surface and the correspondingly lower pressure, increased wear here can only occur if there are misalignments in the crank mechanism: the misaligned crankshaft axle or the bent connecting rod.

Key words: cylinder liner, micrometer, defect, wear, repair size, geometric dimensions.

For citation: Lazar V.V. Micrometry of cylinder liners of YaMZ engines. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(3): 51-55. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-51-55>.

Введение. Вопросам контроля качества в ремонтном производстве уделяется много внимания. Формируются современные требования к качеству процессов с позиции удовлетворенности потребителя [1]. Грамотное применение методов и средств измерений, испытаний и контроля на ремонтных предприятиях необходимо для обеспечения заданного качества машин и долговечности их эксплуатации [2, 3]. Качество изделий машиностроения зависит от достоверности измерительной информации, которую гарантирует система метрологического обеспечения производства¹ [4].

Вопросы обеспечения долговечности ответственных соединений с определенными зазорами [5], с гарантированными натягами [6, 7], в том числе параметров точности в уплотнениях [8, 9], становятся все более актуальными. С целью повышения точности сборки соединений применяются методы неполной взаимозаменяемости [10, 11] и подбор деталей по массе [12]. Повышение точности изготовления, сборки и ремонта соединений приводит к необходимости рационального выбора средств и методов их контроля [13, 14].

Достаточно остро стоит вопрос о применении в качестве запасных частей неоригинальных деталей сторонних поставщиков при ремонте машин и о методах оценки их соответствия [15, 16].

Все вышеописанные мероприятия влияют на качество продукции и приводят к снижению внешних потерь [17, 18], что положительно сказывается на рентабельности и имидже ремонтных предприятий.

При поставке новой техники и новых деталей на производство проводится микрометраж, на основании данных которого формируют контрольные карты для дефектации деталей при поступлении их в ремонт.

Основными задачами дефектации деталей являются:

– контроль деталей с целью определения их технического состояния;

– дальнейшая сортировка на группы: годные (подлежащие дальнейшей эксплуатации); детали, подлежащие ремонту (восстановлению); негодные детали (сортировка деталей по маршрутам восстановления);

– накопление информации о результатах дефектации для дальнейшего совершенствования технологических процессов.

Дефектацию необходимо проводить в соответствии с нормативно-техническими документами и грамотно интерпретировать данные измерений, сопоставляя их с предельными значениями. Отступление от данных условий способствует повышению стоимости ремонта и снижению качества.

Важнейшей деталью, лимитирующей ресурс двигателя, является гильза цилиндра. От состояния рабочей поверхности гильз цилиндров зависит работоспособность двигателя. Со временем, в процессе работы двигателя, происходит износ цилиндров. Это влечет за собой понижение мощности, увеличение расхода топлива, смазки и масла, затруднение при запуске двигателя и т.д. Износ поверхности гильз цилиндра определяется увеличением диаметра, изменением геометрических размеров (повышением овальности и конусообразности).

При наличии износа более 0,35...0,50 мм соединение гильзы с поршнем приходит к предельному состоянию, и двигатель направляется в ремонт для шлифовки гильз под ремонтный размер или замены на новую.

Перед дефектацией гильз цилиндров необходимо провести микрометраж ее поверхности с целью выявления мест наибольшего и наименьшего износа.

Цель исследования: проведение микрометража новых и изношенных гильз цилиндров двигателей ЯМЗ с целью выявления мест наибольшего и наименьшего износа.

Материалы и методы. Исследовались партии гильз цилиндров 5 двигателей ЯМЗ-238 (табл. 1), в каждой партии по 8 шт. (всего 40 гильз).

Таблица 1

Основные технические характеристики гильзы цилиндров двигателя ЯМЗ

Table 1

Main technical characteristics of the cylinder liners of the YaMZ engine

Параметр <i>Parameter</i>	Обозначение <i>Designation</i>	Номинальное значение <i>Rated value</i>
Высота гильзы, мм / <i>Liner height, mm</i>	<i>L</i>	270 _{-0,68}
Высота от верхнего торца гильзы до упорного бурта, мм <i>Height from the top end of the liner to the stop shoulder, mm</i>	<i>h</i>	12,1 ^{+0,03}
Диаметр верхнего центрирующего пояска, мм / <i>Upper centering collar diameter, mm</i>	<i>D₁</i>	Ø 160 _{-0,08}
Диаметр нижнего центрирующего пояска, мм / <i>Lower centering collar diameter, mm</i>	<i>D₂</i>	Ø 153 _{-0,04} _{-0,10}
Диаметр посадочного пояска, мм / <i>Seat face diameter, mm</i>	<i>D₃</i>	Ø 151 _{-0,04} _{-0,10}
Внутренний диаметр гильзы, мм / <i>Inner diameter of the liner, mm</i>	<i>d</i>	130,0 ^{+0,025} _{+0,005}
Твердость рабочей поверхности / <i>Work surface hardness</i>	<i>HRC</i>	42...50
Шероховатость зеркала цилиндра, мкм / <i>Cylinder face roughness, μm</i>	<i>Ra</i>	6,3
Масса гильзы цилиндра, кг / <i>Cylinder liner weight, kg</i>	-	7,8

¹ Бондарева Г.И., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. и др. Проектирование и анализ качества контрольных процессов на ремонтных предприятиях: Монография. М.: ОнтоПринт, 2020. 95 с.

Микрометраж гильз цилиндров проводился с использованием нутромера индикаторного с цифровой головкой повышенной точности с ценой деления 0,001 мм. Для настройки прибора с целью измерения износа предварительный натяг составил 0,3 мм, а для контроля качества новых гильз цилиндров – 0,1 мм, что обеспечит меньшую погрешность измерений.

Результаты и их обсуждение. Особенность микрометража гильз цилиндров заключается в измерении внутреннего диаметра рабочей поверхности гильзы цилиндра в 8 сечениях (1-1...8-8) и 2 плоскостях (А-А, В-В) (рис. 1). Индикаторный нутромер настраивался по установочному

кольцу 130,000 мм, и проводились измерения отклонений диаметра гильз в указанных плоскостях и сечениях (действительные отклонения). Усредненные результаты представлены в таблице 2.

Измерение размеров рабочей поверхности гильзы цилиндров производится после поступления двигателя в ремонт и выпрессовки гильз. Диаметр гильзы во время эксплуатации увеличивается, появляются погрешности в геометрической форме рабочих поверхностей детали в виде овальности и конусности.

Результаты микрометража 30 изношенных гильз цилиндров приведены в таблице 3.

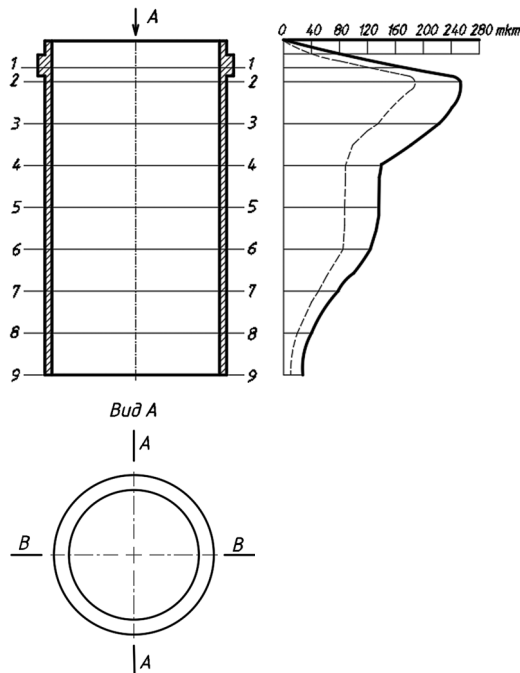


Рис. 1. Схема контроля внутреннего диаметра гильзы цилиндров и диаграмма износа внутренней поверхности:

- - - - - плоскость качания шатуна (А-А);
- — — — — плоскость, перпендикулярная качанию шатуна (В-В);
- А-А, В-В – плоскости замеров;
- 2-2 – сечение, определяемое положением верхнего кольца при положении поршня в ВМТ;
- 8-8 – сечение, определяемое положением нижнего кольца при положении поршня в НМТ

Fig. 1. Control diagram of the inner diameter of the cylinder liner and the wear diagram of the inner surface:

- - - - - connecting rod oscillation plane (А-А);
- — — — — a plane perpendicular to the oscillation of the connecting rod (В-В);
- А-А, В-В – measurement planes;
- 2-2 – section determined by the position of the upper ring when the piston is at TDC;
- 8-8 – section determined by the position of the lower ring when the piston is at BDC

Таблица 2

Результаты микрометража партии новых гильз цилиндров двигателей ЯМЗ

Table 2

Micrometry results of a batch of new cylinderliners of YaMZ engines

Измеряемые плоскости <i>Measured planes</i>	Отклонения от размера 130,0 мм, в сечениях, мкм <i>Deviations from the size of 130.0 mm, in sections, microns</i>								Конусообразность Δ, мкм <i>Taper Δ, μm</i>
	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	6-6	7-7	8-8	
А-А	+10	+9	+9	+11	+10	+9	+12	+11	1,5
В-В	+15	+11	+13	+14	+14	+10	+15	+13	2,5
Овальность, мкм / <i>Ovality, microns</i>	2,5	1	2	1,5	2	0,5	1,5	1	-

Таблица 3

Результаты микрометража партии гильз цилиндров после длительной эксплуатации

Table 3

Results of micrometreage of a batch of cylinder liners after long-term operation

Измеряемые плоскости <i>Measured planes</i>	Отклонения от размера 130,0 мм, в сечениях, мкм <i>Deviations from the size of 130.0 mm, in sections, microns</i>								Конусообразность Δ, мкм <i>Taper Δ, μm</i>
	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	6-6	7-7	8-8	
А-А	+165	+253	+225	+142	+135	+122	+79	+39	107
В-В	+120	+189	+133	+92	+89	+83	+49	+20	84,5
Овальность, мкм / <i>Ovality, microns</i>	22,5	32	46	25	23	19,5	15	9,5	-

Экспериментально установлено, что наибольший износ составляет 253 мкм в плоскости качания шатуна и 189 мкм – в перпендикулярной ей плоскости.

На диаграмме (рис. 1) наблюдается неравномерность износа внутренней поверхности гильз цилиндров.

Наибольший износ проявляется в месте остановки верхнего поршневого кольца в начале такта расширения, причем износ больше в плоскости качания шатуна ввиду действия нормальной силы. Поэтому перед выемкой гильзы цилиндров из блока необходимо пометить эту плоскость. Самая верхняя часть гильзы – это не подвергаемый механическому износу пояс. По его диаметру можно судить о первоначальном размере отверстия гильзы, хотя и здесь необходимо измерение размера по причине влияния высоких температур, некоторого изменения кристаллической решетки материала, окисления и вероятности присутствия продуктов сгорания в виде нагара.

Нижняя часть гильзы цилиндра подвержена износу ввиду трения юбки поршня о ее поверхность. Но вследствие меньшей температуры, лучшей смазки и значительно большей площади контакта, соответственно меньшего давления повышенный износ здесь может наблюдаться только при перекосах в работе кривошипно-шатунного механизма: смещения оси коленчатого вала или изгиба шатуна.

Овальность рассчитывается по результатам измерения диаметров в плоскостях А-А и В-В по формуле:

$$EFK_i = \frac{D_{i_{B-B}} - D_{i_{A-A}}}{2}, \quad (1)$$

где i – сечение гильзы цилиндра.

За действительное значение принимается максимальное значение овальности, выбираемое из расчетов $EFK = EFK_{\max}$.

Библиографический список

1. Ерохин М.Н. Научные основы организации системы менеджмента качества на предприятиях ТС в АПК: Монография / М.Н. Ерохин, О.А. Леонов, В.В. Карпузов, Н.Ж. Шкаруба, Г.Н. Темасова, Ю.Г. Вергазова, А.Н. Самордин. Ставрополь, 2020. 176 с.
2. Leonov O.A., Shkaruba N.Z., Vergazova Y.G., Golinitzkiy P.V., Antonova U.Y. Quality control in the machining of cylinder liners at repair enterprises. *Russian Engineering Research*, 2020; 40 (9): 726-731. <https://doi.org/10.3103/S1068798X20090105>
3. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Лазарь В.В. Оценка технико-экономического уровня технологического оборудования для обработки гильз цилиндров // *Агроинженерия*. 2021. № 2 (102). С. 68-74. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-68-74>
4. Leonov O.A, Shkaruba N.Zh. Development of the management system for metrological assurance of measurements. *Journal of Physics: Conference Series. 2nd International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies*, 2020 Krasnoyarsk, 2020; 1515 (3): 032010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/3/032010>
5. Leonov O.A, Shkaruba N.Zh. A parametric failure model for the calculation of the fit tolerance of joints with clearance. *Journal of Friction and Wear*, 2019; 40 (4): 332-336. <https://doi.org/10.3103/S1068366619040068>

Конусообразность в плоскостях А-А и В-В определяется по формуле:

$$EFP_i = \frac{D_{i_{\max}} - D_{i_{\min}}}{2}. \quad (2)$$

Действительная конусообразность является максимальным значением $EFP = EFP_{\max}$.

Полученные значения овальности и конусообразности для новых гильз не должны превышать предельные значения, указанные в технической документации. Для изношенных гильз (в нашем случае $EFK_{\max} = 46$ мкм в сечении 2-2, а $EFP_{\max} = 107$ мкм в плоскости А-А) это говорит о том, что естественный износ гильз цилиндров проявляется в виде выработки в области движения поршневых колец. При этом цилиндрическая форма отверстия искажается и принимает вид овала с большим износом в плоскости качания шатуна. Выработка получается несимметричной (относительно продольной оси двигателя) ввиду действия нормальной силы. При этом значения овальности по факту определяют величину зазора, через который идет прорыв газов в картер.

Выводы

1. Проведенный микрометраж гильз цилиндров двигателей ЯМЗ показал, что наибольший износ (253 мкм) наблюдается в плоскости качания шатуна, 189 мкм – в перпендикулярной ей плоскости. Овальность изношенных гильз составила 46 мкм, конусообразность – 107 мкм.
2. Наибольший износ характерен для верхней части гильз, в области расположения поршневых колец, что обусловлено сильным истирающим действием поршневых колец.
3. Нижняя часть гильзы цилиндра подвержена износу по причине трения юбки поршня о ее поверхность. Повышенный износ здесь может наблюдаться только при перекосах в работе кривошипно-шатунного механизма – смещения оси коленчатого вала или изгиба шатуна.

References

1. Erokhin M.N., Leonov O.A., Karpuzov V.V., Shkaruba N.Zh., Temasova G.N., Vergazova Yu.G., Samordin A.N. Nauchnye osnovy organizatsii sistemy menedzhmenta kachestva na predpriyatiyakh TS v APK: Monografiya [Scientific foundations of organizing the quality management system at the technical service enterprises in the agro-industrial sector: Monograph]. Stavropol, 2020. 176 p. (In Rus.)
2. Leonov O.A., Shkaruba N.Z., Vergazova Y.G., Golinitzkiy P.V., Antonova U.Y. Quality control in the machining of cylinder liners at repair enterprises. *Russian Engineering Research*, 2020; 40(9): 726-731. <https://doi.org/10.3103/S1068798X20090105>
3. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Lazar V.V. Otsenka tekhniko-ekonomicheskogo urovnya tekhnologicheskogo oborudovaniya dlya obrabotki gil'z tsilindrov [Evaluation of the technical and economic level of technological equipment for processing cylinder liners]. *Agricultural Engineering*, 2021; 2 (102): 68-74. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-68-74> (In Rus.)
4. Leonov O.A, Shkaruba N.Zh. Development of the management system for metrological assurance of measurements. *Journal of Physics: Conference Series. 2nd International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies*, 2020 Krasnoyarsk, 2020; 1515(3): 032010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/3/032010>
5. Leonov O.A, Shkaruba N.Zh. A parametric failure model for the calculation of the fit tolerance of joints with clearance. *Journal of Friction and Wear*, 2019; 40(4): 332-336. <https://doi.org/10.3103/S1068366619040068>
6. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. Calculation of Fit Tolerance by the Parametric Joint Failure Model. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2020; 49(12): 1027-1032.

6. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. Calculation of Fit Tolerance by the Parametric Joint Failure Model. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2020; 49 (12): 1027-1032.

7. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G. Determining the tolerances in fitting for joints with interference. *Russian Engineering Research*, 2019; 39 (7): 544-547.

8. Ерохин М.Н., Леонов О.А., Катаев Ю.В., Мельников О.М. Методика расчета натяга для соединений резиновых армированных манжет с валами по критерию начала утечек // Вестник машиностроения. 2019. № 3. С. 41-44.

9. Мельников О.М., Казанцев С.П., Чеха О.В. Оценка показателей качества деталей и соединения «вал-манжета» // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2019. № 5(93). С.8-13. <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-5-8-13>

10. Ерохин М.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Катаев Ю.В., Вергазова Ю.Г. Процентная взаимозаменяемость посадок с натягом // Вестник машиностроения. 2020. № 3. С. 41-44.

11. Golinitzkiy P.V., Antonova U.Y. Assessment of the influence of measurement error on the quality of selective assembly. *2nd International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies*, 2020, 1515; 5: 052021.

12. Ерохин М.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. Голеницкий П.В., Антонова У.Ю. Нормирование допускаемой погрешности измерения массы при контроле деталей шапунно-поршневой группы // Вестник машиностроения. 2021. № 9. С. 40-44.

13. Leonov O.A., Temasova G.N., Shkaruba N.Zh., Kataev Yu.V. Method for calculating savings from using a more accurate measuring instruments. *2nd International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies*, 2020, 1515; 3: 032022.

14. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. Theoretical basis of selection of measurement measures in control of linear sizes. *2nd International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies*, 2020; 1679 (5): 052081.

15. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Голеницкий П.В., Антонова У.Ю. Методы и средства контроля качества обработки гильз цилиндров на ремонтных машиностроительных предприятиях // Вестник машиностроения. 2020. № 6. С. 40-45.

16. Дорохов А.С., Семейкин В.А., Краснящих К.А. Входной контроль качества запасных частей бесконтактной измерительной установкой // Техника и оборудование для села. 2011. № 9. С. 24-26.

17. Бондарева Г.И., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Темасова Г.Н., Вергазова Ю.Г. Оценка внешних потерь на предприятиях технического сервиса в АПК // Сельский механизатор. 2020. № 9. С. 34-35.

18. Бондарева Г.И., Темасова Г.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. Оценка внешнего брака на предприятиях машиностроения // Вестник машиностроения. 2021. № 11. С. 93-96.

Критерии авторства

Лазарь В.В. выполнила теоретические исследования, на основании полученных результатов провела эксперимент и подготовила рукопись. Лазарь В.В. имеет на статью авторские права и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 20.01.2022

Одобрена после рецензирования 28.04.2022

Принята к публикации 29.04.2022

7. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G. Determining the tolerances in fitting for joints with interference. *Russian Engineering Research*, 2019; 39(7): 544-547.

8. Erokhin M.N., Leonov O.A., Kataev Yu.V., Melnikov O.M. Metodika rascheta natyaga dlya soedineniy rezinovykh armirovannykh manzhet s valami po kriteriyu nachala utechek [Method for calculating the tightness for joints of reinforced rubber collars with shafts according to the criterion for the onset of leaks]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2019; 3: 41-44. (In Rus.)

9. Melnikov O.M., Kazantsev S.P., Chekha O.V. Otsenka pokazateley kachestva detaley i soyedineniya "val-manzheta" [Evaluation of the quality indicators of parts and the "shaft-to-collar" connection]. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*, 2019; 5 (93): 8-13. <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-5-8-13> (In Rus.)

10. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Kataev Yu.V., Vergazova Yu.G. Protsentnaya vzaimozamenyayemost' posadok s natyagom [Percentage interchangeability rate of interference fits]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2020; 3: 41-44. (In Rus.)

11. Golinitzkiy P.V., Antonova U.Y. Assessment of the influence of measurement error on the quality of selective assembly. *2nd International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies*, 2020, 1515; 5: 052021.

12. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Golinitzkiy P.V., Antonova U.Y. Normirovanie dopuskayemoy pogreshnosti izmereniya massy pri kontrole detaley shatunno-porshnevoy gruppy [Rationing the permissible error while measuring mass during the control of parts of the connecting rod and piston group]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2021; 9: 40-44. (In Rus.)

13. Leonov O.A., Temasova G.N., Shkaruba N.Zh., Kataev Yu.V. Method for calculating savings from using a more accurate measuring instrument. *2nd International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies*, 2020, 1515; 3:032022.

14. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. Theoretical basis of selection of measurement measures in control of linear sizes. *2nd International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies*, 2020; 1679(5): 052081.

15. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Golinitzkiy P.V., Antonova U.Yu. Metody i sredstva kontrolya kachestva obrabotki liner cilind na remontnykh mashinostroitel'nykh predpriyatiyakh [Methods and means of monitoring the processing quality of cylinder liners at repair machine-building enterprises]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2020; 6: 40-45. (In Rus.)

16. Dorokhov A.S., Semeykin V.A., Krasnyashchikh K.A. Vkhodnoy kontrol' kachestva zapasnykh chastey beskontaktnoy izmeritel'noy ustanovkoy [Input quality control of spare parts with a non-contact measuring device]. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela*, 2011; 9: 24-26. (In Rus.)

17. Bondareva G.I., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Temasova G.N., Vergazova Yu.G. Otsenka vneshnikh poter' na predpriyatiyakh tekhnicheskogo servisa v APK [Evaluation of external losses at agro-industrial enterprises of technical service]. *Sel'skiy mekhanizator*, 2020; 9: 34-35. (In Rus.)

18. Bondareva G.I., Temasova G.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G. Otsenka vneshnego braka na predpriyatiyakh mashinostroeniya [Evaluation of external defects at mechanical engineering enterprises]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2021; 11: 93-96. (In Rus.)

