



Сельскохозяйственные МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
Основан в 2007 году

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ АГРОИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР ВИМ»

Журнал зарегистрирован
Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
(РОСКОМНАДЗОР)
Свидетельство ПИ № ФС77-84201
от 22 ноября 2022 г.

Журнал включен в перечень изданий,
рекомендованных ВАК РФ для публика-
ции трудов соискателей ученых степе-
ней кандидата и доктора наук по специ-
альностям: 4.1.5 / 4.3.1 / 4.3.2 / 5.6.6.

Журнал включен
в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ)

Полные тексты статей
размещены на сайте электронной
научной библиотеки: <http://elibrary.ru>

Охраняется законом РФ № 5351-1
«Об авторском праве и смежных правах»
от 9 июля 1993 года. Контент распростра-
няется под лицензией Creative Commons
Attribution 4.0 License. Нарушение закона
будет преследоваться в судебном порядке.

НАД НОМЕРОМ РАБОТАЛИ:
В.В. Бижаев,
Г.В. Быковская,
Л.А. Горелова,
Р.М. Нурбагандова
Перевод – Светлана Сорокина

АДРЕС РЕДАКЦИИ:
109428, Москва,
1-й Институтский проезд, 5, стр. 1.
Телефоны: (499) 174-88-11
(499) 174-89-01

<http://www.vimsmit.com>
e-mail: smit@vim.ru

Мнение редакции не всегда совпадает
с позицией авторов публикаций.
Ответственность за достоверность
изложенных фактов и правильность
цитат несут авторы.
Не принятые к публикации статьи не воз-
вращаются и не рецензируются.

Выходит 4 раза в год
(Свободная цена)
Дата выхода в свет 12.06.2024
Формат 60х90/8. Объем 13,75 печ.л.
Тираж 500 экз
Отпечатано в типографии
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

© ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2024

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Андрей Юрьевич Измайл

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, член Президиума Российской академии наук, директор Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=527153

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Яков Петрович Лобачевский (НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР)

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук Российской академии наук, Москва, Российская Федерация, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=369308

Алексей Семенович Дорохов

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, заместитель директора по на-
учно-организационной работе Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская
Федерация, https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=550644

Михаил Никитичевич Ерохин

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, Российский государственный
аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, Москва, Рос-
сийская Федерация, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=626708

Юрий Анатольевич Иванов

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Российской академии наук, главный научный со-
трудник Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация,
https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=672993

Йошисукэ Кишида

академик, Президент компании «Шин-Норинша», г. Токио, Япония

Юрий Федорович Лачуга

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, член Президиума Российской
академии наук, Москва, Российская Федерация, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=365637

Антонин Махалек

доктор технических наук, директор Научно-исследовательского института сельскохозяйственной техники,
г. Прага, Чешская Республика

Владимир Дмитриевич Попов

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, руководитель научного на-
правления Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства,
Санкт-Петербург, Российская Федерация, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=684252

Синьминь Лю

профессор, ректор Циндаоского аграрного университета, г. Циндао, Китайская Народная Республика

Жарылкасын Сарсембекович Садыков

доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института агроинженерных про-
блем и новых технологий Казахского национального агроуниверситета, г. Алматы, Республика Казахстан

Даврон Рустамович Норчаев

доктор технических наук, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории «Механизации садовод-
ства и овощеводства» Научно-исследовательского института механизации сельского хозяйства Респуб-
лики Узбекистан, г. Карши, Кашкадарьинская область, Республика Узбекистан

Юлия Сергеевна Ценч

доктор технических наук, доцент, заместитель директора по образовательной и редакционно-издательской
деятельности Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация,
https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=816741

Вячеслав Иванович Черноиванов

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, Федеральный научный
агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=552570

Роман Алексеевич Фандо

доктор исторических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Инсти-
тут истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова Российской академии наук, Москва, Российская
Федерация, https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=124382



SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL
Founded in 2007

The journal is registered
by Federal Agency for Supervision
of Legislation Observance of Mass
Communications Sphere
and Cultural Heritage Protection
Certificate ПИ No. ФС77-84201
from November, 22, 2022

The Journal is included in the list
of peer-reviewed scientific
publications recommended
by the Higher Attestation Commission
for publishing the research results
of studies and theses for Ph.D. and
Dr.Sc. degrees in scientific
specialties 4.1.5 / 4.3.1 / 4.3.2 / 5.6.6.

The journal is included in the
Russian Index of Scientific Citation
(RISC).

Full texts of articles are placed on
the website of electronic library:
elibrary.ru

Protected by the Russian Federal
Law RF №5351-1 "On Copyright
and Related Rights" dated July 9,
1993. Content is distributed under
Creative Commons Attribution 4.0
License. Violations are subject to
prosecution.

EXECUTIVE EDITORS:

Bizhaev V.V.,
Bykovskaya G.V.,
Gorelova L.A.,
Nurbagandova R.M.
Translation into English –
Svetlana Sorokina

EDITORIAL OFFICE'S ADDRESS

109428, Moscow,
1st Institutskiy proezd, 5, bild. 1.
Tel.: +7 (499) 174-88-11
+7 (499) 174-89-01

<http://www.vimsmit.com>
e-mail: smit@vim.ru

[SEL'SKOKHOZYAYSTVENNYE MASHINY I TEKHNologii]

Founder and publisher: Federal State Budgetary Scientific Institution
"Federal Scientific Agroengineering Center VIM" of the Russian Academy of Sciences

EDITOR-IN-CHIEF

Andrey Yu. Izmaylov

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Academic Board Member of the Russian Academy of Sciences, Director of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

EDITORIAL BOARD

Yakov P. Lobachevskiy (SCIENTIFIC EDITOR)

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Academician Secretary of Department of Agricultural Sciences at the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Aleksey S. Dorokhov

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Scientific and Organizational Work of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Mikhail N. Erokhin

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Yuriy A. Ivanov

Dr.Sc.(Agr.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences; Chief Researcher of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Yoshisuke Kishida

Academician, President Shin-Norinsha Co., LTD, Tokyo, Japan

Yuriy F. Lachuga

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Academic Board Member of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Antonin Makhalek

Dr.Sc.(Eng.), Director of the Agricultural Machinery Research Institute, Prague, Czech Republic

Vladimir D. Popov

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Research Direction of the Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production, St.Peterburg, Russian Federation

Xinmin Liu

Professor, Rector of Qingdao Agricultural University, Qingdao, People's Republic of China

Zharylkasyn S. Sadykov

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Director of Research Institute of Agroengineering Problems and New Technologies, Kazakh National Agrarian University, Almaty, Republic of Kazakhstan

Davron R. Norchaev

Dr.Sc.(Eng.), Senior Researcher, Head of the «Mechanization of Horticulture and Vegetable Growing» Laboratory of the Scientific Research Institute of Agricultural Mechanization of the Republic of Uzbekistan, Karshi city, Kashkadarya region, Republic of Uzbekistan

Yuliya S. Tsench

Dr.Sc.(Eng.), Associate Professor, Deputy Director for Educational, Editorial and Publishing Activities of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Vyacheslav I. Chernov

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Roman A. Fando

Dr.Sc.(Hist.), Director of the Federal State Budgetary Institution of Science S.I. Vavilov Institute of History of Natural Science and Technology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

The opinion of the editorial board does not always coincide with the position of the authors of publications. Responsibility for the accuracy of the stated facts and correctness citations are carried by the authors. Articles not accepted for publication are not returned and are not reviewed.

Published 4 times a year (open price).

Publication date is 12.06.2024.

The format is 60 x 90/8. The volume is 13.75 print's sheets. The circulation is 500 copies.

Printed by FSBSI FSAC VIM.



РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК 300 ЛЕТ

- Лялякин В.П.**
Развитие индустрии по восстановлению деталей
для сельскохозяйственных машин в России 4

- Ценч Ю.С., Курбанов Р.К., Захарова Н.И.**
Развитие систем управления полетом и средств
аэрофотосъемки беспилотных воздушных судов
сельскохозяйственного назначения 11

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

- Дорохов А.С., Сибирев А.В., Пономарев А.Г.,
Петухов С.Н.**
Влияние электрофизического воздействия на сроки
хранения картофеля и овощных культур 20

- Зиновьев А.К., Рембалович Г.К., Костенко М.Ю.**
Технологии физического и химического воздействия
на посадочный материал картофеля 27

- Миронов Д.А., Попов Д.В., Расулов Р.К.,
Ламм А.К.**
Программное обеспечение для создания цифровых
двойников высокотехнологичных рабочих органов
сельскохозяйственных машин и почвенной среды ... 33

- Лобачевский Я.П., Алдошин Н.В.**
Технология и технические средства для реализации
методов воспроизводства плодородия почвы 40

- Чаплыгин М.Е., Жалнин Э.В.**
Комплексная оценка эффективности работы
современных зерноуборочных комбайнов
в условиях южного региона России 47

- Тавасиев Р.М., Дзицкоев А.П., Ахмад А.**
Определение параметров опрыскивателя
для плодопитомников 55

- Загоруйко М.Г., Соловьев Д.А., Рыжко Н.Ф.,
Рыжко С.Н.**
Роботизированный оросительный комплекс
для выращивания сельскохозяйственных культур
на орошаемом участке 61

- Тихомиров Д.А., Хименко А.В., Кузьмичев А.В.**
Повышение энергоэффективности сушильной
установки за счет применения термоэлектрических
модулей 68

- Бижаев А.В., Ветрова С.М., Барчукова А.С.,
Кривых Н.С.**
Использование индивидуального привода колес
трактора посредством электрической тяги 78

- Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С., Миронова А.В.**
Автоматизированный комбинированный агрегат
с универсальным почвообрабатывающим адаптером .. 86

- Чулков А.С., Шибряева Л.С.**
Параметры кассеты для роботизированного
загрузочного устройства селекционной сеялки 92

- Квас С.А., Золотарев А.С.**
Определение фрикционных свойств ABS-пластика
при контакте с суглинистой почвой 98

- Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Егоров С.А.**
Техническое решение очистки выбросов
климатически активных газов 103

THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES IS 300 YEARS OLD

- Lyalyakin V.P.**
Evolution of agricultural machinery parts restoration
industry in Russia 4

- Tsench Yu.S., Kurbanov R.K., Zakharova N.I.**
Evolution of flight control systems
and aerial photography in unmanned
agricultural aircraft 11

INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

- Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Ponomarev A.G.,
Petukhov S.N.**
Effect of electrophysical treatments on the storage
life of potatoes and other vegetable crops 20

- Zinoviev A.K., Rembalovich G.K., Kostenko M.Yu.**
Technologies of physical and chemical impact
on potato planting material 27

- Mironov D.A., Popov D.V., Rasulov R.K.,
Lamm A.K.**
Software for developing digital twins
of agricultural machinery
working bodies 33

- Lobachevsky Ya.P., Aldoshin N.V.**
Technology and technical means for the implementation
of reproduction methods for soil fertility 40

- Chaplygin M.E., Zhالنin E.V.**
Comprehensive evaluation of modern
combine harvester performance
in Southern Russia 47

- Tavasiev R.M., Dzitsoev A.P., Ahmad A.**
Determination of sprayer parameters
for fruit nurseries 55

- Zagoruiko M.G., Soloviev D.A., Ryzhko N.F.,
Ryzhko S.N.**
Robotic irrigation complex for crop
cultivation in irrigated
areas 61

- Tikhomirov D.A., Khimenko A.V., Kuzmichev A.V.**
Increasing the drying unit energy
efficiency through with thermoelectric
modules 68

- Bizhaev A.V., Vetrova S.M., Barchukova A.S.,
Krivyh N.S.**
Using individual tractor wheel drive through
electric traction 78

- Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S., Mironova A.V.**
Automated combined unit with universal
tillage adapter 86

- Chulkov A.S., Shibryaeva L.S.**
Parameters of a robotic loading device
for selection seeder 92

- Kvas S.A., Zolotarev A.S.**
Determining friction properties of ABS plastic
in contact with loamy soil 98

- Briukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Egorov S.A.**
Technical solution for purifying emissions
of climate-active gases 103

EDN: MNLXKX

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-4-10



Научная статья

УДК 629.3014.2



Развитие индустрии по восстановлению деталей для сельскохозяйственных машин в России

Валентин Павлович Лялякин,
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
e-mail: valpal-1938@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Показана эффективность восстановления деталей сельскохозяйственных машин за счет снижения расхода металла, топлива и трудозатрат. (*Цель исследования*) Провести анализ этапов развития системы восстановления деталей машин по мере индустриализации сельского хозяйства в России, а также роли отраслевой науки в создании методологии ремонта машин и восстановления деталей. (*Материалы и методы*) Изучены публикации по истории развития отрасли восстановления деталей. Особое внимание уделено постановлениям советских государственных органов, целевой комплексной программы Государственного комитета по науке и технике, Госплана СССР и Госкомсельхозтехники, направленным на формирование и расширение производственной базы по ремонту и восстановлению деталей для агротехники. (*Результаты и обсуждение*) На первых этапах индустриализации сельского хозяйства при ремонте техники использовались преимущественно новые запасные части, а изношенные детали списывались на переплавку. Важным достижением в области восстановления деталей стало введение ремонтных размеров коленчатых валов и гильз цилиндров. С 1975 года резко повысились расходы на содержание техники за счет затрат на новые запасные части. Дан анализ деятельности Всесоюзного научно-производственного объединения «Ремдеталь» по созданию поточно-механизированных линий и оборудования для восстановления деталей сельхозтехники. (*Выводы*) Показана динамика изменения объемов восстановления деталей с 68 млн рублей в 1965 году до 539 млн рублей в 1988 году при экономии металла в этот период от 136 тысяч тонн до 1110 тысяч тонн. Показана роль Академии наук СССР, ведущих научных институтов, машиностроительных предприятий в выполнении целевой программы по увеличению объемов восстановления деталей и узлов сельскохозяйственной техники.

Ключевые слова: сельскохозяйственные машины, ремонт, детали, узлы, система восстановления, технологии.

■ **Для цитирования:** Лялякин В.П. Развитие индустрии по восстановлению деталей для сельскохозяйственных машин в России // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N2. С. 4-10. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-4-10. EDN: MNLXKX.

Scientific article

Evolution of Agricultural Machinery Parts Restoration Industry in Russia

Valentin P. Lyalyakin,
Dr.Sc.(Eng), professor, chief researcher,
e-mail: valpal-1938@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper shows the effectiveness of agricultural machinery parts restoration by reducing metal and fuel consumption as well as labor costs. (*Research purpose*) The paper analyzes the evolution of the machine part restoration system during the agricultural industrialization process in Russia, and explores the role of industrial science in developing methodologies for machine repairing and part restoration. (*Materials and methods*) Publications on the history of the parts restoration industry were thoroughly reviewed. Special attention was given to the decrees issued by Soviet government bodies, including the targeted comprehensive program of the State Committee of Science and Technology, the USSR State Planning Committee, and the State Committee for Agricultural Technology. These programs were aimed at establishing and expanding the production base for the repair and restoration of agricultural machinery parts. (*Results and discussion*) In the early stages of agricultural industrialization, equipment repairs primarily involved the use of new spare parts, while worn parts were typically discarded for remelting. A significant advancement in parts restoration was the introduction of repair sizes for crankshafts and cylinder liners. Since 1975,

the cost of maintaining equipment has surged sharply due to the prices of new spare parts. The paper also presents an analysis of the efforts by the All-Union Scientific and Production Association «Remdetal» to develop flow-mechanized lines and equipment for restoring agricultural machinery parts. (*Conclusions*) The paper illustrates the significant growth in parts restoration volumes, rising from 68 million rubles in 1965 to 539 million rubles in 1988, as well as metal savings that increased from 136 thousand tons to 1,110 thousand tons over the same period. Additionally it highlights the role of the USSR Academy of Sciences, leading scientific institutes, and machine-building enterprises in executing the targeted program to increase the restoration volumes of agricultural machinery parts and components.

Keywords: agricultural machinery, repair, parts, components, restoration system, technologies.

For citation: Lyalyakin V.P. Evolution of agricultural machinery parts restoration industry in Russia. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 4-10 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-4-10. EDN: MNLXX.

Восстановление деталей представляет собой комплекс операций по устранению основных дефектов, обеспечивающий возобновление работоспособности технических средств. В любой машине в период эксплуатации происходит износ сопряжений, приводящий к отказам. При поступлении машины на ремонт после разборки и установления дефектов оказываются пригодными для дальнейшей эксплуатации 45% деталей, до 50% деталей подлежат восстановлению и только 5-9% направляются на утилизацию [1].

Изношенную деталь можно либо заменить новой, либо восстановить. Для изготовления новой детали необходимо выплавить металл или переплавить изношенные и непригодные для восстановления детали. При переплавке и механической обработке в процессе изготовления новых деталей происходят значительные потери металла.

Вариант восстановления более предпочтителен. В этом случае на изношенную деталь дополнительно требуется до 10% металла. При восстановлении деталей стоимостью 1 млн руб. за счет исключения металлургического цикла и последующей обработки можно сэкономить 1,85 тыс. т металла в виде проката и сортового литья, 0,15 млн чел.-ч затрат труда, 3,19 т условного топлива, 2,56 млн руб. капитальных вложений. Затраты при восстановлении детали составляют 30-50% от стоимости новой [2].

Цель исследования. Анализ развития в России системы восстановления деталей, динамики объемов и экономии ресурсов, а также оценка роли академической и прикладной науки в организации выпуска технологического оборудования и материалов, создании соответствующей научно-исследовательской и материально-технической базы.

Материалы и методы. Исследование проведено на основе научных публикаций, литературных источников, материалов международных выставок «Ремдеталь», постановлений правительства о создании единой производственной системы восстановления деталей, программы Государственного

комитета Совета Министров СССР по науке и технике о мерах по увеличению объемов восстановления деталей.

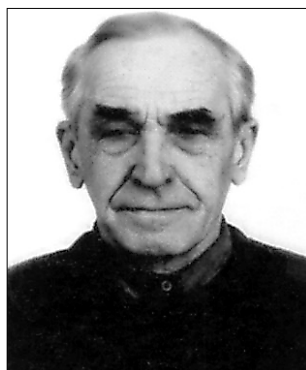
Результаты исследования. На первых этапах эксплуатации импортных (1924-1925 гг.) и отечественных тракторов (1924-1930 гг.) возникали серьезные проблемы, связанные с износом деталей. В то время замена деталей или узлов на новые была единственным решением, которую предлагали зарубежные консультанты, обслуживающие сельскохозяйственные машины и технику [3]. Надо заметить, что и в наши дни дилеры некоторых фирм-поставщиков предлагают такой же метод.

Учитывая состояние ремонтной базы в начале 1930-х годов, основу которой составляли сельские кузницы, удавалось выполнять самые простые приемы восстановления деталей. Так, изношенные лемехи для плуга восстанавливали путем оттяжки и закаливания. Для этого при изготовлении лемеха предусматривался дополнительный запас металла в виде утолщения, позволяющий восстановить первоначальную геометрию кузнечным методом. В первых двигателях для тракторов коленчатый вал вращался в баббитовых вкладышах. Поскольку баббит выплавлялся, вкладыши часто отказывали, и двигатель становился неработоспособным. Для устранения этого дефекта вкладыши заливали в кузнице на специальном приспособлении. После замены баббитовых вкладышей на сталеалюминевые отпала такая необходимость [4].

В 1950-1970-е годы, когда увеличились объемы ремонта тракторов, обострилась проблема с новыми запасными частями, в первую очередь коленчатыми валами и деталями шатунно-поршневой группы. Технологии нанесения металлопокрытий на изношенную поверхность еще не были отработаны, поэтому был выбран курс на применение метода ремонтных размеров (Черноиванов В.И. Организация и технология восстановления деталей машин. М.: Агропромиздат, 1989. 336 с.). Суть его проста: изношенная поверхность детали снимается путем механической обработки (шлифованием, хо-



В.И. Черноиванов
1979-1983 гг.



Б.Б. Неведов
1983-1988 гг.



Э.С. Каракозов
1988-1993 гг.



В.П. Лялякин
1993-2003 гг.

Рис. 1. Директора ВНПО «Ремдеталь» (НПО «Ремдеталь») / Fig. 1. Directors of VNPO «Remdetal» (NPO «Remdetal»)

нингованием). При этом у детали типа «вал» уменьшается наружная поверхность, а у детали типа «отверстие» увеличивается внутренний диаметр.

Для обеспечения работоспособности восстанавливаемых сопряжений заводы-изготовители новой техники поставляли ремонтные детали с увеличенными или уменьшенными размерами. Для этого требовалось определить, на сколько надо уменьшить размер шейки коленчатого вала и увеличить внутренний диаметр гильзы цилиндров двигателя. По средним значениям износов коленчатых валов и гильз цилиндров были определены категориальные размеры. Так, по шатунным и коренным шейкам ремонтный размер составил 0,25 мм и были установлены четыре ремонтных размера. При изготовлении коренные и шатунные шейки закаливали на твердость 52-56 HRC на глубину слоя 2 мм. Гильзы тракторных двигателей растачивали, увеличивая внутренний диаметр на 0,7 мм. Изготовитель запасных частей поставлял ремонтным предприятиям увеличенные по диаметру поршни, кольца и поршневые пальцы [5].

Внедрение ремонтных размеров способствовало снижению расхода новых запасных частей. Однако этот способ имеет ряд недостатков. Например, на шейке коленчатых валов начиная с 3-го ремонтного размера уменьшается поверхностная твердость на 10 HRC, что вызывает повышение износа. По этой причине приходится применять дополнительные способы упрочнения, например, лазерным методом. При растачивании на ремонтном оборудовании ремонтных гильз образуется конусность. Несмотря на недостатки, метод ремонтных размеров распространен в настоящее время на ремонтных предприятиях.

С середины 1970-х годов резко возросли расходы на ремонт и техническое обслуживание машин в сельском хозяйстве: в 1975 г. они составляли 4,2 млрд руб., в 1977 г. – 4,9 млрд, в 1979 г. – 5,3 млрд, в 1982 г. – 5,6 млрд руб. Ежегодно затраты на запасные части при ремонте тракторов, автомобилей и

сельскохозяйственных машин превышали 2,5 млрд руб., или более 40% общих расходов на ремонт и техническое обслуживание.

Выпуск запасных частей ежегодно увеличивался, за их поставками был постоянный контроль со стороны государственных органов. Однако дефицит запасных частей нарастал, что потребовало принятия ряда важных документов. В Постановлении ЦК КПСС и Совета Министров от 8 сентября 1977 г. № 820 и Постановлении Совета министров СССР от 1 февраля 1979 г. № 114 предусматривались меры развития системы восстановления деталей, ставились конкретные задачи увеличения выпуска восстановленных деталей.

Согласно постановлению № 114 в составе В/О «Союзсельхозтехника» было образовано Всесоюзное научно-производственное объединение по восстановлению изношенных деталей автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин. ВНПО «Ремдеталь» отделилось от ГОСНИТИ и на протяжении 24 лет работало самостоятельно, а в 2003 г. опять вошло в структуру ГОСНИТИ.

Главными задачами объединения «Ремдеталь» были:

- разработка научных основ создания перспективной системы развития производств по восстановлению деталей;
- разработка и внедрение поточно-механизированных, роботизированных линий восстановления деталей;
- разработка и внедрение технологических процессов и нормативно-технической документации для ремонтных предприятий.

В структуру объединения под единым руководством входили научное подразделение, опытно-конструкторский коллектив и завод по изготовлению опытного и серийного оборудования. Это позволило составлять единые планы работ от технического задания на создание или модернизацию производства по восстановлению деталей до внедрения технологий с комплектом технологического оборудования.

Таблица 1

Table 1

ДИНАМИКА ОБЪЕМОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ / DYNAMICS OF PARTS RESTORATION VOLUMES								
Показатель	1965 г.	1970 г.	1975 г.	1985 г.	1986 г.	1987 г.	1988 г.	1989 г.
Объем восстановления деталей, млн руб.	68,4	138,6	258	550	574	554	539	442
Экономия металла, тыс. т	136	275	516	1100	1120	1110	1100	880
Доля восстановленных деталей в поставках запчастей, %	-	9,6	12,6	17,6	19,0	18	17,5	15,5

ВНПО «Ремдеталь» первые пять лет руководил Вячеслав Иванович Черноиванов (рис. 1). Под его началом в кратчайшие сроки было сформировано мощное научно-производственное подразделение в составе двух институтов, шести опытно-конструкторских, проектно-технологических филиалов, 12 опытных заводов. Численность сотрудников к 1981 г. превышала 6000 человек.

Объединение выполняло функции головной организации по созданию в СССР соответствующей производственной инфраструктуры. Была разработана и согласована с руководителями союзных республик перспективная схема развития производств по восстановлению изношенных деталей сроком до 1990 г.

До создания ВНПО «Ремдеталь» в объединении «Союзсельхозтехника» большее внимание уделялось организации при ремонтных предприятиях участков восстановления деталей для обеспечения собственных нужд.

Разработки по технологии и внедрению нового оборудования ВНПО «Ремдеталь» оказали существенное влияние на динамику объемов восстановления деталей. Ежегодно с 1965 г. росли объемы восстановления деталей, в 1986 г. их удельный вес составил 19% – наибольший за все годы (табл. 1).

За время существования ВНПО «Ремдеталь» разработаны и внедрены 40 поточных механизированных линий, 1500 технологических процессов, 320 опытных образцов оборудования, 44 ремонтно-тракторные мастерские. Разработки ВНПО «Ремдеталь» получили три премии Совета Министров СССР:

- в 1984 г. за разработку и внедрение в производство новых способов и оборудования для восстановления и упрочнения деталей электроконтактной приваркой присадочных материалов;
- в 1986 г. за разработку и широкое внедрение комплектов оборудования для ресурсосберегающих технологий восстановления и упрочнения деталей газопламенной наплавкой;
- в 1988 г. за разработку и широкое внедрение в производство технологии и оборудования для термопластической раздачи поршневых пальцев.

В 1987 г. на Лейпцигской осенней ярмарке (ГДР) объединение «Ремдеталь» награждено тремя из 18 полученных Советским Союзом медалей: за разработку установки для контактной приварки проволокой и стальной лентой, автомата раздачи поршневых пальцев и автомата для наплавки клапанов.

На фотографиях показаны некоторые разработки ВНПО «Ремдеталь», внедренные в производство.



Рис. 2. Участок восстановления деталей электроконтактной наплавкой на Бронницком ремонтно-техническом предприятии (Московская область)

Fig. 2. Section for electrocontact surfacing restoration at the Bronnitsky Repair and Technical Enterprise (Moscow Region)



Рис. 3. Лазерное термоупрочнение деталей

Fig. 3. Laser hardening process

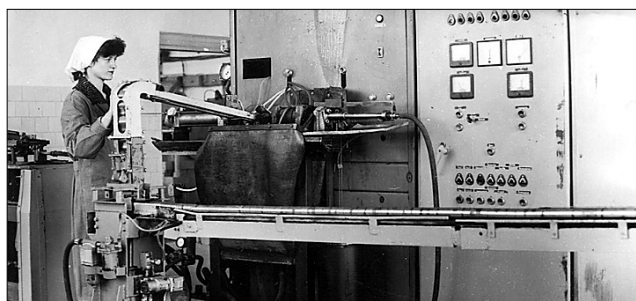


Рис. 4. Поточно-механизированная линия восстановления поршневых пальцев (Маикоп, Адыгея)

Fig. 4. Flow-mechanized line for piston pin restoration (Maikop, Adygea)

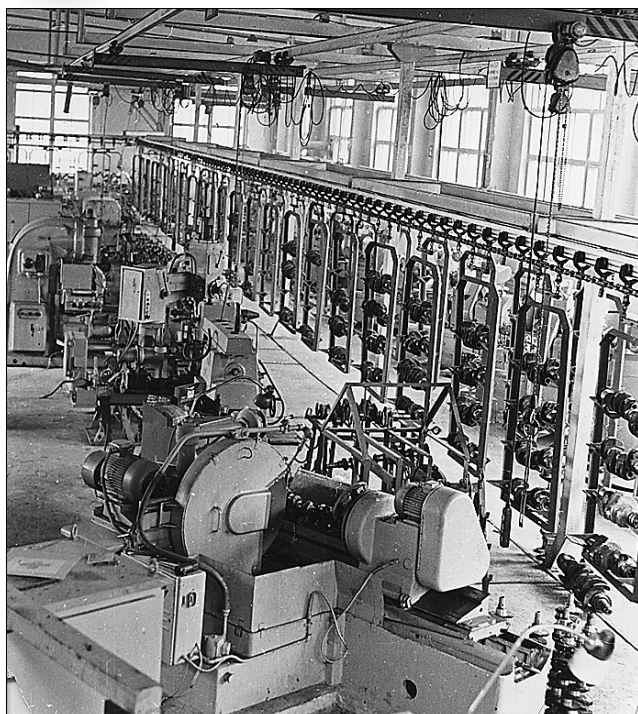


Рис. 5. Поточно-механизированная линия восстановления коленчатых валов (п. Вороново, Винницкая обл., УССР)
Fig. 5. Flow-mechanized line for crankshaft restoration (Voronovo village, Vinnitsa region, Ukrainian SSR)

Значительный вклад в создании передовых технологий восстановления деталей и эффективного оборудования принадлежит организациям академической и прикладной науки. Специалистами Государственного комитета по производственно-техническому обеспечению сельского хозяйства (Госкомсельхозтехника СССР) совместно с Государственным комитетом по науке и технике (ГКНТ) и Госпланом СССР была разработана комплексная научно-техническая программа оц-0,44, в которой приняли участие свыше 76 научных и производственных объединений и организаций. К решению проблемы восстановления деталей были привлечены 56 научных центров АН СССР. Президент АН СССР Анатолий Петрович Александров лично помогал в решении возникающих проблем, посещал созданные ВНПО «Ремдеталь» производства (рис. 6).

Ведущая роль в вопросах восстановления деталей принадлежала Институту электросварки им. Е.О. Патона, где была разработана серия наплавочных и плазменных установок для нанесения покрытий. Несколько таких установок изготавливали заводы, входящие в состав ВНПО «Ремдеталь» (УД-209). Оригинальная установка для заливки жидким металлом опорных катков трактора разработана Институтом проблем литья АН УССР. Участок восстановления опорных катков заливкой жидким металлом работал на Жмеринском предприятии объединения «Райсельхозтехника» в Винницкой области.



Рис. 6. Президент АН СССР А.П. Александров при посещении участка электродуговой металлизации
Fig. 6. President of the USSR Academy of Sciences A.P. Alexandrov visiting the electric arc metallization site

Во многом способствовали продвижению новых разработок на рынок научно-практические конференции, семинары с привлечением специалистов из стран-членов СЭВ [6]. Такие мероприятия проходили на действующих ремонтных предприятиях. Особо были отмечены Международная выставка «Ремдеталь-83» в Киеве с показом технологий на 10 предприятиях в 6 областях Украины, включая разработки стран СЭВ, и Международная выставка «Ремдеталь-88» в Пятигорске.

Совет министров СССР принял Постановление 4 октября 1984 г. № 1035 «О мерах по дальнейшему расширению производства и восстановления деталей и изделий с упрочняющими покрытиями к автомобилям, тракторам и сельскохозяйственным машинам на 1985-1990 годы». Эти меры были нацелены на повышение ресурса работы деталей с упрочняющими покрытиями как новых, так и восстанавливаемых на предприятиях Госкомсельхозтехники. Были введены нормы снижения расхода новых запасных частей для автомашин, тракторов, сельхозмашин, ставилась задача освоения процессов с использованием порошковых материалов. На Торезском заводе (Донецкая область, УССР) начала работать линия производства порошковых материалов по лицензии швейцарской фирмы *Castolin Eutectic* проектной мощностью до 500 т в год.

До Госкомсельхозтехники были доведены директивные показатели о снижении с 1985 до 1990 г. норм расхода запасных частей за счет повышения ресурса работы деталей с упрочняющими покрытиями и количества восстановленных. Одновременно министерствам и ведомствам поручалось поставить Госкомсельхозтехнике необходимые материалы и установки нанесения покрытий, в том числе автоматы и полуавтоматы. При Институте свар-

Таблица 2

Table 2

ДИНАМИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ, %
DYNAMICS OF AGRICULTURAL MACHINERY PARTS RESTORATION, %

Показатель	1985 г.	1986 г.	1989 г.	1990 г.	1995 г.	2000 г.	2007 г.
Объем восстановленных деталей, % к 1985 г.	100,0	103,0	81,3	72,2	45,0	52,0	48,0
Доля восстановленных деталей в поставках запчастей, %	17,8	19,6	15,1	14,1	6,9	8,0	7,2

ки им Е.О. Патона и Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения АН СССР созданы инженерно-технические центры по восстановлению деталей с упрочняющими покрытиями. Эти центры сыграли определенную роль в обеспечении ремонтных предприятий новыми разработками по нанесению покрытий плазменно-детонационными методами [7].

В полном объеме запланированные показатели восстановления и производства деталей с упрочняющими покрытиями не были выполнены и к 1991 г. В связи с ликвидацией СССР действие постановления № 1035 было прекращено. С 1990 г. наряду с резким спадом показателей восстановления (*табл. 2*) возросли расходы на приобретение новых запасных частей и материалов: в 2000 г. их сумма составила 24,9 млрд руб., в 2007 г. – 45 млрд руб.

В современной России остались предприятия, которые сохранили свою производственную направленность, стали развиваться в новых экономических условиях, осваивать новые технологии, наращивать объемы восстановления деталей. Примером является ЗАО «Грачевский завод «Гидроагрегат» (Ставропольский край), его возглавляет Владислав Джаферович Гращенков. Более 30 лет завод специализируется на реновации и ремонте гидравлических узлов и агрегатов, как отечественных, так и импортных. Главная задача коллектива: освоить ремонт и восстановление всех типов гидроагрегатов. На заводе освоены технологии электроискрового легирования, безабразивной ультразвуковой финишной обработки, которые позволяют полностью восстановить начальный ресурс отремонтированных узлов. Отпускная цена восстановленных агрегатов не превышает 20-50% стоимости новых изделий. Особенно большая экономия возможна в

отношении импортных агрегатов: например, стоимость восстановленного гидрораспределителя *BOSCH 23LS* в 5 раз меньше, чем нового [8].

Другой пример – организация восстановления и упрочнения деталей в Мордовском государственном университете им. Н.П. Огарёва. Данное учебное заведение более 60 лет обучает специалистов по механизации сельского хозяйства. Для подготовки высококвалифицированных кадров по восстановлению деталей, ремонту узлов и агрегатов совместно с научными подразделениями Россельхозакадемии (ГОСНИТИ, ВНПО «Ремдеталь») на базе кафедры технического сервиса машин университета создан учебно-производственный центр. За 20 лет данный центр расширился и в настоящее время объединяет 12 производственных участков с набором оборудования и оснастки, на которых по современным технологиям ремонтируются узлы и агрегаты с восстановлением 100% ресурса деталей [9].

Выводы. Проведенный анализ развития восстановления деталей сельскохозяйственных машин показал, что наибольшие достижения в этой отрасли были в период работы В/О «Союзсельхозтехника». В то время приняты три постановления о дальнейшем расширении производств по восстановлению деталей с использованием новых технологий, включая упрочняющие покрытия. Принятые меры позволили увеличить объемы восстановления с 68 млн руб. в 1965 г. до 539 млн руб. в 1988 г., получить экономию металла соответственно с 136 тыс. т до 1110 тыс. т. Эти данные подтверждают целесообразность развития индустрии по восстановлению деталей и запасных частей на предприятиях Минсельхоза России.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черноиванов В.И., Лялякин В.П. Организация и технология восстановления деталей машин. М.: ФНАЦ ВИМ. 2022. 284 с.
2. Огородник И.А., Гречихин Д.С. История и этапы развития ремонтного производства в сельском хозяйстве. Минск: Медисонт. 2018. 688 с.
3. Лялякин В.П. Восстановление деталей – важное направление в исследованиях ГОСНИТИ // *Труды ГОСНИТИ*. 2013. Т. 113. С. 233-244. EDN: RUABUL.
4. Лялякин В.П., Огородник И.А. История развития ремонтного производства // *Технический сервис машин*. 2019. N3(136). С. 170-186. EDN: BEUOKL.
5. Лялякин В.П., Аулов В.Ф. Инновационные технологии восстановления шеек коленчатых валов в связи с их старением в процессе эксплуатации // *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2024. N4. С. 9-13. DOI: 10.31044/1684-2561-2024-0-4-9-13.
6. Лялякин В.П., Кононогов А.М. Совершенствование ор-

ганизации восстановления деталей в СССР и за рубежом: Аналитический обзор. М.: Информагротех, 1991. 40 с.

7. Черноиванов В.И., Горячев С.А., Щеглов Е.В. и др. Формирование инфраструктуры инженерно-технологических услуг сельским товаропроизводителям. М.: Росинформагротех, 2010. 191 с. EDN: QUGJUN.
8. Лялякин В.П. История создания учебно-производственных центров при кафедрах сельскохозяйственных университетов // *Технический сервис машин*. 2022. N4(149). С. 149-157. DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-4-149-157. EDN: WEBTNW.
9. Ежевский А.А., Федоренко В.Ф., Аронов Э.Л. Стратегия, эффективность и опыт производственно-технического обеспечения сельского хозяйства во второй половине XX века. М.: Росинформагротех, 2004. 339 с.
10. Черноиванов В.И., Лялякин В.П., Голубев И.Г. Организация и технология восстановления деталей машин. М.: Росинформагротех, 2016. 568 с. EDN: WETDSX.

REFERENCES

1. Chernoi Ivanov V.I., Lyalyakin V.P. Organization and technology for machine parts restoration. Moscow: FSAC VIM. 2022. 284 (In Russian).
2. Ogorodnik I.A., Grechikhin D.S. History and development of agricultural repair production. Minsk: Medisont. 2018. 688 (In Russian).
3. Lyalyakin V.P. Parts restoration as an important focus of GOSNITI research. *Proceedings of GOSNITI*. 2013. Vol. 113. 233-244 (In Russian). EDN: RUABUL.
4. Lyalyakin V.P., Ogorodnik I.A. The history of the development of repair production. *Machinery Technical Service*. 2019. N3(136). 170-186 (In Russian). EDN: BEUOKL.
5. Lyalyakin V.P., Aulov V.F. Innovative technologies for renewal of crankshaft necks owing to their aging during operation. *Repair, Reconditioning, Modernization*. 2024. N4. 9-13 (In Russian). DOI: 10.31044/1684-2561-2024-0-4-9-13.
6. Lyalyakin V.P., Kononogov A.M. Improving the organization of parts restoration in the USSR and abroad: Analytical review. Moscow: Informagrotekh. 1991. 40 (In Russian).
7. Chernoi Ivanov V.I., Goryachev S.A., Shcheglov E.V., et al. Development of engineering and technological service infrastructure for rural producers. Moscow: Rosinformagrotekh. 2010. 191 (In Russian). EDN: QUGJUN.
8. Lyalyakin V.P. History of training and production centers of agricultural universities. *Machinery Technical Service*. 2022. N4(149). 149-157 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-4-149-157.
9. Ezhevsky A.A., Fedorenko V.F., Aronov E.L. Strategy, efficiency and experience in production and technical support of agriculture in the second half of the 20th century. Moscow: Rosinformagrotekh. 2004. 339 (In Russian).
10. Chernoi Ivanov V.I., Lyalyakin V.P., Golubev I.G. Organization and technology for machine parts restoration. Moscow: Rosinformagrotekh. 2016. 568 (In Russian). EDN: WETDSX.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
Автор прочитал и одобрил окончательный вариант.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.
The author read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

02.03.2024
21.05.2024

EDN: JPLEGX

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19



Научная статья

УДК 656.7.076



Развитие систем управления полетом и средств аэрофотосъемки беспилотных воздушных судов сельскохозяйственного назначения

Юлия Сергеевна Ценч,

доктор технических наук, главный научный сотрудник;

Рашид Курбанович Курбанов,

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;

Наталья Ивановна Захарова,

младший научный сотрудник,

e-mail: smedia@vim.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Развитие технологий БПЛА позволяет совершать фото- и видеосъемку и при этом не отвлекаться на процесс управления полетом. (*Цель исследования*) Выполнить ретроспективный анализ совершенствования систем управления полетом и развития аппаратуры для аэрофотосъемки сельскохозяйственных земель с середины XIX века по настоящее время. (*Материалы и методы*) Выполнили систематический обзор литературы с помощью историко-аналитического метода. Изучили оригинальные работы отечественных и зарубежных авторов: монографии, научные журналы, материалы конференций, экспозиции музеев, фотоматериалы и исходный код программного обеспечения в открытом доступе. (*Результаты и обсуждение*) Выделено по шесть этапов развития средств аэрофотосъемки и систем управления полетом. Полученная периодизация основана на изменении вида камер, типа системы управления и конструкций летательных аппаратов. В каждом из этапов рассмотрены основные камеры, системы управления и летательные аппараты, используемые для выполнения задач в сельском хозяйстве. (*Выводы*) Установили параметры средств аэрофотосъемки, менявшиеся за 165 лет: фотоматериал, пространственное разрешение изображений, спектральное разрешение, масса и крепление камер, тип затворов и их приводы, инерциальный блок управления, встроенный GPS/ГЛОНАСС приемник, сенсор освещенности. Выявили параметры системы управления полетом беспилотного летательного аппарата, менявшиеся за 106 лет: тип управления полетом, число датчиков для стабилизации полета, система обнаружения препятствий, размер системы управления полетом, режимы полета, метод взлета/посадки, интерфейсы для навесного оборудования. Предположили, что дальнейшая интеллектуализация и миниатюризация систем управления полетом и аэросъемочной аппаратуры приведет к повышению производительности работы БПЛА и уменьшению экономических затрат на проведение мониторинга сельскохозяйственных биообъектов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, аэрофотосъемка, аэрофотография, аэрофотоаппарат, фотограмметрия, система управления полетом, полетный контроллер, дистанционное зондирование, история развития.

■ **Для цитирования:** Ценч Ю.С., Курбанов Р.К., Захарова Н.И. Развитие систем управления полетом и средств аэрофотосъемки беспилотных воздушных судов сельскохозяйственного назначения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №2. С. 11-19. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19. EDN: JPLEGX.

Scientific article

Evolution of Flight Control Systems and Aerial Photography in Unmanned Agricultural Aircraft

Yuliya S. Tsench,

Dr.Sc.(Eng.), chief researcher;

Rashid K. Kurbanov,

Ph.D.(Eng.), leading researcher;

Natalia I. Zakharova,

junior researcher,

e-mail: smedia@vim.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The advancement of UAV technologies has enabled the automated capture of photos and videos, eliminating the need for manual intervention in flight control. (*Research purpose*) This research aims to conduct a retrospective analysis of the evolution of flight control systems and the development of aerial photography equipment for agricultural land, covering the period from the mid-19th century to present. (*Materials and methods*) A systematic literature review was conducted using the historical-analytical

method. The paper examines original works by both domestic and international authors, including monographs, scientific journals, conference proceedings, museum exhibitions, photographic archives, and open-source software code. (*Results and discussion*) The paper identifies six distinct phases in the development of aerial photography and flight control systems. The classification is based on key innovations in camera types, control systems, and aircraft designs. Each phase highlights the predominant cameras, control systems, and aircraft utilized for agricultural applications. (*Conclusions*) Over the past 165 years, notable changes have occurred in aerial photography parameters, including the type of photographic material, image spatial and spectral resolution, camera weight and mounting, shutter types and their mechanisms, inertial control units, integrated GPS/GLONASS receivers, and light sensors. In terms of flight control systems for UAVs, significant developments over the last 106 years include variations in flight control types, the number of flight-stabilizing sensors, obstacle detection systems, size of the flight control units, flight modes, and takeoff/landing techniques, along with interfaces for attachments. It is anticipated that future intellectualization and miniaturization of flight control systems will not only boost UAV performance but also reduce the economic costs associated with the aerial monitoring of agricultural biological assets.

Keywords: unmanned aerial vehicle, aerial photography, aerial cameras, photogrammetry, flight control system, flight controller, remote sensing, developmental history.

■ **For citation:** Tsench Yu.S., Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Evolution of flight control systems and aerial photography in unmanned agricultural aircraft. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 11-19 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19. EDN: JPLEGX.

Крупномасштабное картографирование территорий России и европейских стран в XVIII веке базировалось на методе триангуляции [1]. Для создания топографических карт использовали мензурную съемку местности. Стремление человека продвинуться в области картографии привело к поиску новых технологий исследования сложных рельефов.

В 1783 г. официально запатентовано успешное испытание воздушного шара [2]. Позже летательные аппараты легче воздуха стали применяться для наблюдения с высоты птичьего полета. 7 января 1839 г. во Французской академии наук был представлен доклад о новом способе создания изображения, именно этот день считается официальной датой изобретения фотографии [3]. А первые аэрофотографии были получены уже в середине XIX века [4]. Процесс развития технологий расширил сферу применения средств воздухоплавания. В 1903 г. совершен первый в мире управляемый человеком полет на аппарате тяжелее воздуха. Каждый год интерес к аэрофотосъемке только возрастал [5]. Аэрофотосъемка стала неотъемлемой частью дистанционного зондирования и в последнее десятилетие активно используется в сельском хозяйстве [6]. Развитие микроэлектроники способствовало миниатюризации аэрофотосъемочного оборудования и современных систем управления полетом, что позволило создавать беспилотные аппараты для выполнения различных задач, в том числе в сельском хозяйстве [7].

Цель исследования – выполнить ретроспективный анализ совершенствования систем управления полетом и развития аппаратуры для аэрофотосъемки сельскохозяйственных земель с середины XIX века по настоящее время.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Проведен систематический обзор литературы путем применения историко-аналитического метода, чтобы описать развитие систем управления полетом беспилотных летательных аппаратов и аппаратуры для аэрофотосъемки сельскохозяйственных земель. Объекты исследования – оригинальные работы отечественных и зарубежных авторов: монографии, научные журналы, материалы конференций, экспозиции музеев, фотоматериалы и исходный код программного обеспечения в открытом доступе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. История аэрофотосъемки берет начало в 1858 г., когда французский фотограф Гаспар Феликс Турнашон сделал первую в мире аэрофотографию с привязного воздушного шара. В то время для фиксации изображений использовались мокрые коллодионные пластины. Внедрение технологии с применением сухой пластины уже не требовало наличия фотолаборатории в корзине воздушного шара. В следующие несколько лет фотографические технологии продолжали развиваться, разработаны камеры с увеличенным размером пластины (1886 г.) и выдержкой (1908 г.). В это время фотографы использовали различные технические средства для поднятия камеры в воздух: воздушных змеев, птиц, ракеты [8], при этом воздушные шары оставались основным средством (*рис. 1*).

Прогресс в области авиастроения способствовал развитию аэрофотоаппаратов. В 1908 г. впервые записано видео с пилотируемого самолета братьев Райт. В России фотоаппарат был установлен на борт самолета в 1910 г. В аэрофотоаппарате конструкции Сергея Алексеевича Ульянина использовались кассеты из шести стеклянных пластин. Снимок фиксировался на стеклянной пластине разме-



Рис. 1. Пример воздушного шара XIX века. Экспозиция Центрального музея Военно-Воздушных Сил РФ. Фото из архива авторов

Fig. 1. Example of a 19th century balloon displayed at the Central Museum of the Russian Air Force. Photographs from the authors' archive

ром 13×13 см, шесть пластин входили в одну кассету. Камера устанавливалась на биплан «ПТА № 1».

В том же году изобретатель Чарльз Кеттеринг, вдохновленный успехами братьев Райт, предложил создать летательный аппарат, управляемый не человеком, а часовым механизмом. В 1917 г. был разработан экспериментальный образец, названный «Жук Кеттеринга», который считается исторически первым беспилотным летательным аппаратом (БПЛА). Средства аэрофотосъемки на данный БПЛА еще не устанавливались.

Создание первого пленочного полуавтоматического аэрофотоаппарата в 1911 г. позволило создавать топографические карты достаточно высокого качества. Аэрофотоаппарат Владимира Филипповича Потте имел перематываемую пленку и мог записать 50 последовательных снимков размером 13×18 см. Объектив имел фокусное расстояние 210 мм, размер диафрагмы составлял 1:4,5. Аэрофотоаппарат применялся для военных целей [9].

В Первую мировую войну фотография широко использовалась как средство документирования военных действий. Развитие аэрофотосъемки позволило по-новому увидеть и оценить тактику боя, а также продвинуться в области картографии. Были созданы первая специализированная аэрофотокамера (1915 г.) и фотоаппарат с центральным затвором внутри объектива (1916 г.).

С 1921 г. накопленный опыт аэрофотосъемки стали применять для картирования сельскохозяйственных полей. В 1926 г. в Нижегородской губер-

нии были успешно применены самолеты гражданской авиации для обнаружения очагов возгорания лесных массивов [10].

В 1936 г. в США была поставлена задача: создать полную и систематическую аэрофотосъемку сельскохозяйственных угодий страны (рис. 2) [11]. В том же году впервые была осуществлена цветная аэрофотосъемка одновременно в СССР и Канаде.



Рис. 2. Аэрофотография фермы в Луизиане, США. 1936 г.

Fig. 2. Aerial photograph of a farm in Louisiana, USA. 1936. <https://www.alamy.com/aerial-view-of-louisiana-us-department-of-agriculture-experimental-pecan-farm-1936-image594348791.html>

В этот период советскими учеными под руководством Ю.В. Рябушкина были разработаны аэрофотоаппараты «АФА-13», «АФА-33», «АФА-3С», «АФА-И», «НАФА-19», сменившие камеру Потте. Камеры «АФА» отличались по размеру кадра, фокусному расстоянию, типу затвора (шторный и центральный) и применялись для плановой, перспективной и широкоформатной съемки. Семейство камер «АФА-33» было самым востребованным среди всех аэрофотоаппаратов и имело самый массовый выпуск (рис. 3).

К 1931 г. Советский Союз опередил остальную Европу по площади своей территории, сфотографированной с неба. С огромным технологическим прогрессом в области пилотируемой авиации, аэрофотоаппаратуры, картографирования в первой половине XX века аэрофотосъемка быстро стала инструментом реализации широкого круга операций в сельском хозяйстве [12].

В начале XX века БПЛА имели сложную и громоздкую механическую конструкцию, которая ограничивала возможности их применения. Система управления полетом БПЛА была механическая, отвечала за удержание высоты и направления, включение двигателей и выбрасывание парашюта для посадки. В 1939 г. создан первый дистанционно управляемый воздушный аппарат *Radioplane OQ-2*, который в основном использовался в каче-



Рис. 3. Советские аэрофотоаппараты 1930-х годов: а – «АФА-33/75»; б – «НАФА-3с/50». Экспозиция Центрального музея Военно-Воздушных Сил РФ. Фото из архива авторов

Fig. 3. Soviet aerial cameras of the 1930s: a – AFA-33/75; b – NAFA-3c/50. Displayed at the Central Museum of the Russian Air Force. Photographs from the authors' archive

стве мишени для тренировки среди военных и аэрофотоаппаратура не устанавливалась [13].

После Второй мировой войны возобновился выпуск фотоаппаратов для гражданской сферы, применялся опыт и улучшались технологии, разработанные в ходе военных действий. Официально первым снимком Земли, сделанным из космоса, считается изображение, полученное 24 октября 1946 г. ВВС США. Оно было снято на 35-миллиметровую кинокамеру, прикрепленную к ракете «Фау-2». Управление системой пилотирования осуществлялось с помощью пневматического устройства, которое работало на сжатом воздухе. Система управления обеспечивала заданные параметры на протяжении всего полета.

В период восстановления СССР (1949-1955 гг.) после Второй мировой войны активно осваивались и развивались целинные земельные ресурсы. В эти годы авиация выполняла большой объем работ в агропромышленном комплексе, и было введено понятие «ПАНХ» – применение авиации в народном хозяйстве. В сельском хозяйстве выделялись восемь основных направлений использования авиационной техники [10]:

- аэрофотосъемка местности и отдельных участков сельского и лесного хозяйства;
- срочная доставка сельскохозяйственных грузов;
- пассажирская перевозка работников;
- химическое опрыскивание для борьбы с вредителями, болезнями растений и с сорной и нежелательной растительностью;
- разбрасывание удобрений;
- аэросев;
- орошение посевов;
- обнаружение и борьба со степными и лесными пожарами.

Для решения топографических задач были усовершенствованы и созданы новые камеры семейства «АФА»: «АФА-41» и «АФА-42» [14]. Их разработкой занимались специалисты отдела Ю.В. Рябушкина Красногорского завода им. С.А. Зверева.

Активное использование авиационной техники требовало ее дальнейшего развития. В 1950-е годы в качестве беспилотных летательных аппаратов стали использовать вертолеты-мультикоптеры. Беспилотный вертолет *Gyrodyne* выпускался в различных комплектациях, в том числе с телевизионной камерой, работающей в режиме реального времени. Вертолет управлялся дистанционно с двух разных пультов. Операторы контролировали взлет и посадку, а полет проходил по радиолокационным приборам.

Развитие космических технологий во второй половине XX века способствовало интенсивной разработке аппаратуры для аэросъемки и их носителей. Первый искусственный спутник Земли «Спутник-1» был запущен в 1957 г. в Советском Союзе [15]. Цветное фотографирование стало новым средством изучения поверхности Земли и происходящих на ней явлений [16]. Появился термин «дистанционное зондирование» (1960-е годы), так как понятие «аэрофотосъемка» больше не являлось адекватным термином для описания потоков данных, генерируемых новыми технологиями.

В 1960 г. появился первый в мире образец аналитического фотограмметрического прибора. В 1972 г. был запущен первый искусственный спутник Земли для дистанционного зондирования *Landsat-1*. На нем было установлено различное оборудование, в том числе четырехканальный мультиспектральный сканер для получения радиометрических изображений Земли с пространственным разрешением 80 м/пиксель. Данные собирались в диапазоне 500-1100 нм. В сельском хозяйстве начали применять эти данные для создания вегетационных карт [17]. С их помощью решались задачи аграрного производства:

- мониторинг и контроль сельскохозяйственных полей;
- оценка земельных ресурсов;
- оценка загрязнения окружающей среды;
- прогнозирование урожайности.

Наряду со спутниковыми изображениями проводилась аэрофотосъемка с самолетов. На портале *Earth Explorer* собраны данные аэрофотосъемки земель США, начиная с 1985 г. (рис. 4). В Великобритании также использовали аэрофотосъемку для исследования состояния сельскохозяйственных культур [18].

К 1980-м годам достижения в области камер, их цифровизация, миниатюризация и другие технологии увеличили доступность и широкое использо-



Рис. 4. Аэрофотосъемка сельскохозяйственных полей штата Техас, США. 31 марта 1985 г.

Fig. 4. Aerial photography of agricultural fields in Texas, USA, March 31, 1985. Earth Explorer <https://earthexplorer.usgs.gov/scene/metadata/full/5e83d8e4870f4473/ARIVFJGC0010002>

вание аэрофотосъемки. Наиболее значительными достижениями в технологии беспилотных камер стали разработка цифровых камер (1981 г.) с записью изображений в цифровом виде на кассету и позже на *sd*-карту, подвесных систем стабилизации (1988-1988 гг.), матрицы нового поколения – *CMOS* (1990-е годы), а также стандарта сжатия изображений – *jpeg* (1992 г.). К началу 2000-х годов разработанные технологии позволили устанавливать камеры на беспилотные аппараты взлетной массой до 30 кг.

Период 1960-2000 гг. отмечен стремительным ростом «малых» беспилотных летательных аппаратов. Широкое распространение их связано с улучшением технологий микроэлектроники. Зарождение современных беспилотных летательных аппаратов мультикоптерного типа началось с разработки миниатюрного полетного контроллера в 2009 г. Тогда для управления БПЛА применяли гироскоп и акселерометр от игровой консоли с платой *Arduino*. Это привело к развитию проекта *MultiWii* с открытым исходным кодом. С 2009 по 2015 г. происходило развитие полетных контроллеров. В основном они использовались для моделирования, также выпускались готовые беспилотники. Первая готовая версия БПЛА была выпущена в 2010 г.

Следующий этап становления готовых решений БПЛА связан с появлением уникальных разработок компании *DJI*. Именно она в январе 2013 г. выпустила первый серийный коммерческий квадрокоптер *Phantom 1* с установкой камеры *GoPro*. Контроль полетом осуществлялся с помощью пульта дистанционного управления, а система автопилота возвращала и обеспечивала посадку БПЛА в точку взлета. В октябре 2013 г. *DJI* выпустила *Phantom 2*

Vision, который называли «летающей камерой». Квадрокоптер имел интегрированную камеру, управление осуществлялось с помощью пульта через полетный контроллер. В последующие годы были выпущены 14 модификаций данной модели, управляемых с пульта дистанционного управления и смартфона.

В ноябре 2016 г. был представлен БПЛА *DJI Phantom 4pro*, имеющий встроенную камеру с механическим затвором, которая крепилась с помощью трехосевого подвеса. Камера с механическим затвором позволяет уменьшить дисторсию и смазанность изображений по сравнению с электронным затвором при аэрофотосъемке. *DJI Phantom 4pro* стал одним из самых востребованных квадрокоптеров для аэрофотосъемки, в том числе в геодезии и сельском хозяйстве [19]. Он оснащен встроенными датчиками: барометром, акселерометром, магнитометром, гироскопом, датчиком визуального позиционирования, инфракрасным и ультразвуковым датчиками. Данный коптер имеет интеллектуальное управление с использованием навигационной системы *GPS/ГЛОНАСС*, включающее полет челночным методом, систему датчиков для облета препятствий, возврата домой и автоматической посадки. Управление и настройка системы осуществляются через специальное мобильное приложение, которое одновременно обеспечивает потоковую передачу видео с бортовой камеры.

В ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в 2017 г. стал применяться *DJI Phantom 4pro* для мониторинга сельскохозяйственных угодий. На данную модель БПЛА разработан подвес для крепления миниатюрной мультиспектральной камеры *Parrot Sequoia* и получен патент *RU2728846C1*. Камера имеет датчик *IMU*, четыре спектральные камеры и одну *RGB* с электронным затвором, сенсор освещенности с встроенным *GPS/ГЛОНАСС* приемником. С помощью разработанного решения были проведены исследования селекционных посевов (рис. 5) [20].

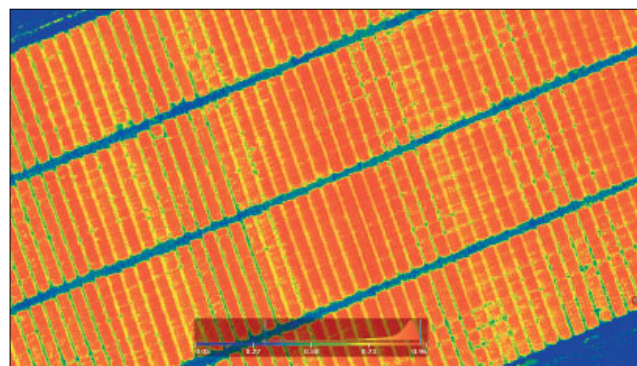


Рис. 5. Вегетационная карта NDVI селекционных посевов сои, Рязанская область, 14 июня 2018 г.

Fig. 5. NDVI vegetation map of soybean breeding crops, Ryazan region, June 14, 2018

В 2019 г. был выпущен промышленный серийный квадрокоптер *DJI Matrice 200 v2*, который стал наиболее востребованным. Он обеспечивал стабильный полет в сложных полевых условиях, поддерживал интеллектуальные режимы полета и дополнительные интерфейсы для навесного оборудования в виде различных камер, лазерных сканеров и бортовых компьютеров (рис. 6).



Рис. 6. БВС *DJI Matrice 200 V2* над полем картофеля, Московская область, 3 августа 2022 г.

Fig. 6. UAV *DJI Matrice 200 V2* over a potato field, Moscow region, August 3, 2022

В наше время развитие камер направлено на уменьшение их габаритов и увеличение пространственного и спектрального разрешения. Установка бортовых компьютеров с обученными нейронными сетями способствует анализу фото- и видеоматериала в режиме реального времени.

Усовершенствование аэрофотоаппаратов и методов их крепления на воздушное судно позволило повысить качество и детализацию аэрофотографий. В 1980-е годы начали развиваться геоинформационные системы, предназначенные для хранения и анализа данных аэрофотосъемки. В настоящее время платформы *EarthExplorer*, *Google Earth Engine* позволяют работать с изображениями, полученными за последние 40 лет. В США многие штаты оцифровали аэрофотоснимки полученные начиная с 1930-х годов (рис. 7).

Проведенный ретроспективный анализ показывает, что процесс развития систем управления полетом и средств аэрофотосъемки сельскохозяйственных земель происходил скачкообразно, что связано с политическими, социальными и экономическими факторами, влиявшими на общий уровень технологического прогресса. В развитии средств аэрофотосъемки выделены шесть этапов, связан-



Рис. 7. Фрагменты аэрофотографий полей штата Нью-Джерси: а – 1930; б – 2020, Географическая информационная сеть Нью-Джерси, США

Fig. 7. Fragments of aerial photographs of New Jersey fields: а – 1930; б – 2020. <https://njgin.nj.gov/njgin/edata/imagery/index.html>

ных с изменением типа камер и летательных аппаратов, на которые они устанавливались. В развитии систем управления полетом выделено также шесть этапов, которые связаны с изменением типа системы управления и конструкцией БПЛА.

На основе таблицы создан график, показывающий ключевые этапы установки камеры на борт БПЛА (рис. 8). В 1940-е годы замечен скачок в развитии систем управления полетом БПЛА, позволивший установить камеру на борт и сделать изо-

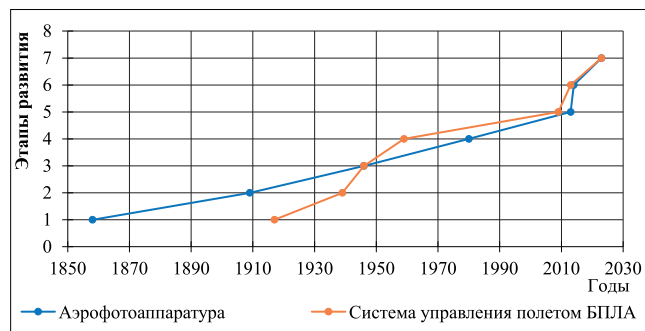


Рис. 8. Развитие систем управления полетом БПЛА и средств аэрофотосъемки

Fig. 8. Advancements in UAV flight control systems and aerial photography equipment

Таблица		Table	
ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОТОМ И СРЕДСТВ АЭРОФОТОСЪЕМКИ EVOLUTIONARY STAGES OF FLIGHT CONTROL SYSTEMS AND AERIAL PHOTOGRAPHY EQUIPMENT			
Развитие средств аэрофотосъемки		Развитие систем управления полетом БПЛА	
1858-1908	Первые экспериментальные разработки аэрофотоаппаратуры	—	
1909-1945	Оборудование для аэрофотосъемки с самолетов	1917	Первые БПЛА
		1939	Радиоуправляемые БПЛА
		1939-1945	Летательные аппараты времен Второй мировой войны
1946-1979	Начало развития дистанционного зондирования Земли	1959	Беспилотный вертолет
1980-2012	Развитие цифровых аэрофотоаппаратов для съемки с борта БПЛА	2009	Полетные контроллеры для моделирования
Январь 2013	Установка миниатюрной камеры на квадрокоптер взлетной массой до 30 кг	2013	Готовые решения с интеллектуальным управлением
Октябрь 2013	Интегрированная камера в квадрокоптер взлетной массой до 30 кг		

бражения на большой высоте. Дальнейшее развитие системы управления полетом и средств аэрофотосъемки позволяло безопасно совершать полеты и управлять камерой, но эти процессы выполнялись изолированно.

В начале 2013 г. миниатюрные камеры устанавливались на БПЛА, но все еще не было возможности управлять камерой с пульта управления беспилотника. С конца 2013 г. интеграция камеры в систему управления полетом позволила акцентировать внимание внешнего пилота на фото- и видеосъемку и не отвлекаться на управление БПЛА.

По мере развития полетных контроллеров их производительность и возможности стремительно растут. В ближайший период (2025-2030 гг.) это позволит внедрить в систему управления полетом искусственный интеллект. Беспилотники с использованием технологий искусственного интеллекта смогут обучаться и адаптироваться на основе ситуации, в которой оказались. Интеллектуальные платформенные решения будут выполнять заданные миссии самостоятельно.

Тенденции развития камер свидетельствуют о дальнейшем увеличении пространственного разрешения и их гибридизации. Разработка подобных платформ будет способствовать увеличению производительности БПЛА, снижению стоимости съемки гектара сельскохозяйственных полей и стремительному распространению технологии цифрового дистанционного зондирования в аграрной сфере.

Выводы

За 165 лет (1858-2023 гг.) развития средства аэрофотосъемки претерпели многочисленные изменения:

- фотоматериал, на который фиксировалось изображение, прошел шесть этапов развития (мокрые и сухие коллоидонные пластины, стеклянные пластины, пленка, кассета, *sd*-карта);

- повысилось пространственное разрешение изображений (от сотен метров до нескольких сантиметров на пиксель);

- увеличилось спектральное разрешение камер (черно-белые, цветные *RGB*, инфракрасные, спектральные изображения);

- уменьшился вес камер (от нескольких килограммов до граммов);

- усовершенствовались крепление камер (в руках фотографа, жесткое крепление к борту самолета, системы стабилизации камер — одно-, двух-, трехосевые подвесы);

- изменился тип затворов и их приводы (шторный, центральный и механический, электронный);

- появился *IMU* (инерциальный блок управления);

- появился встроенный *GPS*/ГЛОНАСС приемник;

- появился сенсор освещенности у мультиспектральных камер.

Системы управления полетом беспилотного летательного аппарата появились 106 лет назад в 1917 г., при этом основное развитие получили в последние десять лет (2013-2023 гг.):

- улучшился тип управления полетом (механическое, с пульта дистанционного управления, со смартфона);

- увеличилось число датчиков, с помощью которых стабилизируется полет (барометр, гироскоп, акселерометр, магнитометр, лазерный дальномер, инфракрасный, ультразвуковой и видео-поточный датчики);

- появилась система обнаружения препятствий;

- уменьшился размер системы управления полетом (от нескольких метров до сантиметров);

- улучшились режимы полета (ручной режим, полет с видом от первого лица, автоматический и интеллектуальный режимы полета);

- усовершенствовался метод взлета/посадки (с рельсовой площадки, с парашюта, в ручном, автоматическом и интеллектуальном режимах);

• появление интерфейсов для навесного оборудования (камеры, лазерные сканеры и бортовые компьютеры).

Дальнейшее развитие систем управления полетом и аэросъемочной аппаратуры будет способство-

вать повышению производительности и эффективности работы БПЛА, уменьшению экономических затрат на проведение аэрофотосъемки сельскохозяйственных биообъектов и распространению технологии в аграрной сфере.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Степанченко А.Л. Виды картографических произведений, созданных по результатам межевания земель России в середине XIX века // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2018. Т. 62. N2. С. 152-156. DOI: 10.30533/0536-101X-2018-62-2-152-156.
2. Kim M.G. Balloon mania: news in the air. *Endeavour*. 2004. 28(4). 149-155. DOI: 10.1016/j.endeavour.2004.04.010.
3. Сергиенко Д. Дагеротип – «зеркало с памятью» // *Троицкий вариант – Наука*. 2020. N14(308). С. 12-13.
4. Краснопевцев Б.В. Основные события истории фотограмметрии и воздушной съемки до 1918 года // *Геодезия и картография*. 1998. N8. С. 55-59.
5. Collier P. Photogrammetry and aerial photography. *International Encyclopedia of Human Geography* (second edition). 2020. 91-98. DOI: 10.1016/B978-0-08-102295-5.10583-9.
6. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. N15(4). С. 6-10. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
7. Ценч Ю.С., Курбанов Р.К. История развития систем управления беспилотных воздушных судов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N3. С. 4-15. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15.
8. Skoog A.I. The Alfred Nobel rocket camera. An early aerial photography attempt. *Acta Astronautica*. 2010. 66(3-4). 624-635. DOI: 10.1016/j.actaastro.2009.06.011.
9. Кусов В.С. История аэрофотосъемки в фотографиях: славянский вклад // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 1992. N6. С. 54-61.
10. Галушина П.С., Кравчук А.А. Применение авиации в сельском хозяйстве Российской Федерации // *Аграрное образование и наука*. 2023. N2. С. 8. EDN: VZXBAU.
11. Monmonier M. Aerial photography at the Agricultural Adjustment Administration: acreage controls, conservation benefits, and overhead surveillance in the 1930s. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2002. Vol. 68. N12. 1257-1261.
12. Bondarev V., Ruday O., Baryshnikova O. Aviation in the agricultural sector: experiments with aviation in the USSR in the 1930-s. *E3S*. 2021. 273. 07016. DOI: 10.1051/e3s-conf/202127307016.
13. Куатов Б.Ж., Макаев Т.З. История развития беспилотных летательных аппаратов // *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2017. Т. 1. С. 137-139.
14. Научно-технический центр. История продолжается. К 70-летию НТЦ-ЦКБ. Под общей редакцией А.Ю. Чистилина. М.: КЕМ, 2018. 208 с.
15. Бычкова И.А. История развития аэрометодов в России в 1880-1950-х годах // *Метеорологический вестник*. 2010. Т. 3. N1. С. 54-68. EDN: LLOZJJ.
16. Гольдман Л.М. Применение цветной аэросъемки для изучения местности (дешифрирование цветных аэроснимков) // *Труды Центрального научно-исследовательского института геодезии, аэросъемки и картографии*. М.: Геодезиздат, 1960. С. 57-63.
17. Mulla D.J. Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering, Special Issue: Sensing Technologies for Sustainable Agriculture*. 2014. Vol. 114. N4. 358-371. DOI: 10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2012.08.009.
18. Curran P.J. Aerial photography for the assessment of crop condition: a review. *Applied Geography*. 1985. 5 (4). 347-360. DOI: 10.1016/0143-6228(85)90012-8.
19. Guo Z., Wang T., Liu S., et al. Biomass and vegetation coverage survey in the Mu Us sandy land - based on unmanned aerial vehicle RGB images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021. 94. 102239. DOI: 10.1016/j.jag.2020.102239.
20. Kurbanov R., Litvinov M. Development of a gimbal for the Parrot Sequoia multispectral camera for the UAV DJI Phantom 4 Pro. *IOP: Materials Science and Engineering*. 2020. 012062. DOI: 10.1088/1757-899X/1001/1/012062.

REFERENCES

1. Stepanchenko A.L. Types of cartographic products created using the data of land-surveying of Russia in the middle of the XIX century. *Proceedings of Higher Educational Establishments. Geodesy and Aerial Photography*. 2018. Vol. 62. N2. 152-156 (In Russian). DOI: 10.30533/0536-101X-2018-62-2-152-156.
2. Kim M.G. Balloon mania: news in the air. *Endeavour*. 2004. 28(4). 149-155 (In English). DOI: 10.1016/j.endeavour.2004.04.010.
3. Sergienko D. Daguerreotype – «the mirror with a memory». *Troitsk Variant – Science*. 2020. N14(308). 2-13 (In Russian).
4. Krasnopevtsev B. V. Milestones in the history of photogrammetry and aerial photography prior to 1918. *Geodesy*

- and Cartography. 1998. N8. 55-59 (In Russian).
5. Collier P. Photogrammetry and aerial photography. *International Encyclopedia of Human Geography* (2nd ed.). 2020. 91-98 (In English). DOI: 10.1016/B978-0-08-102295-5.10583-9.
 6. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. Vol. 15. N4. 6-10. (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
 7. Tsench Yu.S., Kurbanov R.K. History of unmanned aircraft flight controller development. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N3. 4-15 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15.
 8. Skoog A.I. The Alfred Nobel rocket camera. An early aerial photography attempt. *Acta Astronautica*. 2010. 66(3-4). 624-635 (In English). DOI: 10.1016/j.actaastro.2009.06.011.
 9. Kusov V. S. History of aerial photography in photographs: Slavic contribution. *Proceedings of higher educational establishments. Geodesy and Aerial Photography*. 1992. N6. 54-61 (In Russian).
 10. Galushina P., Kravchuk A. The use of aviation in agriculture of the Russian Federation. *Agrarian Education and Science*. 2023. N2. 8 (In Russian). EDN: VZXBAU.
 11. Monmonier M. Aerial photography at the Agricultural Adjustment Administration: acreage controls, conservation benefits, and overhead surveillance in the 1930s. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2002. Vol. 68. N12. 1257-1261 (In English).
 12. Bondarev V., Ruday O., Baryshnikova O. Aviation in the agricultural sector: experiments with aviation in the USSR in the 1930-ies. *E3S*. 2021. 273. 07016 (In English). DOI: 10.1051/e3sconf/202127307016.
 13. Kumatov B. Zh., Makaev T.Z. A History of Unmanned Aerial Vehicle Development. *Proceedings of the International Symposium «Reliability and Quality»*. 2017. Vol. 1. 137-139. EDN: ZDGQTP.
 14. Scientific and Technical Center. The Story Goes On. To the 70th anniversary of the STC-CDB. Ed. by A.Yu. Chistilina. Troitsk Variant – Science. Moscow: KEM. 2019. 208.
 15. Bychkova I.A. Evolution of Aerial Methods in Russia from the 1880s to the 1950s. *Meteorological Bulletin*. 2010. Vol. 3. N1. 54-68 (In Russian). EDN: LLOZJJ.
 16. Goldman L.M. Application of color aerial photography for terrain analysis (Interpretation of color aerial photographs). *Proceedings of the Central Scientific Research Institute of Geodesy, Aerial Photography and Cartography*. Moscow: Geodesizdat. 1960. 57-63 (In Russian).
 17. Mulla D.J. Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering, Special Issue: Sensing Technologies for Sustainable Agriculture*. 2014. Vol. 114. N4. 358-371 (In English). DOI: 10.1016/J.BIOSYSTEMS.2012.08.009.
 18. Curran P.J. Aerial photography for the assessment of crop condition: a review. *Applied Geography*. 1985. 5(4). 347-360 (In English). DOI: 10.1016/0143-6228(85)90012-8.
 19. Guo Z., Wang T., Liu S. et al. Biomass and vegetation coverage survey in the Mu Us sandy land - based on unmanned aerial vehicle RGB images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021. 94. 102239 (In English). DOI: 10.1016/j.jag.2020.102239.
 20. Kurbanov R., Litvinov M. Development of a gimbal for the Parrot Sequoia multispectral camera for the UAV DJI Phantom 4 Pro. *IOP: Materials Science and Engineering*. 2020. 012062. DOI: 10.1088/1757-899X/1001/1/012062.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Ценч Ю.С. – научное руководство, формирование задач исследования;
 Курбанов Р.К. – обработка данных;
 Захарова Н.И. – сбор и анализ материалов по теме исследования, подготовка статьи.
 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Tsench Yu.S. – scientific guidance, defining research tasks;
 Kurbanov R.K. – data processing;
 Zakharova N.I. – collection and analysis of materials on the research topic; manuscript preparation.
 The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
 Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
 The paper was accepted for publication on

04.03.2024
 03.05.2024



Влияние электрофизического воздействия на сроки хранения картофеля и овощных культур

Алексей Семенович Дорохов,
доктор технических наук, профессор,
академик РАН, главный научный сотрудник,
e-mail: dorokhov.vim@yandex.ru;
Алексей Викторович Сибирев,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: sibirev2011@yandex.ru;

Андрей Григорьевич Пономарев,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: agrodisel@mail.ru;
Сергей Николаевич Петухов,
кандидат сельскохозяйственных наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: petuxov61@bk.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Посевной и посадочный материал с целью исключения прогрессирования различных инфекционных заболеваний необходимо подвергнуть обработке ультрафиолетовым излучением с интенсивностью 10-15 килоджоулей. Для этого необходимо изучить влияние ультрафиолетового излучения на продукцию при ее движении в потоке по ленточному транспортеру. (*Цель исследования*) Обоснование возможности применения ультрафиолетового излучения для улучшения показателей хранения овощных культур и картофеля, а также технологических параметров в лабораторно-производственных условиях, обеспечивающих снижение их перезаражения. (*Материалы и методы*) Для определения оптимальных технологических параметров машины для закладки овощных культур и картофеля на хранение в системе послеуборочной доработки создана экспериментальная установка и исследовано электрофизическое воздействие на показатели качества хранения. Для исследования выбраны наиболее распространенные для возделывания в различных почвенно-климатических условиях Российской Федерации сорта картофеля Леди Розетта, моркови столовой Витаминная 6 и свеклы столовой Бордо 237. (*Результаты и обсуждение*) Разработана методика оценки качества семенного материала после периода хранения с обоснованием временного интервала, температурных параметров воздушной смеси и оптических режимов ультрафиолетового излучения. Определены оптимальные параметры обработки клубней картофеля, корнеплодов моркови и свеклы. Изучено влияние на корнеплоды моркови и свеклы ультрафиолетового воздействия с установленными параметрами на степень развития заболеваний, вызываемых исследуемыми фитопатогенными микроорганизмами при температуре 2 и 25 градусов Цельсия. (*Выводы*) При поступательной скорости движения корнеплодов 0,7 метра в секунду, межосевом расстоянии между источниками ультрафиолетового излучения 0,1 метра, расстоянии от них до роликовой поверхности ленточного транспортера 0,05 метра и при постоянной дозе ультрафиолетового воздействия показатели распространения и развития инфекционного заболевания исследованных овощных культур имеют положительную динамику снижения. **Ключевые слова:** овощные культуры, картофель, исследования, испытания, ультрафиолетовое воздействие, лабораторная установка, хранение.