Contribution

V.V. Lazar performed theoretical studies and, based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. V.V. Lazar has author's rights and bears responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 20.01.2022


Approved after reviewing 28.04.2022

Accepted for publication 29.04.2022

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.921.34

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-56-63

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АБРАЗИВНЫХ ЗЕРЕН ХОНИНГОВАЛЬНЫХ БРУСКОВ НА МИКРОГЕОМЕТРИЮ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ**НЕФЕДКИН АНАТОЛИЙ ИГОРЕВИЧ** , *соискатель*
an.nefedkin@yandex.ru **ОДИНОКОВА ИРИНА ВЯЧЕСЛАВОВНА**, *канд. тех. наук, доцент*
odinokova_iv@mail.ru**ГАЕВСКИЙ ВИТАЛИЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ**, *д-р техн. наук, профессор*
vit-life@rambler.ru

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ); 125319, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский проспект, 64

Аннотация. Статическая теория хонингования разработана недостаточно, поскольку процесс массового резания абразивными зёрнами имеет случайный характер, что усложняет математическое описание этого явления. Целью исследований являлась разработка методики моделирования хонингования, позволяющей вести расчёт параметров процесса с учётом упругих деформаций абразивного инструмента. Для решения задач статистической теории (расчёт микрогеометрии детали, съёма металла и усилий резания) в исследованиях применены теоретико-вероятностный анализ и моделирование методом Монте-Карло. Исходя из вероятности распределения абразивных зёрен по объёму режущего слоя инструмента и кинематики процесса рассчитывается закон распределения высот микронеровностей детали. С помощью закона распределения находятся параметры шероховатости поверхности детали и характеристики процесса резания: площадь срезов, количество контактных зёрен и т.д. Установлена математическая зависимость между распределением абразивных зёрен по высоте и распределением глубины царапин, оставленных инструментом на полированном образце. Проведён расчёт геометрических параметров режущей поверхности алмазных брусков с учетом их дискретной модели. Соизмерение расчётных и опытных значений параметров брусков свидетельствует о правильности предложенной методики. Получены в общем виде аналитические зависимости для расчёта параметров шероховатости поверхности детали, скорости съёма металла, усилий резания, площадей среза, числа контактных зёрен и др. Разработанная методика моделирования хонингования позволяет вести расчёт параметров процесса с учётом упругих деформаций абразивного инструмента. Учитывая характеристики брусков, усреднённый профиль зёрен и плотность их распределения по высоте, можно рассчитать все параметры микрогеометрии детали. Результаты проведённого теоретико-вероятностного исследования могут быть применены также к другим видам абразивной обработки.

Ключевые слова: микрогеометрия поверхности детали, высоты профиля абразивных зёрен, распределение вершин зёрен по высоте, усреднённый профиль вершин зёрен, площадь проекции поверхности контакта единичного зерна.

Формат цитирования: Нефедкин А.И., Одинокова И.В., Гаевский В.В. Исследование влияния геометрических параметров абразивных зерен хонинговальных брусков на микрогеометрию поверхности деталей // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 3. С. 56-63. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-56-63>.

© Нефедкин А.И., Одинокова И.В., Гаевский В.В., 2022



ORIGINAL PAPER

INFLUENCE OF THE GEOMETRIC PARAMETERS OF ABRASIVE GRAINS OF HONING STICKS ON THE SURFACE MICROGEOMETRY OF MACHINE PARTS**ANATOLIY I. NEFEDKIN** , *PhD seeker*
an.nefedkin@yandex.ru **IRINA V. ODINOKOVA**, *PhD (Eng), Associate Professor*
odinokova_iv@mail.ru**VITALIY V. GAEVSKIY**, *DSc (Eng), Professor*
vit-life@rambler.ru

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); 125319, Russian Federation, Moscow, Leningradskiy Ave., 64

Abstract. The static theory of honing has not been sufficiently developed, since the process of mass cutting with abrasive grains is random by its nature. This fact complicates the mathematical description of this phenomenon. The research aim was to develop

a technique for modeling honing to calculate the process parameters, taking into account the elastic deformations of the abrasive tool. To solve the problems of statistical theory (analyzing the microgeometry of a machine part, metal removal and cutting forces), the studies involved probabilistic analysis and Monte Carlo simulation. Based on the distribution probability of abrasive grains over the cutting layer of the tool and the process kinematics, the law of distribution of the heights of part microroughnesses was determined. Using the distribution law, the authors found the parameters of the surface roughness of the part and the cutting process characteristics: the area of cuts, the number of contact grains, etc. A mathematical relationship has been established between the distribution of abrasive grains along the height and the distribution of the depth of scratches left by the tool on a polished sample. The geometric parameters of the cutting surface of diamond bars were determined taking into account their discrete model. Comparison of the calculated and experimental values of the bar parameters proved the correctness of the proposed methodology. Analytical dependences were obtained in general form for determining the parameters of the surface roughness of the machine part, the metal removal rate, cutting forces, cut areas, the number of contact grains, etc. The developed honing modeling technique helps determine the process parameters taking into account elastic deformations of the abrasive tool. Taking into account the characteristics of the bars, the average profile of the grains and the density of their distribution along the height, we can determine all the parameters of the machine part microgeometry. The results of the conducted probabilistic research are also applicable to other types of abrasive processing.

Key words: microgeometry of the machine part surface, profile heights of abrasive grains, distribution of grain tops in height, average profile of grain tops, projected area of the contact surface of a single grain.

For citation: Nefedkin A.I., Odinkova I.V., Gaevskiy V.V. Influence of the geometric parameters of abrasive grains of honing sticks on the surface microgeometry of machine parts. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(3): 56-63. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-56-63>.

Введение. Для улучшения и повышения эффективности процесса хонингования необходимо разработать адекватную теорию влияния поверхности абразивных брусков, имеющих случайную микрогеометрию, на обрабатываемую деталь.

Процесс массового резания абразивными зёрнами имеет случайный характер, что усложняет математическое описание этого явления, в связи с чем статическая теория хонингования разработана недостаточно.

Модель процесса резания, положенная в основу теории, основывается на допущении того, что любое зерно, контактирующее с деталью, удаляет слой металла, точно соответствующий его профилю и траектории. При данном допущении не учитываются навалы, созданные по кромкам царапин, и упругие деформации металла. Таким образом, данная модель достаточно полно отвечает процессу хонингования материалов малой пластичности – например, чугуна.

Исходя из расчёта вероятностей распределения абразивных зёрен по объёму режущего слоя инструмента и кинематики процесса вычисляется закон распределения высоты микронеровностей детали. С помощью данного распределения находятся характеристики процесса резания: площадь срезов, количество режущих зёрен и т.д. [1].

Обширные возможности для изучения процесса резания и абразивной обработки открывает метод Монте-Карло.

Цель исследований: увеличить эффективность процесса хонингования; разработать адекватную теорию влияния поверхности абразивных брусков, имеющих случайную микрогеометрию, на обрабатываемую деталь.

Материалы и методы. Для решения главных задач статической теории (расчёт микрогеометрии детали, съёма металла и усилий резания) авторами применены теоретико-вероятностный анализ и моделирование методом Монте-Карло [2].

Управление процессом хонингования реализуется разнообразными способами: подбором материала и конфигурации абразивных брусков, назначением режимов обработки, комбинированием абразивной обработки с электрохимико-физическими методами и др. Одним из направлений повышения эффективности хонингования является улучшение конфигурации и устройства абразивных брусков – в частности, использования брусков с прерывистой режущей поверхностью [3].

Функциональная аппроксимация объёмной плотности распределения вершин по высоте $n(h)$ и функции $z(x)$, описывающей усреднённый профиль вершин зерен, показала, что степенные зависимости хорошо отвечают опытным данным и позволяют получить расчётные формулы для параметров процесса резания-царапания [4]:

$$z(x) = c|x|^{\frac{1}{m}}, \quad n(x) = \begin{cases} k \cdot h^{\beta}, & \text{при } h > 0, \\ 0, & \text{при } h \leq 0. \end{cases}$$

где $n(h)$ – объёмная плотность распределения вершин по высоте h .

Направление отсчёта высоты зёрен меняем на противоположное, приняв его в тело инструмента.

Закон распределения высоты микронеровностей имеет вид [1, 5]:

$$P(h) = \exp \left\{ \frac{-2 \cdot k}{b \cdot c^m \cdot (\beta + 1)} \cdot \int_0^h z^m \cdot (h - z)^{\beta + 1} \cdot dz \right\}, \text{ мкм, (1)}$$

где P – высота микронеровностей, мкм; b – интенсивность съёма металла, мкм/мин; c , m – параметры, описывающие параболическую форму абразивного зерна; h – глубина внедрения в металл абразивного зерна, мкм; β – показатель степени распределения зёрен по высоте h .

Интеграл, входящий в (1), выражается через гамма-функцию $\Gamma(x)$, поэтому

$$P(h) = \exp(-\rho \cdot h^{\rho}) \text{ при } h \geq 0, \quad (2)$$

где ρ – угол трения:

$$\rho = \frac{2 \cdot k \cdot \Gamma(m + 1) \cdot \Gamma(\beta + 1)}{b \cdot c^m \cdot \Gamma(\beta + 1)}; \quad (3)$$

$$\rho = \beta + m + 2. \quad (4)$$

Математическое ожидание высоты профиля (над уровнем наиболее глубоко внедрившегося зерна) равно

$$M = \Gamma\left(\frac{\rho + 1}{\rho}\right) \cdot \left(\frac{1}{\rho}\right)^{\frac{1}{\rho}}. \quad (5)$$

Среднеквадратическая высота неровностей –

$$H_{CK} = \sqrt{\Gamma\left(\frac{p+2}{p}\right) - \Gamma^2\left(\frac{p+1}{p}\right)} \cdot \left(\frac{1}{\rho}\right)^{\frac{1}{p}}. \quad (6)$$

Безразмерную высоту профиля можно определить по выражению:

$$h^* = \frac{h}{H_{CK}}. \quad (7)$$

Закон распределения высоты микронеровностей при этом –

$$P(h^*) = \exp\left[-\left(h^* \cdot \sqrt{\Gamma\left(\frac{p+2}{p}\right) - \Gamma^2\left(\frac{p+1}{p}\right)}\right)^p\right] = \exp\left[-(h^* \cdot \xi)^p\right], \quad (8)$$

где

$$\xi = \sqrt{\Gamma\left(\frac{p+2}{p}\right) - \Gamma^2\left(\frac{p+1}{p}\right)}.$$

Такая запись удобна тем, что конфигурация кривой распределения зависит от одного параметра p .

На графиках распределения высот микронеровностей $P(h^*)$ можно увидеть, что с ростом P асимметрия распределения повышается (рис. 1).

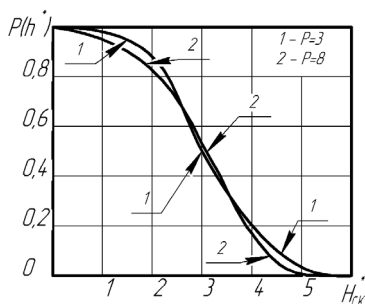


Рис. 1. Распределение высот микронеровностей
Fig. 1. Distribution of microroughness heights

Опорная поверхность на относительно высоких уровнях увеличивается, и это благоприятно сказывается на работоспособности детали [1, 5]. Выражение (6) записываем в виде:

$$H_{CK} = r_1 \cdot \left(\frac{b \cdot c^m}{k}\right)^{\frac{1}{p}}. \quad (9)$$

Аналогично среднеарифметическая высота неровностей R_a –

$$R_a = r_1 \cdot \left(\frac{b \cdot c^m}{k}\right)^{\frac{1}{p}}. \quad (10)$$

Для удобства произведен расчет коэффициентов r_1 и r_2 , зависящих лишь от β и независимых от конфигурации абразивного зерна m (рис. 2), и r_3 – коэффициента, зависящего от β и m (рис. 3).

Шаг неровностей по средней линии S_m представлен в виде:

$$S_m = \frac{b \cdot (1 + \beta) \cdot (2 + \beta)}{k \cdot M^{\beta+2} \cdot \sin \alpha} \cdot \exp(\rho \cdot M^p) \quad (11)$$

или

$$S_m = \frac{r_3}{\sin \alpha} \cdot \left(\frac{b}{k}\right)^{\frac{m}{p}} \cdot \left(\frac{1}{c}\right)^{\frac{m \cdot (\beta+2)p}{p}}, \quad (12)$$

где r_3 – коэффициент, зависящий от β и m ;

$$r_3 = \frac{(\beta+2) \cdot (\beta+1) \cdot [2 \cdot \Gamma(m+2) \cdot \Gamma(\beta+1)]^{\frac{\beta+2}{p}}}{\left[\Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right)\right]^{\beta+2} \cdot \Gamma(p+1)} \cdot \exp\left[\Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right)\right]^p. \quad (13)$$

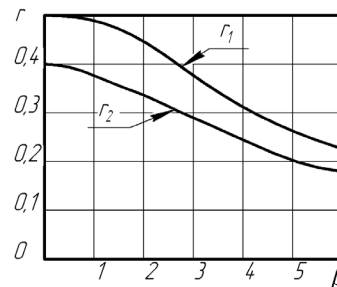


Рис. 2. Расчет коэффициентов r_1 и r_2
Fig. 2. Calculating coefficients r_1 and r_2

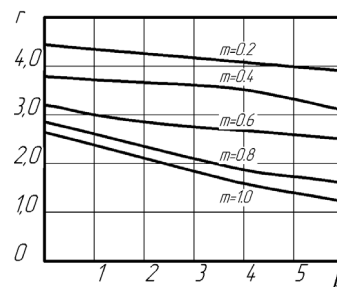


Рис. 3. Расчет коэффициента r_3
Fig. 3. Calculating coefficient r_3

Анализ показателей степеней параметров, входящих в формулу (11), показывает, что режимы обработки и распределение зёрен по высоте мало воздействуют на шаг неровностей S_m , в то время как с увеличением размеров зёрен шаг S_m значительно увеличивается [1].

Полученные формулы позволяют предсказать шероховатость поверхности детали, и при знании микрогеометрии детали – выбрать режим хонингования [1, 4].

Математическое ожидание площади проекции поверхности контакта единичного зерна высотой H_3 можно выразить как

$$\begin{cases} \bar{S}_p(H_3) = \frac{2}{C^m} \cdot \int_0^\infty z^m \cdot \exp[-\rho \cdot (z + H_3)^p] \cdot dz, \\ \bar{S}_o(H_3) = \frac{\pi \cdot m}{C^{2 \cdot m}} \cdot \int_0^\infty z^{2 \cdot m - 1} \cdot \exp[-\rho \cdot (z + H_3)^p] \cdot dz, \end{cases} \quad (14)$$

где $\bar{S}_p(H_3)$ – проекция сечения недеформированной стружки; $\bar{S}_o(H_3)$ – проекция вдавленного абразивного зерна; H_3 – высота абразивного зерна при контакте с металлом; C, m – параметры, описывающие параболическую форму абразивного зерна.

Для удобства введём нормирование высоты

$$H_3^* = \frac{H_3}{H_{CK}} = \frac{H_3 \cdot \rho^{\frac{1}{p}}}{\varepsilon}, \quad (15)$$

тогда

$$\begin{cases} \bar{S}_p(H_3^*) = \frac{2}{C^m \cdot \rho^p} \cdot \int_0^\infty z^m \cdot \exp[-(z + H_3^* \cdot \varepsilon)^p] \cdot dz, \\ \bar{S}_o(H_3^*) = \frac{\pi \cdot m}{C^{2 \cdot m} \cdot \rho^p} \cdot \int_0^\infty z^{2 \cdot m - 1} \cdot \exp[-(z + H_3^* \cdot \varepsilon)^p] \cdot dz. \end{cases} \quad (16)$$

Выразить эти интегралы в конечном виде через элементарные функции невозможно, поэтому запишем:

$$\begin{cases} \bar{S}_p(H_3^*) = 2 \cdot f_p(H_3^*, \beta, m) \cdot \left(\frac{b}{k}\right)^{\frac{m+1}{p}} \cdot \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{m \cdot (\beta+1)}{p}}, \\ \bar{S}_o(H_3^*) = \pi \cdot m \cdot f_o(H_3^*, \beta, m) \cdot \left(\frac{b}{k}\right)^{\frac{2 \cdot m}{p}} \cdot \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{2 \cdot m \cdot (\beta+2)}{p}}, \end{cases} \quad (17)$$

где $f_p(H_3^*, \beta, m)$ и $f_o(H_3^*, \beta, m)$ выражаются системой уравнений:

$$\begin{cases} f_p(H_3^*, \beta, m) = \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{m+1}{p}} \times \\ \times \int_0^\infty z^m \cdot \exp[-(z + H_3^* \cdot \varepsilon)^p] dz, \\ f_o(H_3^*, \beta, m) = \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{2 \cdot m}{p}} \times \\ \times \int_0^\infty z^{2 \cdot m - 1} \cdot \exp[-(z + H_3^* \cdot \varepsilon)^p] dz. \end{cases} \quad (18)$$

Для оптимизации практического применения зависимостей на рисунках 4 и 5 представлены графики этих функций.

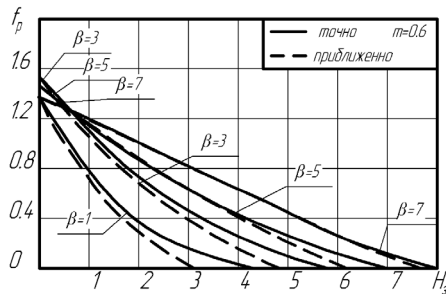


Рис. 4. График функции $f_p(H_3^*, \beta, m)$

Fig. 4. Function Graph $f_p(H_3^*, \beta, m)$

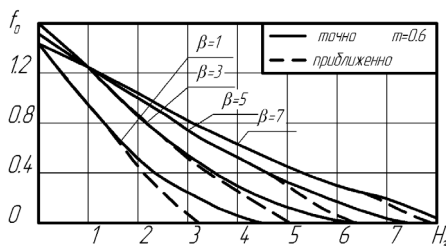


Рис. 5. График функции $f_o(H_3^*, \beta, m)$

Fig. 5. Function Graph $f_o(H_3^*, \beta, m)$

Сравнивая формулы (18) с приближенным расчетом площадей $\bar{S}_p(H_3^*)$ недеформированной стружки и $\bar{S}_o(H_3^*)$ вдав-

ливания зерна в металл, не учитывающим шероховатость поверхности детали, считаем, что высота профиля детали неизменна и равна математическому ожиданию M , тогда

$$\begin{cases} \bar{S}_p(H_3) \approx 2 \cdot \int_0^{(M-H_3)} x(z) \cdot dz = \frac{2 \cdot (M - H_3)^{m+1}}{C^m \cdot (m+1)}, \\ \bar{S}_o(H_3) \approx \frac{\pi}{2} [x(M - H_3)]^2 = \frac{\pi \cdot (M - H_3)^{2 \cdot m}}{2 \cdot C^{2 \cdot m}}. \end{cases} \quad (19)$$

Значения функций $f_p(H_3^*, \beta, m)$ и $f_o(H_3^*, \beta, m)$ определяются по формулам:

$$\begin{cases} f_p(H_3^*, \beta, m) \approx \frac{\left[\Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right) \right]^{m+1}}{(m+1)} \times \\ \times \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{m+1}{p}} \cdot \left[1 - \frac{\varepsilon \cdot H_3^*}{\Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right)} \right]^{m+1}, \\ f_o(H_3^*, \beta, m) \approx \frac{\left[\Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right) \right]^{2 \cdot m}}{2 \cdot m} \times \\ \times \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{2 \cdot m}{p}} \cdot \left[1 - \frac{\varepsilon \cdot H_3^*}{\Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right)} \right]^{2 \cdot m}. \end{cases} \quad (20)$$

На рисунках 4, 5 приближенные функции f_p и f_o изображены пунктиром. Для зёрен, глубоко проникающих в металл (H_3^* имеет малые значения), правильность приближения является неплохой, а для зёрен с незначительной глубиной внедрения (H_3^* имеет большие значения) разногласие является значительным.

Проведем анализ суммарных площадей проекций S_p поверхностей контакта всех зёрен, имеющих на единице площади брусков.

Поскольку $\bar{S}_p = b$ независимо от вида функций $n(h)$ распределения вершин по высоте и $z(x)$ функции, обрисовывающей усреднённый профиль вершин зёрен, то вычисляем лишь

$$\bar{S}_o = \frac{\pi \cdot m \cdot k}{C^{2 \cdot m}} \cdot \int_0^\infty H_3^\beta \cdot \int_0^\infty z^{2 \cdot m - 1} \cdot \exp[-\rho \cdot (z + H_3)^p] \cdot dz \cdot dH_3, \quad (21)$$

После ряда преобразований получим

$$\bar{S}_o = \frac{\pi \cdot m \cdot \Gamma(2 \cdot m) \cdot \Gamma(\beta+1) \cdot \Gamma\left(\frac{\beta+2 \cdot m+1}{p}\right)}{p \cdot \Gamma(\beta+2 \cdot m+1)} \cdot \frac{k}{C^{2 \cdot m}} \cdot \left(\frac{1}{\rho}\right)^{\frac{\beta+2 \cdot m+1}{p}}, \quad (22)$$

или

$$\bar{S}_o = \pi \cdot r_4 \cdot b^{\frac{\beta+2 \cdot m+1}{p}} \cdot k^{\frac{1-m}{p}} \cdot \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{m \cdot (\beta+3)}{p}}, \quad (23)$$

где

$$\begin{aligned} r_4 = & \frac{m \cdot \Gamma(2 \cdot m) \cdot \Gamma(\beta+1) \cdot \Gamma\left(\frac{\beta+2 \cdot m+1}{p}\right)}{p \cdot \Gamma(\beta+2 \cdot m+1)} \times \\ & \times \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{\beta+2 \cdot m+1}{p}}. \end{aligned} \quad (24)$$

Коэффициент r_4 зависит от показателя степени распределения зёрен по высоте (β) и параметра, описывающего форму зерна (m) (рис. 6).

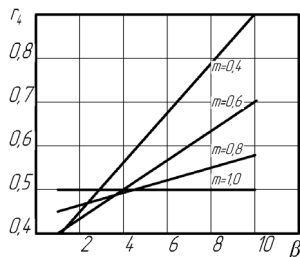


Рис. 6. Определение коэффициента r_4
Fig. 6. Determining coefficient r_4

Зная площади проекций поверхности контакта бруска с деталью, можно определить среднее значение переднего угла γ_{cp} зёрен при стационарном съеме:

$$\gamma_{cp} = -arctg \left[\pi \cdot r_4 \cdot \left(\frac{1}{b}\right)^{\frac{1-m}{p}} \cdot k^{\frac{1-m}{p}} \cdot \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{m(\beta+3)}{p}} \right]. \quad (25)$$

Число режущих зёрен на единицу площади брусков –

$$n_p = k \cdot \int_0^{\infty} z^{\beta} \cdot \exp[-\rho \cdot (z + h_{kp})^p] \cdot dz. \quad (26)$$

Выполнив преобразования, получим

$$n_p(h_{kp}^*) = f_n(h_{kp}^*, \beta, m) \cdot b^{\frac{\beta+1}{p}} \cdot k^{\frac{m+1}{p}} \cdot C^{\frac{m(\beta+3)}{p}}, \quad (27)$$

где

$$f_n(h_{kp}^*, \beta, m) = \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{\beta+1}{p}} \times \int_0^{\infty} z^{\beta} \cdot \exp[-(z + h_{kp}^* \cdot \varepsilon)^p] \cdot dz. \quad (28)$$

Графики функции $f_n(h_{kp}^*, \beta, m)$ представлены на рисунке 7.

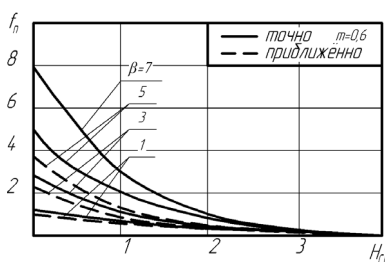


Рис. 7. Определение функции $f_n(h_{kp}^*, \beta, m)$
Fig. 7. Function definition $f_n(h_{kp}^*, \beta, m)$

Предположив, что высота профиля детали равна математическому ожиданию M , найдем приблизительное количество режущих зёрен. При этом формула (27) сохраняется, а приблизительное значение $f_n(h_{kp}^*, \beta, m)$ будет рассчитываться по формуле:

$$f_n(h_{kp}^*, \beta, m) \approx \frac{\left[\Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right) \right]^{\beta+1}}{\beta+1} \cdot \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{\beta+1}{p}} \cdot \left[1 - \frac{h_{kp}^* \cdot \varepsilon}{\Gamma\left(\frac{p+1}{p}\right)} \right]^{\beta+1}. \quad (29)$$

Приближенные значения f_n для некоторых значений β показаны пунктиром на рисунке 7.

Общее число контактных зёрен определим из формул 27 и 28, полагая, что $h_{kp}^* = 0$:

$$n_k = r_5 \cdot b^{\frac{\beta+1}{p}} \cdot k^{\frac{m+1}{p}} \cdot C^{\frac{m(\beta+1)}{p}}, \quad (30)$$

где r_5 – коэффициент, зависящий от β и m (рис. 8):

$$r_5 = \frac{\Gamma\left(\frac{\beta+1}{p}\right)}{p} \cdot \left[\frac{\Gamma(p+1)}{2 \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\beta+1)} \right]^{\frac{\beta+1}{p}}. \quad (31)$$

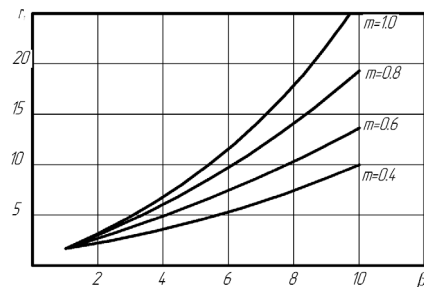


Рис. 8. Определение коэффициента r_5
Fig. 8. Determining coefficient r_5

Полученные зависимости позволяют провести расчёт усилий резания, температурных зависимостей [4].

Приняв допущение того, что условные напряжения среза постоянны и одинаковые пределом текучести σ_s металла, а коэффициент трения по задней поверхности равен μ_r , тангенциальную F_p и нормальную Q , составляющие силы резания, определяем по формулам:

$$F_p = \delta_s \cdot (\bar{S}_p + \mu_r \cdot \bar{S}_o) = \delta_s \cdot \left[b + \frac{\pi \cdot r_4 \cdot \mu_r \cdot b^{\frac{\beta+2m+1}{p}} \cdot k^{\frac{1-m}{p}}}{C^{\frac{m(\beta+3)}{p}}} \right], \quad (32)$$

$$Q = \delta_s \cdot \bar{S}_o = \delta_s \cdot \frac{\pi \cdot r_4 \cdot b^{\frac{\beta+2m+1}{p}} \cdot k^{\frac{1-m}{p}}}{C^{\frac{m(\beta+3)}{p}}}. \quad (33)$$

При хонинговании с заданным давлением абразивных зёрен на металл Q интенсивность съёма b будет равна

$$b = \left(\frac{Q}{\pi \cdot \delta_s \cdot r_4} \right)^{\frac{p}{\beta+2m+1}} \cdot \left(\frac{1}{k} \right)^{\frac{1-m}{\beta+2m+1}} \cdot C^{\frac{m(\beta+3)}{\beta+2m+1}}. \quad (34)$$

Результаты и их обсуждение. Алгоритм вычислений (формулы 1-34) позволил определить влияние отдельных факторов на микрогеометрию детали и процесс резания при хонинговании. Проведено сравнение результатов моделирования с аналитической теорией [5, 6].

Использовался принцип последовательного варьирования каждого из рассматриваемых факторов, что дало возможность изучить их влияние. Экспериментальным путём определить влияние каждого из рассматриваемых факторов фактически невозможно, поскольку происходит изменение сразу нескольких величин. Например, увеличив скорость вращательного движения, мы одновременно изменим абсолютную скорость резания и угол скречивания, а изменяя марку хонинговальных брусков, сразу варьруем как форму зёрен, так и законы распределения по высоте.

Таблица 1

Результаты моделирования процесса хонингования методом Монте-Карло

Table 1

Results of simulation of the honing process by the Monte Carlo method

№ хода Number	Число контактных зёрен, z_c , шт. Number of contact grains, z_c , pcs.	Число режущих зёрен z_p , шт. Number of cutting grains, z_p , pcs.	Математическое ожидание высоты профиля, М, мкм Mathematical expectation of the profile height, M, μm	Среднеквадратическая высота неровностей, $H_{\text{СК}}$, мкм Root-mean-square irregularity height, $H_{\text{СК}}$, μm	Среднеарифметическая высота неровности, R_a , мкм Arithmetic mean roughness height, R_a , μm	Площадь среза, S_p , мкм ² Cut area, μm^2	Нормальная составляющая силы резания, Q, МПа Normal component of cutting force, MPa	Тангенциальная составляющая силы резания, F, МПа Tangential component of cutting force, MPa	Шаг неровностей, $S_{\text{ш}}$, мкм Irregularity pitch, microns
1	151	67	-3,81	1,401	1,152	22,33	0,9951	0,3366	51,89
2	75	36	-6,05	1,662	1,298	27,44	0,5640	0,1989	49,23
3	106	55	-8,94	1,598	1,264	25,59	0,7932	0,2697	49,23
4	98	57	-12,24	1,600	1,294	29,54	0,8265	0,2848	53,33
5	96	49	-14,74	1,484	1,230	23,11	0,6858	0,2261	51,89
6	112	61	-17,85	1,709	1,352	25,24	0,8278	0,2812	56,47
7	88	51	-20,60	1,566	1,276	27,89	0,7099	0,2428	49,23
8	97	57	-23,60	1,557	1,256	27,86	0,7797	0,2671	46,83
9	94	54	-26,55	1,620	1,311	28,02	0,7612	0,2605	42,67
10	85	42	-28,64	1,354	1,102	21,80	0,5750	0,1892	49,23
11	108	57	-31,86	1,551	1,313	26,52	0,8295	0,2835	51,89
12	95	53	-34,92	1,809	1,433	29,58	0,7995	0,2760	45,71
13	102	51	-37,36	1,613	1,287	22,07	0,6738	0,2261	49,23

Рассчитаем среднеквадратическую высоту неровностей для хонингования с параметрами, отвечающими базовым условиям:

$$H_{\text{СК}} = r_1 \left(\frac{b \cdot c^m}{k} \right)^{\frac{1}{p}} = 0,45 \cdot \left(\frac{7,1 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0173^{0,5}}{5,69 \cdot 10^{-9}} \right)^{\frac{1}{4,06}} = 1,58 \text{ мкм.}$$

Моделированием с помощью метода Монте-Карло получено $H_{\text{СК}} = 1,59$ мкм.

Сравнительные результаты расчётов при других исходных данных сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Сравнение аналитических расчетов и результатов моделирования методом Монте-Карло

Table 2

Comparison of analytical calculations and Monte Carlo simulation results

№ п/п No.	Варьируемые факторы Variable factors	Теоретические расчеты Theoretical calculations		Моделирование Modeling		Отклонение, % Deviation, %	
		$H_{\text{СК}}$	R_a	$H_{\text{СК}}$	R_a	$H_{\text{СК}}$	R_a
1	Базовый / Control	1,58	1,26	1,59	1,28	+0,7	+1,7
2	0,01	1,48	1,18	1,45	1,16	-2,1	-1,7
3	$C = 0,04$	1,76	1,4	1,74	1,40	-1,1	-0,7
4	$C = 0,08$	1,91	1,53	1,93	1,54	+1,0	+0,6
5	$b = 3 \cdot 10^{-10}$	1,28	1,02	1,24	0,99	-3,2	-3,0
6	$b = 5 \cdot 10^{-10}$	1,45	1,16	1,41	1,13	-2,7	-2,6
7	$b = 10 \cdot 10^{-10}$	1,72	1,38	1,69	1,37	-1,5	-0,7
8	$z_0 = 2 \cdot 10^{-7}$	2,06	1,65	2,16	1,72	+4,6	+4,0
9	$z_0 = 10 \cdot 10^{-7}$	1,38	1,10	1,36	1,09	-1,4	-0,9
10	$z_0 = 20 \cdot 10^{-7}$	1,16	0,93	1,16	0,93	0,0	0,0
Средняя погрешность, % / Average error, %						-0,067	-0,033

Анализ таблицы 1 выявил воздействие некоторых факторов на процесс резания и микрогеометрию детали при разнообразных условиях хонингования. В частности, высотные характеристики шероховатости детали (R_a , H_{CK}) зависят в основном от закона распределения абразивных зёрен по высоте, а шаг неровностей (S_M) – от формы профиля вершин зёрен. Установлено, что при алмазном хонинговании чугуновых деталей брусками на металлических связках упругие деформации инструмента невелики и не оказывают существенного влияния на процесс резания.

Сходные расчеты проведены также для других условий хонингования, и построены графики (рис. 9), показывающие воздействие различных факторов на основные показатели процесса. В каждом расчёте варьировался лишь один фактор (отмеченный стрелкой на графиках рисунка 9), а остальные факторы оставались неизменными.

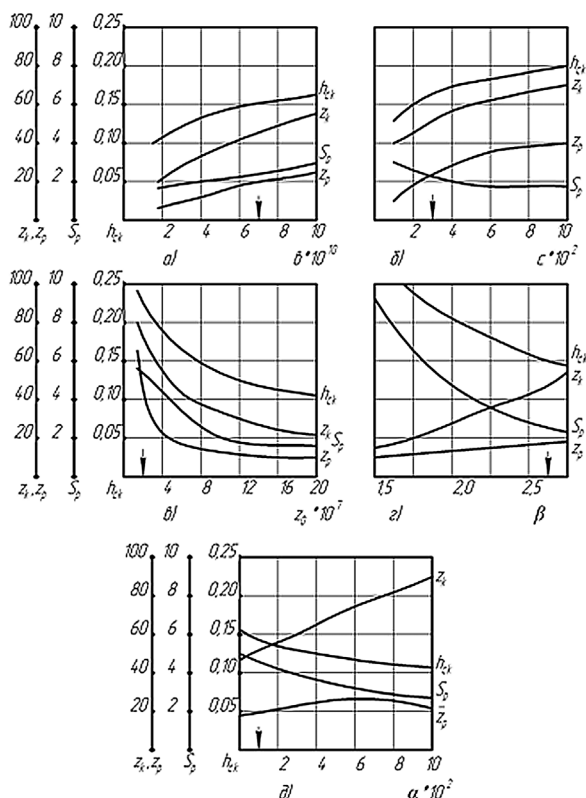


Рис. 9. Влияние отдельных факторов на параметры процесса хонингования
Fig. 9. Influence of individual factors on the parameters of the honing process

Изменение формы зёрен (коэффициент C) воздействует на все параметры процесса (рис. 9б). Чем более острыми являются зёрна (C увеличивается), тем больше число

режущих зёрен и меньше нагрузка на одно зерно. Следовательно, процесс резания протекает в более благоприятных условиях. При уменьшении C за счет как затупления зёрен, так и применения абразива с более округленными вершинами, резание затрудняется, но качество обрабатываемой поверхности повышается (рис. 9б).

Соразмерное изменение количества зёрен z_0 на всех уровнях режущего слоя оказывает противоположное воздействие на качество обрабатываемой поверхности в сравнении с интенсивностью съёма (рис. 9в).

С уменьшением C неровности становятся более пологими, как бы растягиваясь в длину и уменьшаясь по высоте. Это увеличивает опорную поверхность и эксплуатационные свойства детали. Анализ зависимости параметров хонингования от показателя β (рис. 9г) показал, что с ростом β повышается процент режущих и контактных зёрен, уменьшаются нагрузка на одно зерно и шероховатость поверхности детали [7].

Роль упругих деформаций в процессе хонингования иллюстрируется графиками на рисунке 9д. При росте коэффициента деформирования средняя площадь среза на одно зерно и шероховатость падают, в то же время увеличивается число контактных зёрен. Продольные характеристики шероховатости зависят в большей степени от формы зёрен, чем от интенсивности съёма.

Выводы

1. Разработанная методика моделирования хонингования позволяет вести расчёт параметров процесса с учётом упругих деформаций абразивного инструмента.
2. Полученные формулы и алгоритм моделирования позволяют предсказать параметры процесса хонингования, назначить оптимальные режимы обработки в соответствии с требуемой микрогеометрией детали. Зная характеристики абразивных брусков и свойства обрабатываемого металла, можно определить интенсивность съёма, а также другие параметры процесса хонингования.
3. Результаты моделирования процесса хонингования методом Монте-Карло показали, что шероховатости детали (R_a , H_{CK}) зависят в основном от закона распределения абразивных зёрен по высоте, а шаг неровностей (S_M) – от формы профиля вершин зёрен.
4. Результаты выполненных экспериментальных исследований могут быть использованы при оценке эксплуатационных свойств и разработке новых хонинговальных брусков с учетом термических и силовых явлений, а также при исследовании воздействия обратных связей по усилию прижима брусков к детали на процесс хонингования.
5. Результаты проведённого теоретико-вероятностного изучения могут быть применены также к другим видам абразивной обработки.

References

Библиографический список

1. Нефедкин А.И., Одинокова И.В. Исследование закономерностей воздействия абразивных зерен хонинговальных брусков на поверхность обрабатываемой детали // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2018. № 2 (84). С. 37-43. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-37-43>
2. Нефедкин А.И., Одинокова И.В., Томилиная А.А., Сидоренко Т.А. Оптимизация процесса хонингования алмазными брусками с использованием методики полного

1. Nefedkin A.I., Odinkova I.V. Issledovanie zakonomenostey vozdeystviya abrazivnykh zeren khoningol'nykh bruskov na poverkhnost' obrabatyvaemoy detal' [Study of the impact patterns between the abrasive grit of honing stones and workpiece surface]. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*, 2018; 2 (84): 37-43. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-37-43> (In Rus.)
2. Nefedkin A.I., Odinkova I.V., Tomilina A.A., Sidorenko T.A. Optimizatsiya protsessa khoningovaniya almaznymi

факторного эксперимента // Механизация строительства. 2017. Т. 78. № 1. С. 55-58.

3. Leonov O.A., Shkaruba N.Z., Vergazova Y.G., Golinitzkiy P.V., Antonova U.Y. Quality control in the machining of cylinder liners at repair enterprises. *Russian Engineering Research*, 2020; 40 (9): 726-731.

4. Бабичев А.П. Хонингование / А.П. Бабичев, Ю.Н. Полянчиков, А.В. Славин, В.М. Шумячкер, М.Ю. Полянчикова, Л.В. Гусакова; Под общ. ред. А.П. Бабичева. Волгоград: ВолгГАСУ, 2013. 245 с.

5. Неведкин А.И. Исследование закономерностей повышения давления шлама и СОЖ в подбрусковом пространстве на процесс хонингования // Механизация строительства. 2016. Т. 77. № 12. С. 24-27.

6. Buj-Corral I., Alvarez-Flórez J., Dominguez-Fernández A. Effect of grain size and density of abrasive on surface roughness, material removal rate and acoustic emission signal in rough honing processes. *Metals*. 2019; 9 (8): 860. <https://doi.org/10.3390/met9080860>

7. Хонинговальная головка: Пат. 182190 Российская Федерация, МПК В24В33/08 / А.И. Неведкин, И.В. Одинокова, А.В. Суходоля. № 2017128435; заявл. 09.08.2017; опубл. 07.08.2018, Бюл. № 22.

Критерии авторства

Неведкин А.И., Одинокова И.В., Гаевский В.В. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов подготовили рукопись. Неведкин А.И., Одинокова И.В., Гаевский В.В. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 09.11.2021

Одобрена после рецензирования 09.03.2022

Принята к публикации 14.03.2022

bruskami s ispol'zovaniyem metodiki polnogo faktornogo eksperimenta [Optimization of honing with diamond bars using the methodology of a full factorial experiment]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*, 2017; 78(1): 55-58. (In Rus.)

3. Leonov O.A., Shkaruba N.Z., Vergazova Y.G., Golinitzkiy P.V., Antonova U.Y. Quality control in the machining of cylinder liners at repair enterprises. *Russian Engineering Research*, 2020; 40(9): 726-731.

4. Babichev A.P., Polyanchikov Yu.N., Slavin A.V., Shumyacher V.M., Polyanchikova M.Yu., Gusakova L.V. Khoningovanie [Honing]. Ed. by A.P. Babichev. Volgograd, VolgGASU, 2013. 245 p. (In Rus.)

5. Nefedkin A.I. Issledovanie zakonomernostey povysheniya davleniya shlama i SOZH v podbruskovom prostranstve na protsess khoningovaniya [Study of the patterns of increasing the pressure of sludge and coolant in the under-bar space on the honing process]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*, 2016; 77(12): 24-27. (In Rus.)

6. Buj-Corral I., Alvarez-Flórez J., Dominguez-Fernández A. Effect of grain size and density of abrasive on surface roughness, material removal rate and acoustic emission signal in rough honing processes. *Metals*, 2019; 9 (8): 860. <https://doi.org/10.3390/met9080860>

7. Nefedkin A.I., Odinkova I.V., Sukhodolya A.V. Khoningoval'naya golovka [Honing head]: Pat. 182190 Russian Federation, IPC B24B33/08. No. 2017128435, 2018. (In Rus.)

Contribution

A.I. Nefedkin, I.V. Odinkova, V.V. Gaevskiy performed theoretical studies and, based on the results obtained wrote the manuscript. A.I. Nefedkin, I.V. Odinkova, V.V. Gaevskiy 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 09.11.2021

Approved after reviewing 09.03.2022

Accepted for publication 14.03.2022

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 620.193

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-64-67

ЗАЩИТА РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ОТ ТЕРМООКСИДТЕЛЬНОГО СХВАТЫВАНИЯ

ПИКИНА АННА МИХАЙЛОВНА, аспирант

lapsar.anna2013@yandex.ru

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

Аннотация. Современная промышленность предъявляет ряд жестких требований к эксплуатационным свойствам крепёжных соединений. Все элементы крепления, изготовленные из металла, подвержены коррозионно-механическому изнашиванию, а разборка таких соединений – трудоемкий процесс, который часто сопровождается разрушением детали. Предотвратить повреждение резьбовых соединений можно с помощью нанесения на деталь специальной резьбовой смазки. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработана рецептура высокотемпературной резьбовой смазки «Удар», содержащей компоненты: дисульфид молибдена (70 мас. ч.), диоксид титана (3 мас. ч.), смесь коллоидного графита (70 мас. ч.), алюминий (пудра) (5 мас. ч.), ОМИК «ТЕЛАЗ» (10 мас. ч.), загуститель (петролатум), промышленное масло И-40 А. Проведены исследования эффективности смазки по защите крепёжных деталей от атмосферной коррозии и коррозионного схватывания на шести образцах, представляющих пару «Болт-гайка». Результаты сравнительных лабораторных испытаний разработанного состава с зарубежными смазками показали, что разработанная резьбовая смазка способна обеспечить защиту резьбовых соединений от термоокислительного схватывания изделий до 900°C. Применение данного состава позволит значительно уменьшить трудоемкость демонтажа оборудования за счет снижения абсолютной величины крутящего момента при разборке крепёжных изделий, а также исключить термохимическое и коррозионное «схватывание» резьбовых соединений.

Ключевые слова: защитные материалы, коррозия, резьбовая смазка, крепёжные детали, термоокислительное схватывание, техническое обслуживание.

Формат цитирования: Пикина А.М. Защита резьбовых соединений от термоокислительного схватывания // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 3. С. 64-67. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-64-67>.

© Пикина А.М., 2022



ORIGINAL PAPER

IMPROVING THE CORROSION RESISTANCE
OF THREADED JOINTS BY USING LUBRICANTS

ANNA M. PIKINA (Eng), postgraduate student

lapsar.anna2013@yandex.ru

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

Abstract. Modern industry places a number of stringent requirements to the performance properties of fasteners. All fastening elements made of metal are subject to corrosion-mechanical wear. Their disassembling is a time-consuming process which is often accompanied by destruction of the part. Damage to threaded connections can be prevented by applying a special thread lubricant to the part. Based on theoretical and experimental research, the authors have developed a formulation of high-temperature thread compound “Udar”, which contains the following components: molybdenum disulphide (70 wt.%), titanium dioxide (3 wt.%), colloidal graphite compound (70 wt.%), aluminium (powder) (5 wt.%), OMIK “TELAZ” (10 wt.%), thickener (petrolatum), and industrial oil I-40A. The lubricant efficiency in protecting fasteners against atmospheric corrosion and corrosion setting was tested on six specimens representing a pair of “bolt-nut”. The results of comparative laboratory tests of the developed composition with foreign-made greases have shown that the developed thread lubricant is able to protect threaded joints from thermal-oxidative setting occurring at up to 900°C. Application of this composition will considerably reduce the equipment disassembling time due to reduction of the absolute value of torque when disassembling fasteners, and prevent thermochemical and corrosion “seizure” of threaded joints.

Key words: protective materials, corrosion, thread lubricant, fasteners, thermal oxidation setting, maintenance.

For citation: Pikina A.M. Improving the corrosion resistance of threaded joints by using lubricants. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(3): 64-67. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-64-67>.

Введение. Резьбовые соединения используются в любой отрасли промышленности практически на любом оборудовании. Машины, механизмы и инструменты работают в различных условиях, поэтому резьбовые соединения

подвергаются широкому диапазону нагрузок, перепадам температур, воздействию агрессивных факторов окружающей среды и т.д. [1-3]. Чаще всего при эксплуатации резьбовых соединений под влиянием механических нагрузок и атмосферных факторов, способствующих процессам окисления и коррозии, возникает термическое и коррозионное схватывание [4]. Демонтаж такого соединения затруднен и, как правило, сопровождается разрушением всей детали. Внешний вид таких соединений представлен на рисунке 1. Решить данную проблему можно с помощью применения специальных резьбовых смазок [5, 6].

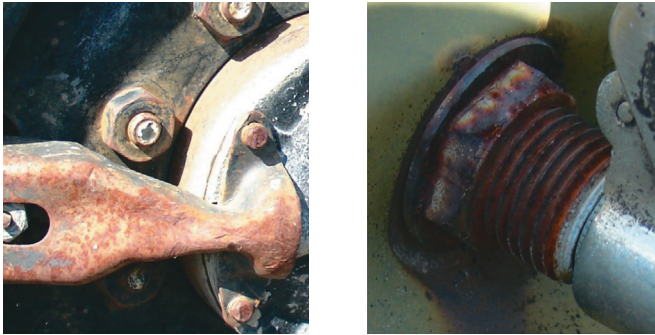


Рис. 1. Внешний вид резьбовых соединений сельскохозяйственной техники при эксплуатации и длительном хранении

Fig. 1. View of threaded joints of agricultural machinery during their operation and long-term storage

Цель исследования: повышение долговечности резьбовых соединений при эксплуатации и хранении сельскохозяйственной техники применением резьбовой смазки.