■ **Для цитирования:** Дорохов А.С., Сибирев А.В., Пономарев А.Г., Петухов С.Н. Влияние электрофизического воздействия на сроки хранения картофеля и овощных культур // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №2. С. 20-26. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-20-26. EDN: HAONIA.

Scientific article

Effect of Electrophysical Treatment on the Storage Life of Potatoes and other Vegetable Crops

Aleksey S. Dorokhov,
Dr.Sc.(Eng.), professor, member of the Russian Academy
of Sciences, chief researcher,
e-mail: dorokhov.vim@yandex.ru;
Aleksey V. Sibirev,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: sibirev2011@yandex.ru;

Andrey G. Ponomarev,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: agrodisel@mail.ru;
Sergey N. Petukhov,
Ph.D.(Agri.), leading researcher,
e-mail: petuxov61@bk.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. To prevent the progression of various infectious diseases, seed and planting material must undergo treatment with ultraviolet (UV) radiation at an intensity of 10-15 kilojoules. This necessitates studying the impact of UV radiation on products as they move in a flow along a conveyor belt. (*Research purpose*) The study aims to evaluate the feasibility of using ultraviolet radiation to improve the storage indicators of potato and other vegetable crops. It also assesses the technological parameters in both laboratory and production settings to ensure a reduction in contamination. (*Materials and methods*) To determine the optimal technological parameters of a machine for processing vegetable crops and potatoes before storage in the post-harvest processing system, an experimental installation was created and the electrophysical effects on storage quality indicators were examined. For the study, the most common vegetable crop varieties were selected, in particular, Lady Rosetta potato, Vitaminnaya-6 table carrot and Bordeaux 237 table beet. These crops are cultivated under various soil and climatic conditions across the Russian Federation. (*Results and discussion*) A methodology has been developed to assess the quality of seed material after the storage period, including the justification for the time interval, air mixture temperature parameters and ultraviolet radiation optical modes. The optimal parameters for processing potato tubers, carrots, and beets have been determined. The study examined the impact of ultraviolet exposure with established parameters on the disease development in carrot and beet crops, caused by the studied phytopathogenic microorganisms at temperatures of 2 and 25 degrees Celsius. (*Conclusions*) The indicators of the spread and development of infectious diseases in the studied vegetable crops show a decline trend when the translational speed of root crop movement is 0.7 meters per second, the interaxial distance between ultraviolet radiation sources is 0.1 meters, the distance from the sources to the roller surface of the conveyor belt is 0.05 meters, and a constant dose of ultraviolet exposure is applied.

Keywords: vegetable crops, potatoes, research, testing, ultraviolet exposure, laboratory installation, storage.

■ **For citation:** Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Ponomarev A.G., Petukhov S.N. Effect of electrophysical treatments on the storage life of potatoes and other vegetable crops. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 20-26 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-20-26. EDN: HAONIA.

Корнеплоды с целью предотвращения поражения болезнями перед закладкой на хранение необходимо сортировать. Для защиты от увядания, подмораживания, механических повреждений, контактной и воздушной инфекции используются методы переслойки, глинования корнеплодов, применяют полимерную пленку, бумажные мешки, покрывают мелом или обрабатывают антисептиками. Непременными условиями являются строгое соблюдение температурно-влажностного режима и проведение санитарных мероприятий в хранилищах [1].

Длительность хранения корнеплодов зависит от их сорта, системы защиты от вредителей и болезней, сроков и способов уборки [2], товарной обработки и подготовки к закладке [3]. Высокое содержание влаги – определяющий фактор эффективной организации хранения [4]. Основные причины потерь при хранении овощей связаны с процессами дыхания, испарения влаги и микробиологической порчи [5].

Механизмы и эффекты обработки электромагнитными полями биологических объектов, в том числе поверхностной микрофлоры корнеплодов, изучены не в полной мере [6, 7]. В связи с этим актуально исследование электрофизического воздействия на фитопатогенные микроорганизмы, вызывающие порчу закладываемого на хранение материала (Дорохов А.С., Сазонов Н.В., Сибирев А.В. и др. Теоретические и экспериментальные исследования линии для послеуборочной обработки клуб-

ней картофеля с применением оптической системы сортирования. М.: Цифровичок, 2023. 143 с.). Современные достижения в области хранения овощей и фруктов важны с позиции не только снабжения населения свежей плодоовощной продукцией, как необходимого компонента здорового образа жизни, но и результата коммерческой деятельности (Измайлов А.Ю., Гришин А.А., Гришин А.П., Лобачевский Я.П. Экспертные системы интеллектуальной автоматизации технических средств сельскохозяйственного назначения. Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий. Москва, 2014. С. 379-382). Оптимальные условия позволяют повысить хранимостепособность плодов, овощей и клубней, и наоборот, нарушение режима хранения может привести к полной потере продукции [8].

Цель исследования – обоснование возможности применения ультрафиолетового излучения, а также определение технологических параметров в лабораторно-производственных условиях, обеспечивающих повышение качества хранения и снижение перезаражения семян овощных культур и картофеля.

Материалы и методы. Для обеспечения возможности применения ультрафиолетового излучения необходимо установить средства электрофизического воздействия в поточную линию послеуборочной обработки продукции при последующем хранении (Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Инновационная система машинно-технологического обеспечения предприятий агропро-

мышленного комплекса. Ч.1. Инновационная система машинно-технологического обеспечения сельскохозяйственных предприятий на длительную перспективу. М.: ВИМ, 2019. 228 с.). С целью равномерного УФ-воздействия на поверхность биологических объектов в конструкции системы рассмотрены варианты расположения осветительных источников:

- с точечным источником УФ-воздействия; данное расположение не подходит для решения задачи идентификации болезней из-за неровностей поверхности плода/клубня (рис. 1а);
- с рассеянным светом и множеством источников УФ-воздействия (рис. 1б).

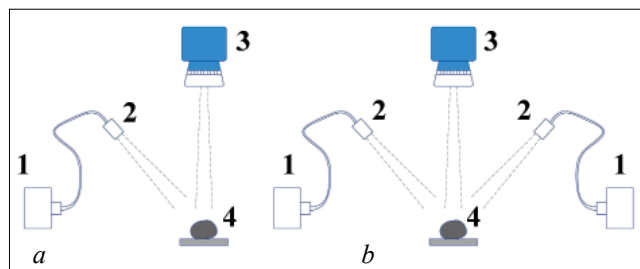


Рис. 1. Схема установок по детектированию изображения с точечным светом (а) и с диффузным освещением (б): 1 – источник рассеянного света; 2 – адаптер рассеянного света; 3 – источник УФ-воздействия; 4 – биологический образец

Fig. 1. Installation diagrams for image detection with point light (a) and diffuse illumination (b): 1 – source of diffused light; 2 – diffused light adapter; 3 – source of ultraviolet (UV) exposure; 4 – biological sample

Клубни картофеля/плоды яблок устойчиво будут перемещаться по рабочей поверхности транспортера при условии [9], что показатель кинематического режима

$$\lambda = \omega_2 / \omega_1, \quad (1)$$

где ω_1, ω_2 – угловая скорость последовательно установленных роликов, с^{-1} .

Для устойчивой работы оптической системы идентификации с ориентирующим модулем необходимо [10], чтобы минимально допустимый показатель кинематического режима был больше коэффициента трения:

$$\lambda = \omega_2 / g \geq f, \quad (2)$$

где f – коэффициент трения клубня/плода о поверхность ролика.

Минимально допустимая угловая скорость роликовой поверхности:

$$\omega_{\min} = f \cdot g / R. \quad (3)$$

Частота вращения корнеплодов вокруг своей оси

$$\omega_K = 2v_{\text{об}} \cdot t / D_p^2 = \lambda / T, \quad (4)$$

где t – шаг витка ролика, м; $v_{\text{об}}$ – поступательная скорость движения клубня/плода, м/с; D_p – диаметр ролика, м.

Согласно выражению (4)

$$v_{\text{об}} = \omega_K \cdot D_p^2 / 2t. \quad (5)$$

Для определения оптимальных технологических параметров машины для закладки овощных культур и картофеля на хранение разработана экспериментальная установка с ориентирующим модулем [11]. Исследовано влияние электрофизического воздействия на хранение овощных культур и картофеля.

Рабочая поверхность установки выполнена в виде роликов 1 с высотой подъема навивки (рис. 2). Над роликами на опорных стойках 2 с помощью болтового соединения 3 установлен защитный экран 4 с источниками УФ-воздействия газоразрядными лампами 6, закрепленными на подвесе 5. Защитный экран перемещается в вертикальной плоскости.

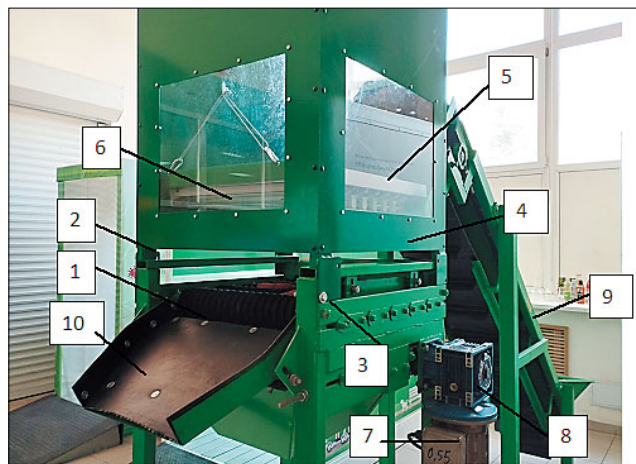


Рис. 2. Лабораторная установка с ориентирующим модулем

Fig. 2. Laboratory installation with an orientation module

Питание основных программно-аппаратных средств лабораторной установки обеспечивается от сети переменного тока. Привод вращательного движения осуществляется мотор-редуктором 8, окружная скорость регулируется частотным преобразователем 7. Режим освещения на временной промежуток, а также порядок работы задаются с помощью программируемого микроконтроллера (на рисунке не указан).

Товарная продукция поступает по транспортеру 9, проходит по рабочей поверхности 1 ориентирующего модуля через зону УФ-воздействия 6 и выгружается через лоток 10.

Влияние УФ-воздействия исследовали при закладке на хранение клубней картофеля и овощных культур урожая 2023 г. при их послеуборочной обработке и последующим теплым вентиляционным хранением на складе согласно требованиям.

Конструкция ориентирующего модуля позволяет формировать поток обрабатываемой продукции в один слой со сходом в затариваемое устройство и перемещением на хранение [12]. Ширина рабочей зоны ориентирующего модуля 1015 мм, количество спиральных валцов – 7, мощность электродвигателя 0,75 кВт, напряжение питания 380 В, высота минимальная 1580 мм, максимальная 1830 мм, зазоры между валцами 25-45 мм. Источниками УФ-лучей в конструкции лабораторной установки служат бактерицидные лампы.

Исследования влияния УФ-излучения на показатели качества семенного и посадочного материала в период закладки на насыпное хранение выполнялись согласно методике оценки качества (рис. 3) по завершении периода хранения с обоснованием временного интервала, температурных параметров воздушной смеси и оптических режимов ультрафиолетового излучения [13]. Эксперименты выполнялись в четырехкратной повторности (допустимое отклонение между параллельными определениями не более 5%). Математическую обработку данных проводили методом описательной статистики и дисперсионного анализа, используя пакеты программ *Microsoft Excel* и *Statistica* [14].



Рис. 3. Структурная схема исследований влияния электрофизического воздействия на сроки хранения картофеля и овощных культур

Fig. 3. Structural diagram of studies investigating the effects of electrophysical treatments on the shelf life of potatoes and other vegetable crops

С целью предотвращения прогрессирования различных инфекционных заболеваний посевной и посадочный материал необходимо подвергнуть обработке УФ-излучением интенсивностью 10-15 кДж/м в потоке движения по ленточному транспортеру перед закладкой на хранение [15].

Результаты и обсуждение. Работа по изучению влияния электрофизического воздействия на био-

логические объекты (патогенную фитофлору) и повышению качества хранения плодоовощной продукции выполнена в лабораторных условиях ФНАЦ ВИМ в 2023 г. в соответствии с программой исследований.

Объектами эксперимента выбраны наиболее распространенные для возделывания в разных почвенно-климатических условиях Российской Федерации клубни картофеля сорта Леди Розетта, морковь столовая сорта Витаминная 6, свекла столовая Бордо 237. Изучали зависимость степени инактивации фитопатогенных микроорганизмов от величины УФ-воздействия (сила фототока УФ-излучения), длительности обработки ($t_{об}$), а также при варьировании расстояния между источниками излучения.

По результатам исследований определяли оптимальные параметры процесса обработки [12]. Изучено влияние обработки корнеплодов моркови и свеклы УФ-воздействием с установленными параметрами на степень развития заболеваний, вызываемых исследуемыми фитопатогенными микроорганизмами при разных температурах [16, 17].

В таблице представлены результаты исследования биологической эффективности УФ-облучения картофеля, столовой моркови и столовой свеклы после заражения фитопатогенными микроорганизмами и последующей обработки. Корнеплоды хранились при температуре 2 ± 1 и $25 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 14 суток [18-20].

Биологическая эффективность контрольных образцов (без комплексной УФ-обработки) при температуре хранения 2°C составила: по показателю распространенности болезни – 84 % для столовой моркови, 84,8% для столовой свеклы и 88% для клубней картофеля, по развитию болезни – 38% для столовой моркови, 32% для столовой свеклы и клубней картофеля. При температуре 25°C показатели ухудшаются: по распространенности болезни – 100% для столовой моркови, 94,7% для столовой свеклы и 84,4% для клубней картофеля, по развитию болезни – соответственно 84,4, 77,8 и 72,3%.

При поступательной скорости движения $v_d = 0,7$ м/с, межсоединении между источниками ультрафиолетового излучения $S_\phi = 0,1$ м и расстоянии от источника излучения до роликовой поверхности $S_1 = 0,05$ м постоянная доза УФ-С воздействия на картофель составляла 10 кДж/м², морковь столовую – 15 кДж/м², свеклу столовую 15 кДж/м².

Исследования выявили положительный эффект метода УФ-воздействия на биологические свойства посевного материала клубней картофеля и корнеплодов при обоснованных технологических параметрах. Опыты в лабораторно-производственных условиях подтвердили повышение качества и снижение перезаражения семян овощных культур и картофеля.

Таблица			Table		
БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАБОТКИ УФ-ИЗЛУЧЕНИЕМ КОРНЕПЛОДОВ И КЛУБНЕЙ ПЕРЕД ХРАНЕНИЕМ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 2±1 и 25±1°C					
Вид обработки		Распространенность болезни <i>P</i> , %	Развитие болезни <i>R</i> , %	Биологическая эффективность	
				<i>P</i> , %	<i>R</i> , %
Температура 2±1°C					
Морковь столовая Витаминная 6					
Контроль	84	38	–	–	
УФ-излучение	33	8,4	63	73,8	
Свекла столовая Бордо 237					
Контроль	88	32	–	–	
УФ-излучение	24	7,6	73,9	72,9	
Картофель Леди Розетта					
Контроль	88	32	–	–	
УФ-излучение	27	8,2	72,4	74,4	
Температура 25±1°C					
Морковь столовая Витаминная 6					
Контроль	100	84,4	–	–	
УФ-излучение	58,3	17,6	43,2	74,7	
Свекла столовая Бордо 237					
Контроль	94,7	77,8	–	–	
УФ-излучение	58,7	16,8	43,7	82,3	
Картофель Леди Розетта					
Контроль	84,4	72,3	–	–	
УФ-излучение	56,4	17,2	42,4	79,4	

Выводы. Для исследований влияния электрофизического воздействия на сроки хранения картофеля и овощных культур разработано устройство [20], которое обеспечивает возможность применения ультрафиолетового излучения в поточной линии послеуборочной обработки продукции при последующем хранении.

Определены конструктивные особенности и мощность источников ультрафиолетового излучения. Минимальная величина составляет 0,2 м и максимальное значение 0,4 м с шагом варьирования 0,1 м.

Установлено, что биологическая эффективность без комплексной обработки УФ-воздействия при температуре хранения 2°C составила: по распространенности болезни 84% для столовой моркови, 84,8% для столовой свеклы и 88% для клубней картофеля, по развитию болезни – для моркови 38%,

для свеклы и клубней картофеля 32%. При температуре 25°C исследуемые показатели ухудшаются: распространенность болезни – соответственно 100, 94,7 и 84,4%, развитие болезни – 84,4, 77,8 и 72,3%.

Использование УФ-воздействия при поступательной скорости движения исследуемых объектов 0,7 м/с, межсезонном расстоянии друг от друга источников ультрафиолетового излучения 0,1 м, расстоянии от источника излучения до роликовой поверхности транспортера 0,05 м и постоянной дозе УФ-С воздействия на картофель составляла 10 кДж/м², морковь столовую – 15 кДж/м², свеклу столовую 15 кДж/м². Отмечена положительная динамика снижения показателей биологической эффективности обработки по распространенности и развитию инфекционного заболевания исследованных корнеклубнеплодов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С., Сибирев А.В. Современное состояние технологического обеспечения производства овощных культур в Российской Федерации // *Овощи России*. 2023. N5. С. 5-10. DOI: 10.18619/2072-9146-2023-5-5-17.
2. Дорохов А.С., Аксенов А.Г., Сибирев А.В. и др. Теоретические предпосылки интенсификации уборки лука-севка // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. N3. С. 85-92. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-85-92.
3. Yanykin D.V., Pashkin M.O., Simakin A.V. et al. Plant photochemistry under glass coated with upconversion luminescent film. *Applied Sciences*. 2022. N12. 7480. DOI: 10.3390/app12157480.

4. Golmohammadi A., Bejaei F., Behfar H. Design, development and evaluation of an online potato sorting system using machine vision. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. 2013. N6. 396-402. DOI: cabdirect.org/cabdirect/abstract/20133372449.
5. Lü J.Q., Shang Q.Q., Yang Y. et al. Design optimization and experiment on potato haulm cutter. *Transactions of the CSAM*. 2016. N47(5). 106-114. DOI: 10.1080/0305215X.2016.1164855.
6. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N4. С. 4-12. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12.
7. Попов В.Д., Валге А.М., Папушин Э.А. Повышение эффективности производства продукции растениеводства с использованием информационных технологий // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2009. Т. 81. С. 32-39. EDN: THYQKD.
8. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. и др. Современные технологии и техника для сельского хозяйства – тенденции выставки Agritechnika 2019 // *Тракторы и сельхозмашины*. 2020. N6. С. 28-40. DOI: 10.31992/0321-4443-2020-6-28-40.
9. Ценч Ю.С., Годлевская Е.В. Математическое моделирование как инструмент проектирования сельскохозяйственных машин и агрегатов (применительно к истории развития научной школы Южного Урала) // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N2. С. 4-12. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-4-12.
10. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Медведев Г.В. Разработка экспериментального фитотрона и его применение в исследованиях по энергоэкологии светокультуры // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N2. С. 40-48. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-40-48.
11. Avila R., Schoenau J., King T., Grevers M. Effects of subsoiling tillage on structure, permeability, and crop yields on compacted Solonchic and Chernozemic dry land soils in Western Canada. *Canadian Biosystems Engineering*. 2020. N62. 1.1-1.9. DOI: 10.7451/CBE.2020.62.1.1.
12. Lobachevsky Ya., Dorokhov A., Aksenov A. et al. RAMAN and fluorimetric scattering lidar facilitated to detect damaged potatoes by determination of spectra. *Applied Sciences*. 2022. N12. 5391. DOI: 10.3390/app12115391.
13. Erokhin M.N., Dorokhov A.S., Sibirev A.V. et al. Development and modeling of an onion harvester with an automated separation system. *AgriEngineering*. 2022. 4(2). 380-399. DOI: 10.3390/agriengineering4020026.
14. Аксенов А.Г., Сибирев А.В. Состояние технического обеспечения производства овощных культур в Российской Федерации // *Картофель и овощи*. 2021. N8. С. 3-8. DOI: 10.25630/PAV.2021.85.47.001.
15. Aksenov A.G., Sibirev A.V. Technical support of vegetable growing in countries of the Eurasian Economic Union. *AMA*. 2020. N3 (51). 12-19. EDN: XAWSBO.
16. Пастухов А.Г., Добрицкий А.А., Бахарев Д.Н., Вольвак С.Ф. Исследование физико-механических свойств семян тыквы как объекта сушки // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N1. С. 52-59. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-52-59.
17. Зимин И.Б., Игнатенков В.Г., Яковлев М.А., Смирнов А.В. Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик гранулированных сыпучих материалов // *Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020. N2(31). С. 29-33. EDN: LZPPM.
18. Сазонов Н.В., Мосяков М.А., Тетерин В.С. и др. Показатели качества работы автоматизированной машины для ухода за растениями картофеля в селекции и семеноводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N1. С. 60-67. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-60-67.
19. Лобачевский Я.П., Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Шогенов Ю.Х. Научно-технические достижения агроинженерных научных организаций в условиях цифровой трансформации сельского хозяйства // *Техника и оборудование для села*. 2023. N4(310). С. 2-5. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-4-2-5.
20. Казаков С.С., Живаев О.В., Никулин А.В. Конструкционные пути снижения повреждаемости клубней посадочного картофеля при работе цепочно-ложечного высаживающего аппарата // *Тракторы и сельхозмашины*. 2019. N 3. С. 29-34. DOI: 10.31992/0321-4443-2019-3-29-34.

REFERENCES

1. Lobachevsky Ya.P., Dorokhov A.S., Sibirev A.V. The current state of technological support for vegetable crops production in Russian Federation. *Vegetable crops of Russia*. 2023. N5. 5-10 (In Russian). DOI: 10.18619/2072-9146-2023-5-5-17.
2. Dorokhov A.S., Aksenov A.G., Sibirev A.V. et al. Theoretical foundations for intensifying onion set harvesting. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N3. 85-92. (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-85-92.
3. Yanykin D.V., Pashkin M.O., Simakin A.V. et al. Plant photochemistry under glass coated with upconversion luminescent film. *Applied Sciences*. 2022. N12. 7480 (In Russian). DOI: 10.3390/app12157480.
4. Golmohammadi A., Bejaei F., Behfar H. Design, development and evaluation of an online potato sorting system using machine vision. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. 2013. N6. 396-402 (In English). DOI: cabdirect.org/cabdirect/abstract/20133372449.
5. Lü J.Q., Shang Q.Q., Yang Y. et al. Design optimization and experiment on potato haulm cutter. *Transactions of the CSAM*. 2016. N47(5). 106-114 (In English). DOI:

- 10.1080/0305215X.2016.1164855.
6. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S. Principles of forming machine and technology systems for integrated mechanization and automation of technological processes in crop production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N4. 4-12. (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12.
7. Popov V.D., Valge A.M., Papushin E.A. Enhancing crop production efficiency using information technology. *Agro-EcoEngineering*. 2009. Vol. 81. 32-39 (In Russian). EDN: THYQKD.
8. Izmaylov A.Y., Lobachevskiy Y.A., Dorokhov A.S. et al. Modern agriculture technologies and equipment - trends of an AGRITECHNIKA 2019 exhibition. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2020. Vol. 87. N6. 28-40 (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2020-6-28-40>.
9. Tsench Yu.S., Godlevskaya E.V. Mathematical Modeling as a aspect for designing agricultural machines and units (development history of Southern Urals scientific school). *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N2. 4-12 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-4-12.
10. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Medvedev G.V. Development of an experimental phytotron and its application in the research on the energy-ecological efficiency of indoor plant lighting. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. 17(2). 40-48 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-40-48.
11. Avila R., Schoenau J., King T., Grevers M. Effects of subsoiling tillage on structure, permeability, and crop yields on compacted Solonchic and Chernozemic dry land soils in Western Canada. *Canadian Biosystems Engineering*. 2020. N62. 1.1-1.9 (In English). DOI: 10.7451/CBE.2020.62.1.1.
12. Lobachevsky Ya., Dorokhov A., Aksenov A. et al. RAMAN and fluorimetric scattering lidar facilitated to detect damaged potatoes by determination of spectra. *Applied Sciences*. 2022. 12. 5391 (In English). DOI: 10.3390/app12115391.
13. Erokhin M.N., Dorokhov A.S., Sibirev A.V. et al. Development and modeling of an onion harvester with an automated separation system. *AgriEngineering*. 2022. 4(2). 380-399 (In English). DOI: 10.3390/agriengineering4020026.
14. Aksenov A.G., Sibirev A.V. State of technical support for vegetable crops production in the Russian Federation. *Potato and vegetables*. 2021. N8. 3-8 (In Russian). DOI: 10.25630/PAV.2021.85.47.001.
15. Aksenov A.G., Sibirev A.V. Technical support of vegetable growing in countries of the Eurasian Economic Union. *AMA*. 2020. N.3 (51). 12-19 (In English). EDN: XAWSBO.
16. Pastukhov A.G., Dobritskiy A.A., Bakharev D.N., Volkov S.F. Physico-mechanical properties of pumpkin seeds in the context of drying processes. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N1. 52-59 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-52-59.
17. Zimin I.B., Ignatenkov V.G., Yakovlev M.A., Smirnov A.V. Experimental study of aerodynamic characteristics of granular bulk materials. *Izvestiya of Velikie Luki State Agricultural Academy*. 2020. N2(31). 29-33 (In Russian). EDN: LZPPM.
18. Sazonov N.V., Mosyakov M.A., Teterin V.S. et al. Quality metrics of automated machinery in potato plant cultivation for breeding and seed production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N1. 60-67 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-60-67.
19. Lobachevskiy Ya.P., Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Shogenov Yu.Kh. Scientific and technical achievements of agroengineering scientific organizations in the context of digital transformation of agriculture. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023. N4(310). 2-5 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2023-4-2-5.
20. Kazakov S.S., Zhivaev O.V., Nikulin A.V. Structural ways to reduce the damage of planting potatoes bulbs when using a chain-spoon planting machine. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2019. N3. 29-34 (In Russian). DOI: 10.31992/0321-4443-2019-3-29-34.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Дорохов А.С. – концептуализация, научное руководство;
Сибирев А.В. – методология, поиск и анализ литературы, проведение исследований, визуализация;
Пономарев А.Г. – поиск и анализ литературы;
Петухов С.Н. – проведение исследований, создание лабораторной установки.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Dorokhov A.S. – conceptualization, scientific guidance;
Sibirev A.V. – methodology, literature search and analysis, research, visualization;
Ponomarev A.G. – search and analysis of literature;
Petukhov S.N. – conducting research, creating a laboratory installation.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

03.04.2024

23.05.2024

EDN: CVPMDF

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-27-32



Научная статья

УДК 635.21



Технологии физического и химического воздействия на посадочный материал картофеля

Алексей Константинович Зиновьев¹,
аспирант, директор,
e-mail: akzinoviev@yandex.ru;

Георгий Константинович Рембалович²,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: akzinoviev@yandex.ru;

Михаил Юрьевич Костенко²,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: akzinoviev@yandex.ru

¹Коломенский аграрный колледж имени Н.Т. Козлова, г. Коломна, Российская Федерация;

²Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, г. Коломна, Российская Федерация

Реферат. Отмечено, что в рамках усилий по обеспечению продовольственной безопасности планируется увеличить площади под посев овощей открытого грунта и картофеля. (*Цель исследования*) Изучить методы и технологии предпосадочной обработки картофеля. (*Материалы и методы*) Исследования проводили в Тульской области в условиях природного инфекционного фона на сортах картофеля Утро раннее и Рокко. Для защиты картофеля использовались фунгициды и биопрепараты с различными действующими веществами. Также изучалось влияние излучения ртутных ультрафиолетовых разрядных ламп низкого давления на изменение биопотенциала и pH картофеля и обработки магнитным полем. (*Результаты и обсуждение*) В процессе исследования уделено внимание повышению урожайности картофеля путем непосредственного воздействия магнитным полем перед посадкой. Рассмотрены особенности влияния ультрафиолетового облучения клубней на рост и урожайность картофеля. Особый акцент сделан на эффективности химических и биологических препаратов для предотвращения развития парши картофеля. Отмечено, что лучшие биометрические показатели и урожайность картофеля достигаются при воздействии магнитной индукцией 30 миллитесла. При увеличении или уменьшении дозы обработки биометрические показатели и урожайность картофеля снижаются, но остаются выше по сравнению с вариантом без обработки в магнитном поле. (*Выводы*) Применение протравителей фунгицидного действия в значительной степени ограничивает развитие парши обыкновенной. Наиболее эффективен против этой болезни картофеля препарат «Ровраль Аквафло 500». После ультрафиолетового облучения дозой 120-240 джоулей на квадратный метр усиливается вегетативный рост, увеличивается урожайность, повышается коэффициент размножения клубней. Лучшие биометрические показатели и урожайность картофеля достигаются в случае воздействия магнитной индукцией (доза обработки 0,23 джоуль-секунды на килограмм).

Ключевые слова: картофель, предпосадочная обработка, развитие корней, болезни, химические препараты, ультрафиолетовое излучение, магнитное поле, урожайность.

■ **Для цитирования:** Зиновьев А.К., Рембалович Г.К., Костенко М.Ю. Технологии физического и химического воздействия на посадочный материал картофеля // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. С. 27-32. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-27-32. EDN: CVPMDF.

Scientific article

Technologies of Physical and Chemical Impact on Potato Planting Material

Aleksey K. Zinoviev¹,
Ph.D. student (Eng.), director,
e-mail: akzinoviev@yandex.ru;

Georgiy K. Rembalovich²,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: akzinoviev@yandex.ru;

Mikhail Yu. Kostenko²,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: akzinoviev@yandex.ru

¹Kolomna Agricultural College named after N.T. Kozlov, Kolomna, Russian Federation;

²Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan, Russian Federation

Abstract. The paper highlights that it is planned to increase the cultivation area of open ground vegetables and potatoes for ensuring the food security. (*Research purpose*) This study aims to explore methods and technologies for pre-planting treatment of potatoes. (*Materials and methods*) The research was conducted in the Tula region where Rannee Utro (Early Morning) and Rokko potato varieties were studied under natural infectious conditions. Various fungicides and biological products containing different active ingredients were applied to protect potatoes. Additionally, the study investigated the effects of low-pressure mercury ultraviolet discharge lamps and magnetic field treatments on the biopotential and pH levels of potatoes. (*Results and discussion*) The study focuses on enhancing potato yields by applying direct magnetic field exposure before planting and investigates the impact of ultraviolet irradiation on tuber growth and productivity. Significant emphasis was placed on the efficacy of chemical and biological agents in preventing potato scab. The findings show that optimal biometric indicators and potato yields were achieved with a magnetic induction of 30 millitesla. Any deviation from this treatment dose results in reduced biometric indicators and yields, which, however, remain higher than those of the untreated controls. (*Conclusions*) The application of fungicidal disinfectants effectively curtails the development of common scab, with the highest efficacy achieved using Rovral Aquafluo 500. Post-treatment with ultraviolet radiation at a dose of 120-240 joules per square meter enhances vegetative growth, productivity, and tuber reproduction rates. The most favorable biometric indicators and yields were observed when a magnetic induction treatment dose of 0.23 joule-seconds per kilogram was applied.

Keywords: potatoes, pre-planting treatment, root development, diseases, chemicals, ultraviolet radiation, magnetic field, yield.

■ **For citation:** Zinoviev A.K., Rembalovich G.K., Kostenko M.Yu. Technologies of physical and chemical impact on potato planting material. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 27-32 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-27-32. EDN: CVPMDf.

Россия входит в число ведущих мировых производителей картофеля и поставляет его на мировой рынок вместе с Беларусью больше, чем страны ЕС. При этом все меньше картофеля выращивается на приусадебных участках и больше в сельскохозяйственных предприятиях.

Картофель относится к культурам, подверженным заражению, что приводит к существенному снижению урожая. В России ежегодный недобор картофеля достигает 20-25% [1]. Повышение эффективности выращивания картофеля связано с необходимостью внедрения энерго- и ресурсосберегающих технологий, направленных на увеличение урожайности и защиту от болезней.

В настоящее время используется достаточно большой спектр способов и технологий предпосадочной подготовки картофеля. Так, широкое распространение получила магнитная обработка клубней. По сравнению с другими электрофизическими способами воздействия это высокопроизводительный, энергосберегающий, экологичный и безопасный для обслуживающего персонала метод.

Ультрафиолетовое излучение также демонстрирует значительный потенциал по эффективности действия и широко используется для разработки новых технологий в растениеводстве [2]. Отдельного внимания заслуживает применение метода культуры апикальных меристем, который стал главным терапевтическим способом лечения и предотвращения развития вирусной инфекции [3].

В многочисленных работах акцентируется внимание на физических методах повышения всхожести и энергии прорастания семян [4]. Активизация роста семян приводит к изменению биохимическо-

го состава, фотосинтетической активности и улучшению качества продукции. В среднем культуры созревают на 2-3 дня раньше, что позволяет увеличить урожайность на 15-30% [5].

В ряде работ исследовали влияние искусственного магнитного поля на прорастание семян [6, 7]. При направленности магнитного поля от Северного полюса к Южному ускоряется рост, в частности, стеблей и корней [8, 9]. Если увеличить напряжение магнитного поля в 2-4 раза, то семена злаковых культур дают более крупные всходы. Оптимальным для роста растений считается напряжение до 1 мТл = 10 Гс [10].

Воздействие магнитного поля основано на усилении в клетке растения химических и биохимических реакций [11]. В частности, увеличение растворимости солей и кислот приводит к изменению pH и биопотенциала клетки [12]. За счет повышения проницаемости клеточных мембран ускоряется диффузия молекул и ионов. Вместе с этим более высокая концентрация минеральных элементов способствует увеличению водопоглощения семян [13]. Вследствие повышения поступления в клетку молекул кислорода и его растворимости подавляется процесс спорообразования фитопатогенных грибов [14].

В некоторых исследованиях представлены результаты применения электротехнологических методов предпосевной обработки посадочного материала: повышение урожайности и качества растительной продукции, снижение заболеваемости. Однако отмечено, что средства магнитной обработки представляют собой более простой вариант для внедрения в поточные линии предпосевной подготовки семян [15].

К перспективным методам увеличения урожайности относится УФ-облучение семян перед посадкой. Так, облучение озимой пшеницы в течение 10 мин (1882 Дж/м^2) положительно повлияло на энергию прорастания, повысилась всхожесть. УФ-обработка дозой 941 и 2823 Дж/м^2 (в течение 5 и 15 минут) привела к увеличению энергии прорастания на 0,9 и 0,5% и всхожести на 2,2 и 3,7% [16, 17].

Отмечено, что при предпосевном УФ-облучении семян, когда они находятся в состоянии свободного падения, а также в условиях вращающегося поля оптического излучения, достигается равномерность обработки [17]. При использовании лампы ЛЭ-30УФ излучение в диапазоне 302–365 нм стимулирует рост семян. Определена взаимосвязь качества семян (энергия прорастания, всхожесть, длина ростков) с факторами обработки (количество включенных ламп и норма протравителя).

Таким образом, рассмотрение возможных методов и технологий обработки картофеля, которые способствуют повышению урожайности, защите от вредителей, представляет собой актуальную научно-практическую задачу.

Цель исследования – изучить методы и технологии обработки клубней картофеля перед посадкой.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ. Исследования проводились в Тульской области на угодьях КФХ «ЖАК» в условиях природного инфекционного фона на сортах картофеля Утро раннее и Рокко в 2019–2020 гг. Размер участков 37 м^2 , размещение рендомизированное, повторяемость опытов трехкратная.

Для защиты картофеля от болезней использовались фунгициды и биопрепараты с действующими веществами: «Максим 025 FS», т.к.с. (производитель Syngenta, Швейцария), активное вещество флудиоксонил, 25 г/л, норма расхода 0,75 л/т; «Ровраль Аквафло 500», к.с. (Agrecol, Польша), ипродион, 500 г/л, 0,4 л/т; «Серкадис», к.с. (BASF, Германия), флуксапироксад, 300 г/л, 0,2 л/т; «Биокомплекс-БТУ», р. (Россия), 1,5 л/т; «Триходермин», р. (НПО «БиоТехнологии», Россия), 2 л/т; «Гаупсин», р. («Защита Агро», Украина), 2 л/т; «Фитоцид», р., 1 л/т; «Гумифилд Форте Брикс» (Humintech GmbH, Германия), 0,8 л/т.

Влияние УФ-излучения исследовали при помощи специальной установки с ртутными ультрафиолетовыми разрядными лампами низкого давления (рис. 1). Применялись лампы из кварцевого стекла типа ZW23D15W(Y)-436 (производитель Jiangyin Feiyang Instrument Co., Ltd, КНР): мощность 23 Вт, ток 420 мА, напряжение на лампе 40–55 В, УФ-облученность $62\text{--}69 \text{ Вт/см}^2$ на расстоянии 1 м.

Картофель в один слой укладывали на решетку 3. Снизу и сверху на расстоянии 0,5 м установлены УФ-облучатели 2. Необходимую дозу облучения задавали по экспозиции и расстоянию до УФ-источников.

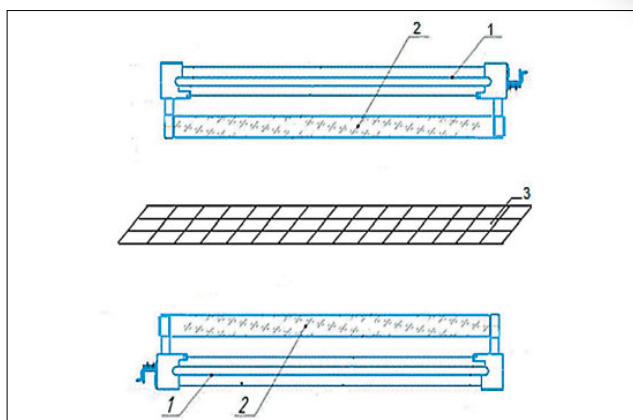


Рис. 1. Конструкция установки для УФ-облучения клубней картофеля: 1 – корпус облучателя; 2 – УФ-лампа; 3 – решетка [4]

Fig. 1. Design of the UV irradiation installation for potato tubers: 1 – irradiator body; 2 – UV-lamp; 3 – lattice [4]

При магнитной обработке экспериментальные исследования по изменению биопотенциала и pH картофеля выполнялись на разработанной лабораторной установке. Величина магнитной индукции регулировалась напряжением постоянного тока, приложенного к катушкам индукторов, и измерялась тесламетром 43205/1. Скорость движения ленты транспортера с клубнями картофеля контролировалась преобразователем частоты Delta VFD004 EL43A.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Погодные условия в период опытов были благоприятными для развития и распространения парши картофеля. Наивысшая эффективность против парши в 2019 г. наблюдалась при использовании протравителя фунгицидного действия «Ровраль Аквафло 500». На сорте картофеля Утро раннее распространение болезни составило 7,5%, поражение клубней – 5,4%, на сорте Рокко соответственно 4,1 и 2,7%. В 2020 г. наибольшая эффективность против парши на сорте Утро раннее получена с препаратом «Серкадис», развитие парши – 5,3%. На сорте Рокко самое низкое развитие парши наблюдалось при использовании препарата «Ровраль Аквафло 500» – 6,1%, распространение болезни составило 9,8%.

При обработке препаратами «Максим 025FS» было собрано больше всего здоровых клубней сорта Утро раннее – 43,5% и Рокко – 58,6%. Следовательно, предпосевная обработка клубней фунгицидами и биопрепаратами несколько ограничивает развитие парши обыкновенной. Наивысшая эффективность действия за период эксперимента отмечена при использовании препаратов «Ровраль Аквафло 500» и «Серкадис» на сорте Утро раннее.

При ультрафиолетовом облучении клубней перед посадкой ускоренно образовывались и развивались первичные корни. Отсчет времени анализа эффектов, проявляющихся под воздействием УФ-

облучения, был определен равным 7 суткам, поскольку у клубней без каких-либо обработок первичные корни начинают появляться именно к этому сроку [5]. При облучении клубней Утро ранее дозой 120 Дж/м² (схема 1) средняя длина корней была на 65% больше, чем в контрольном варианте, а при дозе 240 Дж/м² (схема 2) – на 82%. Подобная динамика наблюдалась у сорта Рокко (таблица).

Таблица		Table	
Воздействие дозы ультрафиолетового излучения на процессы ризогенеза картофеля сортов Утро раннее и Рокко			
IMPACT OF ULTRAVIOLET RADIATION DOSE ON RHIZOGENESIS IN MORNING EARLY AND ROCCO POTATO VARIETIES			
Сорт картофеля	Доза облучения, Дж/м ²	Средняя длина корней после облучения, мм	
		через 3 суток	через 7 суток
Утро раннее	Контрольный образец	0	8,0±1,0
	120 (схема 1)	4	13,2±2,0
	240 (схема 2)	6	14,6±2,0
Рокко	Контрольный образец	0	5,0±1,0
	120 (схема 1)	3	8,5±2,0
	240 (схема 2)	4	9,3±2,0

Также следует отметить, что вегетационный период растений с облученными клубнями завершился на 12-14 дней раньше, чем в контрольных образцах. После сбора урожая средняя масса была больше у облученных клубней (рис. 2), их количество увеличилось. Это имеет существенное значение в первичном семеноводстве картофеля. Прирост урожая при УФ-облучении перед посадкой клубней составил в 2019 г. 15%, в 2020 г. – 12%.



Рис. 2. Масса контрольных (слева) и УФ-облученных (справа) клубней картофеля
Fig. 2. Weight of control (left) and UV-irradiated potato samples (right)

В эксперименте с УФ-излучением клубней установлено влияние энергетической дозы обработки на pH и биопотенциал картофеля. В значительной степени эти показатели изменялись при энергетической дозе обработки 0,23 Дж·с/кг, соответствующей

магнитной индукции 30 мТл (рис. 3). Полученные результаты позволили прийти к выводу, что это наиболее эффективный режим магнитной обработки.

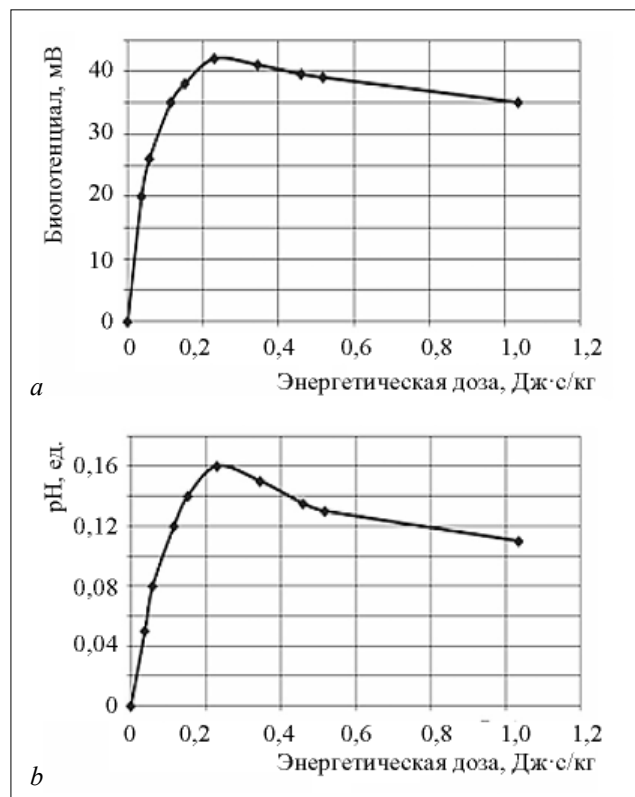


Рис. 3. Зависимость изменения биопотенциала (а) и pH (б) картофеля от энергетической дозы УФ-обработки
Fig. 3. Dependence of biopotential changes (a) and pH (b) in potatoes on the energy dose of UV treatment

Также отмечены лучшие биометрические показатели и урожайность картофеля при воздействии магнитной индукцией 30 мТл (доза обработки 0,23 Дж·с/кг). При увеличении или уменьшении такой дозы данные показатели снижаются, но остаются выше, чем у необработанного картофеля (рис. 4).

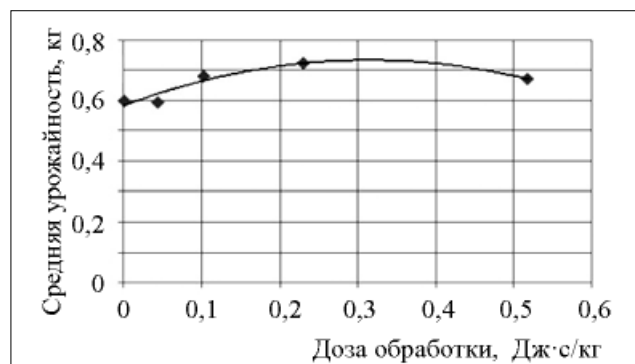


Рис. 4. Зависимость средней урожайности куста картофеля от энергетической дозы обработки
Fig. 4. Dependence of average potato bush yield on UV treatment energy dose

Выводы. Применение протравителей фунгицидного действия в значительной степени позволяет ограничить развитие парши обыкновенной на картофеле. Наиболее эффективным против болезни в 2019 г. был препарат «Ровраль Аквафло 500» (ипродион, 500 г/л) при норме расхода 0,4 л/т, а в 2020 г. – препарат «Серкадис», л.с. (флукаспироксад, 300 г/л) при норме расхода 0,2 л/т.

У растений, клубни которых перед посадкой были облучены дозой УФ-С 120-240 Дж/м², усиливается вегетативный рост, увеличивается урожайность, повышается коэффициент размножения.

Наиболее эффективным режимом магнитной предпосадочной обработки картофеля является магнитная индукция 30 мТл. Урожайность картофеля возрастает на 18-22%, а количество товарных клубней – на 17%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С., Сибирев А.В. Современное состояние технологического обеспечения производства овощных культур в Российской Федерации // *Овощи России*. 2023. №5. 5-10. DOI: 10.18619/2072-9146-2023-5-5-17.
2. Питюрина И.С., Виноградов Д.В., Гогмачадзе Г.Д. Влияние предпосадочной обработки клубней на урожайность картофеля // *АгроЭкоИнфо*. 2021. №4 (46). С. 89-92. DOI: 10.51419/20214409.
3. Удалова Е.Ю. Влияние предпосадочной обработки клубней и вегетирующих растений на устойчивость к фитофторозу картофеля // *Вестник Марийского государственного университета*. 2020. Т. 6. №3 (23). С. 333-339. DOI: 10.30914/2411-9687-2020-6-3-333-338.
4. Смур В.В., Шпанев А.М. Эффективность предпосадочной обработки клубней картофеля на фоне высоких показателей присутствия вредных организмов // *Аграрный научный журнал*. 2021. №6. С. 34-38. DOI: 10.28983/asjy2021i6pp34-38.
5. Кауфова М.А., Дзюев Р.И. Влияние предпосадочной обработки переменным магнитным полем разных частот на всхожесть клубней картофеля // *Известия Горского государственного аграрного университета*. 2021. Т. 58. №3. С. 26-29. EDN: HTVVKF.
6. Скрыбин А.А. Биологическая урожайность и ее структура разных по скороспелости сортов картофеля в зависимости от предпосадочной подготовки почвы // *E-Scio*. 2022. №1 (64). С. 516-521.
7. Kozyrskyi V., Savchenko V., Sinyavsky O. Presowing processing of seeds in magnetic field. *Environmental Science, Agricultural and Food Sciences*. 2018. 576-620. DOI: 10.4018/978-1-5225-3867-7.CH024.
8. Клочков А.В., Клочкова О.С., Соломко О.Б. Проращивание семян в магнитном поле // *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020. №3. С. 163-168. EDN: HSTDZZ.
9. Васильева Т.И., Пурегин П.П., Путько В.Ф. Выбор параметров магнитного поля и времени экспозиции для предпосевной обработки семян культурных растений с помощью портативной магнитоплазменной установки // *Кронос: естественные и технические науки*. 2020. №5 (33). С.4-8.
10. Левина Н.С., Тертышная Ю.В., Бидей И.А., Елизарова О.В. Предпосевная обработка семян подсолнечника, сои и кукурузы низкочастотным электромагнитным излучением // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. №4. С. 22-28. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-4-22-28.
11. Vasilyev A.A., Vasilyev A.N., Dzhanibekov A.K., Normov D.A. Theoretical and experimental research on pre-sowing seed treatment. *IOP: Science and Engineering*. 2020. 791(1). 012078. DOI: 10.1088/1757-899X/791/1/012078.
12. Martinez E., Florez M., Carbonell M.V. Stimulatory effect of the magnetic treatment on the germination of cereal seeds. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*. 2017. Vol. 2 (1). 375-381. DOI: 10.22161/IJEAB/2.1.47.
13. Kataria S., Baghel L., Guruprasad K.N. Pre-treatment of seeds with static magnetic field improves germination and early growth characteristics under salt stress in maize and soybean. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2017. Vol. 10. 83-90. DOI: 10.1016/j.bcab.2017.02.010.
14. Таранов М.А., Гуляев П.В., Корчагин П.Т. и др. Результаты экспериментальных исследований предпосевной обработки семян подсолнечника переменным магнитным полем // *АгроЭкоИнфо*. 2020. №4. DOI: 10.55618/20756704_2022_15_3_37-49.
15. Жолобова М.В., Федорищенко М.Г., Шабанов Н.И., Грачёва Н.Н. Анализ влияния предпосевной обработки семян переменным электромагнитным полем промышленной частоты (ЭМП ПЧ 50 Гц) на энергию прорастания семян среднеспелого ярового ячменя сортов вакула, виконт, ратник // *Научный журнал КубГАУ*. 2016. №118 (04). С. 1129-1138. EDN: VWPTWF.
16. Zablodskiy M., Kozyrskyi V., Zhylytsov A. et al. Electrochemical characteristics of the substrate based on animal excrement during methanogenesis with the influence of a magnetic field. *Proc. on Electronics and Nanotechnology*. 2020. 530-535. DOI: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088763.
17. Курылева А.Г., Кондратьева Н.П. Эффективность ультрафиолетового облучения семян зерновых культур // *Пермский аграрный вестник*. 2019. №4 (28). С. 47-52. EDN: IGOKTN.
18. Газалов В.С., Пономарева Н.Е., Беленов В.Н. Оптическая система предпосевной обработки семян // *Вестник аграрной науки Дона*. 2018. №3(43). С. 21-30. EDN: YOINFR.
19. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Медведев Г.В. Разработка экспериментального фитотрона и его применение в исследованиях по энергоэкологии светокультуры // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №2. С. 40-48. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-40-48.

REFERENCES

1. Lobachevsky Ya.P., Dorokhov A.S., Sibirev A.V. The current state of technological support for vegetable crops production in the Russian Federation. *Vegetable Crops of Russia*. 2023. N5. 5-17 (In Russian). DOI: 10.18619/2072-9146-2023-5-5-17.
2. Pityurina I.S., Vinogradov D.V., Gogmachadze G.D. The effect of pre-planting treatment of tubers on potato yield. *AgroEcoInfo*. 2021. N 4(46). 89-92 (In Russian). DOI: 10.51419/20214409.
3. Udalova E.Yu. The effect of pre-plant treatment of tubers and vegetating plants on potato late blight resistance. *Vestnik of the Mari State University*. 2020. Vol. 6. N3. 333-338 (In Russian). DOI: 10.30914/2411-9687-2020-6-3-333-338.
4. Smuk V.V., Shpanev A.M. Efficiency of pre-planting treatment of potato tubers against the background of high indicators of the presence of harmful organisms. *Agrarian Scientific Journal*. 2021. N6. 34-38 (In Russian). DOI: 10.28983/asjy2021i6pp34-38.
5. Kaufova M.A., Dzuev R. Effect of pre-planting treatment with different frequency alternating magnetic field on potato tubers germination. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2021. Vol. 58-3. N26-29 (In Russian). EDN: HTVVKF.
6. Scriabin A.A. Biological yield and its structure of potato varieties of different maturity depending on pre-planting soil preparation. *E-Scio*. 2022. N1 (64). C. 516-521 (In Russian).
7. Kozyrskiy V., Savchenko V., Sinyavsky O. Presowing processing of seeds in magnetic field. *Environmental Science, Agricultural and Food Sciences*. 2018. 576-620 (In English). DOI: 10.4018/978-1-5225-3867-7.CH024.
8. Klochkov A.V., Klochkova O.S., Solomko O.B. Germination of seeds in a magnetic field. *Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*. 2020. N3. 163-168 (In Russian). EDN: HSTDZZ.
9. Vasilyeva T.I., Purygin P.P., Putko V.F. The choice of magnetic field parameters and exposure time for pre-sowing treatment of seeds of cultivated plants using a portable magnetoplasma installation. *Kronos: Natural and Technical Sciences*. 2020. N5 (33). 4-8 (In Russian).
10. Levina N.S., Tertyshnaya Yu.V., Bidey I.A., Elizarova O.V. Pre-sowing treatment of sunflower, soybean and maize seeds with low-frequency electromagnetic radiation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. N12(4). 22-28 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-4-22-28.
11. Vasilyev A.A., Vasilyev A.N., Dzhaniybekov A.K., Normov D.A. Theoretical and experimental research on pre-sowing seed treatment. *IOP: Science and Engineering*. 2020. 791(1). 012078 (In English). DOI: 10.1088/1757-899X/791/1/012078.
12. Martinez E., Florez M., Carbonell M.V. Stimulatory effect of the magnetic treatment on the germination of cereal seeds. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*. 2017. Vol. 2 (1). 375-381 (In English). DOI: 10.22161/IJEAB/2.1.47.
13. Kataria S., Baghel L., Guruprasad K.N. Pre-treatment of seeds with static magnetic field improves germination and early growth characteristics under salt stress in maize and soybean. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2017. Vol. 10. 83-90 (In English). DOI: 10.1016/j.bcab.2017.02.010.
14. Taranov M.A., Gulyaev P.V., Korchagin P.T. Results of experimental studies of pre-sowing treatment of sunflower seeds with an alternating magnetic field. *AgroEcoInfo*. 2020. N4 (In Russian). DOI: 10.55618/20756704_2022_15_3_37-49.
15. Zholobova M.V., Fedorishchenko M.G., Shabanov N.I., Gracheva N.N. Analysis of the impact of preplant treating of seeds with industrial alternating electromagnetic frequency (EMF PF 50 Hz) on the germination energy of mid-ripening spring barley seeds of the varieties of vakula, vikont, ratnik. *Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2016. N118 (04). 1129-1138 (In Russian). EDN: VWPTWF.
16. Zablodskiy M., Kozyrskiy V., Zhylytsov A. et al. Electrochemical characteristics of the substrate based on animal excrement during methanogenesis with the influence of a magnetic field. *Nanotechnology*. 2020. 530-535 (In English). DOI: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088763.
17. Kuryleva A.G., Kondratieva N.P. Effect of grain seeds UV radiation. *Perm Agrarian Journal*. 2019. N4 (28). 47-52 (In Russian). EDN: IGOKTN.
18. Gazalov V.S., Ponomaryova N.E., Belenov V.N. The optical system of presowing treatment of seed. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2018. N3(43). 21-30 (In Russian). EDN: YOIH.
19. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Medvedev G.V. Development of an experimental phytotron and its application in research on the energy ecology of light culture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N2. 40-48 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-40-48.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Все авторы внести равный вклад.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

All authors contributed equally to this publication.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

04.03.2024

06.05.2024

EDN: EFHTVU

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-33-39

Научная статья
УДК 631.3:004.942

Программное обеспечение для создания цифровых двойников рабочих органов сельскохозяйственных машин

Денис Александрович Миронов,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: nano.otdel@mail.ru;
Дмитрий Владимирович Попов,
инженер,
e-mail: nano.otdel@mail.ru;

Рустам Касимович Расулов,
младший научный сотрудник,
e-mail: nano.otdel@mail.ru;
Алексей Константинович Ламм,
младший научный сотрудник,
e-mail: nano.otdel@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Цифровой двойник, являясь виртуальной моделью реального объекта, становится важным инструментом для моделирования объектов и явлений в современном мире. В сельском хозяйстве он играет особенно значимую роль, обеспечивая возможность не только анализировать данные о почве, климате, урожайности и растениях, но и прогнозировать возможные изменения в этих параметрах. Благодаря накоплению и анализу огромного объема информации, цифровые двойники помогают оптимизировать использование ресурсов, таких как вода, удобрения и пестициды, что в свою очередь приводит к увеличению урожайности и снижению затрат. Кроме того, цифровые двойники позволяют автоматизировать многие процессы в сельском хозяйстве, включая управление сельскохозяйственной техникой и машинами. Они предоставляют возможность более точного и эффективного управления агрегатами, такими как тракторы и комбайны, а также помогают в прогнозировании и предотвращении поломок оборудования, что способствует уменьшению временных и финансовых потерь. *(Цель исследования)* Анализ программных продуктов для проектирования и создания цифровых двойников. *(Материалы и методы)* Рассмотрели различные виды программ, отобранных по критериям спектра функциональных возможностей и их совместимости с другими программами. *(Результаты и обсуждение)* Проанализировали каждую из программ на возможность выполнения поставленных задач. В представленных примерах отметили особенности каждого вида программного обеспечения. Сформировали требования для выбора программ. *(Выводы)* Представили характеристики рассмотренных программных продуктов, определили их функциональные возможности. Установили необходимые требования для принятия решения о выборе программ со схожими функциональными возможностями.

Ключевые слова: цифровой двойник, решатель, программное обеспечение, модель, сельское хозяйство, почвообрабатывающие машины.

■ **Для цитирования:** Миронов Д.А., Попов Д.В., Расулов Р.К., Ламм А.К. Программное обеспечение для создания цифровых двойников высокотехнологичных рабочих органов сельскохозяйственных машин и почвенной среды // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N2. С. 33-39. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-33-39. EDN: EFHTVU.

Scientific article

Software for Developing Digital Twins of Agricultural Machinery Working Bodies

Denis A. Mironov,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: nano.otdel@mail.ru;
Dmitry V. Popov,
engineer,
e-mail: nano.otdel@mail.ru;

Rustam K. Rasulov,
junior researcher,
e-mail: nano.otdel@mail.ru;
Alexey K. Lamm,
junior researcher,
e-mail: nano.otdel@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Digital twins, as virtual models of physical entities, are becoming vital in modeling various objects and phenomena in the modern world. In the agricultural sector, their role is particularly crucial, since digital twins facilitate not only the analysis of

soil, climate, yield, and plant data but also the forecast of changes in these parameters. Accumulating and analysing vast amounts of information, digital twins help optimize the use of resources such as water, fertilizers, and pesticides, which in turn leads to increased yields and reduced costs. Moreover, digital twins enable the automation of many processes in agriculture, including the management of agricultural machinery and equipment. They provide the capability for more precise and efficient control of units such as tractors and combines, and also assist in predicting and preventing equipment failures, thereby reducing time and financial losses. *(Research purpose)* The paper aims to analyze software products used in the design and development of digital twins. *(Materials and methods)* The paper evaluates various software programs, selected based on their functionality range and compatibility with other systems. *(Results and discussion)* The paper assesses the effectiveness of each program in fulfilling its intended tasks. The provided examples highlight distinct features of each software type. Criteria for program selection were formulated. *(Conclusions)* The findings delineate the characteristics and functionalities of the evaluated software products, thereby determining their functional capabilities. Necessary requirements were defined to facilitate decision-making in selecting programs with similar functionality.

Keywords: digital twin, software, agriculture, modeling, agriculture, tillage machines.

■ **For citation:** Mironov D.A., Popov D.V., Rasulov R.K., Lamm A.K. Software for developing digital twins of agricultural machinery working bodies. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 33-39 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-33-39. EDN: EFHTVU.

Цифровой двойник – это любой объект, система, процесс, смоделированный при помощи виртуального программного обеспечения. Модель в точности повторяет форму и движения оригинала. Цифровой двойник необходим для изучения поведения объекта в тех или иных условиях, способствует экономии времени и средств на исследования, а также снижению негативного воздействия объекта на людей и окружающую среду.

Интерес в отношении цифровых двойников в мире возрастает. Технологии цифровых двойников развиваются стремительными темпами и находят применение в различных сферах деятельности человека. Цифровой двойник представляет собой сложную систему, и для его построения требуются различные виды программных продуктов. В основном они схожи между собой, но отличия их отдельных функций играют ключевую роль в создании цифрового двойника [1].

Система автоматизированного проектирования (САПР) включает комплекс программных, технических, технологических, информационных средств, а также проектно-конструкторской документации. Она состоит из трех основных компонентов: системы инженерной графики (*CAD, Computer-aided design*), системы инженерных расчетов (*CAE, Computer-aided engineering*) и системы автоматизации подготовки и управления производством (*CAM, Computer-aided manufacturing*).

CAD-системы предназначены для задач проектирования и формирования конструкторской документации, включают модули создания трехмерных моделей, чертежей и текстовой документации. Для создания традиционных чертежей используется векторная графика, также эти системы могут поддерживать растровую графику для визуализации проектируемых объектов.

CAE – класс систем, предназначенных для определенных инженерных задач; например, расчета на прочность, анализа тепловых процессов, моделирования, расчета гидравлических систем и машин, др. *CAE* системы также используют созданные в *CAD* трехмерные модели.

Функционал *CAM*-систем предназначен для подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ по моделированию процессов, режимов обработки и изготовления деталей. Системы *CAE* широко применяются для изготовления сложных деталей и сокращения времени их производства. Они также используют *3D* модели деталей, созданные в *CAD* [2, 3].

Метод дискретного элемента (*Discrete Element Method, DEM*) – это численный метод, разработанный для моделирования и анализа систем, состоящих из множества индивидуальных частиц или гранул. Он находит широкое применение в исследовании и моделировании гранулированных сред, таких как гравий, песок, молекулы, почва и других материалов с дискретной структурой [4].

Цель исследования – анализ программных продуктов для проектирования и создания цифровых двойников.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Программные продукты анализировали по двум критериям: широкий спектр функций и совместимость работы с другими программами.

Наличие в программе достаточного набора разнообразных опций упрощает и делает рабочий процесс пользователя более гибким, экономит время. Совместимость обеспечивает беспрепятственный обмен данными и информацией между программами, повышает эффективность, уменьшает издержки на перевод данных из одного формата в другой. Совместимость позволяет пользователям интегрировать ПО в рабочие процессы и системы.

Результаты и обсуждение. Анализ различных программ, используемых в сельскохозяйственной отрасли, включал изучение их технической документации, функциональных возможностей, особенностей интеграции и потенциальных ограничений, способствующих моделированию цифровых двойников [5].

Ansys (производитель компания *ANSYS, Inc.*, США) – универсальная программная платформа, основанная на системе анализа методом конечных элементов для инженерных расчетов (*CAE*), а также на системе конструкторских задач (*CAD*). Включает в себя множество подпрограмм как для создания компьютерной модели, так и выполнения инженерных задач в области механики, гидродинамики, электрических систем и проч.

Ansys служит мощным инструментом в создании цифровых двойников, так как комплекс необходимых операций находится в подпрограммах одной платформы. Экспорт моделей от многих популярных *CAD* программ других производителей является положительным критерием.

В *Ansys* при использовании *CAD* возможно провести моделирование функциональных элементов, включая рабочие органы и другие компоненты технических систем. В ПО для *CAE* осуществляется численный расчет напряжений, действующих на конструктивные элементы, такие как рама и рабочие органы. Также возможно применение технологии *CAE* для расчетов гидравлических систем трактора [6].

На *рисунке 1* приведен пример взаимодействия в программном пакете *Ansys Mechanical* и *Ansys Rocky*. *Rocky* используется для создания сред, *Mechanical* – для расчета напряжений, давление от почвы учитывается для расчета напряжений в рабочих органах.

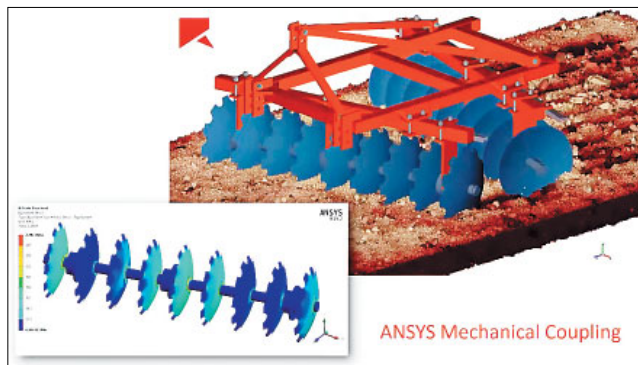


Рис. 1. Взаимодействие программ *Ansys Rocky* и *Ansys Mechanical*

Fig. 1. Coupling *Ansys Rocky* with *Ansys Mechanical*

COMSOL Multiphysics (*COMSOL Group*, Швеция) – универсальный инструмент для создания одофизических и мультифизических систем моде-

лей. Является мощным помощником в анализе сложных систем и процессов. Благодаря дополнительным модулям предоставляются специализированные функции для моделирования электромагнитных и акустических полей, расчета напряженно-деформированного состояния твердых тел, численного анализа гидродинамических, теплообменных и химических процессов.

В совокупности *COMSOL* позволяет пройти все этапы моделирования от построения геометрии моделей, придания свойств различным материалам и описания физики модели до решения необходимых задач и визуализации результатов моделирования. Как программный пакет, включающий множество *CAD* и *CAE* решений, *Comsol* может быть достойной альтернативой для *Ansys* [7].

На *рисунке 2* представлен рабочий процесс, выполняемый в *Comsol*. Отображен расчет нагрузок, а также заметно отклонение от первоначального расположения детали.

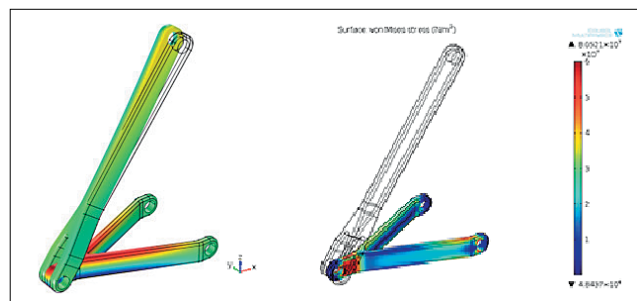


Рис. 2. Возможный элемент рамы рабочего органа (*Comsol*)
Fig. 2. Possible frame element of a working tool (*Comsol*)

Solid Works (компания *Dassault Systemes*, Франция) специализируется на *CAD* для решения задачи моделирования и воссоздания внешнего вида цифрового рабочего органа. Также в его платформу встроено расширение *CAE* системы *Solid Works Simulation* для прочностного анализа элемента рамы. Так как программа в большей степени специализирована на построении 2D и 3D моделей, она подойдет для интеграции построенных моделей STL формата с другими программами.

Solid Works Flow Simulation – это программное обеспечение для вычислительной гидродинамики (CFD), встроенное в *Solid Works 3D CAD*, которое позволяет моделировать потоки жидкости или газа (Лычкина Н.Н., Павлов В.В. Концепция цифрового двойника и роль имитационных моделей в архитектуре цифрового двойника; сб. трудов 11-й Всерос. научно-практ. конф. «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2023). С. 139-149. EDN: ZAOYZG).

В среде *Solid Works* смоделирован, как пример, сложный агрегат – фрезерный культиватор (*рис. 3*). Также возможно подготовить его чертежи для про-

изводства, а построенную модель интегрировать в другие платформы, необходимые для дальнейшего построения цифрового двойника.

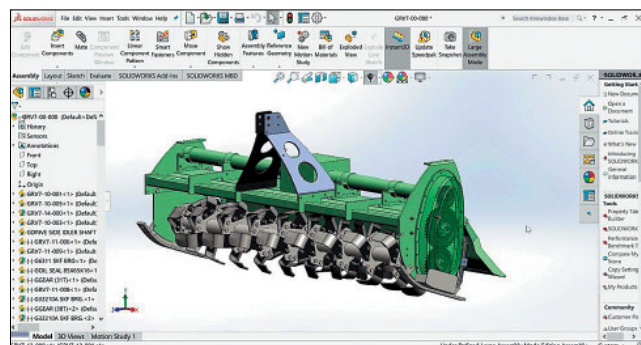


Рис. 3. Модель фрезерного культиватора (Solid Works)
Fig. 3. A Rotary Cultivator Model (Solid Works)

Компас-3D (компания «Аскон», Россия) широко используется при проектировании изделий и деталей в авиа-, судо-, вагоно- и машиностроении, помогает инженерам и дизайнерам разрабатывать и оптимизировать различные продукты и конструкции. Значительная часть функционала ориентирована на соответствие стандартам РФ, хотя в сравнении с другими системами опции, связанные с инженерными расчетами, могут оказаться менее обширными [8]. На рисунке 4 показана построенная модель культиватора КПС-9.

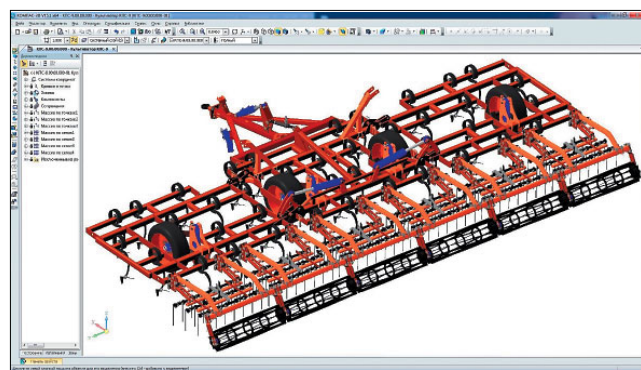


Рис. 4. Модель культиватора КПС-9 (Компас-3D)
Fig. 4. The KPS-9 Cultivator Model (Kompas-3D)

По функционалу и возможностям **Компас-3D** является альтернативой **Solid Works**, но стоит отметить, что построение чертежей в данном ПО организовано лучше, так как по умолчанию шаблоны построения заданы по действующим стандартам ЕСКД.

Ansys Rocky используется для быстрых и точных расчетов поведения частиц и служит действительно эффективным инструментом для моделирования процессов динамики сыпучих сред с учетом сложной геометрии частиц. Продукт предназначен специально для анализа и моделирования поведения гранулированных и дисперсных материалов,

включая частицы различных размеров и форм. Позволяет моделировать как сферические, так и сложные многогранные частицы. Данное ПО реализует динамику свободных компонентов оборудования, учитывая воздействия частиц, сил тяжести и других сил. Также есть функции износа геометрии, разрушения частиц и просмотра сил, действующих на модель со стороны почвы [9].

На рисунке 5 отображена работа трактора с дисковой бороной в программе **Ansys Rocky**. Помимо моделирования частиц предусмотрена функция задания движения геометрии. Геометрия создается отдельно в **CAD** программе, и расчет на прочность деталей также просматривается отдельно (Курносенко А.Е. Цифровые двойники и цифровое производство; матер. Всерос. научно-практ. конф. «Устойчивое развитие и новая индустриализация: наука, экономика, образование». Москва, 18 июня 2021 г. С. 297-301. EDN: SDYNNY).

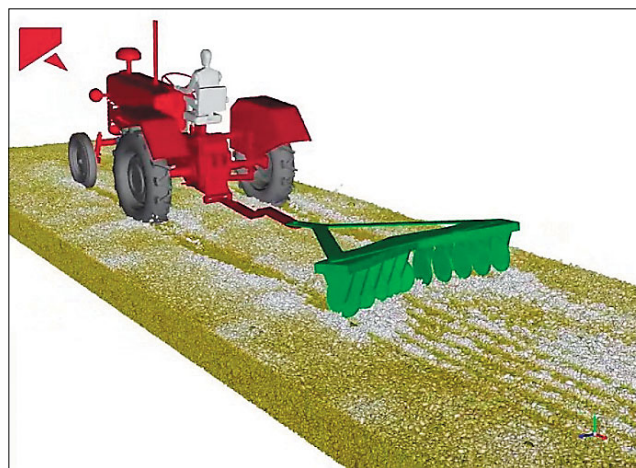


Рис. 5. Трактор с дисковой бороной (Ansys Rocky)
Fig. 5. Tractor with Disc Harrow (Ansys Rocky)

EDEM (компания *Altair Engineering, Inc.*, США) – это высокопроизводительное программное обеспечение для моделирования сыпучих и гранулированных материалов. Продукт, основанный на методе дискретных элементов (**DEM**), быстро и точно моделирует и анализирует поведение угля, руд, почвы, волокон, зерен. Моделирование **EDEM** дает инженерам важную информацию о том, как почвенная среда будет взаимодействовать с рабочими органами машин в различных рабочих и технологических условиях. Одной из особенностей является создание простых фигур внутри программы, не полагаясь на экспорт из сторонних **CAD** программ [10]. На рисунке 6 изображена модель, построенная в среде **Altair EDEM**.