Материалы и методы. На основании теоретических и экспериментальных данных разработана рецептура защитной резьбовой смазки «Удар», содержащей следующие компоненты: дисульфид молибдена и диоксид титана, взятые в массовом соотношении 70:3; смесь коллоидного графита (70 мас. ч.), алюминий (пудра) (5 мас. ч.) и ОМИК «ТЕЛАЗ» (10 мас. ч.); загуститель (петролатум); промышленное масло И-40 А.

Технология приготовления смазки заключается в последовательном введении в подогретое до 60...70°C промышленное масло И-40А при постоянном перемешивании в указанном массовом соотношении петролатума, ОМИК «ТЕЛАЗ», дисульфид молибдена, графита, порошка алюминия и диоксида титана.

Нанесение резьбовой смазки осуществляется следующим образом. Крепежные соединения очищают от загрязнений и продуктов коррозии механическим способом (металлическими щетками, пескоструйной установкой и т.п.). При наличии консервационной смазки их промывают ацетоном или бензином. На очищенную поверхность крепежных деталей шпателем или кисточкой наносят небольшое количество резьбовой смазки, которое равномерно распределяют по резьбе, не допуская присутствия незащищенных участков. Избыток смазки, выдавленной при закручивании резьбовой пары, удаляют либо равномерно распределяют по защищаемой поверхности тонким слоем. При необходимости смазка может быть подогрета до получения требуемой вязкости. После нанесения смазки сборка и закрепление крепежных пар производятся

в установленном инструкции по эксплуатации агрегатов сельскохозяйственной техники порядке [7, 8].

Механизм защитного действия резьбовой смазки экспериментально исследован на шести образцах, представляющих пару «Болт-гайка».

Эффективность смазки по защите крепежных деталей от атмосферной коррозии и коррозионного схватывания исследована на образцах из стали 30ХГСА и на стальных резьбовых соединениях с гальваническим покрытием в соответствии с ГОСТ 9.054-80.

Резьбовую пару с нанесенным исследуемым составом собирали с помощью динамометрического ключа. Крутящий момент при сборке составлял 50 Нм. Величину крутящего момента при разборке определяли по показаниям шкалы динамометрического ключа.

Результаты и их обсуждение. Исследование влияния соотношения массы диспергированных твердых компонентов к общей массе состава показало, что при соотношении массы твердых компонентов к общей массе менее 0,8 происходит быстрая седиментация диспергированных компонентов.

Результаты сравнительных испытаний разработанного состава и зарубежных составов, предназначенных для защиты от термоокислительного схватывания, представлены на рисунке 2. Анализ данных показывает, что введение антифрикционных компонентов позволяет существенно снизить величину крутящего момента, необходимого для разборки крепежных деталей.

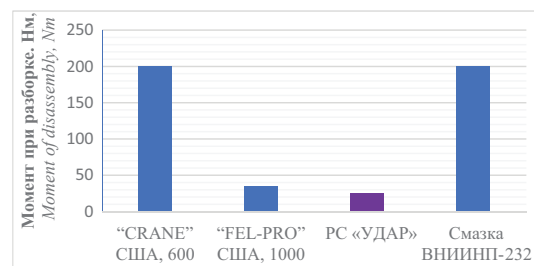


Рис. 2. Результаты сравнительных испытаний составов, предотвращающих термоокислительное схватывание

Fig. 2. Results of comparative tests of compositions preventing thermal-oxidative setting

Таким образом, разработанный состав резьбовой смазки «Удар» обеспечивает защиту от термоокислительного схватывания изделий при температуре до 900°C. Применение разработанного состава позволяет существенно снизить трудоемкость демонтажа оборудования за счет снижения необходимого для разборки крутящего момента.

Исследование механизма защитного действия резьбовой смазки «Удар» показало, что:

1. При нагревании состава, заполняющего зазор между крепежными деталями, ОМИК защищает от окисления графит и дисульфид молибдена, входящие в состав композиции. Правильность этого предположения подтверждается результатами термогравиметрического анализа состава в режиме продувки воздухом с расчетом кинетических параметров разложения ($K_{разл}$). Результаты проведенных исследований представлены в таблице.

Данные указывают на то, что в интервале температур 400...700°C скорость разложения состава (выгорание графита и дисульфида молибдена) в присутствии ОМИК

в несколько раз ниже, чем смеси, не содержащей ОМИК. Следовательно, в данном случае создаются условия, предотвращающие окисление графита и дисульфида молибдена.

В зазоре собранного резьбового соединения в условиях ограниченной диффузии кислорода скорость окисления этих компонентов в присутствии ОМИК является еще более низкой.

Таблица

Кинетические параметры разложения резьбовой смазки «Удар» на воздухе

Table

Kinetic parameters of the decomposition of the thread lubricant “Udar” in air

T, °C	Состав без ОМИК / Composition without OMIK		Состав с 10 м.ч. ОМИК / Composition with 10 m.h. OMIK	
	Кинетический параметр разложения, $K_{разл}$, с ⁻¹ <i>Kinetic decomposition parameter, $K_{разл}$, s⁻¹</i>	Время 95% конверсии, с <i>Time of 95% conversion, s</i>	Кинетический параметр разложения, $K_{разл}$, с ⁻¹ <i>Kinetic decomposition parameter, $K_{разл}$, s⁻¹</i>	Время 95% конверсии, с <i>Time of 95% conversion, s</i>
400	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^5$
500	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^4$
550	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$0,6 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^4$
600	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$0,4 \cdot 10^4$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$0,8 \cdot 10^4$
700	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$0,2 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^4$
720	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^4$
750	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^4$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^4$
800	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^3$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^3$

2. Введение в состав ОМИК позволяет без существенного разложения антифрикционных компонентов достичь температуры 650...700°C. В этом температурном интервале на границах зазора – области свободной диффузии кислорода – создается возможность окисления и оплавления алюминиевого порошка с увеличением объема и заполнением зазора оксидом алюминия. Это приводит к тому, что диффузия кислорода внутрь зазора еще более снижается, и тем самым создаются условия для сохранения в зазоре как графита, так и дисульфида молибдена.

Формирование «запирающего слоя» подтверждено экспериментально. На поверхность шести образцов пары «Болт-гайка М24» из стали 25Х2МФ наносили разработанный состав. Образцы подвергали термообработке на воздухе при 800°C в течение 16 час. В образцах 1, 2, 3 через каждые 4 час. термообработки для разрушения «запирающего слоя» проворачивали болт относительно гайки на 20...30° и возвращали в исходное положение. Результаты эксперимента представлены на рисунке 3.

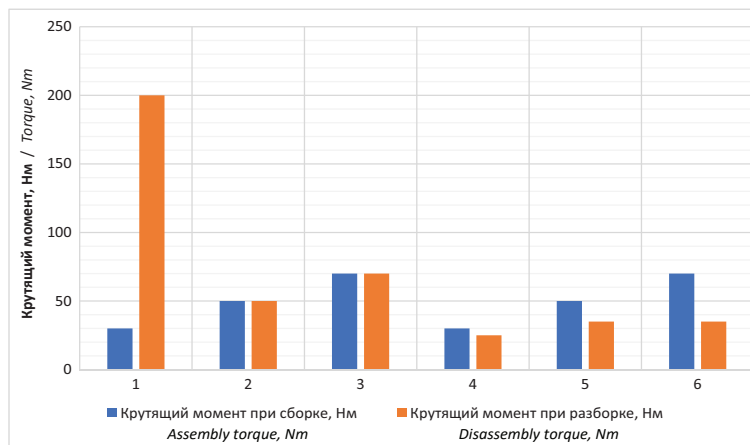


Рис. 3. Результаты эксперимента по исследованию формирования «запирающего слоя» на паре «Болт-гайка М24»

Fig. 3. Experimental results of studying the formation of a “barring layer” on a pair of bolt-nut M24

Результаты, представленные на рисунке 3, свидетельствуют о том, что на образцах, подвергнутых периодическому воздействию, моменты, необходимые для разборки, существенно выше. При разборке пар 1, 2, 3 в зазоре обнаружен порошок светло-желтого цвета, у пар 4, 5, 6 – порошок черного цвета. Это свидетельствует об образовании «запирающего слоя», разрушение которого в образцах 1, 2, 3 привело к полному выгоранию антифрикционных компонентов и термоокислительному схватыванию резьбы.

Для определения эффективности смазки при защите крепежных деталей от атмосферной коррозии и коррозионного схватывания были проведены исследования на образцах из стали 30ХГСА и на стальных резьбовых соединениях с гальваническим покрытием.

Первая группа образцов подвергалась испытаниям с нанесением резьбовой смазки «Удар», вторая – с нанесением смазки ЦИАТИМ-201, третья группа образцов – без защитных материалов.

Испытания проводились в камере соляного тумана в соответствии с ГОСТ 9.054-80.

Результаты коррозионных испытаний показали, что на пластинах из стали 30ХГСА на контрольном образце имеются значительные очаги коррозии; при нанесении ЦИАТИМ-201 присутствуют отдельные очаги коррозии; на образце с резьбовой смазкой «Удар» коррозия отсутствует. На резьбовой паре на контрольном образце имеется значительная коррозия, и проворачивание гайки с помощью ключа осуществить невозможно. На образце с ЦИАТИМ-201 присутствуют отдельные очаги коррозии, и проворачивание гайки с помощью ключа осуществляется со значительным усилием. У образца с резьбовой смазкой «Удар»

коррозия не наблюдается, и проворачивание гайки ключом осуществляется без усилия.

Таким образом, лабораторные исследования подтверждают защитные свойства резьбовой смазки «Удар» от термического, химического и коррозионного «схватывания» крепежных деталей.

Выводы

Применение разработанной резьбовой смазки «Удар» в резьбовых соединениях позволяет минимизировать абсолютную величину крутящего момента при разборке крепежных изделий, а также исключить термохимическое и коррозионное «схватывание» резьбовых соединений.

Библиографический список

1. Гайдар С.М., Быкова Е.В., Карелина М.Ю. Перспективы использования лакокрасочных материалов, модифицированных фторсодержащими поверхностно-активными веществами, для защиты сельхозтехники // Техника и оборудование для села. 2015. № 7. С. 34-38.

2. Гайдар С.М. Применение нанотехнологий для повышения надежности машин и механизмов // Грузовик. 2010. № 10. С. 38-41.

3. Кузнецова Е.Г., Прохоренков В.Д., Князева Л.Г., Петрашев А.И., Гайдар С.М. Защитная эффективность водорастворимых ингибиторов коррозии при консервации сельскохозяйственной техники // Техника в сельском хозяйстве. 2012. № 6. С. 23-25.

4. Петровская Е.А., Гайдар С.М., Петровский Д.И. Повышение коррозионной стойкости оборудования, работающего в агрессивных средах АПК, путем применения полифункциональных ингибиторов // Инновационные технологии и технические средства для АПК: Сборник материалов Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов; Под общ. ред. Н.И. Бухтоярова, Н.М. Дерканосовой, В.А. Гулевского. 2016. С. 74-77.

5. Кузнецова Е.Г., Князева Л.Г., Прохоренков В.Д., Гайдар С.М. Консервационные составы на основе водорастворимых ингибиторов коррозии // Наука в центральной России. 2013. № 5. С. 43-47.

6. Гайдар С.М., Тарасов А.С., Лазарев В.А. Ингибитор коррозии металлов // Патент на изобретение RU2263160 C1, 27.10.2005. Заявка № 2004130182/02 от 12.10.2004 г.

7. Гайдар С.М., Низамов Р.К., Прохоренков В.Д., Кузнецова Е.Г. Инновационные консервационные составы для защиты сельскохозяйственной техники от коррозии // Техника и оборудование для села. 2012. № 11. С. 40-43.

8. Консервационная консистентная смазка: патент на изобретение RU2553001 C1, 10.06.2015 / С.М. Гайдар, А.Л. Дмитриевский, Д.И. Петровский, Е.А. Петровская. Заявка № 2014115955/04 от 22.04.2014 г.

Критерии авторства

Пикина А.М. выполнила теоретические исследования, на основании полученных результатов провела эксперимент и подготовила рукопись. Пикина А.М. имеет на статью авторские права и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 15.03.2022

Одобрена после рецензирования 01.04.2022

Принята к публикации 04.04.2022

References

1. Gaidar S.M., Bykova E.V., Karelina M.Yu. Perspektivy ispol'zovaniya lakokrasochnykh materialov, modifitsirovannykh florsoderzhashchimi poverkhnostnoaktivnymi veshchestvami, dlya zashchity sel'khoztehniki [Prospects for the use of paints and varnishes modified with fluorine-containing surfactants for the protection of agricultural machinery]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*, 2015; 7: 34-38. (In Rus.)

2. Gaidar S.M. Primenenie nanotekhnologii dlya povysheniya nadezhnosti mashin i mekhanizmov [Application of nanotechnologies to improve the reliability of machines and mechanisms]. *Gruzovik*, 2010; 10: 38-41. (In Rus.)

3. Kuznetsova E.G., Prokhorenkov V.D., Knyazeva L.G., Petrashev A.I., Gaidar S.M. Zashchitnaya effektivnost' vodorastvorimyykh ingibitorov korrozii pri konservatsii sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Protective efficiency of water-soluble corrosion inhibitors used for the stand-by stowage of farm machinery]. *Tekhnika v sel'skom khozyaystve*, 2012; 6: 23-25. (In Rus.)

4. Petrovskaya E.A., Gaidar S.M., Petrovsky D.I. Povyshenie korroziionnoy stoykosti oborudovaniya, rabotayushchego v agresivnykh sredakh APK putem primeneniya polifunktional'nykh ingibitorov [Improving the corrosion resistance of equipment operating in aggressive agricultural environments by using polyfunctional inhibitors]. In: *Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskkiye sredstva dlya APK. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov*. Ed. by N.I. Bukhtoyarov, N.M. Derkanosov, V.A. Gulevskiy, 2016: 74-77. (In Rus.)

5. Kuznetsova E.G., Knyazeva L.G., Prokhorenkov V.D., Gaidar S.M. Konservatsionnye sostavy na osnove vodorastvorimyykh ingibitorov korrozii [Preservative compositions based on water-soluble corrosion inhibitors]. *Nauka v tseentral'noy Rossii*, 2013; 5: 43-47. (In Rus.)

6. Gaidar S.M., Tarasov A.S., Lazarev V.A. Ingibitor korrozii metall-ov [Metal corrosion inhibitor]; Patent for invention RU2263160 C1, 27.10.2005. Application No. 2004130182/02 dated October 12, 2004. (In Rus.)

7. Gaidar S.M., Nizamov R.K., Prokhorenkov V.D., Kuznetsova E.G. Innovatsionnye konservatsionnye sostavy dlya zashchity sel'skokhozyaystvennoy tekhniki ot korrozii [Innovative preservative compositions for the protection of agricultural machinery from corrosion]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*, 2012; 11: 40-43. (In Rus.)

8. Gaidar S.M., Dmitrievskiy A.L., Petrovskiy D.I., Petrovskaya E.A. Konservatsionnaya konsistentnaya smazka [Preservative grease]; patent for invention RU2553001 C1, 10.06.2015. Application No. 2014115955/04 dated April 22, 2014. (In Rus.)

Contribution

A.M. Pikina performed theoretical studies and, based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. A.M. Pikina has author's rights and bears responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 15.03.2022


Approved after reviewing 01.04.2022

Accepted for publication 04.04.2022

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 62-762:63

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-68-72

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ**МЕЛЬНИКОВ ОЛЕГ МИХАЙЛОВИЧ** , канд. техн. наукmelnikov@rgau-msha.ru ; <https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>; Scopus Author ID: 57209744643**КАЗАНЦЕВ СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ**, д-р техн. наук, профессор

smdm@rgau-msha.ru; Scopus Author ID: 57209268547

ИГНАТКИН ИВАН ЮРЬЕВИЧ, д-р техн. наук, доцентime@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>; Scopus Author ID: 57222543815**СКОРОХОДОВ ДМИТРИЙ МИХАЙЛОВИЧ**, канд. техн. наук, доцентd.skorokhodov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>; Scopus Author ID: 57223623999**БЕЛОВ МИХАИЛ ИВАНОВИЧ**, д-р техн. наук, профессор

belov@rgau-msha.ru; Scopus Author ID: 57212563127

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

Аннотация. В настоящее время следует не только улучшать технологии ремонта, но и рассматривать возможности применения различных модифицированных материалов с целью повышения послеремонтной надежности сельхозтехники. Одним из способов совершенствования резиновых уплотнений подшипниковых узлов является их модифицирование добавлением в состав резиновой композиции фторорганических соединений, оказывающих комплексное воздействие на резину, улучшающих ее физико-механические и трибологические свойства. Для определения влияния модифицирования уплотнений на трение и износ испытывали соединения, состоящие из стальной втулки диаметром 45 мм с поверхностной твердостью не менее HRC32 и манжет трех типов: серийных (ГОСТ 8752-79); модифицированных спирт-теломером (ФС-1) и фторпарафином (ФС-2) в количестве одной массовой части ФС на 100 массовых частей каучука. Износ манжет определялся по изменению ширины рабочей кромки, измеряемой ДИП-6 с оптико-электронной измерительной системой НИИК-890. Стендовые испытания показали, что объемное модифицирование фторорганическими соединениями улучшило свойства резин: износ модифицированных уплотнений по сравнению с серийными уменьшился в 1,83...1,94 раза, коэффициент трения уменьшился в 1,32...1,37 раза.


Ключевые слова: сельскохозяйственная техника, уплотнительное устройство, износ, коэффициент трения, объемное модифицирование, фторорганическое соединение.

Формат цитирования: Мельников О.М., Казанцев С.П., Игнаткин И.Ю., Скороходов Д.М., Белов М.И. Совершенствование уплотнительных устройств подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 3. С. 68-72. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-68-72>.

© Мельников О.М., Казанцев С.П., Игнаткин И.Ю., Скороходов Д.М., Белов М.И., 2022



ORIGINAL PAPER

IMPROVING SEALING ELEMENTS OF THE BEARING ASSEMBLY OF AGRICULTURAL MACHINERY**OLEG M. MELNIKOV** , PhD (Eng)melnikov@rgau-msha.ru ; <https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>; Scopus Author ID: 57209744643**SERGEY P. KAZANTSEV**, DSc (Eng), Professor

smdm@rgau-msha.ru; Author ID Scopus: 57209268547

IVAN YU. IGNATKIN, DSc (Eng), Associate Professorime@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>; Author ID Scopus: 57222543815**DMITRY M. SKOROKHODOV**, PhD (Eng), Associate Professord.skorokhodov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>; Author ID Scopus: 57223623999**MIKHAIL I. BELOV**, DSc (Eng), Professor

belov@rgau-msha.ru; Scopus Author ID: 57212563127

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

Abstract. At present, it is necessary to improve not only repair technologies, but also consider the possibility of using various modified materials to increase the post-repair reliability of agricultural machinery. One of the ways to improve the rubber seals of bearing

assemblies is to modify them by adding organofluorine compounds to the rubber composition, which have a complex effect on rubber, improve its physical, mechanical, and tribological properties. To determine the modification effect of seals on friction and wear, the author tested joints consisting of a steel bushing with a diameter of 45 mm with a surface hardness of at least HRC32 and collars of three types: serial (GOST 8752-79); modified with alcohol-telomer (FS-1) and fluoroparaffin (FS-2) in the amount of one mass part of PS per 100 mass parts of rubber. The collar wear was determined by changing the width of the working edge, measured by DIP-6 with the optoelectronic measuring system NIIK-890. Bench tests showed that volumetric modification with organofluorine compounds improved the properties of rubber: the wear of modified seals decreased in 1.83...1.94 times compared to serial ones, friction coefficient decreased in 1.32...1.37 times.

Key words: agricultural machinery, sealing device, wear, friction coefficient, volume modification, organofluorine compound.

For citation: Melnikov O.M., Kazantsev S.P., Ignatkin I.Yu., Skorohodov D.M., Belov M.I. Improving sealing elements of the bearing assembly of agricultural machinery. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(3): 68-72. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-68-72>.

Введение. Надежность отремонтированной сельскохозяйственной техники ниже, чем у новой [1], поэтому в настоящее время следует не только улучшать технологии ремонта [2], но рассматривать возможности применения различных модифицированных материалов. При ремонте подшипниковых узлов замене подлежат 100% манжет [3]. Основной причиной нарушения работоспособности уплотнений является износ по внутреннему диаметру (87% манжет), приводящий к снижению натяга до величины меньше минимального функционального [4, 5] и, как следствие, к превышению допустимых утечек. Износ и утечки увеличиваются ввиду значительного влияния таких отклонений формы и расположения поверхностей, как радиальное биение и несоосность оси вала относительно оси манжеты [6], что теоретически можно описать моделью постепенного параметрического отказа соединения с натягом [7]. Нарушение герметичности соединения «Вал-уплотнение» наблюдается у 70% ремонтируемых редукторов [8].

В соединениях «Вал-уплотнение» более интенсивно изнашиваются манжеты [9], их износ по внутреннему диаметру составляет до 2,3 мм [10]. Износ манжет зависит от антифрикционных свойств резины. Улучшить эти свойства можно изменением состава резиновой смеси и (или) энергии

поверхностного слоя изделий, созданием на поверхности износостойкой пленки¹ или обработкой поверхностей трения ПАВ [11]. Так, фторорганическое соединение (ФС), входящее в состав эпилама, позволяет образовывать мономолекулярный слой защитной пленки ПАВ, который увеличивает износостойкость и уменьшает сопротивление трению [12].

Исследования модифицированных РТИ картофелеуборочных комбайнов показали, что добавление в состав резины ФС в количестве 0,5...2,0% приводит к уменьшению адгезии и к улучшению физико-механических свойств резин [13]. В работах В.С. Юровского² и в исследовании [14] отмечено, что ФС улучшают физико-механические и антифрикционные свойства резин, оптимальным количеством вводимых ФС является 0,5...1,0 масс. ч. на 100 массовых частей каучука.

Цель исследований: совершенствование уплотнительных устройств подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники за счет улучшения их трибологических свойств.

Материалы и методы. Для определения влияния модифицирования уплотнений на величину силы трения и износостойкость соединения «Вал-манжета» проводили стендовые испытания уплотнительных узлов (рис. 1). Частота вращения вала варьировалась в диапазоне 50...3000 мин⁻¹.