В данных программах особое внимание уделяется взаимодействию мелких частиц (песок, гранулы, почва) с загруженными в среду геометрическими объектами [11, 12]. Также можно рассчитывать

нагрузки, износ и другие физические параметры взаимодействия [13-15].

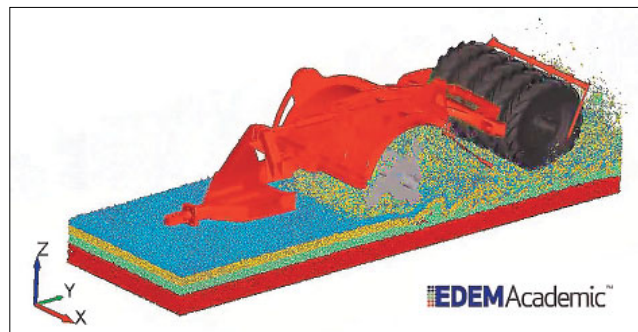


Рис. 6. Фрезерный культиватор в разрезе (Altair EDEM)
Fig. 6. Sectional View of a Milling Cultivator (Altair EDEM)

В таблице приведено краткое описание программных продуктов и указано соответствие критериям, по которым программы предварительно были отобраны для применения в сельскохозяйственных целях.

Представленные ПО делятся на CAD программы –

Solid Works, COMSOL, Ansys, Компас-3D и программы, использующие метод дискретных элементов (DEM) – *Altair EDEM, Ansys Rocky*. Данный комплекс программ можно использовать для реализации имитационных испытаний по множествам параметров.

Главным критерием, который определяет технологический уровень рабочих органов почвообрабатывающих машин, является износостойкость [16]. При выполнении агротехнических мероприятий по обработке почвы рабочие органы быстро изнашиваются, изменяя свои размеры и форму, что нарушает агротехнический процесс обработки почвы. К быстроизнашиваемым деталям плужного корпуса относятся долото, лемех, полевая доска и грудь отвала. Для того, чтобы определить ресурсные характеристики рабочих органов и их формообразование в той или иной почвенной среде нужны многочисленные лабораторные (Видникевич С.Ю., Видникевич С.М. Применение цифровых двойников процессов в предприятиях АПК; матер. Всерос. конф. молодых исследователей «Аграрная наука-2022». Москва. 22-24 ноября 2022 г. С. 1533-

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ И КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ EVALUATION CRITERIA AND A BRIEF DESCRIPTION OF SOFTWARE PRODUCTS		
Спектр функций	Совместимость с другими программами	Характеристика
SolidWorks		
Есть возможность для создания моделей и чертежей, а также для инженерных расчетов	Взаимодействие с другими CAD программами, например <i>Ansys Space Claim</i>	Отличное ПО для создания моделей и конструкторской документации. Встроенные расширения для анализа прочности материалов
Компас-3D		
Мало возможностей для инженерных расчетов	Нет возможности для взаимодействия	Хороший отечественный аналог САПР-программ. Все функции адаптированы под стандарты РФ, но довольно малый функционал для инженерных расчетов
Ansys		
Много возможностей для задания мультифизических расчетов за счет большого количества расширений	Хорошее взаимодействие с <i>Rocky DEM</i> и <i>Algoryx Momentum Granular</i>	Множество расширений, таких как <i>Ansys Space Claim</i> для моделирования, <i>Ansys Mechanical</i> для расчетов на прочность, <i>Ansys Workbench</i> для мультифизических расчетов
COMSOL Multiphysics		
Встроенные ядра различных физических процессов позволяют проводить мультифизические расчеты	Взаимодействие с <i>Excel</i> , а также способность создания простых приложений	Как и у <i>Ansys</i> , множество модулей для всех необходимых инженерных расчетов
Ansys Rocky		
Базовые функции задания сыпучих сред, а также моделирования износа рабочих органов в различных условиях среды	Взаимодействие со всем пакетом программ <i>Ansys</i>	Программа для создания сыпучих сред на основе DEM метода
Altair EDEM		
Возможность создания трудных форм частиц	Взаимодействие только с программами пакета <i>Altair</i>	Такое же ПО, как и <i>Rocky DEM</i> , но имеет немного больше функций

1536. EDN: OLOHLC) и эксплуатационные исследования. Необходимо затратить много сил и ресурсов, чтобы выбрать наиболее эффективные материалы для изготовления рабочих органов почвообрабатывающего агрегата. Сезонные ограничения для проведения таких испытаний в еще большей степени увеличивают срок принятия решения по испытываемому материалу. Создание в рассмотренном комплексе программ цифрового двойника процесса работы почвообрабатывающего агрегата в среде полной адекватности позволит решить данные вопросы.

Выводы

Проанализированы ключевые программные продукты, целью которых является создание цифровых двойников.

Определены функциональные возможности каждого программного продукта, направленные на определение соответствующего вектора развития в области создания цифровых двойников почвообрабатывающих машин и почвенной среды.

Выделены требования для принятия решения при выборе программ, обладающих схожими функциональными возможностями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Федоренко В.Ф., Таркинский В.Е. Цифровые беспроводные технологии для оценки показателей сельскохозяйственной техники // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. №1. С. 10-15. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-10-15.
- Тищенко В.И. Феномен «цифрового двойника» // *Sciences of Europe*. 2021. №85-3. С. 51-59. DOI: 10.24412/3162-2364-2021-85-3-51-59.
- Рудской А.И., Колбасников Н.Г., Боровков А.И. и др. Компьютерное моделирование ударной вязкости структурно-неоднородных металлов // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2011. №1 (117). С. 226-233. EDN: NREROJ.
- Боровков А.И., Немов А.С., Колбасников Н.Г., Золотов А.М. Конечно-элементное моделирование и исследование двухопорного ударного изгиба стального образца с целью определения ударной вязкости // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2007. №3. С. 53-58. EDN: JFVGVD.
- Ронжин А.Л., Савельев А.И. Системы искусственного интеллекта в решении задач цифровизации и роботизации агропромышленного комплекса // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №2. С. 22-29. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-22-29.
- Ценч Ю.С., Годлевская Е.В. Математическое моделирование как инструмент проектирования сельскохозяйственных машин и агрегатов (применительно к истории развития научной школы Южного Урала) // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №2. С. 4-12. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-4-12.
- Дерепаскин А.Н., Куваев А.Н., Токарев И.В. Математическая модель для определения конструктивной массы почвообрабатывающего орудия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №1. С. 27-33. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-1-27-33.
- Лобачевский Я.П., Лискин И.В., Сидоров С.А. и др. Разработка и технология изготовления почвообрабатывающих рабочих органов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. №4. С. 3-8. EDN: WLZXPД.
- Сидоров С.А., Поткин С.Н., Миронов Д.А., Лискин И.В. Комбинированные лабораторные исследования материалов рабочих органов на абразивный износ // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. №6. С. 21-26. DOI: 10.22314/207375992016.6.2126.
- Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Миронова А.В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №1. С. 41-50. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50.
- Погонышев В.А., Ториков В.Е., Погонышева Д.А. Цифровые двойники в сфере АПК // *Современные тенденции развития аграрной науки*. 2022. С. 729-734. EDN: GWNVDX.
- Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Кислицкий М.М., Миронова А.В. Эффекты от применения цифровых двойников в сельском хозяйстве // *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2023. №103. С. 71-78. DOI: 10.21515/1999-1703-103-71-78.
- Миронов Д.А., Ламм А.К., Расулов Р.К. Обзор программных продуктов разработки цифровых двойников // *Вестник Национального Института Бизнеса*. 2022. №4 (48). С. 12-27. EDN: QQNQEE.
- Кислицкий М.М., Миронов Д.А., Лылов А.С. Цифровые двойники сельскохозяйственных машин и оборудования в системе обеспечения продовольственной безопасности: значение и перспективы // *Теория и практика мировой науки*. 2022. №12. С. 27-29. EDN: NHXIAW.
- Дорохов А.С., Павкин Д.Ю., Юрочка С.С. Технология цифровых двойников в сельском хозяйстве: перспективы применения // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25. №4. С. 14-25. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-14-25.
- Сидоров С.А., Миронов Д.А., Ценч Ю.С., Миронова А.В. Оценка износостойкости и ресурса двухслойных упрочненных почворезающих рабочих органов в различных почвенных условиях // *Инженерные технологии и системы*. 2020. Т. 30. №4. С. 699-710. DOI: 10.15507/2658-4123.030.202004.699-710.

REFERENCES

1. Fedorenko V.F., Tarkivskiy V.E. Digital wireless technology to measure agricultural performance. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N 1. 10-15 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-10-15.
2. Tishchenko V. The digital twin phenomenon. *Sciences of Europe*. 2021. N85-3. 51-59 (In Russian). DOI: 10.24412/3162-2364-2021-85-3-51-59.
3. Rudskoy A.I., Kolbasnikov N.G., Borovkov A.I., et al. Computer modeling of impact strength of structurally inhomogeneous metals. *St. Petersburg Polytechnical University Journal*. 2011. N1 (117). 226-233 (In Russian). EDN: NREROJ.
4. Borovkov A.I., Nemov A.S., Kolbasnikov N.G., Zolotov A.M. Finite element modeling and investigation of two-support impact bending of a steel sample in order to determine impact strength. *St. Petersburg Polytechnical University Journal*. 2007. N3. 53-58 (In Russian). EDN: JFVGVD.
5. Ronzhin A.L., Savel'ev A.I. Artificial intelligence systems for solving problems of agroindustrial complex digitalization and robotization. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N2. 22-29 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-22-29.
6. Tsench Yu.S., Godlevskaya E.V. Mathematical modeling as a aspect for designing agricultural machines and units (development history of Southern Urals scientific school). *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N2. 4-12 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-4-12.
7. Derepaskin A.I., Kuvaev A.N., Tokarev I.V. A mathematical model for determining the specific structural weight of a tillage implement. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N1. 27-33 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-1-27-33.
8. Lobachevskiy Ya.P., Liskin I.V., Sidorov S.A. et al. Working out and production technique of soil cultivating working tools. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2016. N4. 3-8 (In Russian). EDN: WLZXP.
9. Sidorov S.A., Potkin S.N., Mironov D.A., Liskin I.V. Combined laboratory abrasion test of working tools materials. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2016. N6. 21-26 (In Russian). DOI: 10.22314/207375992016.6.2126.
10. Lobachevskiy Ya.P., Mironov D.A., Mironova A.V. Increasing the operating lifetime of wearable working bodies of agricultural machines. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N 1. 41-50 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50.
11. Pogonysh V.A., Torikov V.E., Pogonysh D.A. Digital counterparts in the field of agriculture. *Modern Trends in the Development of Agricultural Science*. 2022. 729-734 (In Russian). EDN: GWNVDX.
12. Lobachevskiy Ya.P., Mironov D.A., Kislitsky M.M., Mironova A.V. Digital twins use effects in agriculture. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2023. N103. 71-78 (In Russian). DOI: 10.21515/1999-1703-103-71-78.
13. Mironov D.A., Lamm A.K., Rasulov R.K. Review of software products for the development of digital twins. *Bulletin of the National Institute of Business*. 2022. N4 (48). 12-27 (In Russian). EDN: QQNQEE.
14. Kislitsky M.M., Mironov D.A., Lylov A.S. Digital twins of agricultural machinery and equipment in the food security system: significance and prospects. *Theory and Practice of World Science*. 2022. N12. 27-29 (In Russian). EDN: HHXIAW.
15. Dorokhov A.S., Pavkin D.Yu., Yurochka S.S. Digital twin technology in agriculture: prospects for use. *Agroengineering*. 2023. Vol. 25. N4. 14-25 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-14-25.
16. Sidorov S.A., Mironov D.A., Tsench Yu.S., Mironova A.V. Assessment of durability and service life of two-layer hardened earth cutters in various soil conditions. *Engineering Technologies and Systems*. 2020. Vol. 30. N4. 699-710 (In Russian). DOI: 10.15507/2658-4123.030.202004.699-710.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Миронов Д.А. – постановка проблемы, научное руководство, формирование основных направлений исследования;

Попов Д.В. – сбор и анализ аналитических и практических материалов по теме исследования, формирование общих выводов;

Расулов Р.К. – анализ научных источников по теме исследования, доработка текста, установка и анализ программного обеспечения;

Ламм А.К. – подбор и формирование списка литературы, подготовка текста к публикации.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Mironov D.A. – problem statement, scientific guidance, formation of the main directions of research;

Popov D.V. – collection and analysis of analytical and practical materials on the research topic, formation of general conclusions;

Rasulov R.K. – analysis of scientific sources on the research topic, revision of the text, installation and analysis of software;

Lamm A.K. – selection and formation of the list of references, preparation of the text for publication.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

04.03.2024

26.04.2024



Технология и технические средства для реализации методов воспроизводства плодородия почвы

Яков Петрович Лобачевский,
доктор технических наук, профессор,
академик РАН,
e-mail: lobachevsky@yandex.ru;

Николай Васильевич Алдошин,
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
e-mail: naldoshin@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Плодородие почвы определяется наличием гумуса, как основной части органического вещества. Расширенное воспроизводство плодородия почвы обеспечивается внесением органических и минеральных удобрений, выращиванием сидеральных культур и разложением остатков растительной массы. (*Цель исследования*) Разработка технологий и средств механизации при расширенном воспроизводстве плодородия. (*Материалы и методы*) Для совместного внесения жидких органических удобрений и возделывания сидератов разработан агрегат, реализующий шланговую технологию транспортирования жидких органических удобрений. По напорным шланговым магистралям удобрения подаются к рабочим органам вглубь почвенного пласта. Комбинированный агрегат состоит из трактора К-744 «Кировец» и адаптера для глубокой обработки почвы с внесением жидких удобрений, а также сеялки мелкозерновых культур. Для выравнивания поверхности поля после прохода агрегата и заделки высеваемых семян сидеральной культуры агрегат оснащается зубовым катком. (*Результаты и обсуждение*) Приведены формулы для определения критической глубины обработки, выполнен силовой расчет агрегата. Конструкция почвообрабатывающего орудия позволяет устанавливать плоскорезные рабочие органы с захватом 0,80 м и щелеватели с захватом 0,45 метра. Проведены испытания комбинированного агрегата. Глубина обработки почвы составляла 36±1 сантиметров, норма высева сидеральной культуры (редька масличная) 25 килограммов на гектар, диапазон рабочих скоростей агрегата от 0,4 до 0,8 метра в секунду. (*Выводы*) Равномерность подпочвенного распределения органических удобрений составила 90-95 процентов. Удельная энергоёмкость технологического процесса комбинированного агрегата на базе трактора К-744 при внутрисочвенном внесении удобрений составляет 40-65 киловатт-часов на гектар (без учета мощности на прокачку удобрений). Энергозатраты зависят от глубины обработки и удельного сопротивления почвы. Предлагаемый способ позволяет предотвратить водную и ветровую эрозию почвы, улучшить ее агрономически ценные свойства. Сокращение пестицидной нагрузки на почву и ее микрофлору способствует переходу к модели устойчивых агроэкосистем, повышению и улучшению качества урожая. Предлагаемая технология обеспечивает расширенное воспроизводство плодородия почвы.

Ключевые слова: плодородие почвы, гумус, жидкие удобрения, сидераты, комбинированный агрегат, почвообрабатывающие рабочие органы, трактор, высевочный аппарат, сопротивление почвы.

■ **Для цитирования:** Лобачевский Я.П., Алдошин Н.В. Технология и технические средства для реализации методов воспроизводства плодородия почвы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №2. С. 40-46. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-40-46. EDN: EFILLH.

Scientific article

Technology and Technical Means for the Implementation of Reproduction Methods for Soil Fertility

Yakov P. Lobachevskiy,
Dr.Sc.(Eng.), professor, academician of the Russian
Academy of Sciences,
e-mail: lobachevsky@yandex.ru;

Nikolay V. Aldoshin,
Dr.Sc.(Eng.), professor, chief researcher,
e-mail: naldoshin@yandex.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Soil fertility is determined by the presence of humus as the main part of organic matter. The extended reproduction of soil fertility is ensured by the introduction of organic and mineral fertilizers, the cultivation of sideral crops and the decomposition of plant residues. (*Research purpose*) The research purpose is developing the technologies and means of mechanization for extended reproduction of fertility. (*Materials and methods*) For the joint application of liquid organic fertilizers and the cultivation of siderates, a unit has been developed that implements a hose technology for transporting liquid organic fertilizers. Fertilizers

are fed through pressure hose lines to the working parts deep into the soil layer. The combined unit consists of a tractor K-744 Kirovets and an adapter for deep tillage with liquid fertilizers, as well as a seeder for small-seeded crops. To level the surface of the field after the passage of the unit and the sealing of the sown seeds of the sideral culture, the unit is equipped with a tooth roller. (*Results and discussion*) Formulas for determining the critical processing depth are given, the power calculation of the unit is performed. The design of the tillage tool allows to install flat-cutting working parts with a grip of 0.80 meters and slits with a grip of 0.45 meters. Tests of the combined unit were carried out. The depth of tillage was 36 ± 1 centimeters, the seeding rate of the sideral crop (oilseed radish) was 25 kilograms per hectare, the operating speed range of the unit was from 0.4 to 0.8 meters per second. (*Conclusions*) The uniformity of the subsurface distribution of organic fertilizers was 90-95 percent. The specific energy intensity of the technological process of the combined unit based on the K-744 tractor for intra-soil fertilization is 40-65 kilowatt hours per hectare (excluding the capacity for pumping fertilizers). Energy consumption depends on the depth of cultivation and resistivity of the soil. The proposed method allows preventing water and wind erosion of the soil, improving its agronomically valuable properties. Reducing the pesticide load on the soil and its microflora contributes to the transition to a model of sustainable agroecosystems, improving and improving crop quality. The proposed technology provides extended reproduction of soil fertility. **Keywords:** soil fertility, humus, liquid fertilizers, siderates, combined aggregate, tillage working bodies, tractor, seeding unit, soil resistance.

■ **For citation:** Lobachevsky Ya.P., Aldoshin N.V. Technology and technical means for the implementation of reproduction methods for soil fertility. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 40-46. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-40-46. EDN: EFILLH.

Известно, что плодородие почвы определяется в первую очередь наличием гумуса, который составляет основную часть органического вещества. На воспроизводство гумуса оказывает влияние внесение органических и минеральных удобрений [1]. Посев сидератов также способствует обогащению почвы органическим веществом. Наибольший эффект может быть достигнут при совместном использовании удобрений и выращивании сидератов. Для реализации такого подхода необходимы технологические приемы, способствующие активизации биологических процессов в почве и снижению затрат энергоресурсов при возделывании сельскохозяйственных культур [2].

Повышать эффективность использования удобрений позволяет проведение пожнивной сидерации [3]. В этом случае увеличение плодородия почвы основано на заделывании в почву сидеральных культур после достижения необходимой вегетативной массы [4]. В качестве сидератов целесообразно применять горох, вику, однолетний люпин, эспарцет и другие бобовые культуры, которые существенно обогащают почву азотом за счет развития на их корнях азотфиксирующих бактерий [5].

Учет почвенно-климатических условий, оптимизация севооборотов с расширением ассортимента возделываемых культур, снижение уровня поражения растений болезнями и вредителями, использование культур, возделывание которых не снижает уровень плодородия почв, посев сидератов способствуют обогащению почвы органическим веществом. В связи с этим для механизации возделывания сельскохозяйственных культур и повышения плодородия почвы необходимы технические средства, которые позволят, используя ресурсы растения, получать максимально возможный урожай с

заданными параметрами качества и обеспечит расширенное воспроизводство плодородия почв.

Цель исследования. Разработка технологии и средства механизации для реализации методов расширенного воспроизводства плодородия почв на основе принципов биологизации земледелия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Примером расширенного воспроизводства плодородия почвы может служить совместное использование внутривспашечного глубокого внесения жидких органических удобрений и возделывания сидеральных культур (Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Инновационная система машинно-технологического обеспечения предприятий агропромышленного комплекса. Ч. 1. Инновационная система машинно-технологического обеспечения сельскохозяйственных предприятий на длительную перспективу. М.: ВИМ. 2019. EDN: RVHGMW). На фермах, где применяется способ гидросмыва при удалении навоза, накапливаются жидкие органические удобрения. Поскольку их нормы внесения составляют десятки, а в некоторых случаях сотни тонн на гектар, то объемы их транспортирования от мест аэрации и хранения до поля исчисляются тысячами тонн [6]. В связи с этим для транспортировки жидких органических удобрений наиболее экономично использовать шланговые системы [7].

В составе таких систем предусматриваются насосные станции для перекачки жидких удобрений, магистральные шланги длиной до 10-15 км, буксирные шланги, транспортируемые по полю и используемые для подключения к тракторному агрегату, сельскохозяйственные агрегаты для обработки почвы и внутривспашечного внесения жидких удобрений с устройством привязки к транспортирующей магистрали.

При использовании технологии внутрипочвенного внесения жидких органических удобрений часть полезных питательных элементов испаряется и вымывается в подпахотные слои почвы [8, 9]. Применение сидератов позволяет сократить потери питательных веществ и получить дополнительную биомассу для повышения плодородия почвы (Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сизов О.А., Ахалая Б.Х. Агротехническое и экологическое обоснование эффективности (целесообразности) использования биоактивных технологических способов обработки почвы в системе машинных технологий для обработки залежей и запущенных угодий. М.: ВНИИ механизации сельского хозяйства. 2013. С. 127-130).

В настоящей работе решаются технологические задачи:

- глубокое внутрипочвенное рыхление с внесением жидких органических удобрений;
- закрытие поверхности почвы сидеральными растениями для формирования в приземном слое условий, благоприятных для микроорганизмов;
- активизация процесса использования питательных веществ, вносимых с органическими удобрениями;
- обеспечение сидеральных растений питательными элементами для формирования большей растительной массы [10].

Предложенная технология реализуется с помощью комбинированного агрегата, состоящего из адаптера, производящего глубокую обработку почвы с одновременным внесением жидких органических удобрений по шланговым системам, и сеялки мелкозерновых культур. Для выравнивания поверхности поля после прохода агрегата и заделки высеваемых семян сидерата агрегат оснащается зубовым катком. Компоновочная схема комбинированного агрегата представлена на *рисунке 1*.

При работе агрегата плоскорезные рабочие органы производят глубокое рыхление слежавшегося почвенного горизонта. Профиль обработанного слоя почвы представляет собой форму трапеции (*рис. 2*). Плоскорезные рабочие органы оснащены открывками для увеличения площади поперечного сечения разрыхляемого пласта. Глубина обработки a регулируется в пределах 20-40 см (Алдошин Н.В. Современные тенденции инженерного обеспечения биологизации растениеводства; сб. матер. XVIII Междунар. конф. «Аграрная наука – сельскому хозяйству». Барнаул. 2023. С. 99-103. EDN: JELTRA).

Деформация почвы в виде трапеции в поперечной плоскости происходит до достижения критического порога глубины обработки h_k [11]. При большей глубине обработки картина деформации почвенного пласта меняется. Происходит смятие почвы по направлению движения агрегата без увеличения зоны рыхления в поперечной плоскости. Это

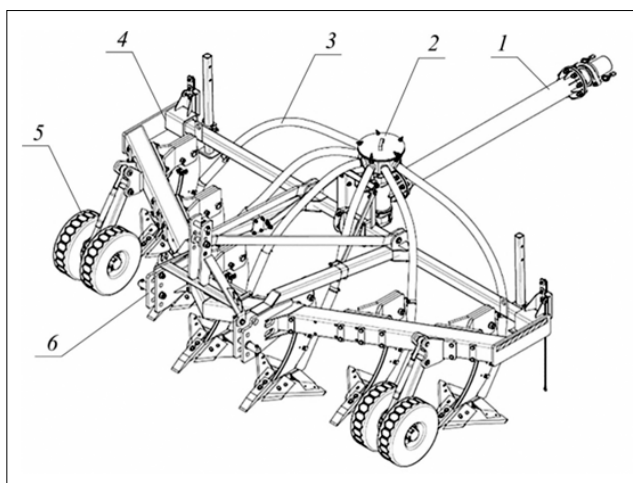


Рис. 1. Компоновочная схема агрегата для внутрипочвенного внесения жидких органических удобрений по шланговым системам: 1 – шланговая магистраль; 2 – распределительный узел жидких органических удобрений; 3 – распределительные шланги; 4 – несущая система с почвообрабатывающими органами; 5 – опорные колеса; 6 – навесное устройство

Fig. 1. Layout diagram of the unit for application of liquid organic fertilizers by hose systems: 1 – hose line; 2 – distribution unit of liquid organic fertilizers; 3 – distribution hoses; 4 – bearing system with tillage bodies; 5 – support wheels; 6 – attachment device

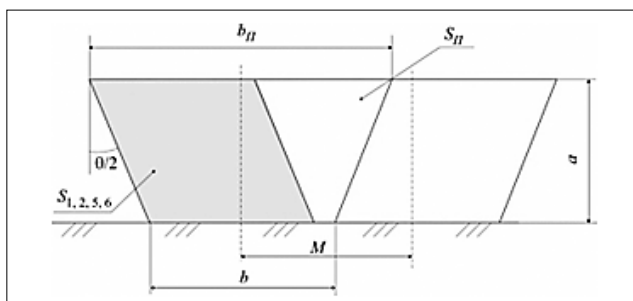


Рис. 2. Площади рыхления почвенного пласта плоскорезным рабочим органом с открывками: a – глубина обработки; b и b_{Π} – ширина обрабатываемого пласта на глубине обработки и на поверхности почвы; M – ширина междуследий установки рабочих органов; S и S_{Π} – площади рыхления каждым из рабочих органов

Fig. 2. The areas of loosening of the soil layer by a plane-cutting working part with openers: a – treatment depth; b – width of the treated layer at the treatment depth; b_{Π} – width of the treated layer on the soil surface; M – width of the interstices of the working parts; S , S_{Π} – loosening areas

приводит в целом к уменьшению подверженного рыхлению объема почвы при ее переуплотнении в непосредственной близости от стоек рабочих органов. Резко возрастает тяговое сопротивление агрегата, так как на глубине больше критической происходит блокированное резание без отделения почвенной стружки с боковых сторон рабочего органа.

Для определения критической глубины обработки предлагается формула (Токушев Ж.Е. Теория и расчет орудий для глубокого рыхления плотных почв. М.: ИНФРА-М. 2003. 300 с.):

$$h_k = \frac{b_0 \left[0,1 \frac{p}{\sigma_{от}} (1 + 3 \operatorname{tg} \psi) \right] - 2,5}{4,2 + \operatorname{ctg} \alpha}, \text{ см}, \quad (1)$$

где b_0 – ширина долота, см; p – сопротивление почвы смятию (твердость почвы), МПа; $\sigma_{от}$ – временное сопротивление почвы отрыву, МПа; α – угол резания, град; ψ – угол скалывания почвы, равный наклону равнодействующей силы сопротивления почвы к горизонту, град (рис. 3).

Минимальному тяговому сопротивлению R_x рабочего органа соответствуют углы резания $\alpha \approx 20-25^\circ$ при $P/\sigma_{от} = 100-150$ и $b_0 = 0,05$ м.

Угол скалывания почвы определяется по формуле

$$\psi = 90^\circ - (\alpha + \varphi + \varphi_{\Pi}) / 2, \quad (2)$$

где α – угол крошения, град; φ – угол трения почвы по лапе, град; φ_{Π} – угол внутреннего трения почвы, град.

В продольном направлении силы сопротивления, действующие на рабочий орган, приводятся к равнодействующей R_{xz} . Вертикальная составляющая R_z характеризует способность рабочего органа к заглублению, а горизонтальная R_x – соответствует тяговому сопротивлению.

Суммарное тяговое сопротивление агрегата определим по формуле В.П. Горячкина:

$$R_x = \sum_{i=1}^6 k_{\Pi} S_i + \varepsilon S_i v^2, \quad (3)$$

где k_{Π} – удельное сопротивление почвы, кПа; S_i – площадь поперечного сечения взрыхленной части пласта i -й лапой, м²; ε – коэффициент (кН·с²/м⁴), учитывающий рабочую скорость v , м/с.

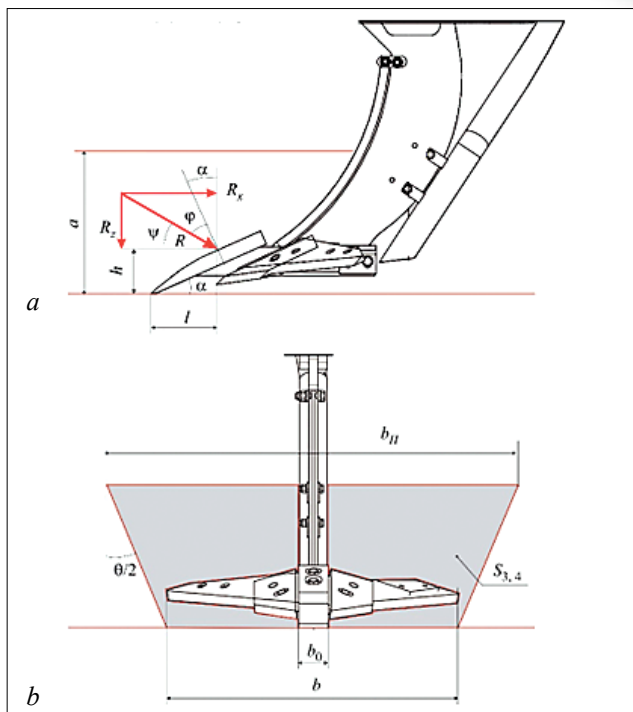


Рис. 3. Силы, действующие на рабочий орган и зоны рыхления почвы: а – вид сбоку; б – вид спереди

Fig. 3. Forces acting on the working part and soil loosening zones: a – side view; b – front view

По схеме силового нагружения (рис. 4) составим систему уравнений равновесия почвообрабатывающего агрегата в продольно-вертикальной плоскости xOz :

$$\begin{cases} \sum_i P_{xz i} = 0; \\ \sum_i M_{xz i} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где $\sum_i P_{xz i}$ – сумма всех сил; $\sum_i M_{xz i}$ – сумма моментов всех сил относительно любой точки механической системы «трактор плюс почвообрабатывающий агрегат».

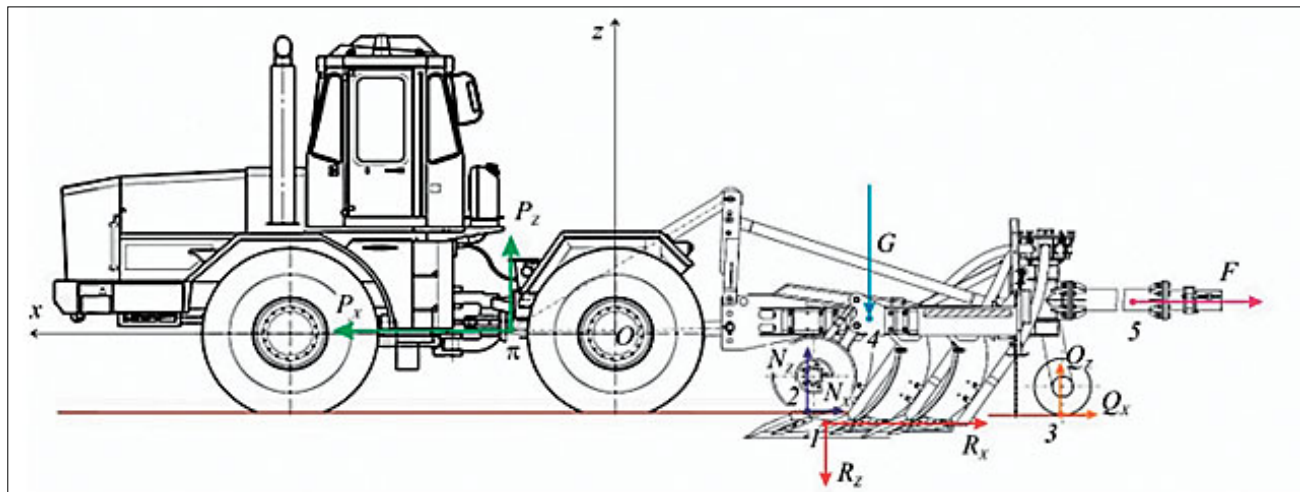


Рис. 4. Силовое нагружение почвообрабатывающего агрегата / Fig. 4. Power loading of the tillage unit

Решение системы уравнений позволяет определить силы P_x, P_z, N_x, Q_z . Для агрегата система уравнений выглядит следующим образом (уравнения (3) и (4) – суммы моментов сил относительно опорных колес орудия и зубового катка):

$$\begin{cases} P_x - R_x - \mu_z N_z - \mu_z Q_z - F = 0; \\ P_z - R_z + N_z + Q_z - G = 0; \\ P_x(z_\pi + z_2) - P_z(x_\pi + x_2) - Q_z(x_3 - x_2) - G(x_4 - x_2) + \\ + R_x(z_1 - z_2) - R_z(x_1 - x_2) - F(z_2 + z_5) = 0; \\ P_x(z_\pi + z_3) - P_z(x_\pi + x_3) - N_z(x_3 - x_2) - G(x_3 - x_4) - \\ - R_x(z_1 - z_3) + R_z(x_3 - x_1) - F(z_2 + z_5) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

где P_x, P_z – составляющие силы тяги трактора, кН; N_x и N_z – реакции почвы, действующие на опорные колеса машины, кН; Q_x и Q_z – составляющие реакции на опорной поверхности катка, кН; R_x, R_z – реакции почвы, приложенные к условному «среднему» рабочему органу, кН; $G = mg$ – сила тяжести машины, кН; F – сила сопротивления буксированию шланга с жидкими органическими удобрениями, кН; x_π, z_π – координаты мгновенного центра вращения трехточечного навесного устройства трактора в продольно-вертикальной плоскости xOz , м; x_1, z_1 – координаты точки носка «среднего» рабочего органа, м; x_2, z_2 – координаты опорных колес приложения реакций, м; x_3, z_3 – координаты зубового катка приложения реакций, м; x_4 – координата точки центра тяжести машины, м; z_5 – координата точки приложения силы сопротивления перемещению шланга, м. Начало координат точка O совпадает с проекцией оси задних колес трактора.

Сила сопротивления буксированию шланга по полю

$$F = f_T m_T g, \quad (6)$$

где f_T – коэффициент трения шланга о почву; $m_T = \rho V$ – масса шланга с удобрениями, кг; ρ – плотность удобрений в шланге, м^3 ; d и L – диаметр и длина шланга, м.

Конструкция почвообрабатывающего орудия позволяет устанавливать два типа рабочих органов: плоскорезы шириной захвата 0,80 м и щелеватели шириной захвата 0,45 м в количестве 5 или 6 единиц каждого.

На несущей системе почвообрабатывающего агрегата устанавливается сеялка мелкозерновых культур с центральным катушечным высевальным аппаратом, приводимым в действие от системы электрооборудования трактора. Семена воздушным потоком, создаваемым вентилятором, транспортируются по семяпроводам и распределяются по поверхности поля, затем при помощи зубового катка заделываются в почву. Общий вид комбинированного агрегата представлен на рисунке 5.

Технологический процесс работы агрегата происходит следующим образом. Жидкие органические

удобрения по шланговой магистрали под давлением от насосной станции поступают к агрегату через узел привязки. Далее через дроссель удобрения попадают в распределительное устройство, оснащенное измельчителем, далее по трубопроводам удобрения к рабочим органам и распределяются в нижней части почвенного пласта. Одновременно в поверхностный слой почвы высевается сидеральная культура с заделкой семян зубовым катком.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для определения критической глубины обработки почвы получена зависимость ее от угла крошения (рис. 6).

Для разработанного агрегата заглублять рабочие органы больше, чем на $h_k = 36$ см нецелесообразно.

Согласно стандартам Ассоциации испытателей сельскохозяйственной техники и технологий (СТО АИСТ 4.2-2010) проведены испытания комбинированного агрегата при внесении жидких органических удобрений. Глубина обработки почвы при внесении составляла 36 ± 1 см, норма высева сидеральной культуры (редька масличная) 25 кг/га, диапазон рабочих скоростей агрегата от 0,4 до 0,8 м/с.

Комбинированный агрегат соединялся с трактором К-744 «Кировец». Исследовались щелеватели с шириной захвата 0,45 м и плоскорезы рабочих органов с шириной захвата 0,80 м.

По мере увеличения скорости движения в 2 раза производительность агрегата за 1 ч чистого времени W прямо пропорционально растет, а объемный q и массовый q_m расходы жидких органических удобрений через шланговую гидросистему незначительно (на 6-8%) снижаются (рис. 7).

При работе комбинированного агрегата максимальной шириной захвата 4,55 м с шестью плоскорезными рабочими органами при увеличении скорости движения с 0,44 до 0,76 м/с норма внесе-



Рис. 5. Комбинированный агрегат для глубокого внутрипочвенного внесения жидких органических удобрений и посева сидеральных культур

Fig. 5. Combined unit for deep application of liquid organic fertilizers and sowing of sowing crops

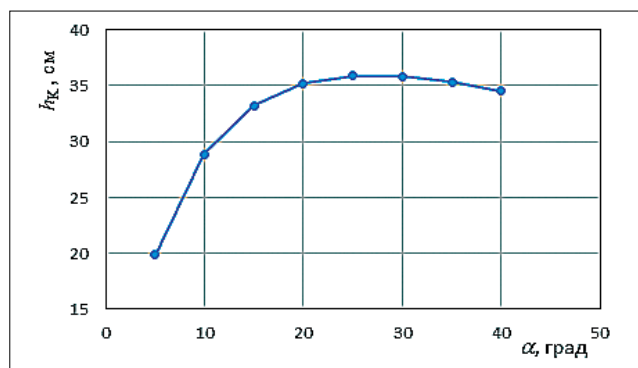


Рис. 6. Зависимость критической глубины обработки почвы h_k от угла α крошения рабочего органа

Fig. 6. Critical depth of tillage h_k on the crumbling angle α of the working part

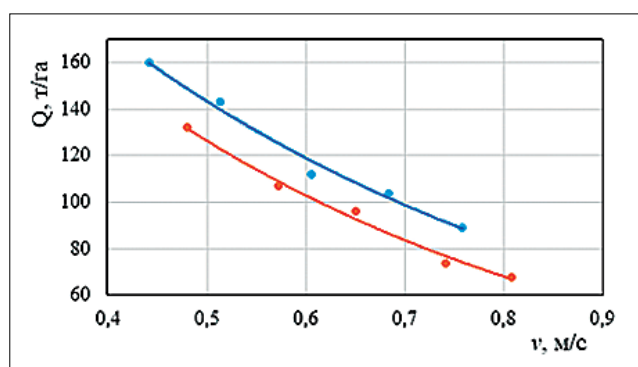


Рис. 7. Зависимость нормы внесения удобрений Q от скорости агрегата v при использовании щелевателей (верхняя кривая) и плоскорезов (нижняя кривая)

Fig. 7. Fertilizer application rate Q on the speed of the unit v when using slits (upper curve) and plane cutters (lower curve)

ния жидких удобрений снижалась с 160 до 89 т/га. При ширине захвата 3,98 м и пяти щелевателях с увеличением скорости движения трактора с 0,48 до 0,81 м/с норма внесения удобрений снижалась с 132 до 68 т/га. Равномерность подпочвенного распределения жидких органических удобрений в обоих вариантах рабочих органов составила 90-95%.

Удельная энергоёмкость технологического процесса комбинированного агрегат на базе трактора К-744 при внутрипочвенном внесении жидких удобрений (без учета мощности насосной станции на прокачку через шланговую систему) определена в диапазоне 40-65 кВт·ч/га в зависимости от глубины обработки и удельного сопротивления почвы.

Особенностью предлагаемой комплексной технологии обеспечения расширенного воспроизводства плодородия почвы является использование сидеральных культур. Именно этот прием позволяет получить дополнительные преимущества по повышению плодородия почв и борьбе с сорным компонентом агроценоза, особенно при внесении жидких органических удобрений. В результате возделывания сидеральных культур снижается уровень водной и ветровой эрозии почвы, сокращаются потери питательных веществ.

Выводы

Для обеспечения расширенного воспроизводства плодородия почвы необходимо внедрять комплексные технологии, в которых используются одновременно несколько факторов. При этом целесообразно применять комбинированные сельскохозяйственные агрегаты, выполняющие за один проход операции обработки почвы, внесения удобрений и посева сидеральных культур.

Обработку почвы и внесение жидких органических удобрений целесообразно производить на глубину до 36 см. Нормы внесения удобрений сокращаются при увеличении рабочей скорости агрегата.

Равномерность подпочвенного распределения жидких органических удобрений при использовании обоих вариантов рабочих органов – щелевателей и плоскорезов составила 90-95%.

Удельная энергоёмкость технологического процесса комбинированного агрегат на базе трактора К-744 «Кировец» при внутрипочвенном внесении жидких органических удобрений определена в диапазоне 40-65 кВт·ч/га в зависимости от глубины обработки и удельного сопротивления почвы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Косолапов В.М., Цыгуткин А.С., Алдошин Н.В., Лылин Н.А. Агрономические основы инженерного обеспечения биологизации земледелия // *Кормопроизводство*. 2022. N3. С. 41-47. DOI: 10.25685/krm.2022.3.2022.007.
2. Тютюнов С.И., Соловиченко В.Д., Цыгуткин А.С., Логинов И.В. Влияние способов обработки почвы, минеральных и органических удобрений в различных севооборотах на содержание гумуса в чернозёме типичном // *Достижения науки и техники АПК*. 2020. N5. С. 7-12. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-10501.
3. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N4. С. 4-12. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12.
4. Смелик В.А., Цыганова Н.А., Теплинский И.З. Внесение минеральных удобрений в точном земледелии // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2012. N3. С. 38-40. EDN: OXUPWF.
5. Алдошин Н.В., Васильев А.С., Козлов Н.Д. Механизированная технология утилизации соломы // *Дальневосточный аграрный вестник*. 2023. Т. 17. N2. С. 71-80. DOI:10.22450/19996837_2023_2_71.
6. Кузнецова О.А., Кривуца З.Ф., Щитов С.В. и др. Расширение функциональных возможностей колёсной энер-

- гетики // *Дальневосточный аграрный вестник*. 2021. N1 (57). С.87-98. DOI: 10.24412/1999-6837-2021-1-87-98.
7. Панов А.И., Алдошин Н.В., Манохина А.А., Семин В.В. Внутрипочвенное внесение жидких органических удобрений и оценка их доз // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25. N2. С. 28-33. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-2-28-33.
8. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. и др. О синтезе роботизированного сельскохозяйственного мобильного агрегата // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2019. N4. С. 63-68. DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/63-68.
9. Личман Г.И., Белых С.А., Марченко А.Н. Способы внесения удобрений в системе точного земледелия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N4. С. 4-9. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-4-4-9.
10. Милюткин В.А., Шахов В.А., Асманкин Е.М. и др. Исследования инновационных технологий, техники и жидких минеральных удобрений на основе карбамидно-аммиачной смеси при возделывании сельхозкультур // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2022. N4(96). С. 104-111. DOI: 10.37670/2073-0853-2022-96-4-104-111.
11. Жук А.Ф. Влияние почвенного нараста на работу клина // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2013. N3. С. 24-29. EDN: QINCRD.

REFERENCES

1. Kosolapov V.M., Tsygutkin A.S., Aldoshin N.V., Lylin N.A. Mechanized agronomy as means for arable farming biologization. *Fodder Production*. 2022. N3. 41-47 (In Russian). DOI: 10.25685/krm.2022.3.2022.007.
2. Tyutyunov S.I., Solovichenko V.D., Tsigutkin A.S., Logvinov I.V. The influence of soil cultivation methods, mineral and organic fertilizers in various crop rotations on the humus content in typical chernozem. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2020. N5. 7-12 (In Russian). DOI: 10.24411/0235-2451-2020-10501.
3. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S. Principles of forming machine and technology systems for integrated mechanization and automation of technological processes in crop production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N4. 4-12 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12.
4. Smelik V.A., Tsyganova N.A., Teplinsky I.Z. Application of mineral fertilizers in precision agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2012. N3. 38-40 (In Russian). EDN: OXUPWF.
5. Aldoshin N.V., Vasilev A.S., Kozlov N.D. Mechanical straw utilization technology. *Far Eastern Agricultural Journal*. 2023. Vol. 17. N2. 71-80 (In Russian). DOI:10.22450/19996837_2023_2_71.
6. Kuznetsova O.A., Krivutca Z.F., Shchitov S.V. et al. Expansion of wheeled power functional capabilities. *Far Eastern Agricultural Journal*. 2021. N1 (57). 87-98 (In Russian). DOI: 10.24412/1999-6837-2021-1-87-98.
7. Panov A.I., Aldoshin N.V., Manokhina A.A., Semin V.V. Assessment of the application rates of liquid manure subsoil injection. *Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 25. N2. 28-33 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2023-2-28-33.
8. Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Tsench Yu.S. et al. About synthesis of robotic agriculture mobile machine. *Bulletin of the Russian Agricultural Science*. 2019. N4. 63-68 (In Russian). DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/63-68.
9. Lichman G.I., Belykh S.A., Marchenko A.N. Methods of applying fertilizers in precision agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N4. 4-9 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-4-4-9.
10. Milyutkin V.A., Shakhov V.A., Asmankin E.M. et al. Research of innovative technologies, engineering and liquid mineral fertilizers based on carbamide-ammonia mixture for crop cultivation. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2022. N4(96). 104-111 (In Russian). DOI: 10.37670/2073-0853-2022-96-4-104-111.
11. Zhuk A.F. Influence of soil build-up on wedge work. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2013. N3. 24-29 (In Russian). EDN: QINCRD.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Лобачевский Я.П. – руководство исследованием, концептуализация, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
Алдошин Н.В. – администрирование проекта, методология, проведение исследования; создание черновика рукописи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Lobachevsky Ya.P. – research management, conceptualization, creation of the final revision of the manuscript and its editing;
Aldoshin N.V. – project administration, methodology, research; creation of a draft manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

02.04.2024

24.05.2024

EDN: SOKFZO

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-47-54



Научная статья

УДК 631.354.2



Комплексная оценка эффективности работы современных зерноуборочных комбайнов в условиях южного региона России

Михаил Евгеньевич Чаплыгин,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: misha2728@yandex.ru;

Эдуард Викторович Жалнин,
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
e-mail: zhalnin@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. При разнообразии применяемых в хозяйствах машин (по маркам, моделям, производителям и другим признакам) отсутствие нормативных рекомендаций часто приводит к нарушению принципов оптимальности и гармоничности парка техники, а также к увеличению себестоимости готовой продукции. (*Цель исследования*) Обобщение результатов испытаний в южных регионах России зерноуборочных комбайнов и комплексная оценка эффективности их работы. (*Материалы и методы*) Испытания проведены в хозяйствующих субъектах южного региона России по единой стандартизированной программе и методике (ГОСТ 28301-2015, ГОСТ 24055-2016, СТО АИСТ 8.22-2010). Проведена комплексная оценка комбайнов по эксплуатационно-технологическим показателям, энергозатратам, экономическим критериям. (*Результаты и обсуждение*) Техническая экспертиза двенадцати моделей комбайнов зарубежного и российского производства выявила главные характеристики, от которых зависят производительность и качество работы. Пропускная способность (класс) комбайнов находится в пределах от 6,7 (*Nova S 340*) до 13,8 килограмма в секунду (*John Deere S690*), мощность двигателей от 180 до 530 лошадиных сил. Диапазон удельной мощности двигателя на единицу пропускной способности испытанных комбайнов составляет 24,0-38,4 лошадиной силы. Аксиально-роторные комбайны отличаются высокой производительностью и низкими потерями зерна, имеют преимущество по показателям дробления и засоренности бункерного зерна. Средний расход топлива 11,2 килограмма на гектар. (*Выводы*) По показателям качества работы (потери зерна, дробление, засоренность, расход топлива) отечественные комбайны не уступают зарубежным аналогам и соответствуют стандартным агротехническим требованиям. Отечественным конструкторам целесообразно обратить внимание на устройство очистительных органов комбайна *Laverda*, которые обеспечивают минимальную засоренность бункерного зерна. Стоимость всех сравниваемых комбайнов не пропорциональна росту их производительности, что значительно (до 40%) увеличивает затраты на уборочные работы. Комбайн «Дон-1500Б» имеет лучшие экономические показатели (прямые издержки и капитальные затраты) по сравнению с аналогами, поэтому снятие его с производства является преждевременным.

Ключевые слова: зерноуборочные комбайны, тип молотилки, параметры, эксплуатационно-технологическая оценка, прямые затраты, качество зерна, производительность, расход топлива, потребность в механизаторах.

■ **Для цитирования:** Чаплыгин М.Е., Жалнин Э.В. Комплексная оценка эффективности работы современных зерноуборочных комбайнов в условиях южного региона России // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 18. N2. С. 47-54. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-47-54. EDN: SOKFZO.

Scientific article

Comprehensive Evaluation of Modern Combine Harvester Performance in Southern Russia

Mikhail E. Chaplygin,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: misha2728@yandex.ru;

Eduard V. Zhalnin,
Dr.Sc.(Eng.), professor, chief researcher,
e-mail: zhalnin@yandex.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Given the diverse range of machines used on farms (including different brands, models, and manufacturers, etc.), the absence of regulatory guidelines often results in violations of optimality and harmony within the equipment fleet. This, in turn, leads to increased costs of finished products. (*Research purpose*) This study aims to generalize the results from testing

grain harvesters in the southern regions of Russia and to provide a comprehensive assessment of their operational efficiency. (*Materials and methods*) Tests were conducted on economic entities in Southern Russia using a unified, standardized program and methodology according to GOST 28301-2015, GOST 24055-2016, and STO AIST 8.22-2010. A comprehensive assessment of combine harvesters was conducted evaluating operational and technological performance, energy consumption, and economic criteria. (*Results and discussion*) A technical analysis of 12 models of foreign and domestically-produced combines has revealed key characteristics that influence their productivity and operational quality. These combines exhibit a throughput capacity ranging from 6.7 kilograms per second (*Nova S 340*) to 13.8 kilograms per second (*John Deere S690*), and their engine powers vary between 180 and 530 horsepower. The specific engine power per unit of throughput also varies, ranging from 24.0 to 38.4 horsepower. Axial rotary combines are noted for their high productivity and minimal grain loss. They offer benefits such as reduced grain crushing and low levels of impurity in bunker grain. The average fuel consumption of these combines is recorded at 11.2 kilograms per hectare. (*Conclusions*) In terms of grain loss, grain crushing, purity, and fuel consumption, domestic combines are comparable to their foreign counterparts, and meet standard agrotechnical requirements. It is recommended that domestic designers study the cleaning mechanisms of the Laverda combine, which ensure minimizing the impurity levels in bunker grain. The cost of the combines analysed does not correlate proportionally with their increased productivity, leading to a significant (up to 40%) rise in the cost of harvesting operations. The *Don-1500B* combine harvester shows superior economic performance, including direct and capital costs, compared to its counterparts. Therefore, discontinuing its production would be premature.

Keywords: grain harvesters, thresher types, performance indicators, operational and technological assessment, direct costs, grain quality, productivity, fuel consumption, need for machine operators.

■ **For citation:** Chaplygin M.E., Zhalnin E.V. Comprehensive evaluation of modern combine harvester performance in Southern Russia. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 18. N2. 47-54 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-47-54. EDN: SOKFZO.

Современный рынок зерноуборочных комбайнов весьма насыщен разными моделями по конструкции, производительности и стоимости. Каких-либо единых нормативных рекомендаций нет, поэтому производители сельскохозяйственных товаров на свой риск приобретают ту технику, которая, по их мнению, лучше.

Цель исследования. Обобщить за период 2015-2022 гг. результаты испытаний в условиях южного региона России различных зерноуборочных комбайнов (с участием авторов) и дать комплексную оценку эффективности их работы.

Материалы и методы. Испытания выполнены в хозяйствующих субъектах по единой стандартизованной программе и методике (ГОСТ 28301-2015, ГОСТ 24055-2016, СТО АИСТ 8.22-2010). Комплексную оценку комбайнов проводили по эксплуатационно-технологическим показателям (производительность, потери и качество зерна), энергозатратам, экономическим критериям и зависимости от типа конструкции комбайна. Статистическая обработка полученных данных показала их достаточную достоверность.

Результаты и обсуждение. В целом потребность в зерноуборочных комбайнах в России обеспечивают семь предприятий, из них три завода поставляют 97% техники: это ООО «КЗ «Ростсельмаш» (75,3%), *Claas*, Краснодар (6,4%) и АО «Брянсксельмаш» (15%). Еще четыре предприятия занимаются штучным производством комбайнов (около 230 в год). На их долю приходится порядка 3% от общего выпуска, причем в основном воспроизводятся

зарубежные комбайны (Росстат: Обеспеченность тракторами и комбайнами сельскохозяйственных организаций Российской Федерации в 2022 году. С. 5-6) [1].

ООО «КЗ Ростсельмаш» производит отечественные комбайны модельного ряда *Nova*, *Vector*, *Acros* и *Torum* [2]. Краснодарский завод выпускает модельный ряд *Tuscano* фирмы *Claas*, недавно линейка пополнилась модельным рядом *Trion*. АО «Брянсксельмаш» воспроизводит белорусские комбайны «Палессе». Общая потребность в зерноуборочных комбайнах разных моделей для России составляет порядка 240-260 ед. При гарантийном сроке службы 10 лет годовое производство должно составлять 24-26 тыс. ед. Современное производство комбайнов составляет 5-5,5 ед. в год, в 5 раз меньше. Это приводит к увеличению сроков уборки и естественным потерям зерна [3].

Экспертиза выявила главные технические характеристики 12 исследуемых моделей комбайнов (Чаплыгин М.Е. Повышение эффективности использования зерноуборочного комбайна путем обоснования оптимальной ширины захвата жатки для условий Юга России: автореф. ... канд. техн. наук, 2015. 20 с.), от которых зависят производительность и качество их работы [4, 5].

Из *таблицы 1* следует, что пропускная способность (класс) этих комбайнов находится в пределах от 6,7 кг/с (*Nova S 340*) до 13,8 кг/с (*John Deere S690*), а мощности установленных двигателей – от 180 до 530 л.с. Для оценки эффективности работы молотилки комбайнов очень важен такой показатель,



Технические характеристики современных зерноуборочных комбайнов различной конструкции												
Table 1												
Показатель	Nova S 340	«Дон-1500Б»	PCM-101 «Вектор 4102	PCM-142 Acros 530	КЗС-1218 «Палес» GS12	Claas Tulcano 450	PCM-181 Torum 740	Claas Lexion 560	Laverda M 306	John Deere S690	Massey Ferguson 9790	Fendt 9460R
Изготовитель		«Ростсельмаш»			«Брянк-сельмаш»	«Клсаа» Россия	«Ростсельмаш2	Claas, ФРГ	Laverda, Италия	John Deere, США	Massey Ferguson, США	Fendt, ФРГ
Пропускная способность, кг/с	6,7	9,5	7,8	9,7	12,8	11,5	12,6	11,3	12,7	13,8	11,9	12,3
Мощность двигателя, л.с.	180	235	210	280	330	299	400	340	305	530	350	459
Удельная мощность двигателя, л.с/ (кг·с)	32,2	24,7	26,9	28,8	25,8	26,0	31,7	30,1	24,0	38,4	29,4	37,3
Ширина молотилки, мм	1200	1500	1200	1500	1500	1600	1500	1700	1600	1400	1408	1410
Ширина захвата жатки, м	6,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,6	9,0	7,6	6,0	10,7	7,5	9,2
Количество клавиш соломотряса	4	5	4	5	5	6	-	6	6	-	-	-
Размеры молотильного аппарата, мм: тип* диаметр барабана (ускорителя)/ротора длина	1 600 1185	1 800 1480	1 800 1180	1 800 1480	2 800 (600) 1480	2 450 1580	4 762 3200	3 600 1680	2 600 1580	4 762 3124	4 700 3556	4 800 3560
Площадь сепарации, м²: подбарабана (обм.+сеп.) соломотряса решет очистки	0,93 4,34 3,59	1,36 6,15 4,74	1,1 5,0 3,59	1,38 6,15 4,74	2,39 6,15 5,00	1,22 7,0 5,65	5,4 - 5,2	1,74 7,48 5,8	2,25 6,81 5,58	2,64 - 5,25	3,0 - 5,4	3,29 - 5,35
Угол обхвата подбарабана, град входное/основное	146	130	130	130	213	60/151	360	142	106			
Емкость: зернового бункера, м³ топливного бака, л	4,9 300	6,0 540	6,0 540	9,0 540	9,5 600	9,0 650	10,5 850	10,5 800	9,0	14,1 1155	10,6 606	12,3 870
Масса (с жаткой), кг	12400	12590	11400	15704	16600	12530	18500	15750	13500	17636	14750	16960
Тип молотильного аппарата: 1 – однобарабанный, бичевой, отбойный битей, клавишный соломотряс; 2 – двухбарабанный, бичевой, отбойный битей, клавишный соломотряс; 3 – двухбарабанный, бичевой, отбойный битей, роторный соломосепаратор; 4 – аксиально-роторный.												

Таблица 2

Table 2

ОБОБЩЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СОВРЕМЕННЫХ
ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ В УСЛОВИЯХ ЮЖНОГО РЕГИОНА РОССИИ
GENERALIZED RESULTS FROM OPERATIONAL AND TECHNOLOGICAL EVALUATION OF MODERN GRAIN HARVESTERS
WITH VARIOUS DESIGNS IN SOUTHERN RUSSIA

Марка комбайна	Средняя уборочная урожаемость зерна ц/га	Производительность за 1 ч основного времени: тип/га/г	Удельный расход топлива за время смены: кг/т (кг/га)	Потери зерна, %: общие/ за молотилкой/ за жаткой	Дробление зерна, %	Засоренность бункерного зерна, %	Масса 1000 зерен, г
Nova S 340	58,8	1/1,65/9,7	1,65 (9,70)	1,9/1,49/0,41	1,7	0,5	40,9
«Дон-1500Б»	61,9	1/2,0/12,9	1,50 (9,30)	1,40/0,98/0,42	2,2	1,2	36,7
PCM-101 «Вектор 410»	57,8	1/1,84/10,63	2,55 (14,65)	1,89/1,44/0,45	1,78	0,5	41,7
PCM-142 Acros 530	52,4	1/3,12/16,3	2,3 (12,1)	2,24/0,70/1,54	3,9	0,47	35,7
K3C-1218 «Палессе GS12»	59,0	2/2,90/17,1	1,79 (10,56)	2,22/2,16/0,06	4,9	2,1	39,6
Claas Tukano 450	50,3	2/3,12/15,7	1,97 (9,9)	0,92/0,58/0,34	1,3	0,7	41,2
PCM-181 Torum 740	49,4	4/3,34/16,5	2,43 (12,0)	1,85/0,31/1,54	0,31	0,73	35,0
Claas Lexion 560	52,7	3/4,00/21,2	2,3 (12,0)	1,55/1,10/0,45	3,7	1,6	36,7
Laverda M 306	58,9	2/3,10/18,5	1,5 (8,7)	0,70/40/0,34	4,2	0,2	36,7
John Deere S 690	60,9	4/4,79/29,2	2,25 (13,7)	2,93/2,82/0,11	0,6	2,5	36,7
Massey Ferguson 9790	42,0	4/3,90/16,4	2,7 (11,5)	2,95/2,62/0,33	0,23	0,20	34,2
Fendt 9460R	42,0	4/5,20/21,84	2,4 (10,0)	1,9/1,5/0,4	0,47	0,25	34,2

как удельная мощность двигателя на единицу пропускной способности. Для всех испытанных комбайнов она находится в пределах 24,0–38,4 л.с/(кг·с): минимальная у *Laverda M 306* и «Дон-1500Б» – соответственно 24,0 и 24,7, максимальная у *John Deere S690* – 38,4 л.с/(кг·с).

Пропускную способность комбайнов с классической (барабанной) схемой молотилки [6] рассчитывали по формуле:

$$q_k = 1,83i_k - 0,83, \quad (1)$$

где i_k – параметрический индекс для каждого комбайна [7].

Пропускная способность комбайнов с аксиально-роторной молотилкой [8]

$$q_k = 1,83[N_e/126 + 0,5(F_{nc} + F_p)] - 0,83, \quad (2)$$

где F_{nc} – площадь развертки подбарабана ротора, включая молотильную и сепарирующую секции; N_e – фактическая мощность двигателя; F_p – площадь решет.

В таблице 2 обобщены результаты эксплуатационно-технологических испытаний комбайнов. Как видно, большинство моделей испытаны на уборке зерновых культур с урожайностью в пределах 50–60 ц/га и только два комбайна – *Massey Ferguson 9790* и *Fendt 9460R* на урожайности 42,5. Наиболее производительными оказались *Claas Lexion 560* – 4 га/ч основного (чистого) времени, *John Deere S690* – 4,79 га/ч и *Fendt 9460 R* – 5,20 га/ч. Произво-

дительность отечественных комбайнов определена в пределах 1,65–3,34 га/ч основного времени. Такую разницу можно объяснить двумя причинами: более мощными двигателями иностранных моделей и увеличенными потерями зерна за молотилкой по сравнению с потерями за отечественными комбайнами при меньшей урожайности – 42 ц/га.

Удельный расход топлива на 1 га убираемой площади самый большой отмечен у комбайна PCM-101 «Вектор 410» – 14,65 кг/га, наименьший у комбайна «Дон-1500Б» – 9,3 кг/га, у остальных варьировался от 9,7 до 13,7 кг/га. Наименьшие потери зерна (общие) были у *Laverda M 306* – 0,74% к убранному зерну, наибольшие – 2,93% у *John Deere S 690* и 2,95% у *Massey Ferguson 9700*. Из отечественных моделей меньше потери зерна у комбайна «Дон-1500Б» – 1,4%. О степени совершенства молотилки комбайнов можно судить по потерям зерна за ней. По этому показателю самые лучшие результаты у отечественных комбайнов PCM-181 *Torum 740* – 0,31% и PCM-142 *Acros 530* – 0,7%. У остальных потери зерна за молотилкой в 1,5–2,5 раза выше.

Наименьшие показатели дробления зерна у комбайнов с аксиально-роторной молотилкой – от 0,2 до 0,73% при нормативе 2%. Исследованию работы классических и аксиально-роторных молотилок посвящены многие работы [9–11]. Установлено, что их более высокая производительность достигается благодаря увеличенной площади сепарации и более щадящему режиму обмолота [12, 13].

Таблица 3

Table 3

ДИНАМИКА ПОВЫШЕНИЯ ЗАТРАТ ДЕНЕЖНЫХ СРЕДСТВ НА ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ КОМБАЙНОВ В СРАВНЕНИИ С БАЗОВОЙ МОДЕЛЬЮ «ДОН-1500Б» КАК НАИБОЛЕЕ МАССОВОЙ В ХОЗЯЙСТВАХ КУБАНИ (ДО 60 % В ПАРКЕ)
FINANCIAL DYNAMICS OF USING VARIOUS COMBINES IN KUBAN FARMS COMPARED TO THE MOST COMMON DON-1500B BASE MODEL (UP TO 60% FLEET SHARE)

Марка комбайна	Прямые затраты, % к базе	Капитальные вложения, % к базе	Потребность в топливе, т на уборку 3500 га		Потребность в механизаторах, % к базе	
			факт	% к базе	факт	% к базе
«Дон-1500Б»	100	100	32,5	100	19	100
PCM-101 «Вектор 410»	152	176	36,6	113	24	126
PCM-142 Acros 530	145	146	42,4	130	16	84
PCM-181 Torum 740	98	145	42	129	12	63
КЗС-1218 «Палессе GS12»	128	118	35,4	109	13	68
Claas Tukano 450	98	176	34,7	106,7	14	74

Важным показателем эксплуатационно-технологической оценки является засоренность бункерного зерна, так как она влияет на комплектацию послеуборочной линии по доведению бункерного вороха до кондиционной чистоты [14]. У отечественных комбайнов этот показатель находится в пределах 0,47-0,73%, у зарубежных – 0,2-2,1%.

Сравнение комбайнов с разными типами молотилок выявило следующее:

- для однобарабанных молотилок (тип 1) средняя мощность составляет 26,8, для двухбарабанных (тип 2) – 25,9, для гибридных (тип 3) – 30,1 и аксиально-роторных (тип 4) – 34,2 л.с/(кг·с);
- средняя производительность за 1 ч основного времени работы для типов 1-4 соответственно 2,154, 3,04, 4,04, 4,3 га/ч;
- удельный расход топлива 11,4, 16,4, 21,2, 11,8 кг/га;
- общие потери зерна 1,86, 1,57, 1,55, 2,4% от собранного зерна;
- дробление зерна 2,4, 3,1, 3,7, 0,4%;
- засоренность бункерного зерна соответственно 0,67, 1,4, 1,6, 0,4% (без учета комбайна *John Deere S 690*, у него засоренность оказалась 2,5%).

Анализ исходных данных для расчета экономической эффективности современных зерноуборочных комбайнов [15] показывает, что получить достаточно объективную сравнительную эффективность довольно затруднительно по ряду причин.

Во-первых, стоимость почти всех комбайнов, установленная заводом-изготовителем, не пропорциональна увеличению производительности. При росте цены в 2-2,5 раза производительность увеличивается не более, чем в 1,6-1,8 раза. Видимо, конъюнктура рынка влияет на цену комбайна сильнее, чем принцип гармоничности сочетания производительности и цены. В результате применения всех новых марок комбайнов повышается себестоимость зерна. Например, если взять за базу комбайн «Дон-1500Б», то для «PCM-101 Вектор 410» производительность в 1 ч основного времени на 18% меньше, а цена выше на 39%, аналогично PCM-142 *Acros 530* повышают производительность на 26%, а стоимость

растет на 73%. Производительность «Дон-1500Б» в среднем 1,6 га/ч основного времени, а *Massey Ferguson 9790* – 2,89 га /ч, т.е. производительность повысилась на 80%, цена – в 4 раза и т.д.

Вторая причина – большая разница в снижении производительности комбайнов за 1 ч эксплуатационного времени по сравнению с производительностью за 1 ч основного чистого времени, что дополнительно влияет на капитальные издержки. К примеру, если взять за базу комбайн «Дон-1500Б», то разница его производительности составляет 37%, комбайна PCM-101 «Вектор 410» – 60%, PCM-142 *Acros 530* – 37%, *Claas Tukano 450* – 43%, *Laverda M306* – 28%, КЗС-1218 «Палессе GS12» – 35%, *Massey Ferguson 9790* – 25,6%, PCM-181 *Torum 740* – 40%, *John Deere S690* – 21% и т.д.

Эти две причины позволяют сделать вывод, что при выборе лучшего для хозяйства комбайна прежние критерии экономической эффективности – минимум капитальных затрат и минимум эксплуатационных издержек уже не так действенны. Все новые комбайны увеличивают эксплуатационные издержки и капитальные затраты, как и стоимость уборки зерна в целом. Соотношение затрат при использовании разных марок комбайнов представлено в *таблице 3*.

Таким образом, все новые марки по сравнению с комбайном «Дон-1500Б» увеличивают прямые затраты в 1,17-1,52 раза (за исключением PCM-181 *Torum 740*), капитальные затраты – в 1,18-2,24 раза, а потребность топлива – в 1,09-1,47 раза в зависимости от модели. Исходя из этого, возрастает роль энергетического и социального (кадрового) факторов. То есть, сколько требуется топлива на уборку 1 т зерна или с 1 га и сколько механизаторов для уборки заданной площади за определенное время, к примеру, 8-10 дней.

Разброс данных по расходу топлива на уборку урожая с 1 га оказался не очень большим. Минимальный расход получается у комбайнов *Laverda M 306* – 8,7 кг/га и «Дон-1500Б» – 9,3 кг/га, а максимальный у *John Deere S690* – 13,7 кг/га, PCM-142

Acros 530 и *PCM-181 Torum 740* – по 12 кг/га, в среднем тратится 11,2 кг/га.

За счет роста производительности новых комбайнов класса свыше 9 кг/с снижается необходимое количество механизаторов, и это становится чуть ли ни главным критерием. Убирать зерно все равно надо, затраты нести приходится, а профессиональных механизаторов не хватает даже в крупных агрохолдингах. По этой причине хозяйства делают выбор в пользу мощных комбайнов. Если раньше была такая логика: чтобы снизить себестоимость уборки, надо сократить эксплуатационные издержки и капитальные затраты, то сейчас – убрать с поля зерно любой ценой. Прежде была популярна рекомендация: для небольших уборочных площадей применять комбайны меньшего класса (4-6 кг/с), а для крупных хозяйств больше – 10 кг/с [16, 17]. Это оправдывалось тем, что при сложившихся тогда ценах обеспечивалась быстрая окупаемость комбайнов (1,5-2 года). Сейчас временной порог сдвигается до 2,5-3,5 лет или частично компенсируется повышением стоимости зерна [18]. По факту для малых (но не меньше 500 га) и средних по масштабам посевных площадей рекомендуются комбайны от 6 до 8 кг/с, а для больших площадей – более высоких классов и особенно с аксиально-роторной молотилкой. Можно полагать, что при гармоничном сочетании стоимости комбайнов и их производительности прежняя рекомендация останется в силе. Но сейчас уже стало ясно, что снятие с производства комбай-

на «Дон- 1500Б» было преждевременным.

Выводы

Современный рынок зерноуборочных комбайнов весьма насыщен моделями разными по конструкции, производительности и стоимости, и для производителя сельскохозяйственных товаров выбор лучшего варианта представляет определенную проблему.

Все новые комбайны имеют повышенную стоимость, не пропорциональную росту производительности, что затрудняет получение достаточно достоверной оценки их эффективности в денежном выражении.

При выборе лучшего для хозяйств комбайна важными критериями являются количество топлива на уборку зерна с определенной площади за нормативный агросрок и требуемое количество механизаторов.

По многим эксплуатационно-технологическим показателям отечественный комбайн «Дон-1500Б» и его модификация занимает лучшие позиции, поэтому можно считать, что снятие его с производства является преждевременным.

Для уборки хлебов урожайностью свыше 60 ц/га более предпочтительны комбайны с аксиально-роторной молотилкой.

Отечественный комбайн *PCM-181 Torum 740* и его модификации *Torum 750* и *Torum 780* по многим показателям эксплуатационно-технологической оценки не уступают зарубежным аналогам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. Система машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации сельскохозяйственного производства на период до 2020 года // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2013. №6. С. 6-10. EDN: RVTBNJ.
- Ломакин С.Г., Бердышев В.Е. Анализ технического уровня зерноуборочных комбайнов «Ростсельмаш» // *Вестник МГАУ имени В.П. Горячкина*. 2018. №6. С. 34-42. DOI: 10.26897/1728-7936-2017-6-34-42.
- Федорова О.А., Поддубный О.И. Анализ парка зерноуборочных комбайнов в Волгоградской области // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2018. N1 (49). С. 298-303. DOI: 10.32786/2071-9485-2018-01-298-303.
- Жалнин Э.В., Ценч Ю.С., Пьянов В.С. Методика анализа технического уровня зерноуборочных комбайнов по функциональным и конструктивным параметрам // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N2. С. 4-8. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-2-4-8.
- Zhalnin E.V., Astafyev V.L., Chaplygin M.E. Analytical criteria for evaluation of engineering level of grain harvesters. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2020. Vol. 8. N9. 6546-6552. DOI: 10.30534/ijeter/2020/260892020.
- Ряднов А.И., Тронеv С.В., Скворцов И.П. Теоретическая оценка пропускной способности рабочих органов зерноуборочного комбайна // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2014. N2 (34). С. 189-194. EDN: SFFKZV.
- Zhalnin E.V., Chaplygin M.E. Improving the design of combine harvesters by harmonizing their basic technical parameters. *Engineering Technologies and Systems*. 2023. N33(3). 403-416. DOI: 10.15507/2658-4123.033.202303.403-416.
- Tronev S.V., Ovchinnikov A.S., Ryadnov A.I. et al. Application of a structural-topological model in the optimization of the working elements of a combine harvester. *IOP: Earth and Environmental Science*. 2019. 012121. DOI: 10.1088/1755-1315/341/1/012121.
- Бердышев В.Е. Оптимизация конструктивных и технологических параметров аксиально-роторной молотильно-сепарирующей системы // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2012. N3 (19). С. 114-117.
- Бердышев В.Е. Оптимизация конструктивно-техно-

- логических параметров «классической» молотильно-сепарирующей системы зерноуборочного комбайна // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2012. N3 (27). С. 175-178.
11. Чаплыгин М.Е., Жалнин Э.В. Определение качества работы зерноуборочных комбайнов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N4. С. 71-76. DOI: 10.22314/2073-7599-2019-13-4-71-76.
 12. Benaseer S., Masilamani P., Albert V.A. et al. Impact of harvesting and threshing methods on seed quality – A review. *Agricultural Reviews*. 2018. Vol. 39. 183-192. DOI: 10.18808/ag.P-1803.
 13. Fu J., Chen Z., Han L., Ren L. Review of grain threshing theory and technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018. Vol. 11. N3. 12-20. DOI: 10.25165/IJABE.V11I3.3432.
 14. Пахомов В.И., Брагинцев С.В., Рудой Д.В., Бахчевников О.Н. Пневматическое молотильное устройство // *Техника и оборудование для села*. 2023. N6. С. 28-30. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-6-28-30.
 15. Оробинский В.И., Ворохобин А.В., Корнев А.С. и др. Влияние фракционного состава зернового вороха на уровень травмирования и посевные качества семян // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2021. Т. 14. N3. С. 12-17. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2021_3_12.
 16. Чаплыгин М.Е., Давыдова С.А., Подзоров А.В. Современные требования к техническому уровню зерноуборочных комбайнов // *Технический сервис машин*. 2020. Т. 58. N4(140). С. 29-39. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-4-29-39.
 17. Ломакин С.Г., Бердышев В.Е. Формирование парка зерноуборочных комбайнов с учетом условий уборки // *Вестник МГАУ имени В.П. Горячкина*. 2016. N5. С. 7-12.
 18. Годжаев З.А., Шевцов В.Г., Лавров А.В. и др. Стратегия машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России до 2030 года (прогноз) // *Технический сервис машин*. 2019. N4(137). С. 220-229. EDN: DMOGNR.