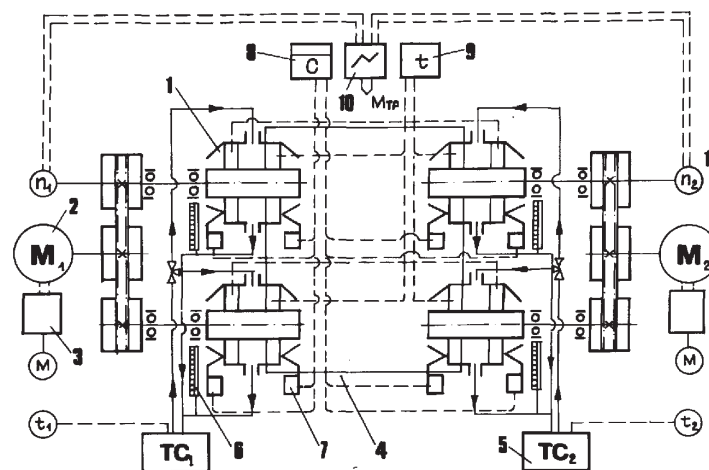


Рис. 1. Принципиальная схема испытательного стенда:

1 – рабочая камера; 2 – электропривод; 3 – датчик колебаний частоты вращения; 4 – основание; 5 – термостат; 6 – уровнемер; 7 – датчик утечки; 8 – блок счетчиков; 9 – потенциометр; 10 – шлейфный осциллограф; 11 – тахометр

Fig. 1. Schematic diagram of the test bench:

1 – working chamber; 2 – electric drive; 3 – oscillation sensor of the rotation frequency; 4 – base; 5 – thermostat; 6 – level gauge; 7 – leakage sensor; 8 – block of counters; 9 – potentiometer; 10 – loop oscilloscope; 11 – tachometer

¹ Гарбар И.И., Логинов С.В., Рябинин Н.А. и др. // Износ в машинах и методы защиты от него: Тезисы докладов Всесоюзной конференции. Брянск: Брянский технологический институт, 1985. С. 147-148.

² Юровский В.С., Краснов А.П., Афоничева О.В. и др. Совершенствование рецептуры резиновых смесей для теплостойких уплотнителей // Каучук и резина. 1999. № 1. С. 23-24.

Испытывались соединения, состоящие из стальной втулки диаметром 45 мм из стали 45 ГОСТ 1050-88 с поверхностной твердостью не менее HRC32, шероховатостью Ra = 0,32 и манжет трех типов: серийных (ГОСТ 8752-79); модифицированных спирт-теломером (ФС-1) и модифицированных фторпарафином (ФС-2) (рис. 2). Все манжеты были изготовлены на одном заводе одной группы и партии резины. Содержание фторорганических соединений в составе резиновой смеси – 1 масс. ч. на 100 массовых частей каучука.



Рис. 2. Внешний вид образцов
Fig. 2. View of samples

Для исследования фрикционных характеристик и проведения ускоренных испытаний вместо рабочей камеры устанавливали устройство для измерения усилия трения в уплотнительном узле (рис. 3).

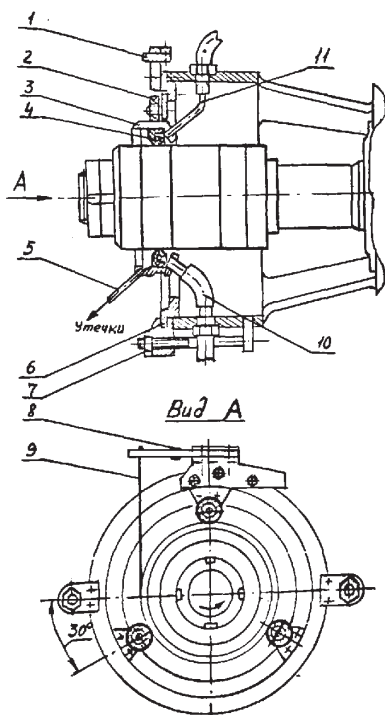


Рис. 3. Схема устройства для измерения усилия трения в соединении «Вал-манжета»:

- 1 – тензобалка; 2 – ролики; 3 – обойма поворотная;
- 4 – уплотнение; 5 – трубка отводная; 6 – корпус;
- 7 – зажим; 8 – тензодатчик; 9 – нить жесткая;
- 10, 11 – маслопроводы

Fig. 3. Scheme of a device for measuring the friction force in the “shaft-to-collar” connection:

- 1 – strain gauge; 2 – rollers; 3 – swivel clip; 4 – seal;
- 5 – outlet tube; 6 – body; 7 – clamp; 8 – load cell;
- 9 – hard thread; 10, 11 – oil pipelines

Для определения износа манжеты замеряли ширину рабочей кромки на двухкоординатном измерительном приборе ДИП-6 с оптико-электронной измерительной системой НИИК-890 (рис. 4). Количество повторений при измерениях выбирали согласно рекомендациям³. Полученные значения делили на коэффициент 0,97233, учитывающий уклон стакана.

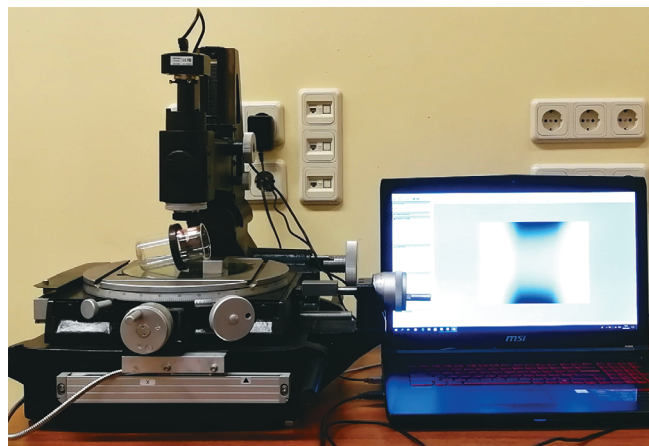


Рис. 4. Устройство для измерения ширины рабочей кромки манжеты

Fig. 4. Device for measuring the width of the working edge of the collar

Результаты и их обсуждение. Влияние модифицирования на изменение силы трения в соединении «Вал-манжета» и износ манжет определяли при ускоренных стендовых испытаниях на трех трибосоединениях (табл.).

Изменение силы трения и коэффициента трения представлено на рисунке 5, износ по ширине рабочей кромки – на рисунке 6.

Согласно результатам испытаний (рис. 5, 6) у модифицированных уплотнений по сравнению с серийными наблюдается снижение коэффициента трения в 1,32...1,37 раза, снижение износа – в 1,83...1,94 раза.

Значительное улучшение антифрикционных свойств модифицированных резин объясняется низкой поверхностной энергией и смазывающей способностью ФС. Снижение коэффициента трения вызывает уменьшение температуры и снижение износа рабочей кромки манжет. В начальный период работы коэффициент трения снижается незначительно, что объясняется низкой скоростью миграции ФС из объема к поверхности резины вследствие недостаточного разогрева. При дальнейшей работе уплотнительного узла происходит истирание поверхностного слоя резины, имеет место миграция ФС из объема на поверхность резины и вала. Независимо от интенсивности истирания поверхность резины защищена пленкой ФС. При этом ФС выполняют роль смазки, что особенно важно в момент пуска агрегата и работы уплотнительного узла в режиме отсутствия смазки в зоне трения.

³ Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Г.В. Веденяпин. М.: Колос, 1973. 199 с.

Таблица

Материалы трибосоединений

Table

Tribconnection materials

Материал вала <i>Shaft material</i>	Материал манжеты <i>Collar material</i>
Сталь 45 <i>Steel 45</i>	Исходная резина на основе бутадиен-нитрильного каучука ИРП-1068 <i>Initial rubber based on nitrile rubber IRP-1068</i>
Сталь 45 <i>Steel 45</i>	Исходная резина модифицированная ФС-1 <i>Initial modified rubber FS-1</i>
Сталь 45 <i>Steel 45</i>	Исходная резина модифицированная ФС-2 <i>Initial modified rubber FS-2</i>

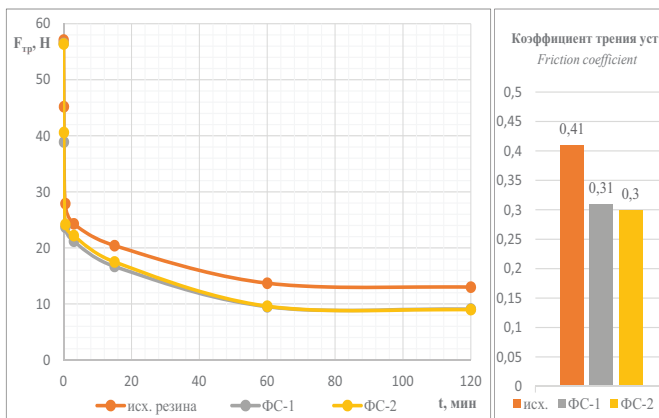


Рис. 5. Изменение силы трения и коэффициента трения
Fig. 5. Change in friction force and friction coefficient

Выводы

1. Нарушение герметичности соединений «Вал-манжета» снижает надежность машин, увеличивает затраты на ремонт, повышает расход смазочных материалов.

2. Объемное модифицирование фторорганическими соединениями позволяет значительно улучшить анти-

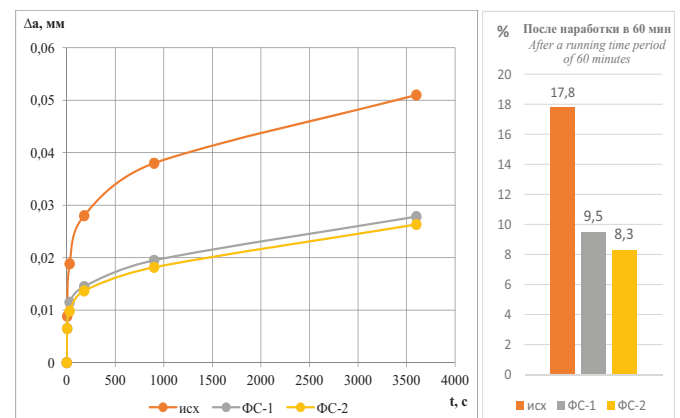


Рис. 6. Износ по ширине рабочей кромки манжет
Fig. 6. Wear along the width of the working edge of the collars

фрикционные свойства резины, что выражается снижением коэффициента и силы трения в соединении «Вал-манжета».

3. Стендовые испытания показали снижение износа модифицированных уплотнений по сравнению с серийными в 1,83...1,94 раза, снижение коэффициента трения – в 1,32...1,37 раза.

Библиографический список

1. Бондарева Г.И., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. Составляющие качества ремонта // Сельский механизатор. 2016. № 7. С. 2-4.
2. Бондарева Г.И., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. Теоретические основы выбора рациональных способов восстановления деталей // Сельский механизатор. 2019. № 5. С. 38-39.
3. Ерохин М.Н. Детали машин и основы конструирования / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, А.В. Карп и др. М.: КолосС, 2011. 512 с.
4. Erokhin M.N., Leonov O.A., Kataev Yu.V., Melnikov O.M. Tightness and leakage in applying reinforced rubber sleeves to shafts. *Russian Engineering Research*. 2019; 39 (6): 459-462.
5. Ерохин М.Н., Леонов О.А., Катаев Ю.В., Мельников О.М. Расчет предельного натяга в соединениях «Вал-манжета» // Инновационные технологии реновации в машиностроении: Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 150-летию

References

1. Bondareva G.I., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G. Sostavlyayushchie kachestva remonta [Components of the repair quality]. *Sel'skiy mekhanizator*, 2016; 7: 2-4. (In Rus.)
2. Bondareva G.I., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G. Teoreticheskie osnovy vybora ratsional'nykh sposobov vosstanovleniya detaley [Theoretical foundations for choosing rational methods for restoring parts]. *Sel'skiy mekhanizator*, 2019; 5: 38-39. (In Rus.)
3. Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Karp A.V. et al. Detali mashin i osnovy konstruirovaniya [Machine parts and design basics]. Moscow, KolosS, 2011. 512 p. (In Rus.)
4. Erokhin M.N., Leonov O.A., Kataev Yu.V., Melnikov O.M. Tightness and leakage in applying reinforced rubber sleeves to shafts. *Russian Engineering Research*, 2019; 39(6): 459-462.
5. Erokhin M.N., Leonov O.A., Kataev Yu.V., Melnikov O.M. Raschet predel'nogo natyaga v soyedineniyakh "val-manzhet" [Analyzing the limiting tightness in the "shaft-to-collar" connections]. *Innovatsionnye tekhnologii renovatsii v mashinostroyenii: Sb. trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchonnoy 150-letiyu fakul'teta "Mashinostroitel'nye tekhnologii" i kafedry "Tekhnologii obrabotki materialov" MGTU*

факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана; под общ. ред. В.Ю. Лавриненко. М.: Московский государственный областной университет, 2019. С. 311-315.

6. Ерохин М.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Амелин С.С., Бодунов Д.М. Применение размерного анализа для расчета суммарного отклонения от соосности манжеты относительно вала // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. № 6. С. 61-67. <https://doi.org/10.31857/S0235711921060067>

7. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. Расчет допуска посадки с натягом по модели параметрического отказа // Вестник машиностроения. 2019. № 4. С. 23-26.

8. Игнаткин И.Ю., Дроздов А.В. Способ восстановления вала редуктора с применением упрочненной ремонтной детали // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 9. С. 13-17.

9. Леонов О.А. Предельное состояние соединений «Вал-уплотнение» // Технический сервис в агропромышленном комплексе: Сборник научных трудов Московского государственного агроинженерного университета имени В.П. Горячкина. М.: Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина, 1998. С. 25-31.

10. Мельников О.М., Казанцев С.П., Чеха О.В. Оценка показателей качества деталей и соединения «Вал-манжета» // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2019. № 5 (93). С. 8-13. <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-5-8-13>

11. Гайдар С.М., Волков А.А., Карелина М.Ю. Адсорбция Фтор-ПАВ и ее влияние на смазку трибосопряжений в условиях граничного и гидродинамического трения // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 118. С. 113-123.

12. Сальниковое уплотнение: патент на полезную модель № 55064 / С.М. Гайдар, А.В. Серяков, Л.П. Захаров; заявл. 02.02.2006; опубл. 27.07.2006. Бюл. № 21.

13. Ерохин М.Н., Выскребенцев Н.А. Исследование влияния полимерных добавок на основе фтора на физико-механические свойства // Технические средства для обеспечения интенсивных технологий сельскохозяйственного производства: Сборник научных трудов МИИСП. 1991. С. 91-97.

14. Мельников О.М. Влияние фторорганических соединений на физико-механические свойства резины для манжетных уплотнений сельскохозяйственной техники // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2018. № 3 (85). С. 42-46.

Критерии авторства

Мельников О.М., Казанцев С.П., Игнаткин И.Ю., Скороходов Д.М., Белов М.И. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Мельников О.М., Казанцев С.П., Игнаткин И.Ю., Скороходов Д.М., Белов М.И. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 17.03.2022

Одобрена после рецензирования 26.04.2022

Принята к публикации 26.04.2022

im. N.E. Bauman; ed. by V.Yu. Lavrinenko. Moscow, Moscow State Regional University, 2019: 311-315. (In Rus.)

6. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Amelin S.S., Bodunov D.M. Primenenie razmernogo analiza dlya rascheta summarnogo otkloneniya ot soosnosti manzhety odnositel'no vala [Application of dimensional analysis to calculate the total deviation from the collar alignment relative to the shaft]. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin*, 2021; 6: 61-67. <https://doi.org/10.31857/S0235711921060067> (In Rus.)

7. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G. Raschet dopuska posadki s natygom po modeli parametricheskogo otказа [Determining the interference fit tolerance using the model of parametric failure]. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2019; 4: 23-26. (In Rus.)

8. Ignatkin I.Yu., Drozdov A.V. Sposob vosstanovleniya vala reduktora s primeneniem uprochnennoy remontnoy detali [Method for restoring the gearbox shaft using a hardened repair part]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*, 2020; 9: 13-17. (In Rus.)

9. Leonov O.A. Predel'noe sostoyanie soedineniy "Val-uplotneniye" [Limit state of "shaft-to-seal" connections. In: *Tekhnicheskii servis v agropromyshlennom komplekse: Sbornik nauchnykh trudov Moskovskogo gosudarstvennogo agroinzhenernogo universiteta imeni V.P. Goryachkina*. Moscow, Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkin, 1998: 25-31. (In Rus.)

10. Melnikov O.M., Kazantsev S.P., Chekha O.V. Otsenka pokazateley kachestva detaley i soyedineniya "val-manzheta" [Evaluation of the quality indicators of parts and the "shaft-to-collar" connection]. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*, 2019; 5 (93): 8-13. <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-5-8-13> (In Rus.)

11. Gaydar S.M., Volkov A.A., Karelina M.Yu. Adsorbtsiya Ftor-PAV i ee vliyaniye na smazku tribosopryazheniy v usloviyakh granichnogo i gidrodinamicheskogo treniya [Fluorine-surfactant adsorption and its effect on the lubrication of tribocouplings under boundary and hydrodynamic friction]. *Trudy GOSNITI*. 2015; 118: 113-123. (In Rus.)

12. Gaydar S.M., Seryakov A.V., Zakharov L.P. Packing seal [Sal'nikovoe uplotnenie]: Patent for utility model No. 55064, 2006. (In Rus.)

13. Erokhin M.N., Vyskrebentsev N.A. Issledovanie vliyaniya polimernykh dobavok na osnove ftora na fiziko-mekhanicheskiye svoystva [Study of the influence of fluorine-based polymer additives on physical and mechanical properties]. *Tekhnicheskkiye sredstva dlya obespecheniya intensivnykh tekhnologiy sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva: Sb. nauch. trudov MIISP*, 1991: 91-97. (In Rus.)

14. Mel'nikov O.M. Vliyaniye ftororganicheskikh soedineniy na fiziko-mekhanicheskiye svoystva reziny dlya manzhetykh uplotneniy sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Influence of organofluorine compounds on the physical and mechanical properties of lip seal rubber for agricultural machinery]. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*, 2018; 3 (85): 42-46. (In Rus.)

Contribution

O.M. Melnikov, S.P. Kazantsev, I.Yu. Ignatkin, D.M. Skorohodov, M.I. Belov performed theoretical studies and, based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. O.M. Melnikov, S.P. Kazantsev, I.Yu. Ignatkin, D.M. Skorohodov, M.I. Belov 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 17.03.2022

Approved after reviewing 26.04.2022

Accepted for publication 26.04.2022

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.316.925

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-73-79

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6-35 КВ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

СБИТНЕВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ✉, старший преподаватель

evgenij.sbitnev@yandex.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-7114-6934>

ОСОКИН ВЛАДИМИР ЛЕОНИДОВИЧ, канд. техн. наук, доцент

osokinvl@mail.ru

ЖУЖИН МАКСИМ СЕРГЕЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент

zhuzhin001@yandex.ru

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет; 606340, Российская Федерация, г. Княгинино, ул. Октябрьская, 22а

Аннотация. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью не отключаются релейными защитами линий ввиду малых ёмкостных токов. Рекомендуется отключать линию с замыканием на землю как можно быстрее, но иногда отыскать и локализовать повреждения бывает затруднительно. Реальное исследование и анализ режимов электрических сетей 6-35 кВ с изолированной нейтралью являются достаточно трудоёмкой задачей. Поэтому расчет фазных напряжений на подстанции при замыкании на землю проведен через переходное сопротивление на линии на основе метода фазных координат. Создана виртуальная модель исследуемой линии электропередач для анализа несимметричных режимов трехфазных сетей и проверки работоспособности метода в пакете имитационного моделирования MATLAB Simulink. Результаты моделирования показали отсутствие расхождения значений величин напряжений и токов исходной модели в фазных координатах и модели в Simulink. В результате исследований установлено, что метод фазных координат позволяет рассчитывать аварийные режимы с наложением нескольких составляющих аварий с учетом токов нагрузки. Модель в фазных координатах позволит с большой скоростью проанализировать работу релейной защиты при различных режимах работы электроэнергетической системы.

Ключевые слова: сети с изолированной нейтралью, аварийный режим, короткое замыкание, повреждение изоляции, метод фазных координат.

Формат цитирования: Сбитнев Е.А., Осокин В.Л., Жужин М.С. Исследование однофазного замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ с изолированной нейтралью // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24. № 3. С. 73-79. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-73-79>.

© Сбитнев Е.А., Осокин В.Л., Жужин М.С., 2022



ORIGINAL PAPER

STUDY OF SINGLE-PHASE EARTH FAULT IN ELECTRICAL NETWORKS OF 6-35 KV WITH AN ISOLATED NEUTRAL

EVGENIY A. SBITNEV✉, senior lecturer

evgenij.sbitnev@yandex.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-7114-6934>

VLADIMIR L. OSOKIN, PhD (eng), Associate Professor

osokinvl@mail.ru

MAKSIM S. ZHUZHIN, PhD (eng), Associate Professor

zhuzhin001@yandex.ru

Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics; 22a, Oktyabrskaya Str., Knyaginino, 606340, Russian Federation

Abstract. Ground faults in networks with an isolated neutral are not switched off by relay line protections due to low capacitive currents. It is recommended to disconnect the line with a earth fault as quickly as possible, but sometimes it is difficult to find and localize the damage. To analyze the emergency mode of single-phase ground fault in networks with an isolated neutral,

the phase coordinate method for calculating phase voltages is used. At the point of damage, the values of the phase-to-phase voltages remain unchanged, and the phase voltages change. Real research and analysis of electrical network modes of 6-35 kV with an isolated neutral is rather time-consuming task. Therefore, the calculation of phase voltages at the substation during an earth fault is carried out through the transition resistance on the line based on the phase coordinate method. The authors developed a virtual model of studied power transmission line for analyzing asymmetric modes of three-phase networks and checking the operability of the method in the MATLAB Simulink simulation package. The simulation results showed that there was no discrepancy between the voltage and current values of the original model in phase coordinates and the Simulink model. As a result of the research, the authors have found that the phase coordinate method helps calculate emergency modes with the overlay of several component accidents taking into account load currents. The model in phase coordinates will allow analyzing relay protection operation at high speed under different operating modes of the electric power system.

Key words: power networks with an insulated neutral, emergency mode, short circuits, insulation damage, phase coordinate method.

For citation: Sbitnev E.A., Osokin V.L., Zhuzhin M.S. Study of single-phase earth fault in electrical networks of 6-35 kV with an isolated neutral. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(3): 73-79. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-73-79>.