REFERENCES

1. Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P. System of machines and technologies for comprehensive mechanization and automation of agricultural production until 2020. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2013. N6. 6-10 (In Russian). EDN: RVTBHJ.
2. Lomakin S.G., Berdyshev V.E. Assessing technical performance level of Russian ROSTSELMASH combines. *Vestnik of Moscow Goryachkin State Agroengineering University*. 2018. N6. 34-42 (In Russian). DOI: 10.26897/1728-7936-2017-6-34-42.
3. Fedorova O.A., Poddubny O.I. Analysis of the combine harvester fleet in the Volgograd region. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2018. N1 (49). 298-303 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2018-01-298-303.
4. Zhalnin E.V., Tsench Yu.S., P'yanov V.S. Analysis method of combine harvesters technical level by functional and structural parameters. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N2. 4-8 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-2-4-8.
5. Zhalnin E.V., Astafyev V.L., Chaplygin M.E. Analytical criteria for evaluation of engineering level of grain harvesters. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2020. Vol. 8. N9. 6546-6552 (In English). DOI: 10.30534/ijeter/2020/260892020.
6. Ryadnov A.I., Tronev S.V., Skvortsov I.P. Theoretical assessment of combine harvester working parts throughput. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2014. N2 (34). С. 189-194 (In Russian). EDN: SFFKZV.
7. Zhalnin E.V., Chaplygin M.E. Improving the design of combine harvesters by harmonizing their basic technical parameters. *Engineering Technologies and Systems*. 2023. N33(3). 403-416 (In English). DOI: 10.15507/2658-4123.033.202303.403-416.
8. Tronev S.V., Ovchinnikov A.S., Ryadnov A.I. et al. Application of a structural-topological model in the optimization of the working elements of a combine harvester. *IOP: Earth and Environmental Science*. 2019. С. 012121 (In English). DOI: 10.1088/1755-1315/341/1/012121.
9. Berdyshev V.E. Optimization of design and technological parameters for an axial-rotor threshing-separating system. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2012. N3 (19). 114-117 (In Russian).
10. Berdyshev V.E. Optimization of design and technological parameters for the 'classical' threshing-separating system in grain harvesters. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2012. N3 (27). 175-178 (In Russian).
11. Chaplygin M.E., Zhalnin E.V. Determining the Performance Quality of Combine Harvesters Operating. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019. Vol. 13. N4. 71-76 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2019-13-4-71-76.
12. Benaseer S., Masilamani P., Albert V.A. et al. Impact of harvesting and threshing methods on seed quality – A review. *Agricultural Reviews*. 2018. Vol. 39. 183-192 (In English).
13. Fu J., Chen Z., Han L., Ren L. Review of grain threshing theory and technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018. Vol. 11. N3. 12-20 (In English). DOI: 10.25165/IJABE.V11I3.3432.
14. Pakhomov V.I., Braginets S.V., Rudoi D.V., Bakhchevnikov O.N. Pneumatic threshing device. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023. N6. 28-30 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2023-6-28-30.
15. Orobinsky V.I., Vorokhobin A.V., Kornev A.S. et al. Fraction composition of the grain heap and its influence on the

- level of grain damage and sowing qualities of seeds. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2021. Vol. 14. N3. 12-17 (In Russian). DOI: 10.53914/issn2071-2243_2021_3_12.
16. Chaplygin M.E., Davydova S.A., Podzorov A.V. Modern requirements for the technical level of combine harvesters. *Machinery Technical Service*. 2020. Vol. 58. N4(140). 29-39 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-4-29-39.
17. Lomakin S.G., Berdyshev V.E. Formation of combine harvesters fleet with account of harvesting conditions. *Vestnik of Moscow Goryachkin State Agroengineering University*. 2016. N5. 7-12 (In Russian).
18. Godzhaev Z.A., Shevtsov V.G., Lavrov A.V. et al. Strategy of Russian agricultural machinery modernization until 2030 (forecast). *Machinery Technical Service*. 2019. N4(137). 220-229 (In Russian). EDN: DMOGNR.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Чаплыгин М.Е. – участие в испытаниях, сбор и обработка результатов, составление начального варианта статьи, доработка текста и оформление материалов, формулирование общих выводов, анализ литературных источников, итоговая доработка статьи в соответствии с нормативными требованиями;

Жалнин Э.В. – формулирование основных целей и задач исследования, первая редакция текста статьи и подготовка обобщенных таблиц, анализ литературных источников, формулирование общих выводов, итоговая доработка статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Chaplygin M.E. – participating in tests, collecting and processing results, drafting the initial manuscript, enhancing the text and material design, formulating general conclusions, literature review, final revision of the article to meet regulatory requirements;

Zhalnin E.V. – formulating the study's main goals and objectives, proofreading the initial draft of the article, creating the generalized tables, literature review, formulating general conclusions, final revision of the article.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

05.03.2024
07.05.2024

EDN: TAJJVQ

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-55-60



Научная статья

УДК 631.348.45



Определение параметров опрыскивателя для плодопитомников

Рамазан Мусаевич Тавасиев¹,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: tikis@yandex.ru;

Аркадий Павлович Дзиццов¹,
кандидат технических наук, старший преподаватель,
e-mail: range-rover_sport@mail.ru;

Авс Ахмад²,
младший научный сотрудник,
e-mail: aws.ahmad318@gmail.com

¹Горский государственный аграрный университет, Республика Северная Осетия-Алания, г. Владикавказ, Российская Федерация;

²Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отмечено, что в промышленных насаждениях обработку от вредителей и сорняков проводят при помощи опрыскивателей. Для установления необходимого расхода жидкости необходимо пользоваться расчетами при регулировке опрыскивателя на заданный расход жидкости. Разработанный в Горском аграрном университете малогабаритный самоходный агрегат с дистанционным управлением «ГНОМ» предназначен для разного применения, в том числе гербицидного опрыскивания растений в плодопитомниках. (*Цель исследования*) Обосновать оптимальные параметры распылительного узла модуля у агрегата для гербицидной обработки, исследовать зависимость расхода и качества распыла жидкости от давления в системе. (*Материалы и методы*) Для исследования характеристик распыла создана лабораторная установка. В зоне распыла помещали нейлоновые нити диаметром 100 и 250 микрон, результат распыла жидкости фиксировали цифровой фотокамерой Nikon COOLPIX 58100. В каждом последующем опыте давление жидкости увеличивали на 0,05 мегапаскаля. (*Результаты и обсуждение*) Получены снимки факела распыла жидкости малогабаритного самоходного агрегата для определения категории распыла жидкости по размерам капель. Теоретически обосновали влияние изменения объема воздуха в баке на давление и качество распыла жидкости, а также зависимость дисперсности от давления рабочей жидкости. (*Выводы*) Анализ показал, что при давлении рабочей жидкости в гидросистеме от 0,65 до 0,75 мегапаскаля и угле распыла 90 градусов наблюдается наиболее качественный мелкодисперсный распыл при расходе рабочей жидкости в диапазоне 0,4-0,6 литра в минуту, что весьма существенно влияет на увеличение обрабатываемой площади при одной заправке бака самоходного агрегата.

Ключевые слова: плодопитомник, гербицидная обработка, самоходный агрегат, дистанционное управление, форсунка, показатели распыла, давление, расход рабочей жидкости.

■ **Для цитирования:** Тавасиев Р.М., Дзиццов А.П., Ахмад А. Определение параметров опрыскивателя для плодопитомников // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N2. С. 55-60. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-55-60. EDN: TAJJVQ.

Scientific article

Determination of Sprayer Parameters for Fruit Nurseries

Ramazan M. Tavasiev¹,
Dr.Sc.(Eng.), professor, e-mail: tikis@yandex.ru;
Arkady P. Dzitsoev¹,
Ph.D. (Eng.), senior lecturer,
e-mail: range-rover_sport@mail.ru;

Aws Ahmad²,
junior researcher,
e-mail: aws.ahmad318@gmail.com

¹Gorsky State Agrarian University, Vladikavkaz, Russian Federation;

²Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper highlights that in industrial plantings, pests and weeds control is conducted using sprayers. To establish the required liquid flow rate, it is necessary to use calculations for sprayer adjustment. A small-sized, remotely controlled «GNOM»

unit, developed at Gorsk Agrarian University, is designed for various tasks, including herbicidal spraying in fruit nurseries. (*Research purpose*) The research aims to substantiate the optimal parameters of the spraying unit in the herbicide treatment module. It also seeks to investigate the dependence of the flow rate of the working fluid and quality of liquid spray on the pressure in the system. (*Materials and methods*) A laboratory installation was developed to study the spray characteristics. Nylon threads with diameters of 100 and 250 micrometers were placed within the spray zone, and the resulting liquid spray was captured using a Nikon COOLPIX 58100 digital camera. Each subsequent experiment was carried out at a liquid pressure of 0.05 megapascals more than the previous one. (*Results and discussion*) The experiments resulted in obtaining images of the spray swath for a small-sized self-propelled unit, allowing for the categorization of the spray based on droplet sizes. The theoretical analysis demonstrated how changes in the air volume within the tank influence both the pressure and quality of the liquid spray. Additionally, it showed how the dispersion depends on the pressure of the working fluid. (*Conclusions*) The analysis of the working fluid spray showed that at a pressure in the hydraulic system in the range from 0.65 to 0.75 megapascals and a spray angle of 90 degrees, the highest quality fine spray is observed, the flow rate of the working fluid is in the range of 0.4-0.6 liters per minute, which very significantly affects the size of the treated area in the direction of its increase at one tank refueling unit.

Keywords: fruit nursery, herbicide treatment, self-propelled unit, remote control, nozzle, spray characteristics, pressure, working fluid flow rate.

For citation: Tavasiev R.M., Dzitsoev A.P., Ahmad A. Determination of sprayer parameters for fruit nurseries. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 55-60 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-55-60. EDN: TAJJVQ.

Сорняки забирают из почвы большое количество влаги и питательных веществ, затеняют и угнетают культурные растения, создают очаги для массового развития болезней и вредителей. Сильная засоренность нарушает процесс фотосинтеза, препятствует нормальному развитию плодово-ягодных культур [1]. В промышленных насаждениях гербициды вносят при помощи опрыскивателей, оборудованных для дозированного внесения в ряды [2, 3]. Для установления точного количества при внесении гербицидов необходимо пользоваться расчетами при регулировке опрыскивателя на заданный расход жидкости.

В Горском ГАУ разработан малогабаритный самоходный агрегат с дистанционным управлением «ГНОМ» для использования в плодopитомниках [4]. Он оснащен двумя рабочими органами: фрезой для рыхления поверхностного слоя почвы в междурядьях саженцев плодовых деревьев с одновременным механическим уничтожением сорняков; опрыскивателем для химического уничтожения сорняков (рис. 1).

Исследование работы и обоснования параметров опрыскивателя важно с точки зрения возможностей оптимизации процесса при выполнении основного требования – минимального расхода рабочей жидкости (Федоренко В.Ф., Мишуrow Н.П., Буклагин Д.С. и др. Цифровое сельское хозяйство: состояние и перспективы развития. М.: Росинформагротех, 2019. 316 с.). Как показали предварительные опыты, экспериментальный агрегат не уступает по качеству распыла стандартным устройствам (Якушев В.В. Точное земледелие: теория и практика. – СПб: АФИ, 2016. 364 с.). В связи с тем, что для малогабаритных опрыскивателей предпочтителен малый расход жидкости в единицу времени, принято

решение использовать экспериментальный распылитель в конструкции самоходного агрегата (Астахов В.С., Иванчиков Г.О. Точное земледелие как элемент ресурсосбережения и экологической безопасности; мат. междунар. науч. конф. «Молодежь и инновации». Горки, 2022. С. 87-91).

Цель исследования. Обосновать оптимальные параметры распыливающего узла агрегата, определить зависимость расхода от качества распыла рабочей жидкости от давления в системе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Разработана и изготовлена лабораторная установка (рис. 2). Она состоит из бака 1 с рабочей жидкостью 7, компрессора 2 и распылителя 3, снабжена манометром 4 и уровнемером 5. Для регулирования потока рабочей жидкости и подаваемого давления предусмотрены соответственно кран 6 и запорный вентиль 8.



Рис. 1. Самоходный агрегат «ГНОМ»

Fig. 1. Self-propelled unit GNOM

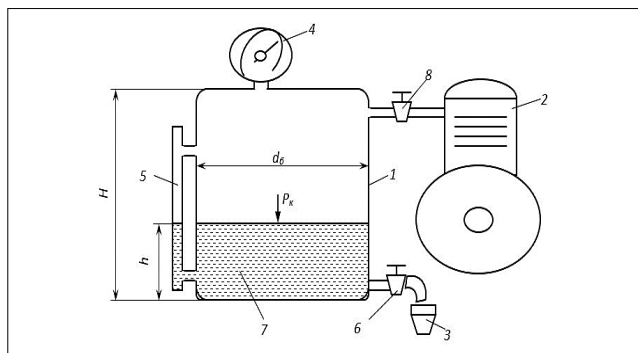


Рис. 2. Принципиальная схема лабораторной установки
Fig. 2. Schematic diagram of the laboratory installation

Ввиду малых концентраций статические и гидродинамические свойства рабочей жидкости практически не отличаются от свойств воды, которую использовали при лабораторных исследованиях [4].

Давление рабочей жидкости на входе в распылитель

$$P_p = P_k + P_B, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где P_k и P_B – давление, создаваемое компрессором и массой воды.

$$P_B = \rho_B \cdot g \cdot h, \quad (2)$$

где ρ_B – плотность воды, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; h – высота столба воды в баке, м.

$$\text{Тогда } P_p = P_k + \rho_B \cdot g \cdot h. \quad (3)$$

Объем рабочей жидкости для проведения одного опыта

$$V_{жс} = \frac{\pi d_6^2 h}{4}, \text{ следовательно } h = \frac{4V_{жс}}{\pi d_6^2}. \quad (4)$$

Максимальный расход жидкости на проведение одного опыта составляет 0,5 л. С учетом диаметра бака и расхода жидкости по формуле (4) для одного опыта высота столба жидкости в баке $h = 7$ мм. Согласно формуле (2) $P_B = 7 \cdot 10^{-4}$ МПа, среднее значение давления на входе в распылитель $P_{рсп} = 0,42$ МПа.

Относительная доля давления P_B , создаваемого массой воды,

$$\Delta = \frac{P_B}{P_{рсп}} \cdot 100 = \frac{7 \cdot 10^{-4}}{0,42} \cdot 100 = 0,17\%, \quad (5)$$

поскольку эта величина пренебрежимо мала и не превышает ошибку опыта, можно принять $P_p = P_k$.

На протяжении опыта рабочая жидкость убывает, ее уровень снижается, объем воздуха над жидкостью увеличивается, давление в баке уменьшается, т.е. имеет место изотермический процесс:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2. \quad (6)$$

Снижение давления жидкости влияет на точность и достоверность результатов исследований. Оценим степень этого влияния.

Из уравнения (5)

$$P_2/P_1 = V_1/V_2. \quad (7)$$

Первоначальный объем воздуха

$$V_1 = \frac{\pi d_6^2}{4} (H - h), \quad (8)$$

а объем воздуха при завершении опыта

$$V_2 = \frac{\pi d_6^2}{4} \cdot H. \quad (9)$$

Подставив значения V_1 и V_2 из (7) и (8) в равенство (6), получим:

$$P_2/P_1 = (H - h)/H; P_2/P_1 = 0,986. \quad (10)$$

Отклонение величины давления в баке от первоначального значения

$$\Delta = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \cdot 100\%; \Delta = \frac{P_1 - 0,986 P_1}{P_1} \cdot 100\% = 1,4\%. \quad (11)$$

Полученная величина меньше максимальной ошибки опыта и влиянием этого фактора на точность результатов опытов можно пренебречь.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. При обработке экспериментальных данных использованы стандартные методики по ГОСТ 34630-2019 «Машины для защиты растений. Опрыскиватели. Методы испытаний». На первом этапе для определения давления жидкости и зависимости от качества распыла в зону распыла помещали нейлоновые нити диаметром 100 и 250 мкм [5]. Момент распыла жидкости фиксировался цифровой фотокамерой *Nikon COOLPIX 58100* с разрешением 12,1 мегапикселя (Башкирев А.П., Шварц А.А., Шкабенко А.Ю. Условия применения опрыскивателей в сельскохозяйственном производстве; тр. межд. науч. конф. «Молодежь и XXI век». Курск, 2019. С. 261-264).

Воду заливали в бак и закрывали горловину. При закрытом кране включается компрессор для создания в баке избыточного давления (0,05 МПа). Каждый последующий опыт проводился при повышении давления жидкости с шагом 0,05 МПа [6]. При достижении определенного давления в баке компрессор выключается, кран 8 закрывается. Затем открывается кран 6 и фиксируется фотокамерой факел распыла жидкости с соответствующей нитью [7]. Анализ снимков в 10-кратном увеличении на экране монитора компьютера позволяет определить качество опрыскивания по категории распыла [8]. В данном эксперименте выделены крупнокапельный распыл (капли больше 250 мкм), мелкокапельный (100-250 мкм) и туманообразный (25-100 мкм) [9, 10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Согласно принятой методике проведены серии опытов, получены снимки факела распыла жидкости [11]. Капли жидкости идентифицировали по дисперсности и сравнили с

диаметром нити (Горюнов Н.Н. Способы настройки нормы расхода рабочей жидкости сельскохозяйственных опрыскивателей; межд. науч.-практ. конф. «Инновационные тенденции развития российской науки». Красноярск, 2022. С. 195-197).

На рисунке 3 представлены факелы распыла при давлении в гидросистеме 0,35 и 0,65 МПа, угле распыла 90° с использованием стандартных распылителей.

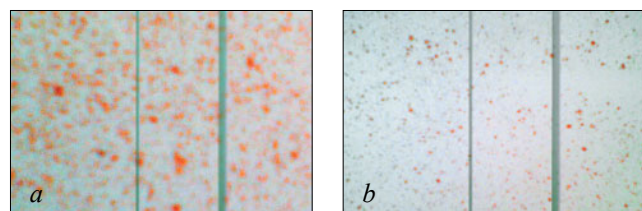


Рис. 3. Снимок факела распыла рабочей жидкости: а – $P = 0,35$ МПа; б – $P = 0,65$ МПа (увеличение 10-кратное)
Fig. 3. Image of the working fluid spray: а – $P = 0,35$ МПа; б – $P = 0,65$ МПа (10-fold increase)

Дисперсность распыла капель зависит от давления рабочей жидкости: крупнокапельный при 0,30, 0,35 МПа; мелкокапельный при 0,40, 0,45, 0,50, 0,55 МПа; туманообразный распыл при 0,60, 0,65, 0,70, 0,75 МПа.

Из графика зависимости расхода рабочей жидкости от давления (рис. 4) следует, что используемые в агрегате распылители значительно экономичнее по сравнению со стандартными [12]. При этом с повышением давления в системе распыл получается более мелкокапельный, стремится к туманообразному виду [13]. При давлении 0,35 МПа и выше расход жидкости стабилизируется на уровне 0,4-0,6 л/мин.

Обработку результатов и построение графика проводили на компьютере с использованием программы Excel. Зависимость расхода рабочей жидкости от давления для исследуемого распылителя представлена в виде линии тренда и описывается уравнением вида [14-16]:

$$q = 0,1472 \ln(p) + 0,0195. \quad (12)$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тавасиев Р.М., Дзиццов А.П. Агрегат для ухода за саженцами в питомниках // *Сельский механизатор*. 2021. N8. С. 16-17. EDN: RFTVIN.
2. Мирзаев М.А. Разработка алгоритма роботизированного устройства точного внесения средств защиты растений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N3. С. 74-80. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-3-74-80.
3. Денисов А.В., Усина Е.Е., Яковлев Р.Н. и др. Алгоритмы построения сетей радиомаяков с ячеистой топологией для локализации робототехнических систем в сельском хозяйстве // *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2019. N3(50). С. 57-65.
4. Андреев К.П., Аникин Н.В., Бышов Н.В. и др. Внедрение системы точного земледелия // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. 2019. N2(42). С. 74-80.
5. Baillie C.P., Thomasson J.A., Lobsey C.R. et al. A review of the state of the art in agricultural automation. *ASABE*. 2018. N1801589. DOI: 10.13031/aim.201801591.

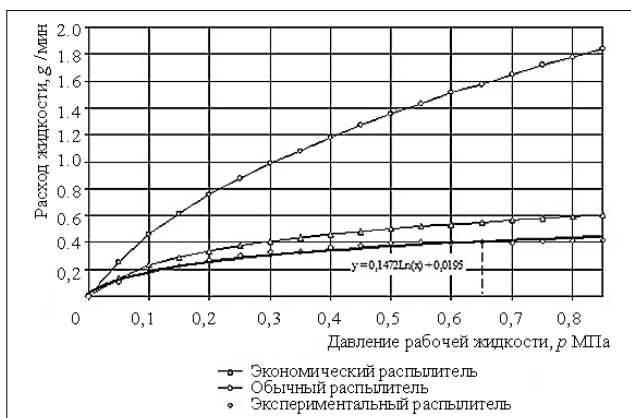


Рис. 4. Зависимость расхода рабочей жидкости от давления для экспериментального агрегата

Fig. 4. Dependence of working fluid flow on pressure in the experimental unit

Таким образом, в опрыскивателе для гербицидной обработки междурядий саженцев в плодпитомниках оптимальным давлением рабочей жидкости можно признать 0,60-0,75 МПа [17]. При таком давлении расход рабочей жидкости составляет 0,4-0,6 л в минуту, распыл туманообразный, что способствует увеличению обрабатываемой площади при одной заправке бака агрегата [18].

Выводы

В питомниках уход за саженцами весьма трудоемкая задача, особенно уничтожение сорняков в их междурядьях. Применение обычных тракторных агрегатов довольно сложно из-за ограниченной ширины междурядья саженцев (до 1 м). Новые конструктивные и технологические решения, в том числе использование сельскохозяйственных роботов [19], позволяют проводить операции с оптимальными эксплуатационными параметрами.

Обоснованы оптимальные параметры распыливающего узла агрегата «ГНОМ» при опрыскивании. Оптимальным давлением рабочей жидкости при гербицидной обработке междурядий саженцев в плодпитомниках, можно считать 0,60-0,75 МПа. Равномерный туманообразный распыл достигается при расходе жидкости 0,4-0,6 л в минуту.

6. Liu X., Chen S., Aditya S. et al. Robust fruit counting: Combining deep learning, tracking, and structure from motion. *IEEE/RSJ Intelligent Robots and Systems*. 2018. 1045-1052. DOI: 10.1109/IROS.2018.8594239.
7. Измайлов А.Ю., Хорт Д.О., Смирнов И.Г. и др. Анализ параметров работы устройства для гидравлического удаления сорной растительности // *Инженерные технологии и системы*. 2019. Т. 29. N4. С. 614-634. DOI: 10.15507/2658-4123.029.201904.614-634.
8. Измайлов А.Ю., Смирнов И.Г., Хорт Д.О. Цифровые агротехнологии в системе «Умный сад» // *Садоводство и виноградарство*. 2018. N6. С. 33-39. DOI: 10.31676/0235-2591-2018-6-33-39.
9. Bechar A., Vigneault C. Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems. *Biosystems Engineering*. 2017. Vol. 153. 110-128. DOI: 10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2016.11.004.
10. Смирнов И.Г., Хорт Д.О. Перспективы развития автоматизации и роботизации работ в полевых экспериментах // *Известия Международной академии аграрного образования*. 2018. N41-2. С. 60-64. EDN: VOGENY.
11. Шалова С.Х., Загазежева О.З. Обзор рынка сельскохозяйственных роботов и их влияние на экономическое развитие // *Известия ЮФУ*. 2019. N7(209). С. 57-70. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-7-57-70.
12. Киреев И.М., Коваль З.М. Способ и средство для совершенствования технологий опрыскивания растений // *Агрохимия*. 2017. N4. С. 87-96.
13. Лысов А.К., Корнилов Т.В., Наумова Н.И., Гончаров Н.Р. Новое оборудование для ультрамалообъемного опрыскивания в борьбе с вредителями капусты, экологическое и экономическое преимущества // *Агро-ЭкоИнженерия*. 2019. N1(98). С. 115-124. DOI: 10.24411/0131-5226-2019-10128.
14. Воробьева Н.С., Дяшкин А.В., Ажгалиев Р.С., Дяшкин-Титов В.В. Обоснование конструктивного исполнения роботизированного устройства для возделывания бахчевых культур под пленкой // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2022. N9(268). С. 19-23. DOI: 10.35211/1990-5297-2022-9-268-19-23.
15. Кочева Н.С., Пискунов К.С., Мохань О.В. Влияние средств защиты растений на урожайность сои сорта Сфера в условиях Приморского края // *Вестник КрасГАУ*. 2021. N12(177). С. 32-37. DOI: 10.36718/1819-4036-2021-12-32-37.
16. Киреев, И.М., Коваль З.М. Способ и пневматическое устройство для снижения коагуляции капель в факелах распыла жидкости при защите растений // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. N9. С. 3-6. DOI: 10.17816/0321-4443-66176.
17. Мирзаев М.А. Проектирование автономного полевого робота для дифференцированного внесения агрохимических средств // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2021. Т. 68. N4(45). С. 131-136. DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-4-131-136.
18. Лысов А.К., Гончаров Н.Р., Наумова Н.И., Корнилов Т.В. Экономическое обоснование технологии УМО опрыскивания с принудительным осаждением капель в борьбе с сорняками в посевах зерновых культур // *Вестник защиты растений*. 2018. N2(96). С. 46-50. EDN: XTTQLZ.
19. Романенкова М.С., Балабанов В.И. Применение цифровых технологий в растениеводстве // *Наука в Центральной России*. 2020. N2(44). С. 74-82. DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-74-82.

REFERENCES

1. Tavasiev R.M., Dzitsoev A.P. The unit for the care of seedlings in nurseries. *Selskiy Mechanizator*. 2021. N8. 16-17 (In Russian). EDN: RFTBIH.
2. Mirzaev M.A. Developing an Algorithm for Robotic Precision Application of Crop Protection Products. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N3. 74-80 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-3-74-80.
3. Denisov A.V., Usina E.E., Iakovlev R.N. et al. Algorithms for radio beacon mesh network establishment for navigation of robotic systems in agriculture. *Vestnik MSTU «STANKIN»*. 2019. N3 (50). 57-65 (In Russian).
4. Andreev K.P., Anikin N.V., Byshov N.V. et al. Introduction of exact farming system. *Herald of Ryazan State Agro-technological University Named after P.A. Kostychev*. 2019. N2(42). 74-80 (In Russian).
5. Baillie C.P., Thomasson J.A., Lobsey C.R. et al. A review of the state of the art in agricultural automation. *ASABE*. 2018. N1801589 (In English). DOI: 10.13031/aim.201801591
6. Liu X., Chen S., Aditya S. et al. Robust fruit counting: Combining deep learning, tracking, and structure from motion. *IEEE/RSJ Intelligent Robots and Systems*. 2018. 1045-1052 (In English). DOI: 10.1109/IROS.2018.8594239.
7. Izmaylov A.Yu., Khort D.O., Smirnov I.G. et al. Analysis of work parameters of the device for hydraulic removal of weed vegetation. *Engineering Technologies and Systems*. 2019. Vol. 29. N4. 614-634 (In Russian). DOI: 10.15507/2658-4123.029.201904.614-634.
8. Izmailov A.Yu., Smirnov I.G., Khort D.O. Digital agricultural technologies in the «Smart garden» system. *Horticulture and Viticulture*. 2018. N6. 33-39 (In Russian). DOI: 10.31676/0235-2591-2018-6-33-39.
9. Bechar A., Vigneault C. Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems. *Biosystems Engineering*. 2017. Vol. 153. 110-128 (In English). DOI: 10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2016.11.004.
10. Smirnov I.G., Khort D.O. Prospects for the development of automation and robotics work in field experiments.

- Proceedings of the International Academy of Agricultural Education*. 2018. N41-2. 60-64 (In Russian). EDN: VOGEHY.
11. Shalova S.Kh., Zagasezheva O.Z. Overview of agricultural robots market and their impact on economic development. *Izvestiya Southern Federal University*. 2019. N7(209). 57-70 (In Russian). DOI: 10.23683/2311-3103-2019-7-57-70.
 12. Kireev I.M., Koval' Z.M. Method and means for improving plant spraying technologies. *Agrochemistry*. 2017. N4. 87-96 (In Russian).
 13. Lysov A.K., Kornilov T.V., Naumova N.I., Goncharov N.R. New equipment for ULV spraying for pest control of cabbage: environmental and economic benefits. *AgroEcoEngineering*. 2019. N1(98). 115-124 (In Russian). DOI: 10.24411/0131-5226-2019-10128.
 14. Vorob'eva N.S., Dyashkin A.V., Azhgaliev R.S., Dyashkin-Titov V.V. Substantiation of the design of a robotic device for cultivating melons under a film. *Izvestia Volgograd State Technical University*. 2022. N9 (268). 19-23 (In Russian). DOI: 10.35211/1990-5297-2022-9-268-19-23.
 15. Kocheva N.S., Piskunov K.S., Mohan O.V. Plant protectors effect on the soybean Sfera varieties yield in the Primorsky region. *Bulletin of KrasGAU*. 2021. N12(177). 32-37 (In Russian). DOI: 10.36718/1819-4036-2021-12-32-37.
 16. Kireev I.M., Koval' Z.M. Method and pneumatic device for reduction of coalescence of drops in spray cones of liquid in plant protection. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2016. N9. 3-6 (In Russian). DOI: 10.17816/0321-4443-66176.
 17. Mirzaev M.A. Design of an autonomous field robot for differentiated application of agrochemical agents. *Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2021. Vol. 68. N4 (45). 131-136 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-4-131-136.
 18. Lysov A.K., Goncharov N.P., Naumova N.I., Kornilov T.V. Economic justification of ultra-low volume spraying technology with forced deposition of drops in integrated crop protection system. *Plant Protection News*. 2018. 2(96). 46-50 (In Russian). EDN: XTTQLZ.
 19. Romanenkova M.S., Balabanov V.I. Application of digital technologies in plant crops. *Science in the Central Russia*. 2020. N2(44). 74-82 (In Russian). DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-74-82.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Тавасиев Р.М. – научное руководство, концепция исследования, участие в разработке конструкции и методики испытаний, подготовка текста, итоговые выводы;
Дзитсов А.П. – участие в разработке конструкции и испытаниях, доработка текста, итоговые выводы;
Ахмад А. – обработка экспериментальных данных.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Tavasiev R.M. – scientific guidance, research concept, participation in the development of the design and test methodology, preparing the manuscript, final conclusions.
Dzitsoev A.P. – participation in the design and testing, revision of the manuscript, final conclusions;
Ahmad A. – processing of experimental data.
The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

02.04.2024
24.05.2024

EDN: TWDGJU

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-61-67

Научная статья
УДК 631.6:631.347

Роботизированный оросительный комплекс для выращивания сельскохозяйственных культур на орошаемом участке

Михаил Геннадьевич Загоруйко¹,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: zagorujko.misha2013@yandex.ru;
Дмитрий Александрович Соловьев²,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: solovevda@bk.ru;

Николай Федорович Рыжко³,
доктор технических наук, заведующий отделом,
e-mail: ryzhkonf@bk.ru;
Сергей Николаевич Рыжко³,
кандидат технических наук,
научный сотрудник,
e-mail: Twglides@gmail.com

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация;

²Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, г. Саратов, Российская Федерация;

³Волжский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации, Саратовская область, Российская Федерация

Реферат. Интеллектуальные технологии, применяемые в цифровом сельском хозяйстве, включая дистанционное зондирование, служат необходимым инструментом по сбору данных о биообъектах. Установили, что данные, собранные с помощью дистанционного зондирования и Интернета вещей (*IoT*), в том числе изображения, представляющие полную картину сельскохозяйственных биообъектов, и их анализ помогут решить многие проблемы при производстве агропродукции. (*Цель исследования*) Обосновать и разработать роботизированный оросительный комплекс для выращивания сельскохозяйственных культур, оптимизации процесса полива с учетом влажности почвы, температуры воздуха, скорости ветра и других факторов. (*Материалы и методы*) Оценили важность разработки, которая может оптимизировать работу при возделывании сельскохозяйственных культур. Привели описание приложений и баз данных, входящих в центральный вычислительный пункт. Контроль за текущим состоянием участка орошения, расчет и выработка управленческих решений обеспечиваются с центрального вычислительного пункта, который по мобильной связи может получать, обрабатывать и передавать команды на пульт управления дождевальными машинами, насосной станции и диспетчеру машинно-тракторной бригады. (*Результаты и обсуждение*) Обосновали схему и основные блоки роботизированного оросительного комплекса для выращивания сельскохозяйственных культур. Разработали алгоритм взаимосвязи и операций сбора данных, расчета, контроля и управления. Установили, что такой комплекс позволит оптимизировать процесс полива, затраты и расход ресурсов на орошаемом участке, снизить загрязнение окружающей среды. (*Выводы*) Внедрение роботизированного оросительного комплекса позволит уменьшить расход воды, сократить издержки. Поддержание влажности почвы в оптимальных пределах создаст возможность для получения высокого и стабильного урожая качественной продукции при различных погодных условиях.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, система полива, закрытая оросительная сеть, низконапорная дождевальная машина «Каскад», автоматизация, роботизированный комплекс.

■ **Для цитирования:** Загоруйко М.Г., Соловьев Д.А., Рыжко Н.Ф., Рыжко С.Н. Роботизированный оросительный комплекс для выращивания сельскохозяйственных культур на орошаемом участке // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №2. С. 61-67. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-61-67. EDN: TWDGJU.

Scientific article

Robotic Irrigation Complex for Crop Cultivation in Irrigated Areas

Mikhail G. Zagoruiko¹,
Ph.D.(Eng.), associate professor, leading researcher,
e-mail: zagorujko.misha2013@yandex.ru;
Dmitry A. Soloviev²,
Dr.Sc.(Eng.), associate professor,
e-mail: solovevda@bk.ru;

Nikolay F. Ryzhko³,
Dr.Sc.(Eng.), department head,
e-mail: ryzhkonf@bk.ru;
Sergey N. Ryzhko³,
Ph.D.(Eng.), researcher,
e-mail: Twglides@gmail.com

¹Federal Scientific Agroengineering Centre VIM, Moscow, Russian Federation;

²Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russian Federation;

³Volga Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation, Saratov Region, Russian Federation

Abstract. Intelligent technologies used in digital agriculture, such as remote sensing, serve as a necessary tool for collecting bio-object data. It has been established that data collected through remote sensing and the Internet of Things (*IoT*), including comprehensive imaging of agricultural bio-objects, and their subsequent analysis will help solve numerous challenges in agricultural production. (*Research purpose*) The research aims to develop and validate a robotic irrigation complex for crop cultivation. This system will optimize irrigation processes by considering various environmental factors such as soil moisture, air temperature, wind speed, and other relevant conditions. (*Materials and methods*) The paper evaluates the significance of developing a design that can optimize the process of crop cultivation and details the applications and databases integrated within the central computing center. The central computing hub monitors the current state of the irrigation area, performs calculations and develops management decisions. Utilizing mobile communications, this hub receives, processes, and transmits commands to the control panels of sprinklers, the pumping station, and the dispatcher for the machine-tractor team. (*Results and discussion*) The research has validated the design and main components of a robotic irrigation system for crop cultivation. Furthermore, an algorithm has been established to orchestrate the processes of data collection, calculation, and the control and management of operations. It was found that such a complex would optimize the irrigation process, reduce costs and resource consumption in the irrigated area, and decrease environmental pollution. (*Conclusions*) The implementation of a robotic irrigation complex will reduce water consumption, as well as material and energy costs associated with irrigation. By maintaining soil moisture within optimal ranges, this complex will enable the consistent production of high-quality crops under various weather conditions.

Keywords: remote sensing, irrigation system, closed irrigation network, low-pressure sprinkler «Cascade», automation, robotic complex.

For citation: Zagoruiko M.G., Soloviev D.A., Ryzhko N.F., Ryzhko S.N. Robotic irrigation complex for crop cultivation in irrigated areas. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 61-67 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-61-67. EDN: TWDGJU.

Применение многоопорных дождевальных машин служит наиболее распространенным в нашей стране способом орошаемого земледелия при возделывании сельскохозяйственных культур. При этом преобладает групповая эксплуатация дождевальных машин (от 10 до 40 ед.), которые работают от стационарной насосной станции и закрытой оросительной сети [1, 2].

В последнее десятилетие в аграрном секторе произошли технологические преобразования, в результате которых производственные процессы стали более индустриализованными и эффективными [3]. Интеллектуальные технологии, применяемые в цифровом сельском хозяйстве, включают дистанционное зондирование, Интернет вещей (*IoT*), облачные вычисления и анализ больших данных (*BigData*) [4].

Дистанционное зондирование с помощью спутников, самолетов и беспилотных воздушных судов (БВС) становятся необходимым инструментом для сбора данных о биообъектах [5, 6]. Эти данные позволяют получать актуальную информацию с больших территорий, включая зоны, недоступные для исследования человеком [7, 8].

Интернет вещей обеспечивает цифровую трансформацию сельскохозяйственной отрасли. Совре-

менные датчики, устройства с поддержкой *IoT*, программные приложения и облачные хранилища позволяют собирать, хранить, манипулировать огромными объемами и типами данных [9]. В частности, прогнозировать погоду, проводить мониторинг динамических параметров, таких как влажность и качество почвы, состояние растений, сбор урожая (рис. 1).