Введение. Аварийные режимы электрических сетей приводят к резкому нарушению качества электрической энергии во всей системе электроснабжения. Аварийными режимами в сетях 6-35 кВ являются двухфазные короткие замыкания (КЗ), двухфазные КЗ на землю, трёхфазные КЗ, двойные короткие замыкания, обрыв фазных проводов, однофазные замыкания на землю [1-4]. В аварийных режимах изменяются токи и напряжения, поэтому их необходимо учитывать и проводить расчет при анализе работы потребителей, а также для выбора уставок релейной защиты [5]. Вероятность появления аварийных режимов в сетях – случайная величина [6, 7], обусловленная достаточно многими факторами. По данным [8], наиболее частым видом повреждений в сетях с изолированной нейтралью напряжением 6-35 кВ являются однофазные замыкания на землю.

В сетях с изолированной нейтралью в нормальном режиме работы ни одна точка электрической сети не соединена ни с заземляющим устройством, ни с землёй. В таких сетях повреждение изоляции одной из фаз не изменяет векторную диаграмму линейных напряжений и не приводит к появлению больших токов – изменяются только фазные напряжения в сети, но не у потребителей. Этим объясняются особенности в рассмотрении режима работы сети с изолированной нейтралью с замкнувшейся на землю фазой. Повреждение изоляции одной из фаз относительно земли не является аварийным режимом в сетях с изолированной нейтралью, но последствия от таких повреждений могут быть самыми тяжёлыми. Поэтому их необходимо рассматривать наряду с режимами, которые приводят к нарушению качества напряжения у потребителей.

Реже всего в сельской местности питание потребителей осуществляется по кабельным линиям. В кабельных линиях самым опасным видом однофазного короткого замыкания является замыкание на землю через перемежающуюся дугу. В этом случае при каждом загорании или погасании дуги возникают переходные процессы, а следовательно, скачки тока и импульсные перенапряжения. Дуга во время горения испаряет токопроводящую жилу и изоляционные материалы, что может вызвать двойное замыкание на землю.

В сельской местности преимущественно прокладываются воздушные линии электропередачи 6-10 кВ, выполненные неизолированными, чаще всего – сталеалюминиевыми

проводами марки АС. В таких сетях повреждения изоляции возникают чаще всего по нескольким причинам [4]:

- естественное старение изоляции линий и аппаратов (24% от общего числа повреждений). Особенно быстро старится изоляция после расчетного срока службы электрооборудования. Для воздушных линий электропередачи с железобетонными опорами срок службы составляет 30 лет, с деревянными опорами – 25 лет;
- механическое повреждение опор и изоляции (11%);
- ошибочные действия оперативно-ремонтного персонала (9%) при включении линий после ремонта, при выводе в ремонт, при умышленном нарушении блокировок, неправильные операции с аппаратами сетей;
- атмосферные перенапряжения (21%), возникающие при отсутствии или выходе из строя устройства защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП).

Цель исследований: анализ однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью, проверка работоспособности метода фазных координат в пакете имитационного моделирования MATLAB & Simulink.

Материалы и методы. Электрические сети 6-35 кВ включают в себя трансформаторы 35/10(6) или 110/35/10(6), трёхпроводные воздушные или кабельные линии электропередачи и потребительские силовые трансформаторы.

Для расчета фазных напряжений на подстанции при замыкании на землю через переходное сопротивление на линии применяется метод фазных координат, используемый для расчетов междуфазных коротких замыканий и двойных коротких замыканий на землю [9, 10].

Рассмотрим схему замещения сети, содержащей трансформатор 35/10 кВ, линию с замыканием на землю в конце и нагрузку (рис. 1).

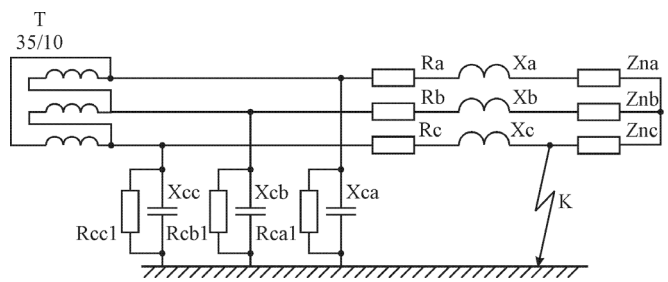


Рис. 1. Схема замещения сети
Fig. 1. Network replacement scheme

По методу фазных координат элементы сети (трансформатор, линию, место повреждения и нагрузку) представим 2К-полюсниками (рис. 1).

Параметры 2К-полюсника трансформатора 35/10 кВ определяются в соответствии с методикой [11] за 7 шагов.

Шаг 1. По паспортным сведениям (номинальной мощности S_n ; номинальным напряжениям U_v, U_n ; току холостого хода $i_{xx}, \%$; напряжению короткого замыкания $u_k, \%$; потерям короткого замыкания $\Delta P_{кз}$; потерям холостого хода ΔP_{xx}) вычисляются сопротивления и проводимости трансформатора.

Шаг 2. Вычисляются собственные и взаимные сопротивления обмоток трансформатора.

Шаг 3. Заполняется матрица сопротивлений Z_v и составляется матрица инцидентов (соединений) M .

Шаг 4. Вычисляется матрица узловых проводимостей размерностью 7×7 :

$$Y = M \cdot Z_v^{-1} \cdot M^T, \quad (1)$$

где M^T – транспонированная матрица инцидентов.

Шаг 5. Эквивалентруется матрица Y относительно 7-го узла и получается матрица Y_e размерностью 6×6 .

Шаг 6. Матрица Y_e разделяется на 4 блока относительно входа и выхода трансформатора ($Y_{e11}, Y_{e12}, Y_{e21}, Y_{e22}$), которые представляют собой параметры 2К-полюсника трансформатора в форме «Y».

Шаг 7. Вычисляются параметры 2К-полюсника в форме «Н».

Каждый параметр представляет собой матрицу размерностью 3×3 .

Параметры 2К-полюсника линии электропередачи вычисляются по методике [12]. Только ёмкостная проводимость B_c учитывает суммарную длину электрически связанных линий, подключенных к трансформатору. В месте повреждения изоляции включаем сопротивления между фазами и землёй. По этим сопротивлениям находим проводимости и заполняем матрицу проводимостей, затем записываем параметры 2К-полюсника повреждения.

Параметры 2К-полюсника нагрузки вычисляем по присоединённой мощности, через которую находим и заполняем матрицу проводимостей Y_s .

На схеме замещения сети 2К-полюсниками (рис. 2) на входе и выходе каждого элемента сети обозначим напряжения и токи.

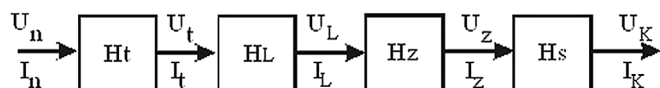


Рис. 2. Схема замещения сети 2К-полюсниками:

- Ht – 2К-полюсник трансформатора;
- HL – 2К-полюсник линии электропередачи;
- Hz – 2К-полюсник повреждения;
- Hs – 2К-полюсник нагрузки

Fig. 2. Replacement scheme of the network with 2K-poles:

- Ht – 2K-transformer pole;
- HL – 2K-power line pole;
- Hz – 2K-damage pole; Hs – 2K-load pole

Объединяем 2К-полюсники места повреждения (A_z), нагрузки (A_s), линии (A_L) и трансформатора (A_t):

$$\begin{aligned} AE &= A_t \cdot ALzs + Bt \cdot CLzs; BE = A_t \cdot BLzs + Bt \cdot DLzs; \\ CE &= Ct \cdot ALzs + Dt \cdot CLzs; DE = Ct \cdot BLzs + Dt \cdot DLzs. \end{aligned}$$

После объединения всех 2К-полюсников задаем вектор-столбец напряжений U_n на входе трансформатора и определяем векторы напряжений в конце на выходе нагрузки U_k :

$$U_k = AE^{-1} \cdot U_n. \quad (2)$$

Эти же напряжения будут на входе нагрузки и в месте повреждения $U_k = U_z = U_L$. При изменении переходного сопротивления в месте повреждения будет изменяться параметр Y_z , что в итоге приводит к изменению напряжений всех фаз.

В качестве примера рассмотрим однофазное замыкание на землю на линии длиной 15 км, выполненной проводом АС-70 с удельным сопротивлением $R_0 = 0,412$ Ом/км, $X_0 = 0,432$ Ом/км. Линия подключена к трансформатору ТМН-4000/35. К линии подключена нагрузка с сопротивлением $50 + 50i$ Ом. Переходное сопротивление изменяется от 0 до 1 МОм. Вычисления производились в математическом пакете Mathcad. Часть алгоритма представлена ниже.

Исходные данные:

$$Z1 := 0.1 + j1; Z0 := 0.3 + j3; k := 1; U := 35e^3; \delta := 15 \text{ deg.}$$

Расчетные формулы:

$$E_{es} := \begin{pmatrix} k \cdot U \cdot \exp(\delta) \\ k \cdot U \cdot \exp(\delta - 120 \text{ deg}) \\ k \cdot U \cdot \exp(\delta + 120 \text{ deg}) \end{pmatrix};$$

$$Z := \begin{bmatrix} \frac{(2Z1 + Z0)}{3} & \frac{(Z0 - Z1)}{3} & \frac{(Z0 - Z1)}{3} \\ \frac{(Z0 - Z1)}{3} & \frac{(2Z1 + Z0)}{3} & \frac{(Z0 - Z1)}{3} \\ \frac{(Z0 - Z1)}{3} & \frac{(Z0 - Z1)}{3} & \frac{(2Z1 + Z0)}{3} \end{bmatrix};$$

$$M1 := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; M0 := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$A_{es} := \begin{pmatrix} M1 & Z \\ M0 & M1 \end{pmatrix}; A_s := \begin{pmatrix} \{3,3\} & \{3,3\} \\ \{3,3\} & \{3,3\} \end{pmatrix};$$

$$Z = \begin{pmatrix} 0.167 + j1.667 & 0.067 + j0.667 & 0.067 + j0.667 \\ 0.067 + j0.667 & 0.167 + j1.667 & 0.067 + j0.667 \\ 0.067 + j0.667 & 0.067 + j0.667 & 0.167 + j1.667 \end{pmatrix};$$

$$E_{es} := \begin{pmatrix} 913.376 \\ 112.477 \\ 7.417 \cdot 10^3 \end{pmatrix}.$$

Результаты вычислений приведены в таблице 1.

Таблица 1

Изменение напряжения в зависимости от величины переходного сопротивления

Table 1

Voltage change depending on the value of the transient resistance

Холостой ход / Idling				
$R_{пер}, \text{ Ом}$	0	3000	7000	10000
$U_A, \text{ В}$	11000 – 5,23i	8728 – 1515i	6392 – 922,6i	5653 – 154,5i
$U_B, \text{ В}$	5498 – 9529i	3225 – 11040i	888,8 – 10450i	150,6 – 9678i
$U_C, \text{ В}$	≈ 0	–268 – 1499i	–4602 – 912,1i	–5340 – 146,2i
$3U_0, \text{ В}$	95,26 – 55,05i	55,9 – 81,1i	15,5 – 70,91i	2,68 – 57,6i
$R_{пер}, \text{ Ом}$	30000	50000	100000	1000000
$U_A, \text{ В}$	5121 + 1970i	5217 + 2476i	5345 + 2850i	5501 + 3173i
$U_B, \text{ В}$	–382 – 7554i	–286,1 – 7048i	–157,9 – 6674i	–2,1 – 6351i
$U_C, \text{ В}$	–5876 + 1974	–5781 + 2480i	–5654 + 2854i	–5499 + 3177i
$3U_0, \text{ В}$	–6,56 – 20,8i	–4,91 – 12,1i	–2,65 – 5,6i	0
С учётом нагрузки / Under the load				
$R_{пер}, \text{ Ом}$	0	3000	7000	10000
$U_A, \text{ В}$	9884 – 367,6i	7411 – 1140i	5413 – 679,4i	4770 – 39,58i
$U_B, \text{ В}$	5432 – 8516i	2959 – 9288i	960,5 – 8828i	318 – 8188i
$U_C, \text{ В}$	≈ 0	–1869 – 1349i	–3866 – 892,9i	–4509 – 254,7i
$3U_0, \text{ В}$	92,43 – 55,35i	49,1 – 68,1i	14,46 – 60,1i	3,33 – 48,9i
$R_{пер}, \text{ Ом}$	30000	50000	100000	1000000
$U_A, \text{ В}$	4277 + 1758i	4350 + 2191i	4452 + 2511i	4578 + 2789i
$U_B, \text{ В}$	–174,7 – 6391i	–102,5 – 5958i	–0,38 – 5638i	–126,2 – 5360i
$U_C, \text{ В}$	–5004 + 1540i	–493,2 + 1972i	–4831 + 2293i	–4705 + 2570i
$3U_0, \text{ В}$	–5,2 – 17,8i	–3,96 – 10,4i	–2,19 – 4,82i	≈ 0

По полученным результатам строим диаграммы изменения напряжения в зависимости от величины переходного сопротивления (рис. 3).

Из диаграммы изменения напряжений следует, что напряжение повреждённой фазы изменяется от нуля при металлическом замыкании до фазного напряжения сети

при переходном сопротивлении, близком к бесконечности. Геометрическим местом точек конца вектора напряжения повреждённой фазы $U_c = f(R_{пер})$ будет дуга окружности, опирающаяся на фазное напряжение, как на диаметр. В проведённом вычислительном эксперименте получили такие же результаты, как и достигнутые аналитическим путём.

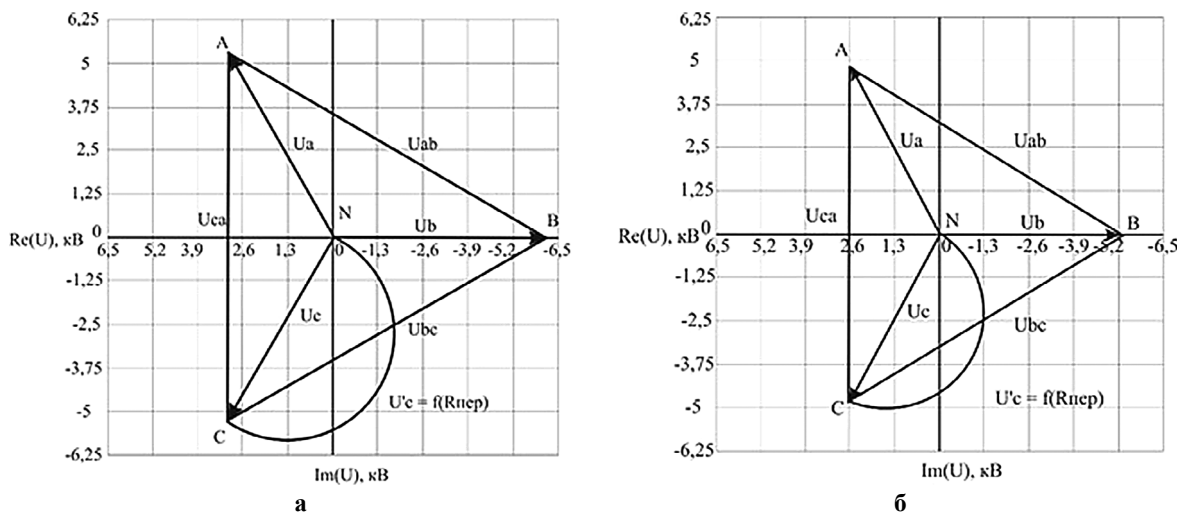


Рис. 3. Изменение напряжения при замыкании фазы С на землю: а – холостой ход; б – с учётом нагрузки

Fig. 3. Voltage change when phase C is earth connected: а – idle; б – under the load

При изменении переходного сопротивления в месте повреждения величины междуфазных напряжений остаются без изменений. Изменяются фазные напряжения, которые в любой точке сети вычисляются по формулам, связывающим напряжения и токи на входе U_{n_i} , I_{n_i} и на выходе U_{k_i} , I_{k_i} , 2К-полюсников в форме Н, двигаясь от конца к началу линии:

$$U_{n_i} = A_i \cdot U_{k_i} + B_i \cdot I_{k_i}; I_{n_i} = C_i \cdot U_{k_i} + D_i \cdot I_{k_i}. \quad (3)$$

Геометрическая сумма трёхфазных напряжений представляет собой утроенное напряжение нулевой последовательности $3U_0$, которое получаем на выходе обмотки напряжения, соединённой в разомкнутый треугольник, на питающей подстанции. Вычисление $3U_0$ производим по формуле:

$$3U_0 = \left| \frac{U_{t_A} + U_{t_B} + U_{t_C}}{K_{TV}} \right|, \quad (4)$$

где U_{t_A} , U_{t_B} , U_{t_C} – напряжения фаз на шинах 10 кВ питающей подстанции; K_{TV} – коэффициент трансформации трансформатора напряжения. Для обмотки, соединённой в разомкнутый треугольник $K_{TV} = 173,2$.

По показаниям вольтметра, подключенного к обмотке трансформатора напряжения, соединённой в разомкнутый треугольник, можно фиксировать динамику изменения напряжения на поврежденной фазе. Так, при переходном сопротивлении 30000 Ом напряжение на вольтметре составит $3U_0 = 18,6$ В.

Результаты и их обсуждение. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью не отключаются релейными защитами линий ввиду малых ёмкостных токов. Такое повреждение только сигнализируется на питающей подстанции за счёт изменения фазных напряжений на всех присоединениях, подключённых к одному силовому трансформатору. На отыскание и локализацию повреждения в электрических сетях отводится в среднем 2 ч, а иногда повреждения отыскиваются в течение десятков часов. За это время соединение фазного провода с землёй представляет угрозу для жизни людей

и животных, приближающихся к проводу, лежащему на земле, или к опоре с повреждённой изоляцией. Поэтому рекомендуется отключать линию с замыканием на землю как можно быстрее, особенно если линия проходит по населённому пункту. Кроме того, замыкание на землю одной фазы приводит к повышению фазных напряжений, от которых пробивается изоляция другой фазы, появляется двойное замыкание на землю, сопровождающееся большими токами, от которых одна или две линии отключаются. Длительное протекание тока замыкания на землю через железобетонную опору нарушает структуру бетона подземной части опоры, и опоры выбраковывают.

Коллективом авторов разработано устройство для отключения линии с замыканием на землю в сети с изолированной нейтралью [13]. В результате технического применения данного устройства повысится безопасность эксплуатации электрической сети, поскольку при появлении на питающей подстанции сигнала «Замыкание на землю» сработает программное реле времени, которое через промежуточные реле и выключатели начнет поочередно отключать линии, подключённые к шинам питающей подстанции. И если на линии отсутствует однофазное замыкание на землю, то автоматическое повторное включение (АПВ) восстановит питание потребителей.

Реальное исследование и анализ режимов электрических сетей 6-35 кВ с изолированной нейтралью являются достаточно трудоёмкой задачей. Поэтому на первоначальном этапе возможно применение виртуальной компьютерной модели, создаваемой на основе реальной схемы электроснабжения. Наиболее подходящей средой для моделирования электрической сети в нашем случае является программный комплекс MATLAB. Он содержит в себе графическую среду Simulink, позволяющую смоделировать электрическую систему. В процессе исследования виртуальной модели есть возможность прямого наблюдения за процессами, происходящими в системе, и сохранения данных. На рисунке 4 представлена виртуальная модель линии с замыканием на землю в сети с изолированной нейтралью.

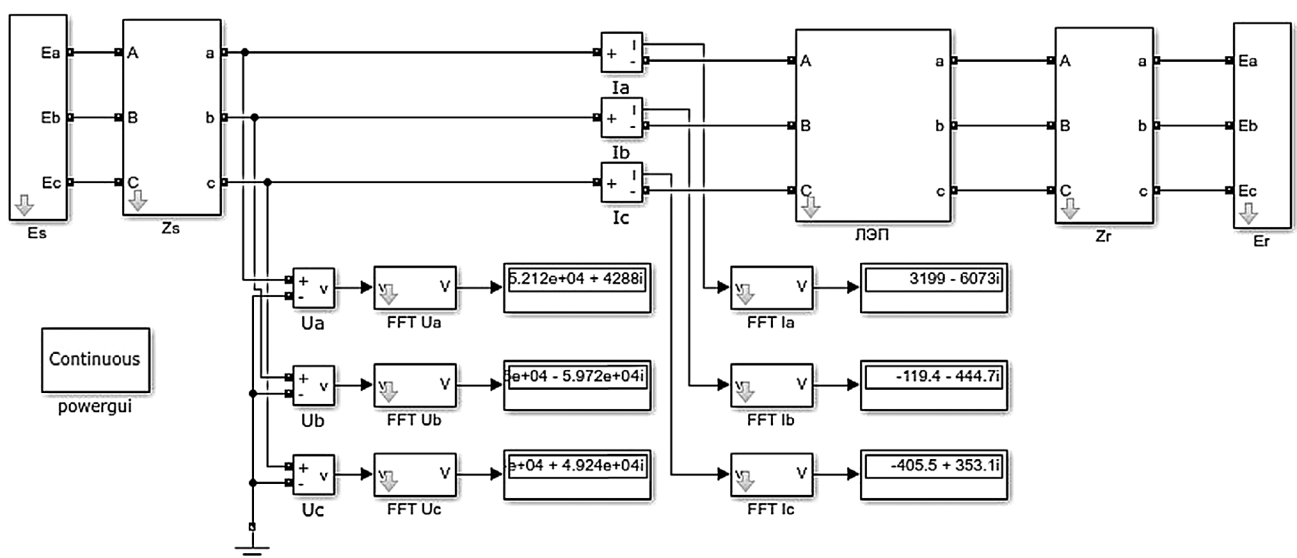


Рис. 4. Виртуальная модель линии в MATLAB
 Fig. 4. Virtual model of the network in MATLAB

Для проверки работоспособности метода в пакете имитационного моделирования MATLAB & Simulink была смоделирована схема исследуемой линии электропередач, описанная в базисе фазных координат.

Параметры ЭС:

$U = 35e3$ – номинальное напряжение электропередачи;

$k = 1$ – коэффициент регулирования мощности;

$d = 10$ – угол передачи мощности;

$Z1es = 3 + 10i$ – сопротивление ЭС по прямой последовательности;

$Z0es = 5 + 18i$ – сопротивление ЭС по нулевой последовательности.

Параметры ЛЭП:

$Z1 = 0.15 + 0.4i$ – погонное сопротивление ЛЭП по прямой последовательности;

$Z0 = 0.3 + 1.2i$ – погонное сопротивление ЛЭП по нулевой последовательности;

$Y1 = 0$ – погонная проводимость ЛЭП по прямой последовательности;

$Y0 = 0$ – погонная проводимость ЛЭП по нулевой последовательности;

$xf = 50$ – расстояние до места короткого замыкания;

$l = 100$ – длина ЛЭП.

Параметры повреждения (моделируется однофазное КЗ):

$Ra = 0,1$;

$Rb = 10e10$;

$Rc = 10e10$;

$Rab = 10e10$;

$Rbc = 10e10$;

$Rca = 10e10$.

Параметры нагрузки:

$P = 10e6$ – активная мощность нагрузки;

$Q = 6e6$ – реактивная мощность нагрузки.

Расчетные формулы:

$[Es, As] = A \text{ eqsys}(U, k, d, Z1es, Z0es)$;

$Er = \text{zeros}(3, 1)$;

$Af_ = A_line(Z1, Z0, Y1, Y0, l)$;

$Af = A_line(Z1, Z0, Y1, Y0, (l-xf))$;

$Akz = A_fault(Ra, Rb, Rc, Rab, Rbc, Rca)$;

$An = A_load(P, Q, U)$;

$A = As \cdot Af \cdot Akz \cdot Af \cdot An$;

$Y = A_to_Y(A)$;

$Y11 = Y(1:3, 1:3)$;

$Y12 = Y(1:3, 4:6)$;

$Y21 = Y(4:6, 1:3)$;

$Y22 = Y(4:6, 4:6)$;

$S = [\text{sum}(\text{sum}(Y11)) \text{sum}(\text{sum}(Y12))$;

$\text{sum}(\text{sum}(Y21)) \text{sum}(\text{sum}(Y22))]$;

$V = [\text{sum}(Y11) \text{sum}(Y12)$;

$\text{sum}(Y21) \text{sum}(Y22)]$;

$fi = -\text{inv}(S) \cdot V \cdot [Es; Er]$;

$I = Y \cdot [Es + fi(1); fi(2) \cdot \text{ones}(3, 1)]$;

$V1 = As \setminus [Es + fi(1); I(1:3)]$;

end.

В таблице 2 представлены результаты апробации модели в Simulink и проверки метода в фазных координатах.

Таблица 2

Результаты моделирования режима короткого замыкания

Table 2

Short circuit simulation results

Величина Value	Модель в Simulink Model in Simulink	Модель в фазных координатах Model in phase coordinates
	Модуль / Module	Модуль / Module
U_A , В	16630,340	16630,411
U_B , В	9404,920	9404,924
U_C , В	20683,300	20683,521
I_A , А	2183,792	2183,700
I_B , А	146,537	146,436
I_C , А	171,099	171,200

Сопоставляя значения, полученные с помощью моделей в фазных координатах и Simulink в режиме короткого замыкания, можно сделать вывод об отсутствии расхождений значений. Показатели находятся в допустимых пределах. Модель, составленная в фазных координатах, пригодна для дальнейших расчетов. Она позволяет рассчитывать установившиеся режимы электроэнергетических систем при помощи матричных уравнений, которые при интеграции в MATLAB рассчитываются с большой скоростью.

Выводы

1. Ёмкостные токи замыкания на землю не оказывают значительного влияния на величину тока нагрузки в фазах, поэтому релейная токовая защита присоединения не среагирует на этот вид повреждения. Для обнаружения замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью необходимо устанавливать измерительные трансформаторы напряжения со вторичной дополнительной обмоткой, соединенной в разомкнутый треугольник.

2. Метод фазных координат позволяет рассчитывать аварийные режимы с наложением нескольких составляющих аварий с учетом токов нагрузки. Модель в фазных координатах позволит с большой скоростью проанализировать работу релейной защиты при различных режимах работы электроэнергетической системы.

Библиографический список

1. Козлов А.В., Шевцов И.С. Анализ аварийности сельских электрических сетей 0,38 кВ в ООО «АКС» «Амурэлектросервис» // Инновационная наука. 2021. № 7. С. 50-54.
 2. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем; Под ред. Л.А. Жукова. М.: Энергия, 1979. 456 с.
 3. Лабуз И.В., Загороднев Я.А., Мусорина О.С. Моделирование аварийных режимов распределительной

References

1. Kozlov A.V., Shevtsov I.S. Analiz avariynosti sel'skikh elektricheskikh setey 0,38 kV v ООО "AKS" "Amurelektroset'servis" [Analysis of the accident rate of rural electric networks of 0.38 kV in LLC "AKS" "Amurelektroset'servis"]. *Innovatsionnaya nauka*, 2021; 7: 50-54. (In Rus.)
 2. Zhdanov P.S. Voprosy ustoychivosti elektricheskikh sistem [Issues of the stability of electrical systems]. Ed by. L.A. Zhukov. Moscow, Energiya, 1979. 456 p. (In Rus.)

электрической сети 10/0,38 кВ с накопителями электроэнергии // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 33. С. 1391-1404.

4. Сбитнев Е.А., Жужин М.С. Анализ аварийности сельских электрических сетей 0,38 кВ Нижегородской энергосистемы // Вестник НГИЭИ. 2020. № 11 (114). С. 36-47. <https://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10104>

5. Борковский С.О., Горева Т.С., Горева Т.И. Проблема диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю // Фундаментальные исследования. 2014. № 9-5. С. 954-959.

6. Папков Б.В., Осокин В.Л., Дулепов Д.Е. Оценка вероятностей несимметричных режимов систем электроснабжения // Вестник НГИЭИ. 2021. № 4 (119). С. 31-41.

7. Папков Б.В., Илюшин П.В., Куликов А.Л. Надежность и эффективность современного электроснабжения: Монография. Нижний Новгород: Научно-издательский центр «XXI век», 2021. 160 с.

8. Зацаринная Ю.Н., Рахматуллин Р.Р., Хабибуллин М.Н. Защита сетей с изолированной нейтралью от однофазных замыканий на землю // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 3. С. 75-76.

9. Попов Н.М., Клочков А.Н. Методика расчета сложных режимов в сетях с изолированной нейтралью // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2010. № 11. С. 52-57.

10. Клочков А.Н. Методика расчета и обнаружения замыканий на землю с обрывами фазного провода в сельских сетях 10 кВ // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 8. С. 68-70.

11. Солдатов В.А., Попов Н.М. Моделирование трансформаторов распределительных сетей в фазных координатах: Деп. рукопись № 1308-В2003. ВИНТИ, 08.07.2003. Кострома, 2003. 53 с.

12. Солдатов В.А., Попов Н.М. Моделирование параметров К-фазных линий электропередачи в фазных координатах. Деп. рукопись № 1306-В2003. ВИНТИ, 08.07.2003. Кострома, 2003. 27 с.

13. Устройство для отключения линии с замыканием на землю в сети с изолированной нейтралью: патент № 2733202 С1 Российская Федерация, МПК Н02Н 3/16 / Н.М. Попов, В.Л. Осокин, Е.А. Сбитнев; заявл. 18.02.2020; опубл. 30.09.2020, Бюл. № 28.

Критерии авторства

Сбитнев Е.А., Осокин В.Л., Жужин М.С. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели обобщение и подготовили рукопись. Сбитнев Е.А., Осокин В.Л., Жужин М.С. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.12.2021

Одобрена после рецензирования 08.04.2022

Принята к публикации 12.04.2022

3. Labuz I.V., Zagorodnev Ya.A., Musorina O.S. Modelirovanie avariynnykh rezhimov raspredelitel'noy elektricheskoy seti 10/0.38 kV s nakopitel'yami energii [Simulation of the emergency modes of a 10/0.38 kV electric distribution network with energy storage devices]. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*, 2021; 33: 1391-1404. <https://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10104> (In Rus.)

4. Sbitnev E.A., Zhuzhin M.S. Analiz avariynosti sel'skikh elektricheskikh setey 0.38 kV Nizhegorodskoy energosistemy [Accident rate analysis of 0.38 kV rural electric networks of the Nizhny Novgorod power system]. *Vestnik NGIEI*, 2020; 11 (114): 36-47. <https://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10104> (In Rus.)

5. Borkovskiy S.O., Goreva T.S., Goreva T.I. Problema diagnostiki odnofaznykh zamykaniy na zemlju v setyakh s malymi tokami zamykaniya na zemlju [Problem of detecting single-phase short circuits to earth in networks with small currents of short circuit to earth]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2014; 9: 954-959. (In Rus.)

6. Papkov B.V., Osokin V.L., Dulepov D.E. Otsenka veroyatnostey nesimmetrichnykh rezhimov sistem elektrosnabzheniya [Estimation of the probabilities of asymmetric modes in power supply systems]. *Vestnik NGIEI*, 2021; 4 (119): 31-41. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-4-31-41> (In Rus.)

7. Papkov B.V., Ilyushin P.V., Kulikov A.L. Nadezhnost' i effektivnost' sovremennogo elektrosnabzheniya: monografiya [Reliability and efficiency of modern power supply: monograph]. *Nizhny Novgorod, Nauchno-izdatel'skiy tsentr "XXI vek"*, 2021. 160 p. (In Rus.)

8. Zatsarinnaya Yu.N., Rakhmatullin R.R., Khabibullin M.N. Zashhita setey s izolirovannoy neytral'yu ot odnofaznykh zamykaniy na zemlyu [Protection of networks with an isolated neutral from single-phase earth faults]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*, 2014; 17 (3): 75-76. (In Rus.)

9. Popov N.M., Klochkov A.N. Metodika rascheta slozhnykh rezhimov v setyakh s izolirovannoy neytral'yu [Method of calculating complex modes in networks with an isolated neutral]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2010; 11: 52-57. (In Rus.)

10. Klochkov A.N. Metodika rascheta i obnaruzheniya zamykaniy na zemlyu s obryvami faznogo provoda v sel'skikh setyakh 10 kV [Method of calculation and detection of ground faults with phase wire breakage in rural 10 kV networks]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2011; 8: 68-70. (In Rus.)

11. Soldatov V.A., Popov N.M. Modelirovanie parametrov K-faznykh liniy elektroperedachi v faznykh koordinatakh [Modeling the parameters of K-phase power transmission lines in phase coordinates]: Manuscript VINITI 08.07.2003, No. 1308-B2003. Kostroma, 2003. 53 p. (In Rus.)

12. Soldatov V.A., Popov N.M. Modelirovanie parametrov K-faznykh liniy elektroperedachi v faznykh koordinatakh [Modeling the parameters of K-phase power transmission lines in phase coordinates]. Manuscript VINITI 08.07.2003, No. 1306-B2003. Kostroma, 2003. 27 p. (In Rus.)

13. Popov N.M., Osokin V.L., Sbitnev E.A. Ustroystvo dlya otklyucheniya linii s zamykaniem na zemlyu v seti s izolirovannoy neytral'yu [Device for disconnecting the line with earth fault in a network with an insulated neutral]: Patent No. 2733202 C1 Russian Federation, IPC N02 N3/16, 2020. (In Rus.)

Contribution

E.A. Sbitnev, V.L. Osokin, M.S. Zhuzhin performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. E.A. Sbitnev, V.L. Osokin, M.S. Zhuzhin 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 10.12.2021


Approved after reviewing 08.04.2022

Accepted for publication 12.04.2022

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.363

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-80-86

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОАКТИВАТОРА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ГРУБЫХ КОРМОВ**СТОРЧЕВОЙ ВЛАДИМИР ФЕДОРОВИЧ** , *д-р техн. наук, профессор*v.storchevoy@rgau-msha.ru ; <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>**КАБДИН НИКОЛАЙ ЕГОРОВИЧ**, *канд. техн. наук, доцент*

energo-nek@rgau-msha.ru

АНДРЕЕВ СЕРГЕЙ АНДРЕЕВИЧ, *канд. техн. наук, доцент*

energo-andreev@rgau-msha.ru

ГУРОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ, *магистр*

dim_ok7@mail.ru

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

Аннотация. Высокая продуктивность сельскохозяйственных животных требует рациона кормления, при котором животные получают наряду с кормами все необходимые питательные элементы, соответствующие их потребностям. Перед скармливанием корма подвергаются дополнительной обработке для повышения их пищевой ценности и поедаемости. Перспективным способом является обработка грубых кормов активированными средами. Спроектирован и описан принцип работы однофазного электроактиватора проточного типа с диафрагмой типа бельгинга с такими оптимальными параметрами, чтобы осуществлять подготовку нужного количества активированной воды (католита) для обработки ею грубого корма массой 5 т в сезон. Для обоснования режимов работы электроактиватора использована матрица активного планирования трехфакторного эксперимента. При выборе интервалов изменений факторов (мощности электроактиватора, производительности активатора и цикла работы активатора) руководствовались технологическими условиями процесса электрохимической активации жидкости и особенностями конструкции установки для активации жидкости. Эффективность процесса активации жидкости определялась величиной изменения водородного показателя активируемого раствора, потерей напряжения на электроактиваторе и плотностью тока. Получены регрессионные модели, на базе которых оптимизированы режимы работы установки. На основе полученных уравнений можно осуществлять изменение варьируемых параметров для получения нужных пропорций входных и выходных параметров установки.


Ключевые слова: электроактиватор, активированная вода, католит, обработка грубых кормов, параметры работы проточного электроактиватора.

Формат цитирования: Сторчевой В.Ф., Кабдин Н.Е., Андреев С.А., Гуров Д.А. Моделирование рациональных режимов электроактиватора для обработки грубых кормов // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 3. С. 80-86. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-80-86>.

© Сторчевой В.Ф., Кабдин Н.Е., Андреев С.А., Гуров Д.А., 2022



ORIGINAL PAPER

SIMULATING RATIONAL MODES OF ELECTRIC ACTIVATOR FOR ROUGH FORAGE PROCESSING**VLADIMIR F. STORCHEVOY** , *DSc (Eng), Professor*v.storchevoy@rgau-msha.ru ; <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>**NIKOLAY E. KABDIN**, *PhD (Eng), Associate Professor*

energy-nek@rgau-msha.ru

SERGEY A. ANDREEV, *PhD (Eng), Associate Professor*

energo-andreev@rgau-msha.ru

DMITRIY A. GUROV, *MSc (Eng)*

dim_ok7@mail.ru

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

Abstract. The high productivity of farm animals requires that the feeding ration should contain all the necessary nutrients to meet their needs. Before offering to animals, feeds are subjected to additional processing to increase their nutritional value and palatability.

A promising method is the treatment of roughage with activated media. The authors designed and described the operating principle of a single-phase flow-type electric activator with a belting-type diaphragm. It has optimal parameters to prepare the required amount of activated water (catholyte) for processing roughages in the amount of five tons per season. To justify the operating modes of the electric activator, a matrix of active planning of a three-factor experiment was used. When choosing the intervals for changing factors (the electric activator power, performance, and cycle), the authors were guided by the technological conditions of electrochemical activation of the liquid and the activator design features. The efficiency of the liquid activation process was determined by the value of change in the hydrogen index of the activated solution, the voltage loss on the electric activator, and the current density. Regression models were obtained to optimize the operating modes of the activator. Based on the equations obtained, it is possible to change the variable parameters to obtain the desired proportions of the input and output parameters of the installation.

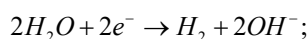
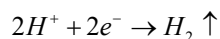
Key words: electric activator, activated water, catholyte, roughage processing, operation parameters of a flow-through electroactivator.

For citation: Storchevoy V.F., Kabdin N.E., Andreev S.A., Gurov D.A. Simulating rational modes of electric activator for rough forage processing. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(3): 80-86. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-80-86>.

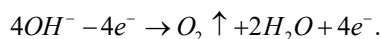
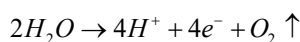
Введение. Одна из важных задач, поставленных перед отраслью животноводства, – обеспечение сельскохозяйственных животных качественными кормами, которые являются источником энергии и содержат полезные вещества. Актуальным является внедрение прогрессивных способов дополнительной обработки кормов с целью повышения их пищевой ценности. Самый перспективный способ – обработка грубых кормов активированными средами, поскольку он является экономичным, безопасным и экологически чистым^{1,2} [1-3].

Получение активированных растворов возможно в процессе электрохимической активации при электролизе [4, 5]. Электроактивированная вода получается, когда на электроды, погруженные в водный раствор, подается постоянное напряжение. При прохождении постоянного тока через водный раствор на катоде происходит электрохимическое восстановление с выделением газообразного водорода, а на аноде – электрохимическое окисление воды с выделением кислорода:

на катоде –



на аноде –



Для получения в процессе электроактивации отдельного анолита и католита пространство между электродами разделяют диафрагмой [6-10].

Высокую реакционную способность электрохимически активированным (ЭХА) растворам в метастабильном состоянии придают изменение водородного показателя (рН) и окислительно-восстановительного потенциала (ОВП), что позволяет использовать их в биотехнологии и пищевой промышленности, обеспечивая экологическую и продовольственную безопасность [11-13]. Установлено, что активированные

растворы при их использовании до момента полной релаксации обеспечивают обеззараживание питьевой воды и сточных вод, консервирование зеленых кормов, положительно воздействуют на организм человека и животных.

Для сельского хозяйства рекомендуется установка для получения ЭХА-раствора, в которой активатор имеет следующие параметры: площадь одного электрода – 0,03 м²; межэлектродное расстояние – 0,05 м. Регулируемый источник постоянного тока позволяет изменять напряжение на электродах в пределах от 0 до 250 В. Удельный расход электроэнергии составляет 0,022 кВт · ч/м³ [13].

На кафедре механизации и электрификации животноводства Гродненского сельскохозяйственного института разработана опытно-модельная установка для применения в технологии консервирования зеленых кормов. Электроактиваторная установка представляет собой диафрагменный электролизер непрерывного действия с использованием цилиндрических электродов и ионопроницаемой диафрагмы. Но у данного активатора имеется существенный недостаток, заключающийся в низкой ремонтопригодности. К тому же проблематично сделать какие-либо выводы о возможности применения произведенных растворов в тех или иных технологических процессах, так как авторами разработанной установки не указан используемый материал электродов.

Цель исследований: определение основных параметров работы электроактиватора для обработки грубых кормов, обеспечивающего производство католита с заданными параметрами.

Материалы и методы. Обоснование конструктивных параметров электроактиваторной установки и режимов ее работы базируется на математических моделях, описывающих связь между варьируемыми параметрами технологического процесса с критериями оценки эффективности процесса, а именно воздействия постоянного электрического тока на проходящую через электроактиватор воду. Определение рациональных режимов работы однофазного проточного электроактиватора для обработки грубых кормов осуществлялось с помощью компьютерной программы Statistica V10.

Результаты и их обсуждение. С целью обработки 5 т грубого корма в сезон спроектирован однофазный электроактиватор проточного типа с диафрагмой типа бельтинга, который имеет оптимальные параметры, необходимые для подготовки нужного количества католита. Определены режимы

¹ Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных: Справочное пособие. 3-е изд., перераб. и доп. / Под ред. А.П. Калашникова, В.И. Фисинина, В.В. Щеглова, Н.И. Клейменова. М.: Россельхозакадемия, 2003. 456 с.

² Подготовка силоса к скармливанию // Зооинженерный факультет РГАУ-МСХА. URL: <http://www.activestudy.info/podgotovka-silosa-k-skarmlivaniyu> (дата обращения: 20.20.2020).

работы электроактиватора. Принята конструкция активатора аналогично конструкции образца А.С. Оськина (рис. 1) [2].

Электроактиватор представляет собой установку прямоугольной формы, корпус которой выполнен из текстолита, работающую в постоянном режиме и обслуживаемую одним оператором. Внутри активатора находится канал, по которому протекает жидкость и который разделен диафрагмой на две зоны: катодную и анодную. Поток воды, попадая в канал, приобретает змеевидную направленность благодаря особой конструкции. Подача воды в электроактиватор осуществляется в каждую зону отдельно. По краям катодной и анодной зон расположены электроды. На электроды подается постоянное напряжение, и между электродами через проходящую в камере воду начинает протекать ток. Вода, проходя через камеру, разделенную диафрагмой, активируется. На выходе электроактиватора получают католит и анолит.

Для обоснования режимов работы электроактиватора использована матрица активного планирования трехфакторного эксперимента типа 2³.

Основными критериями, влияющими на процесс активации жидкости, являются: χ_1 – мощность электроактиватора P; χ_2 – производительность активатора Q; χ_3 – цикл работы активатора.

При выборе интервалов изменений факторов руководствуются технологическими условиями процесса электрохимической активации жидкости и особенностями конструкции установки для активации жидкости.

Эффективность процесса активации жидкости определяется критериями, имеющими наибольшую значимость для данного процесса: Y_1 – величиной изменения во-

дородного показателя активируемого раствора ΔpH ; Y_2 – потерей напряжения U на электроактиваторе; Y_3 – плотностью тока J (табл. 1).

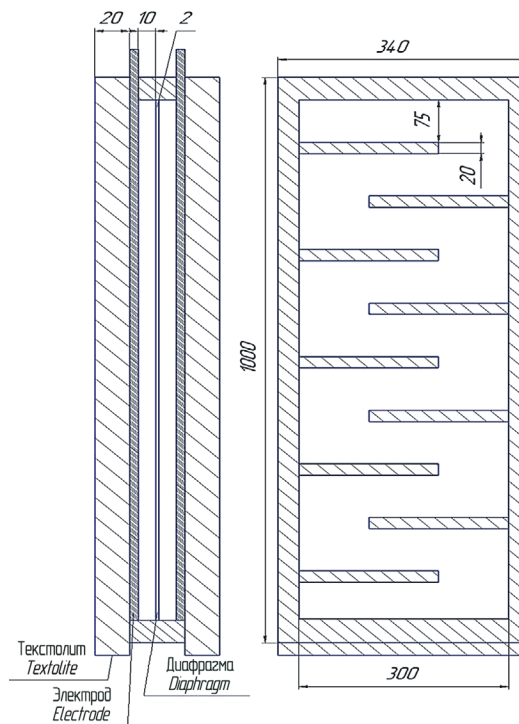


Рис. 1. Конструкция электроактиватора производительностью 650 л/ч

Fig. 1. Design of the electric activator with a capacity of 650 l/h

Таблица 1

Матрица активного планирования трехфакторного эксперимента по оптимизации режимных параметров проточного электроактиватора

Table 1

Matrix of active planning of a three-factor experiment on optimizing the operating parameters of a flow-through electric activator

№ п/п No.	Варьируемые параметры / Variable parameters		Критерии оптимизации (отклик) / Optimization criteria (response)	
	Мощность в катодной камере, P _к , Вт Power in the cathode chamber, P _к , W χ_1	Производительность по католиту, Q _к , л/ч Catholyte productivity, Q _к , l/h χ_2	Изменение водородного показателя, ΔpH_k Change in pH, ΔpH_k Y_1	Падение напряжения в катодной камере, U _к , В Voltage drop in the cathode chamber, U _к , V Y_2
1	3500	500	2,50	46,30
2	3500	650	1,92	47,06
3	3500	800	1,56	47,56
4	5000	500	3,56	53,74
5	5000	650	2,74	55,00
6	5000	800	2,23	55,75
7	6500	500	4,63	59,62
8	6500	650	3,56	61,28
9	6500	800	2,90	62,39

В процессе статистической обработки экспериментальных данных проведен регрессионный анализ, получены уравнения множественной линейной регрессии для каждого критерия

оптимизации. Данные уравнения адекватно описывают процесс электроактивации в проточном активаторе и позволяют выявить эффективные режимы работы электроактиватора.

Графики поверхностей для Y_1 , χ_1 и χ_2 отражены на рисунках 2, 3.

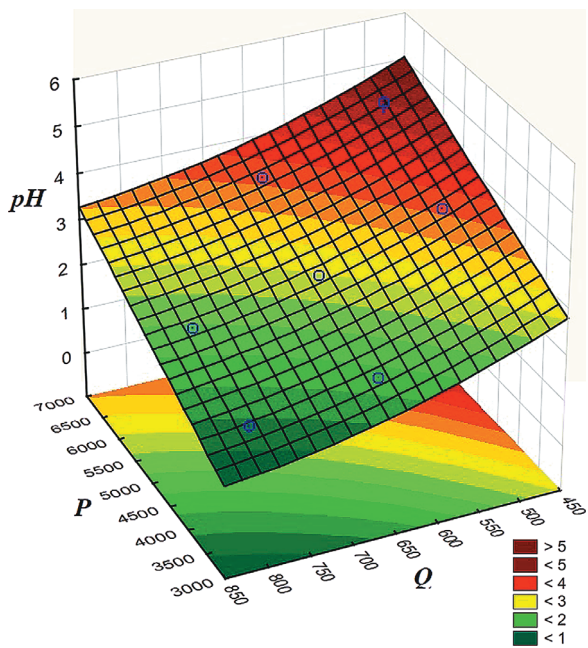


Рис. 2. Поверхность отклика трехфакторной модели изменения водородного показателя в электроактиваторе
Fig. 2. Response surface of the three-factor model of the hydrogen index change in the electric activator

На рисунке 3 представлена поверхность отклика трехфакторной модели оптимального (desirability измеряется от 0 до 1) изменения водородного показателя в электроактиваторе. Оптимальные изменения ΔpH в данном случае составляют 2,5...3,5.

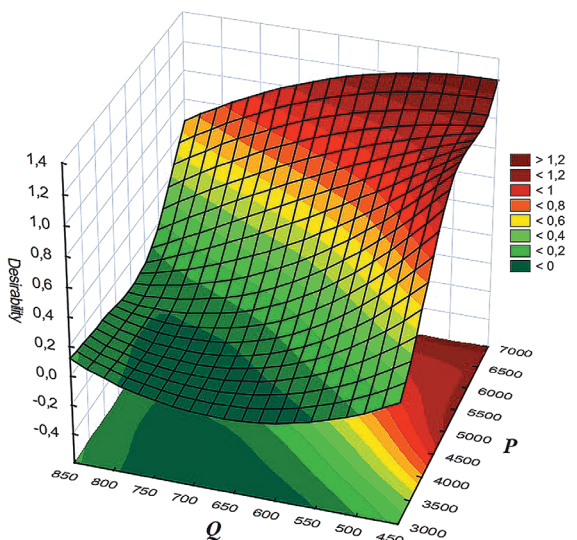


Рис. 3. Поверхность отклика трехфакторной модели оптимального изменения водородного показателя в электроактиваторе, равного 2,5...3,5
Fig. 3. Response surface of the three-factor model of the optimal change in the pH value in the electric activator, equal to 2.5...3.5

Графики поверхностей для оптимальных значений Y_2 , χ_1 и χ_2 представлены на рисунках 4, 5.

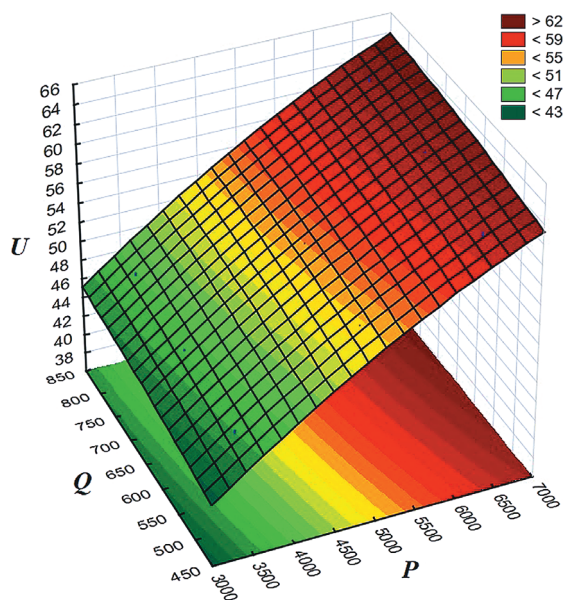


Рис. 4. Поверхность отклика трехфакторной модели изменения падения напряжения в катодной камере электроактиватора
Fig. 4. Response surface of the three-factor model of the voltage drop change in the cathode chamber of the electric activator

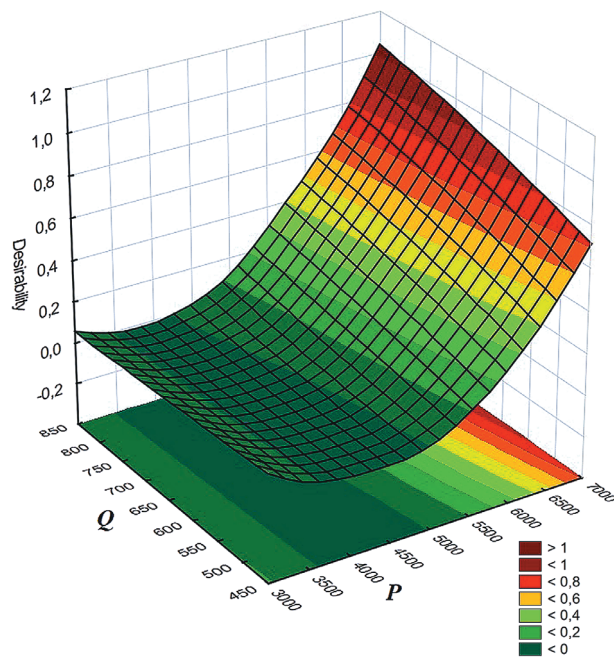


Рис. 5. Поверхность отклика трехфакторной модели оптимального значения падения напряжения в электроактиваторе, равного 55...65 В
Fig. 5. Response surface of the three-factor model of the optimal voltage drop value in the electric activator, equal to 55...65 V

Для более подробного исследования режимов работы электроактиватора введем переменную «Цикл». Цикл – это временная величина, характеризующая изменение режима работы электроактиватора от самого начала до момента забивания диафрагмы и серьезного засорения активатора солями, выпавшими в осадок, выраженная в относительных единицах (табл. 2).

Значение цикла, равное единице (1), обозначает начальную временную фазу работы электроактиватора, при которой активатор производит максимально близкие к расчетным данным выходные характеристики. Но со временем эксплуатационный режим начнет изменяться, так как во время работы электроактиватора постепенно начинают выпадать в осадок соли и уменьшается живое сечение диафрагмы ввиду забивания пор. Как следствие, напряжение на катодной и анодной камерах начнет уменьшаться, сопротивление диафрагмы будет возрастать. Значение цикла, равное числу «два» (2), обозначает ту временную фазу, в которой электроактиватор

постепенно изменяет свой режим работы ввиду внешних факторов, описанных выше. Значение цикла, равное числу «три» (3), обозначает временную фазу, при которой значительно начинают ухудшаться выходные характеристики активатора. Забивание пор диафрагмы происходит намного интенсивнее, чем во второй временной фазе, до момента, в котором уже нужно производить ее промывку или замену. Также в данной фазе еще сильнее увеличивается выпадение солей, и начнется процесс парообразования в камерах активатора.

Графики поверхностей для Y_1 , χ_1 и χ_3 отражены на рисунках 6, 7.

Таблица 2

Матрица активного планирования трехфакторного эксперимента по оптимизации режимных параметров проточного электроактиватора

Table 2

Matrix of active planning of a three-factor experiment on optimizing the operating parameters of a flow-through electric activator

№ п/п No.	Варьируемые параметры / Variable parameters		Критерии оптимизации (отклик) / Optimization criteria (response)		
	Мощность в катодной камере, P_k , Вт Power in the cathode chamber, P_k , W χ_1	Полный цикл работы электроактиватора, Цикл Full operation cycle of the electric activator, cycle χ_2	Изменение водородного показателя, ΔpH_k Change in pH, ΔpH_k Y_1	Падение напряжения в катодной камере, U_k , В Voltage drop in the cathode chamber, U_k , V Y_2	Плотность тока, J , $\frac{A}{cm^2} \cdot 10^3$ Current density, J , $A/cm^2 \cdot 10^3$ Y_3
1	3500	1	1,92	47	36,7
2	3500	2	1,615	51,24	30,9
3	3500	3	1,211	59,16	23,2
4	5000	1	2,74	55	45
5	5000	2	2,05	63,64	33,5
6	5000	3	1,185	83,7	19,4
7	6500	1	3,56	61	52,1
8	6500	2	2,27	76,5	33,5
9	6500	3	1,09	1,09	16

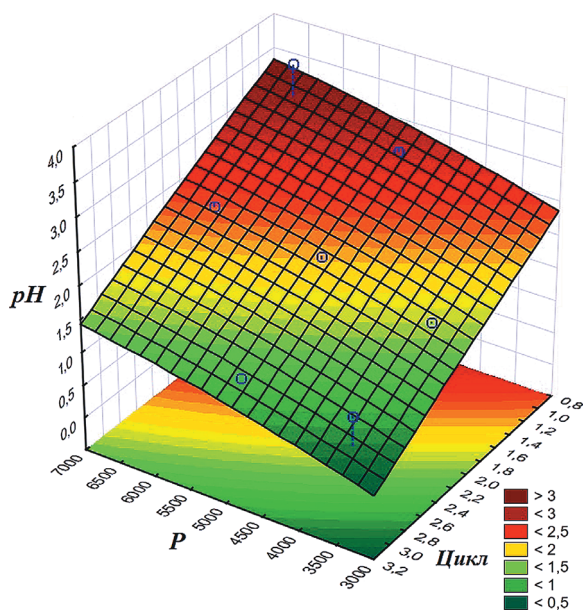


Рис. 6. Поверхность отклика трехфакторной модели изменения водородного показателя в электроактиваторе при производительности 650 л/ч
Fig. 6. Response surface of the three-factor model of the change in the pH value in the electric activator at a capacity of 650 l/h

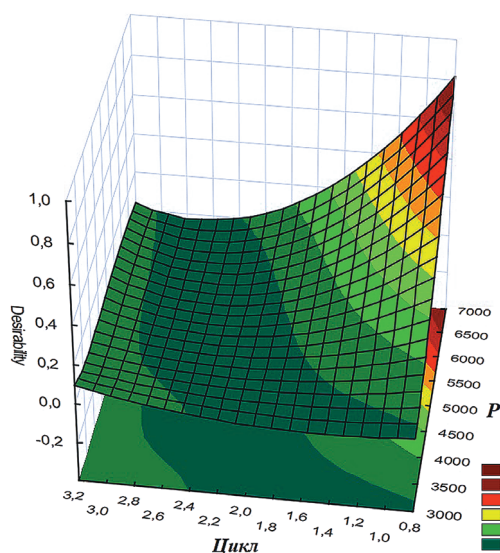


Рис. 7. Поверхность отклика трехфакторной модели оптимального изменения водородного показателя в электроактиваторе (2,5...3,5) при производительности 650 л/ч с учетом цикла работы
Fig. 7. Response surface of the three-factor model of the optimal change in the pH value in the electric activator (2.5...3.5) with a capacity of 650 l/h, taking into account the operating cycle

График поверхностей для Y_2 , χ_1 и χ_3 представлен на рисунке 8.

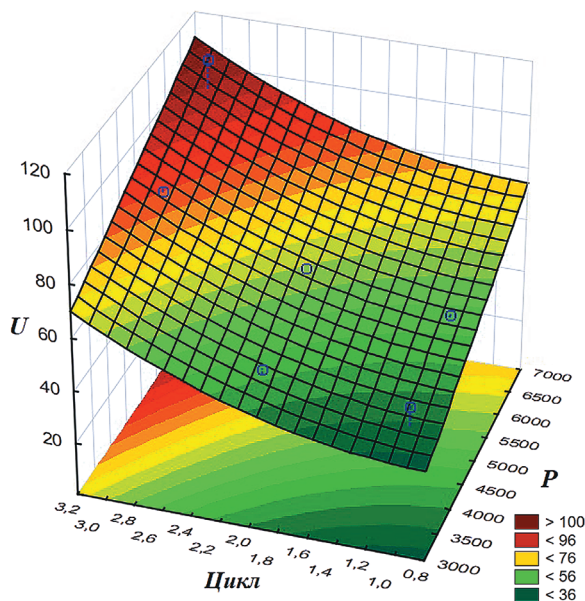


Рис. 8. Поверхность отклика трехфакторной модели изменения падения напряжения в катодной камере электроактиватора при производительности 650 л/ч
Fig. 8. Response surface of the three-factor model of the change in the voltage drop in the cathode chamber of the electric activator at a capacity of 650 l/h

Проанализировав полученные экспериментальные данные, получаем уравнения регрессии по каждому критерию оптимизации, которые позволяют получить рациональные режимы электроактивации жидкости:

$$Z_1 = 2,894 + 0,0006P - 0,0044Q.$$

$$Z_2 = 26,4 + 0,00471P + 0,00671Q.$$

$$Z_3 = 2,33 - 0,789Ц + 0,00025P.$$

$$Z_4 = -12,966 + 0,01P + 15,7Ц.$$

$$Z_5 = 87,535 + 0,5244U - 25,35Ц.$$

Выводы

1. Для установки, обеспечивающей обработку 5 т грубого корма в сезон католитом, эффективные режимы электроактивации жидкости описываются следующими регрессионными уравнениями:

– падение напряжения от мощности P и производительности Q

$$U_k = 2,894 + 0,0006P - 0,0044Q;$$

Библиографический список

1. Рядчиков В.Г. Основы питания и кормления сельскохозяйственных животных. Краснодар: КГАУ, 2012. 328 с.
2. Сторчевой В.Ф., Кабдин Н.Е., Гуров Д.А. Методика расчета основных параметров электроактиватора для обработки грубых кормов // Доклады ТСХА. 2021. Вып. 293. Ч. 3. С. 81-84.
3. Андреева И.В., Белопухов С.Л., Сторчевой В.Ф. Влияние активированной воды на прорастание семян и продуктивности растений // Научная жизнь. 2016. № 7. С. 37-48.
4. Shaposhnik V.A., Kesore K. An early history of electrodialysis with permselective membranes. Journal

График поверхностей для Y_3 , χ_1 и χ_3 представлен на рисунке 9.

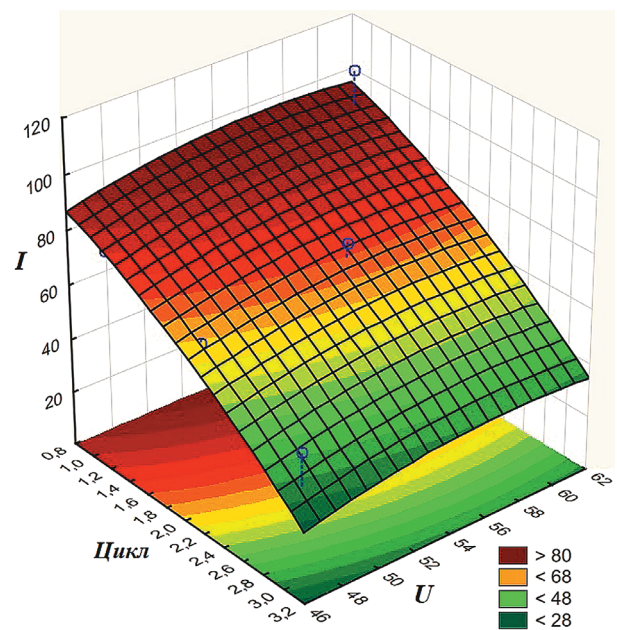


Рис. 9. Поверхность отклика трехфакторной модели изменения плотности тока в электроактиваторе при производительности 650 л/ч
Fig. 9. Response surface of the three-factor model of current density change in the electric activator at a capacity of 650 l/h

– изменение водородного показателя от подаваемой мощности P и производительности Q

$$pH_k = 26,4 + 0,00471P + 0,00671Q;$$

– изменение водородного показателя от цикла и подаваемой мощности P

$$pH_k = 2,33 - 0,789Ц + 0,00025P;$$

– падение напряжения от цикла и подаваемой мощности P

$$U_k = -12,966 + 0,01P + 15,7Ц;$$

– плотность тока от цикла и подаваемого напряжения

$$J = 87,535 + 0,5244U - 25,35Ц.$$

2. На основе полученных уравнений можно осуществлять изменение варьируемых параметров для получения нужных пропорций входных и выходных параметров установки.

References

1. Ryadchikov V.G. Osnovy pitaniya i kormleniya sel'skokhozyaystvennykh zhivotnykh [Fundamentals of the nutrition and feeding of farm animals], Krasnodar, KGAU, 2012. 328 p. (In Rus.)
2. Storchevov V.F., Kabdin N.E., Gurov D.A. Metodika rascheta osnovnykh parametrov elektroaktivatora dlya obrabotki grubyykh kormov [Methodology for calculating the main parameters of an electric activator for roughage processing]. *Doklady TSKHA*, 2021; 293(3): 81-84. (In Rus.)
3. Andreeva I.V., Belopukhov S.L., Storchevov V.F. Vliyanie aktivirovannoy vody na prorastanie semyan i produktivnosti rasteniy [Influence of activated water on seed germination and plant productivity]. *Nauchnaya zhizn'*, 2016; 7: 37-48. (In Rus.)

of Membrane Science, 1997; 136 (1-2): 35-39. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(97\)00149-X](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(97)00149-X)

5. Бахир В.М., Прилуцкий В.И., Шомовская Н.Ю. Электрохимически активированные водные среды – анолит и католит как средство подавления инфекционных процессов // Медицинский алфавит. 2010. Т. 3. № 13. С. 40-42.

6. Прилуцкий В.И. Электрохимически активированная вода: аномальные свойства, механизм биологического действия / В.И. Прилуцкий, В.М. Бахир. М.: ВНИИ-ИМТ НПО «Экран», 1995. 151 с.

7. Некрасова Л.П. Проблемы измерения и интерпретации окислительно-восстановительного потенциала активированных вод // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 11-2. С. 13-17.

8. Petrushanko I.Y., Lobyshev V.I. Nonequilibrium state of electrochemically activated water and its biological activity. *Biofizika*, 2001; 46 (3): 389-401.

9. Petrushanko I.Y., Lobyshev V.I. Physico-chemical properties of aqueous solutions, prepared in a membrane electrolyzer. *Biofizika*, 2004; 49 (1): 22-31.

10. Кошчаев А.Г., Плутахин Г.А., Фисенко Г.В., Петренко А.И. Безотходная переработка подсолнечного шрота // Хранение и переработка сельхозсырья. 2008. № 3. С. 66-68.

11. Жолобова И.С., Лунева А.В., Лысенко Ю.А. Мясная продуктивность и качество мяса перепелов после применения натрия гипохлорита // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 41. С. 146-150.

12. Способ изготовления белкового концентрата из подсолнечного шрота: Пат. 2218811, Российская Федерация, МПК7 А23К 1/14 / А.И. Петенко, О.П. Татарчук, А.Г. Кошчаев, Г.А. Плутахин; заявл. 08.01.2002; опубл. 20.12.2003.

13. Способ получения белковой добавки из гороха: Пат. 2268612, Российская Федерация, МПК А23К 1/14 / А.Г. Кошчаев, Г.А. Плутахин, А.И. Петенко, О.В. Кошчаева, В.В. Ткачев; заявл. 22.03.2004; опубл. 27.01.06.

Критерии авторства

Сторчевой В.Ф., Кабдин Н.Е., Андреев С.А., Гуров Д.А. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели обобщение и подготовили рукопись. Сторчевой В.Ф., Кабдин Н.Е., Андреев С.А., Гуров Д.А. 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 11.05.2022

Принята к публикации 12.05.2022

4. Shaposhnik V.A., Kesore K. An early history of electro dialysis with permselective membranes. *Journal of Membrane Science*, 1997; 136(1-2): 35-39. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(97\)00149-X](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(97)00149-X)

5. Bakhir V.M., Prilutsky V.I., Shomovskaya N.Yu. Elektrokhimicheski aktivirovannyye vodnyye sredy – anolit i katolit kak sredstvo podavleniya infektsionnykh protsessov [Electrochemically activated aqueous media – anolyte and catholyte as a means of suppressing infectious processes]. *Meditsinskiy alfavit*, 2010; 3(13): 40-42. (In Rus.)

6. Prilutsky V.I., Bakhir V.M. Elektrokhimicheski aktivirovannaya voda: anomal'nye svoystva, mekhanizm biologicheskogo deystviya [Electrochemically activated water: anomalous properties, mechanism of biological action]. Moscow, VNIIMT NPO "Ekran", 1995. 151 p. (In Rus.)

7. Nekrasova L.P. Problemy izmereniya i interpretatsii okislitel'no-vosstanovitel'nogo potentsiala aktivirovannykh vod [Problems of measuring and interpreting the redox potential of activated waters]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2013; 11-2: 13-17. (In Rus.)

8. Petrushanko I.Y., Lobyshev V.I. Nonequilibrium state of electrochemically activated water and its biological activity. *Biophysics*, 2001; 46(3): 389-401.

9. Petrushanko I.Y., Lobyshev V.I. Physico-chemical properties of aqueous solutions, prepared in a membrane electrolyzer. *Biophysics*, 2004; 49(1): 22-31.

10. Koshchayev A.G., Plutakhin G.A., Fisenko G.V., Petrenko A.I. Bezotkhodnaya pererabotka podsolnechnogo shrota [Waste-free processing of sunflower meal]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya*, 2008; 3: 66-68. (In Rus.)

11. Zholobova I.S., Luneva A.V., Lysenko Yu.A. Myasnaya produktivnost' i kachestvo myasa perepelov posle primeneniya natriya gipokhloriga [Meat productivity and quality of quail meat after applying sodium hypochlorite]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2013; 41: 146-150. (In Rus.)

12. Petenko A.I., Tatarchuk O.P., Koshaev A.G., Plutakhin G.A. Sposob izgotovleniya belkovogo konsentrata iz podsolnechnogo shrota [Method for the manufacturing of protein concentrate from sunflower meal]: Patent 2218811, Russian Federation, МПК7 А23К 1/14, 2003. (In Rus.)

13. Koshaev A.G., Plutakhin G.A., Petenko A.I., Koshaeva O.V., Tkachev V.V. Sposob polucheniya belkovoy dobavki iz gorokha [Method for obtaining a protein supplement from peas]: Patent 2268612, Russian Federation, МПК А23К 1/14, 2006. (In Rus.)

Contribution

V.F. Storchevov, N.E. Kabdin, S.A. Andreev, D.A. Gurov performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. V.F. Storchevov, N.E. Kabdin, S.A. Andreev, D.A. Gurov 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 11.05.2022

Accepted for publication 12.05.2022