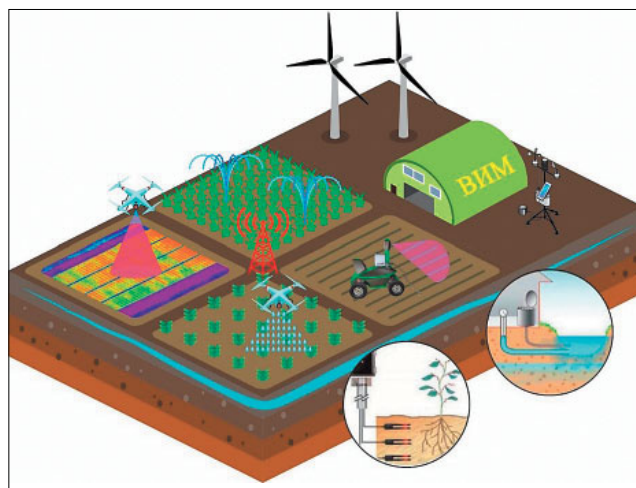


Рис. 1. *IoT* в сельском хозяйстве

Fig. 1. *IoT* in agriculture

Облачные сервисы используются для сбора, хранения, предварительной обработки и моделирования огромных объемов данных из различных источников. На основе массива данных в облачных хранилищах можно осуществить высокоточное прогнозирование [10, 11]. Технологии дистанционного зондирования, интернет вещей, облачных вычислений и обработки *BigData* поднимают на новый уровень цифровые услуги [12], создают возможности для повышения эффективности технологических процессов и снижения рисков потерь продукции.

Массив данных, собранных с помощью дистанционного зондирования и *IoT*, включает в себя изображения, предоставляющие полную картину сельскохозяйственных биообъектов. Анализ изображений позволяет более эффективно принимать решения на всех этапах производства [13]. Таким образом, распознавание огромного массива изображений является важной областью исследований в сельском хозяйстве, а в последние годы свёрточные нейронные сети глубокого обучения успешно применяются для обработки изображений высокого разрешения.

С помощью средств воздушного мониторинга на базе различных типов БВС собираются мультиспектральные и *RGB* данные [14]. На их основе производители агропродукции способны формировать цифровые карты, оценивать состояние сельскохозяйственных культур, выполнять контроль операций, вносить средства защиты растений, прогнозировать урожайность [15]. С увеличением количества данных требуется больше времени на анализ цифровых карт. Свёрточные нейронные сети глубокого обучения могут это сделать за секунды [16].

Цифровые технологии в сельском хозяйстве нашей страны еще недостаточно развиты, отличаются ограниченными возможностями и отсутствием комплексных решений.

Цель исследования – обосновать и разработать роботизированный оросительный комплекс, который позволит оптимизировать процесс полива сельскохозяйственных культур, учитывая влажность почвы, температуру воздуха, скорость ветра, другие параметры выращивания.

Материалы и методы. Роботизированный оросительный комплекс предназначен для эффективного использования дождевальных машин (ДМ) и насосной станции при обеспечении агроэкологических требований к поливу, сохранению плодородия почв, рациональному использованию водных, земельных, энергетических и трудовых ресурсов [17, 18].

В роботизированный комплекс входят центральный вычислительный пункт контроля и управления работой группы дождевальных машин. В общем виде алгоритм управления представлен на [рисунке 2](#).

Контроль за текущим состоянием участка оро-

шения, расчет и выработка управленческих решений обеспечиваются с центрального вычислительного пункта, который по мобильной связи может получать, обрабатывать и передавать команды на пульт управления дождевальных машин, насосной станции и диспетчеру машинно-тракторной бригады.

Центральный вычислительный пункт имеет ряд приложений и баз данных.

1. База данных участка орошения: данные и схема орошаемого массива с расположением дождевальных машин (ДМ), насосной станции и закрытой оросительной сети (канала) с указанием размеров наружных и подземных труб, запорной и регулирующей арматуры; данные по насосной станции: число насосных агрегатов, расход (Q) и напор (H) воды, марка и мощность (N) электродвигателя, удельный расход электроэнергии на подачу 1000 м^3 воды, оптимальное число одновременно работающих дождевальных машин. На насосной станции устанавливается датчик давления в коллекторе и датчик уровня воды в канале. Данные по каждой дождевальной машине: длина и площадь полива, расход воды и напор на входе в машину, таблица нормы полива, скорость движения последней тележки, время полива участка орошения, а также данные сим-карты для связи с пультом управления машины.

2. База данных выращиваемых под каждой дождевальной машиной сельскохозяйственных культур: вид, сроки посева, усредненные данные по фазам роста, требования к влажности почвы в каждый период развития, плановая урожайность, потребность в удобрениях, вид и способ их внесения, глубина корневой системы, общая кратность полива за сезон, поливные и оросительные нормы за период вегетации и др.

3. База данных климатических параметров участка: температура и относительная влажность воздуха, скорость ветра и слой осадков подекадно в течение вегетационного периода, средняя дата начала вегетации и др.

4. База данных почв на участке: тип и механический состав, объемная масса, среднее содержание азота, фосфора, калия и гумуса, влажность, влагоемкость, засоление почвы и др. Фактические данные заносятся после периодического отбора и химического анализа проб.

5. База данных рельефа участка: высотные значения гидрантов и крайней тележки машин, величина уклонов по секторам поля, величина уровня грунтовых вод и др.

6. База данных по организации поливов и уходу на участке орошения: расчет укомплектованного графика поливов с указанием их числа, нормы поливов, даты и времени каждого. Определяется оптимальное количество одновременно действующих



Рис. 2. Схема роботизированного оросительного комплекса для выращивания сельскохозяйственных культур на орошаемом участке

Fig. 2. Diagram of the robotic irrigation complex for crop cultivation on the irrigated area

машин при оптимальном режиме работы насосных агрегатов с минимальными затратами электроэнергии на полив, а также общая потребность в электроэнергии за поливной сезон.

Результаты и обсуждение. Время орошения участка определяется по формуле (Штепа Б.Г., Носенко В.Ф., Винникова Н.В. Механизация полива: Справочник. М.: Агропромиздат, 1990. 336 с.; Рыжко Н.Ф. Обоснование ресурсосберегающего дождевания и совершенствование дождевальной машины «Фрегат» в условиях Саратовского Заволжья; автореф. ...д-ра техн. наук. Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова. Саратов: 2012. 40 с.):

$$T_{\text{п}} = \frac{S \cdot m}{3,6 \cdot Q_{\text{д}} K_{\text{см}} (1 - E_{\text{ис}} / 100)}, \quad (1)$$

где S – площадь полива дождевальной машиной, га; m – норма полива, $\text{м}^3/\text{га}$; $Q_{\text{д}}$ – расход воды л/с; $K_{\text{см}}$ – коэффициент использования времени смены; $E_{\text{ис}}$ – величина потерь воды на испарение и снос, %.

Оптимальный режим работы и расход воды насосной станции

$$Q_{\text{НС}} = \sum Q_{\text{д}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{д}}$ – количество одновременно работающих дождевальных машин, л/с.

Расход воды насосной станции должен быть равен сумме оптимальных расходов насосных агрегатов ($Q_{\text{НА}}$, л/с) и обеспечить минимальные затраты электроэнергии на полив для данного типа насоса [19]:

$$Q_{\text{НС}} = \sum Q_{\text{НА}}. \quad (3)$$

Число одновременно работающих машин на отдельной линии закрытого трубопровода должно определяться допустимой скоростью потока в нем воды и потерями напора по длине (Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф. Таблицы для гидравлических расчетов водопроводящих труб. М.: Стройиздат, 1984. 120 с.).

Дождевальные машины должны комплектоваться блоками управления, включающими пульты ручного и автоматического управления (открыть и закрыть задвижку, пуск и остановка машины, уста-

новка скорости движения и нормы полива, пуск и отключение концевого аппарата и др.), датчиками контроля давления на входе и в конце машины, движения и др. К блоку управления подключен метеопункт, фиксирующий температуру и относительную влажность воздуха, скорость ветра и слой осадков, а также влажность почвы на отдельных секторах поля.

Данные состояния машины, климата и почвы передаются на центральный пункт для контроля, анализа и выработки управленческого решения. Для контроля текущего состояния влажности почвы после выпавших осадков используется беспилотный летательный аппарат (БЛА) с видеокамерами или съемки со спутника с обследованием состояния растений [20, 21].

С началом проведения поливов с учетом выпавших или отсутствия осадков и при наступлении засушливого периода корректируются нормы и сроки орошения. С наступлением жары, суховея и при отсутствии осадков норма полива увеличивается, дата начала устанавливается более ранняя. Наоборот, при похолодании или после обильных осадков норма полива уменьшается, а начало полива переносится на более поздний срок. Корректировка проводится с учетом возможного числа одновременно работающих машин в оптимальном режиме насосной станции, а также пропускной способности отдельных участков закрытой оросительной сети при минимальных затратах электроэнергии на полив.

Выводы. Обоснованы схема и основные блоки роботизированного оросительного комплекса для выращивания сельскохозяйственных культур, разработан алгоритм взаимосвязи, а также выполнения операций по сбору данных, расчету, контролю и управлению.

В рамках исследования планируется разработать автоматизированный оросительный комплекс с использованием современных технологий, включая системы искусственного интеллекта и дистанционного мониторинга. Такой комплекс позволит оптимизировать процесс полива и снизить затраты на его проведение. Кроме этого, использование автоматизированных систем полива может повысить эффективность использования водных ресурсов и снизить загрязнение окружающей среды.

Новизна разработки заключается в том, что центральный вычислительный пункт обеспечивает управление группой дождевальных машин (до 40 ед.) и группой насосных агрегатов с учетом особенностей закрытой оросительной сети. При этом не требуется установка компьютеров на каждой дождевальной машине.

Внедрение роботизированного комплекса на орошаемом участке позволит снизить затраты водных и энергетических ресурсов на полив, поддерживать влажность почвы в оптимальных пределах, что будет способствовать получению стабильно высоких урожаев независимо от объема выпадающих осадков и климатических условий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Шогенов Ю.Х. Развитие интенсивных машинных технологий, роботизированной техники, эффективного энергообеспечения и цифровых систем в агропромышленном комплексе // *Техника и оборудование для села*. 2019. N6 (264). С. 2-9. DOI: 10.33267/2072-9642-2019-6-2-8.
2. Дубенок Н.Н., Майер А.В. Разработка систем комбинированного орошения для полива сельскохозяйственных культур // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2018. N1 (49). С. 9-19. DOI: 10.32786/2071-9485-2018-01-9-19.
3. Блохина С.Ю., Блохин Ю.И. Интеллектуальное земледелие на основе Интернета вещей // *Земледелие*. 2020. N7. С. 7-13. DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10702.
4. Соловьев Д.А., Камышова Г.Н., Терехова Н.Н. и др. Цифровые технологии в управлении орошением // *Аграрный научный журнал*. 2019. N4. С. 93-97. DOI: 10.28983/asj.y2019i4pp93-97.
5. Соловьев Д.А., Камышова Г.Н., Терехова Н.Н., Бакиров С.М. Моделирование нейроуправления скоростью дождевальных машин // *Аграрный научный журнал*. 2020. N7. С. 78-84. DOI: 10.28983/asj.y2020i7pp78-84.
6. Смирнов И.Г., Курбанов Р.К., Марченко Л.А., Горшков Д.М. Дифференцированная обработка сельхозугодий с помощью БПЛА // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N4(37). С. 30-35. EDN: LFOUDJ.
7. Ценч Ю.С., Захарова Н.И. Тенденции развития технических средств аэрофотосъемки сельскохозяйственных земель // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N3. С. 16-26. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-16-26.
8. Романенкова М.С., Балабанов В.И. Применение цифровых технологий в растениеводстве // *Наука в Центральной России*. 2020. N2(44). С. 74-82. DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-74-82.
9. Соловьев Д.А., Журавлева Л.А., Бахтиев Р.Н. Цифровые технологии в сельском хозяйстве // *Аграрный научный журнал*. 2019. N11. С. 95-98. DOI: 10.28983/asj.y2019i11pp95-98.
10. Камышова Г.Н. Применение искусственных нейронных сетей для управления орошением // *Аграрный научный журнал*. 2021. N4. С. 84-86. DOI: 10.28983/asj.y2021i4pp84-88.
11. Waga D., Rabah K. Environmental conditions' bigdata management and cloud computing analytics for sustainable agriculture. *World Journal of Computer Application and*

- Technology*. 2014. Vol. 2. N3. 73-81. DOI: 10.13189/wjcat.2014.020303.
12. Kamilaris A., Kartakoullis A., Prenafeta-Boldú F.X. A review on the practice of Big Data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017. Vol. 143. 23-37. DOI: 0.1016/j.compag.2017.09.037.
 13. Liaghat S., Balasundram S.K.A. The role of remote sensing in precision agriculture. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*. 2010. Vol. 5. N1. 50-55. DOI: 10.3844/ajabssp.2010.50.55.
 14. Ozdogan M., Rodell M., Beaudoin H.K., Toll D.L. Simulating the effects of irrigation over the United States in a land surface model based on satellite-derived agricultural Data. *Journal of Hydrometeorology*. 2010. Vol. 11. N1. 171-184. DOI: 10.1175/2009JHM1116.1.
 15. Загоруйко М.Г., Бельшклина М.Е., Курбанов Р.К., Захарова Н.И. Мониторинг показателей фотосинтетической деятельности и его использование для прогнозирования потенциальной урожайности сои // *Аграрный научный журнал*. 2021. N12. С. 9-12. DOI: 10.28983/asj.y2021i12pp9-12.
 16. Хаитов Б.У. Цифровое моделирование рельефа местности для задач предварительного анализа территорий // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Приборо-*
 - строение*. 2019. N3 (126). С. 64-76. DOI: 10.18698/0236-3933-2019-3-64-76.
 17. Кожанов А.Л., Воеводин О.В. Осушительно-увлажнительные системы на равнинных территориях с применением фронтальных и фронтально-круговых дождевальных машин // *Мелиорация и гидротехника*. 2021. N3. С. 95-108. DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-3-95-108.
 18. Мирзаев М.А., Смирнов И.Г. Система позиционирования рабочих органов при дифференцированном опрыскивании растений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N1. С. 96-100. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-96-100.
 19. Бакиров С.М. Анализ энергозатрат на дождевальную машину // *Аграрный научный журнал*. 2019. N10. С. 95-98. DOI: 10.28983/asj.y2019i10pp95-98.
 20. Хорт Д.О., Личман Г.И., Филиппов Р.А., Беленков А.И. Применение беспилотных летательных аппаратов (дронов) в точном земледелии // *Фермер. Поволжье*. 2016. N10. С. 34-37. EDN: ZCPNPT.
 21. Зубарев Ю.Н., Фомин Д.С., Чашин А.Н., Заболотно-ва М.В. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // *Вестник Пермского федерального исследовательского центра*. 2019. N2. С. 47-51. DOI: 10.7242/2658-705X/2019.2.5.

REFERENCES

1. Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Lobachevsky Y.P., Shogenov Yu.H. Development of intensive machine technologies, robotic technology, efficient energy supply and digital systems in the agribusiness. *Technics and equipment for rural areas*. 2019. N6 (264). 2-9 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2019-6-2-8.
2. Dubenok N.N., Mayer A.V. Development of systems of combined irrigation for watering crops. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agro-university complex*. 2018. N1 (49). 9-19 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2018-01-9-19.
3. Blokhina S.Yu., Blokhin Yu. I. A smart farming concept based on the Internet of things. *Zemledelie*. 2020. N7. 7-13 (In Russian). DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10702.
4. Soloviev D.A., Kamyshova G.N., Terekhova N.N. et al. Digital technologies in irrigation management. *Agrarian Scientific Journal*. 2019. N4. 93-97 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2019i4pp93-97.
5. Solovyev D.A., Kamyshova G.N., Terekhova N.N., Bakirov S.M. Simulation of speed neural control for irrigation machines. *Agrarian Scientific Journal*. 2020. N7. 78-84 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2020i7pp78-84.
6. Smirnov I.G., Kurbanov R.K., Marchenko L.A., Gorshkov D.M. Differential spraying of farmland via unmanned aerial vehicles. *Electrotechnologies and electrical equipment in agroindustrial complex*. 2019. N4(37). С. 30-35. (In Russian). EDN: LFOUDJ.
7. Tsench Yu.S., Zakharova N.I. Trends in development of agricultural aerial photography technology. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N3. 16-26. (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-16-26.
8. Romanenkova M., Balabanov V. Application of digital technologies in plant crops. *Science in Central Russia*. 2020. N2(44). С. 74-82. (In Russian). DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-74-82.
9. Soloviev D.A., Zhuravleva L.A., Bakhtiev R.N. Digital technology in agriculture. *Agrarian Scientific Journal*. 2019. N11. 95-98 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2019i11pp95-98.
10. Kamyshova G.N. Application of artificial neural networks for irrigation control. *Agrarian Scientific Journal*. 2021. N4. 84-86 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2021i4pp84-88.
11. Waga D., Rabah K. Environmental conditions' bigdata management and cloud computing analytics for sustainable agriculture. *World Journal of Computer Application and Technology*. 2014. Vol. 2. N3. 73-81 (In English). DOI: 10.13189/wjcat.2014.020303.
12. Kamilaris A., Kartakoullis A., Prenafeta-Boldú F.X. A review on the practice of Big Data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017. Vol. 143. 23-37 (In English). DOI: 0.1016/j.compag.2017.09.037.
13. Liaghat S., Balasundram S.K.A. The role of remote sensing in precision agriculture. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*. 2010. Vol. 5. N1. 50-55 (In English). DOI: 10.3844/ajabssp.2010.50.55.
14. Ozdogan M., Rodell M., Beaudoin H.K., Toll D.L. Simulating the effects of irrigation over the United States in a

- land surface model based on satellite-derived agricultural Data. *Journal of Hydrometeorology*. 2010. Vol. 11. N1. 171-184 (In English). DOI: 10.1175/2009JHM1116.1.
15. Zagoruyko M.G., Belyshkina M.E., Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Monitoring of photosynthetic activity indicators and its use to control the moisture supply of soybean crops. *Agrarian Scientific Journal*. 2021. N12. 9-12 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2021i12pp9-12.
 16. Khaitov B.U. Digital terrain simulation for preliminary territory analysis. Bulletin of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. *Series Instrumentation*. 2019. N3 (126). C. 64-76 (In Russian). DOI: 10.18698/0236-3933-2019-3-64-76.
 17. Kozhanov A.L., Voyevodin O.V. Drainage and watering systems on even lands with the use of frontal and frontal-circular sprinklers. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2021. Vol. 11. N3. 95-108. DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-3-95-108.
 18. Mirzaev M.A., Smirnov I.G. Positioning system of working bodies in differential spraying of plants. *Agricultural Machines and Technologies*. 2024. Vol. 18. N1. 96-100 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-96-100.
 19. Bakirov S.M. Analysis of energy costs for sprinkler. *Agrarian Scientific Journal*. 2019. N10. 95-98 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2019i10pp95-98.
 20. Hort D.O., Lichman G.I., Filippov R.A., Belenkov A.I. Application of unmanned aerial vehicles (drones) in precision agriculture. *Farmer. Volga region*. 2016. N10. 34-37 (In Russian). EDN: ZCPNPT.
 21. Zubarev Yu.N., Fomin D.S., Chashchin A.N., Zabolotnova M.V. Use of uncleaned aircraft in agriculture. *Bulletin of the Perm Federal Research Center*. 2019. N2. 47-51 (In Russian). DOI: 10.7242/2658-705X/2019.2.5.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Загоруйко М.Г. – научное руководство, постановка задачи, обработка результатов исследований;
 Соловьев Д.А. – научное руководство, формулирование общих выводов;
 Рыжко Н.Ф. – научное руководство, разработка теоретических предпосылок;
 Рыжко С.Н. – подготовка начального варианта статьи, литературный анализ.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Zagoruyko M.G. – scientific guidance, problem statement, processing of research results;
 Soloviev D.A. – scientific guidance, formulation of general conclusions;
 Ryzhko N.F. – scientific guidance, development of theoretical assumptions;
 Ryzhko S.N. – preparation of the initial version of the manuscript, literature review.
The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
 Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
 The paper was accepted for publication on

03.04.2024
 24.05.2024



Повышение энергоэффективности сушильной установки за счет применения термоэлектрических модулей

Дмитрий Анатольевич Тихомиров,
доктор технических наук, член-корреспондент РАН,
главный научный сотрудник,
e-mail: tihda@mail.ru;

Алексей Викторович Хименко,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: avmkh87@gmail.com;
Алексей Васильевич Кузьмичев,
научный сотрудник, e-mail: alkumkuzm@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Сушка пищевых продуктов и материалов относится к наиболее распространенным способам и энергоемким процессам переработки сырья. Основным недостатком традиционных электрических конвективных бытовых сушилок являются потери теплоты в окружающую среду с влажным отработанным сушильным агентом. Также в подобных установках высушиваемый продукт нагревается неравномерно за счет снижения температуры и увеличения относительной влажности по мере продвижения снизу вверх. *(Цель исследования)* Провести лабораторные исследования процесса сушки на примере яблок для оценки энергозатрат на испарение 1 кг влаги разработанной конвективной термоэлектрической сушильной установкой и сравнить ее энергоэффективность с серийно выпускаемыми конвективными сушилками. *(Материалы и методы)* На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований были разработаны функциональная схема и лабораторный образец конвективной термоэлектрической сушилки с применением термоэлектрического теплового насоса. Сушка продукта осуществляется сушильным агентом (нагретым воздухом) с частичной рециркуляцией и рекуперацией теплоты удаляемого воздуха. *(Результаты и обсуждение)* Получены графики изменения температуры в контрольных точках и относительной влажности сушильного агента на входе и на выходе из разработанной установки. Представлены параметры яблок до и после сушки в термоэлектрической сушильной установке, а также в традиционной серийно выпускаемой конвективной сушилке бытового назначения. Разработана электрическая схема управления. Приведены выражения для расчета радиатора горячего спая термоэлектрического теплового насоса «воздух-воздух». *(Выводы)* Оценено среднее значение количества утилизируемой теплоты радиатором холодного спая термоэлектрического теплового насоса из удаляемого сушильного агента в процессе сушки, которое составляет около 20 процентов от общего энергопотребления термоэлектрической установки из электрической сети. Выявлено, что лабораторный образец разработанной термоэлектрической сушильной установки обеспечивает более равномерный процесс сушки продукта за счет наличия боковых воздушных каналов и более эффективной организации движения сушильного агента в рабочей камере в отличие от традиционных конвективных сушилок, что подтверждается результатами испытаний. Показали, что применение термоэлектрического теплового насоса с рекуперацией теплоты отработанного сушильного агента позволит уменьшить установленную мощность нагревателя сушильного агента и снизить расход электроэнергии на процесс сушки по сравнению с серийно выпускаемыми бытовыми конвективными сушилками.

Ключевые слова: конвективная сушка, термоэлектрический тепловой насос, термоэлектрический модуль Пельтье, сушка пищевых продуктов, энергоэффективность, утилизация теплоты, рециркуляция воздуха, энергосбережение.

■ **Для цитирования:** Тихомиров Д.А., Хименко А.В., Кузьмичев А.В. Повышение энергоэффективности сушильной установки за счет применения термоэлектрических модулей // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №2. С. 68-77. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-68-77. EDN: VXKYOP.

Scientific article

Increasing the Drying Unit Energy Efficiency Through with Thermoelectric Modules

Dmitry A. Tikhomirov,
corresponding member of the Russian Academy
of Sciences, Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: tihda@mail.ru;

Aleksey V. Khimenko,
Ph.D.(Eng.), senior researcher, e-mail: avmkh87@gmail.com;
Aleksey V. Kuzmichev,
researcher, e-mail: alkumkuzm@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Drying food products and materials is one of the most common methods in processing raw materials, yet it remains

an energy-intensive process. The main drawback of traditional electric convective household dryers is the loss of heat and the wet waste drying agent into the environment. Furthermore, such units are characterized by uneven heating of the dried product, attributed to a temperature decrease and increasing humidity from bottom to top. (*Research purpose*) The purpose of this study is to conduct laboratory experiments on the drying process of apples focusing on evaluating the energy consumption required to evaporate 1 kilogram of moisture using a newly developed convective thermoelectric drying unit and compare its energy efficiency with mass-produced convective dryers. (*Materials and methods*) The findings from theoretical and experimental studies facilitated the development of a functional diagram and a laboratory prototype of a convective thermoelectric dryer using a thermoelectric heat pump. The drying process involves the utilization of a drying agent (heated air) with partial air recirculation, and heat recovery from the exhaust air. (*Results and discussion*) Temperature variations at designated control points and the relative humidity of the drying agent at both inlet and outlet of the developed unit were graphed and analyzed. The parameters of apples before and after drying in the thermoelectric drying unit are compared with those dried in a conventional household convective dryer. The study has resulted in developing an electrical control circuit for a thermoelectric drying unit and providing expressions to calculate the hot junction radiator of an air-to-air thermoelectric heat pump integrated into the developed drying unit. (*Conclusions*) The study estimated the average heat recovery by the cold junction radiator of a thermoelectric heat pump from the exhaust drying agent during the drying process, amounting to approximately 20 percent of the total energy consumption by the thermoelectric drying unit from the electrical grid. The research findings demonstrate that the laboratory prototype offers a more consistent drying process for the product. This is attributed to the incorporation of side air channels and a more efficient arrangement of the drying agent's movement within the working chamber, as opposed to traditional convective dryers. These conclusions are substantiated by the test results. It is illustrated that the use of a developed thermoelectric heat pump with heat recovery from the waste drying agent can lead to a reduction in the installed power capacity of the drying agent heater and a decrease in the energy consumption for the drying process in the developed convective thermoelectric drying unit compared to mass-produced household convective dryers.

Keywords: convective drying, thermoelectric heat pump, Peltier thermoelectric module, food drying, energy efficiency, heat recovery, air recirculation, energy saving.

■ **For citation:** Tikhomirov D.A., Khimenko A.V., Kuzmichev A.V. Increasing the drying unit energy efficiency through with thermoelectric modules. *Agricultural machinery and technologies*. Vol. 18. N2. 68-77 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-68-77. EDN: VXKYOP.

Тепловая сушка является частью многих сельскохозяйственных технологий и относится к высокоэнергоёмким процессам [1]. Сушеные овощи, фрукты и ягоды хорошо транспортируются, для их хранения требуется меньше складских площадей и они достаточно широко используются в качестве сырья для производства разнообразной пищевой продукции [2]. Однако при удалении влаги расходуется большое количество энергии при нагревании сушильного агента (воздуха), в связи с чем активно исследуются технологические и технические возможности по снижению энергозатрат за счет применения более экономичных решений и источников энергии, а также оптимизации процесса сушки.

Проведены теоретические исследования по определению времени и скорости нагрева измельченных яблок при радиационном способе сушки, а также экспериментальные исследования процесса сушки дикорастущих плодов и овощей в радиационной сушильной установке [3, 4]. Отмечено, что энерго-сберегающий режим работы кондуктивно-конвективной мини-зерносушилки может быть достигнут за счет частичного использования теплоты солнечного излучения, генерируемой в гелиоколлекторе и запасенной в тепловом аккумуляторе, а также рециркуляции отработанного сушильного агента [5].

Исследован процесс высушивания семян в кон-

вективно-радиационной установке с псевдооживленным слоем [6] и в конвективной сушилке с псевдооживленным слоем [7, 8]. Разработана автоматизированная система процесса сушки сельскохозяйственного сырья в условиях, обеспечивающих сохранение ценных биологических компонентов [9].

Возможность использования тепловых насосов в процессе сушки рассмотрена в работах [10, 11]. Предложена конструкция вакуум-сублимационной сушилки с использованием термоэлектрических модулей, обоснованы параметры и режимы ее работы [12].

В бытовых, а также в промышленных сушильных установках небольшой производительности продукт обычно нагревается конвективным способом. При этом с отработанным влажным воздухом в окружающую среду теряется часть теплоты. В то же время даже при частичной рециркуляции влажного воздуха в замкнутом контуре без осушения продолжительность сушки увеличивается, качество высушиваемого продукта ухудшается и энергосберегающий эффект будет невысокий [13]. Таким образом, недостатком электрических конвективных сушилок являются потери теплоты, уносимые с влажным воздухом в окружающую среду. Также к существенным недостаткам сушилок подобных конструкций можно отнести неравномерность нагрева высушиваемого продукта и сниже-

ние температуры сушильного агента по мере его продвижения снизу вверх через поддоны в корпусе сушилки, в результате чего продукты на нижних поддонах сушатся быстрее, чем на верхних поддонах.

Одним из способов повышения энергоэффективности тепловых процессов на объектах АПК является применение термоэлектрических модулей и сборок на базе элементов Пельтье (термоэлектрического теплового насоса) [14]. Например, для осушения и нагревания воздуха [15], локального обогрева молодняка животных [16], пастеризации и охлаждения молока (Кирсанов В.В., Кравченко В.Н., Филонов Р.Ф. Применение термоэлектрических модулей в пастеризационно-охладительных установках для обработки жидких пищевых продуктов. М.: МГАУ. 2011. 88 с.). Принцип работы термоэлектрического теплового насоса заключается в том, что холодный контур термоэлектрической сборки частично ассимилирует теплоту из отработанного воздуха и передает ее на горячий контур. В результате на горячей стороне термоэлектрического модуля генерация тепловой энергии для нагревания воздуха повышается.

Обосновано применение термоэлектрического теплового насоса в качестве нагревателя сушильного агента, разработаны функциональная схема и лабораторный образец конвективной сушильной установки с применением термоэлектрической сборки [14]. Данное решение позволит снизить потребление сетевой электроэнергии при сохранении высоких показателей качества продукта в сравнении с традиционными конвективными установками бытового назначения, в которых нагревателем сушильного агента служит, как правило, трубчатый электрический нагреватель (ТЭН).

Цель исследования: изучить процесс сушки яблок для оценки энергозатрат на испарение 1 кг влаги в разработанной конвективной термоэлектрической сушильной установке и ее сравнение по энергоэффективности с серийно выпускаемыми аналогами.

Материалы и методы. Принцип действия термоэлектрической сушильной установки с тепловым насосом показан на *рисунке 1* (Патент RU2749682C1). Процесс осуществляется с частичной рециркуляцией воздуха и рекуперацией теплоты отработанного сушильного агента.

Воздух, проходя через радиатор горячего спая термоэлектрической сборки 5, подогревается и через приточный воздуховод 10 подается в сушильную камеру 11. Из нее поток сушильного агента удаляется в вытяжную камеру 12, разделяется и частично поступает в канал 14, а также в циркуляционный воздуховод 13. Через заслонку 8 вводится порция свежего наружного воздуха и через канал 7

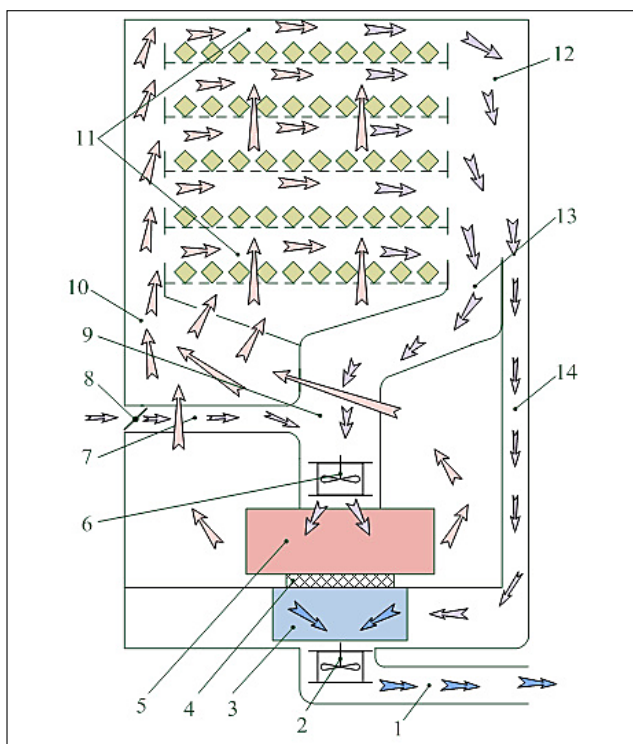


Рис. 1. Функциональная схема сушильной установки с применением термоэлектрической сборки, работающей в режиме теплового насоса

Fig. 1. Functional diagram of a drying unit using a thermoelectric assembly operating in heat pump mode

поступает в камеру смешения 9, откуда циркуляционным вентилятором 6 направляется на радиатор горячего спая 5 термоэлектрического теплового насоса 4. Часть удаляемого из сушильной камеры воздуха по каналу 14 направляется на радиатор холодного спая теплового насоса 3, где происходит рекуперация теплоты. Далее воздух вытяжным вентилятором 2, который обеспечивает подсос наружного воздуха через корпус основного блока питания ~220V/–24V, где он предварительно подогревается, охлаждая элементы схемы, выводится через канал 1 в окружающую среду.

Результаты и обсуждение. На основании разработанной функциональной схемы изготовлена физическая модель термоэлектрической сушильной установки для исследования параметров сушки (*рис. 2*).

Датчики температуры установлены в шести контрольных точках: T_1 – поверхность горячего радиатора; T_2 – воздух, подаваемый в сушильную камеру после подогрева; T_3 – воздух в сушильной камере; T_4 – воздух, уходящий из сушильной камеры; T_5 – отработанный воздух, удаляемый из сушильной установки; T_6 – воздух окружающей среды.

Проведены лабораторные испытания сушки яблок сорта «Гала» на пяти поддонах в термоэлектрической сушильной установке с исходным содер-

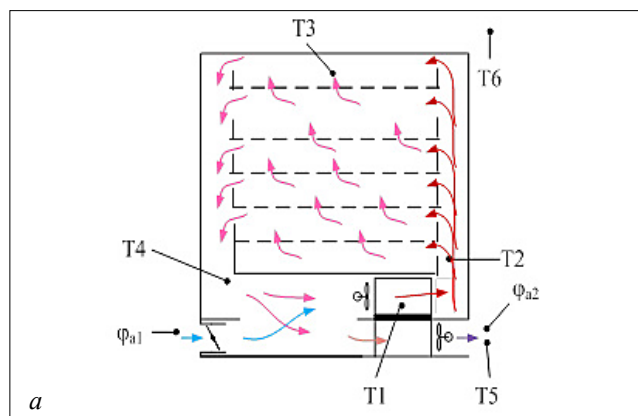


Рис. 2. Схема размещения датчиков температуры $T1-T6$ и влажности воздуха φ_{a1} , φ_{a2} в сушильной камере (а); общий вид лабораторного образца термоэлектрической сушильной установки (б): 1 – измеритель-регулятор температуры и влажности; 2 – отверстие для выхода отработанного сушильного агента; 3 – регулятор положения заслонки приточного воздуха

Fig. 2. Layout diagram of temperature sensors $T1-T6$ and air humidity sensors φ_{a1} , φ_{a2} in the drying chamber (a); overall view of the laboratory prototype of a thermoelectric drying unit (b): 1 – temperature and humidity controller; 2 – outlet for the exhaust dryer agent; 3 – supply air damper position regulator

жанием влаги 80-85% до конечной влажности 20%. Температурный и влажностный режимы соответствуют требованиям ГОСТ 32896-2014 «Фрукты сушеные. Общие технические условия». Температура окружающего воздуха $19 \pm 1^\circ\text{C}$, относительная влажность 45%.

Усредненные параметры яблок до и после сушки в термоэлектрической сушильной установке, полученные в лабораторных испытаниях, представлены в таблице 1. Усредненные параметры процесса сушки яблок в конвективной сушилке «РОТОР СШ-002» (рис. 3), полученные в лабораторных испытаниях, приведены в таблице 2.

Результаты оценки энергозатрат на 1 кг испаренной влаги в разработанной термоэлектрической су-



Рис. 3. Конвективная сушильная установка «РОТОР СШ-002» с датчиками температуры и влажности
Fig. 3. Convective dryer ROTOR SH-002 with temperature and humidity sensors

шилке и некоторых серийно выпускаемых аналогах приведены в таблице 3 [17]. Для серийно выпускаемых образцов № 2-6 представлены расчетные значения, а для образцов № 1 и № 7 указаны экспериментальные данные, полученные при высушивании яблок в условиях, аналогичных для лабораторного образца № 8.

Графики изменения температуры в контрольных точках $T1-T6$ и влажности сушильного агента на входе и выходе в процессе сушки лабораторного образца установки представлены на рисунке 4. Резкое повышение относительной влажности воздуха на выходе φ_{a2} в начальный период процесса сушки связано с интенсивным испарением поверхностной влаги из продукта. Циклическое изменение значений температуры $T1-T6$ и относительной влажности воздуха на выходе из сушильной установки φ_{a2} обусловлено работой измерителя-регулятора температуры и влажности (рис. 2б).

Скорость в выходном канале отработанного воздуха ($F_{\text{вк}} = 0,00232 \text{ м}^3$) измерялась с помощью термоанемометра ТКА-РКМ60 с выносным зондом ($w_{\text{а,вк}} = 2-2,5 \text{ м/с}$). Температуру в контрольных точках определяли с помощью термопар хромель-копель и измерителя-регулятора температуры ТРМ138.

Среднее количество утилизируемой теплоты $Q_{\text{ок}}$ из удаляемого сушильного агента, которое подводится к радиатору холодного спая термоэлектрического теплового насоса при среднем перепаде температур $T4$ и $T5$ в течение сушки $7,3^\circ\text{C}$ и объемной теплоемкости влажного воздуха $1,3 \text{ кДж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$, составляет 50,6 Вт. Это соответствует приблизительно 20% от общего потребления термоэлектрической сушильной установки из электрической сети (~240 Вт). Технические параметры лабораторного образца сушильной установки приведены в [14].

Образец термоэлектрической сушильной установки обеспечивает более равномерный процесс сушки продукта за счет наличия боковых воздушных каналов и более эффективной организации дви-

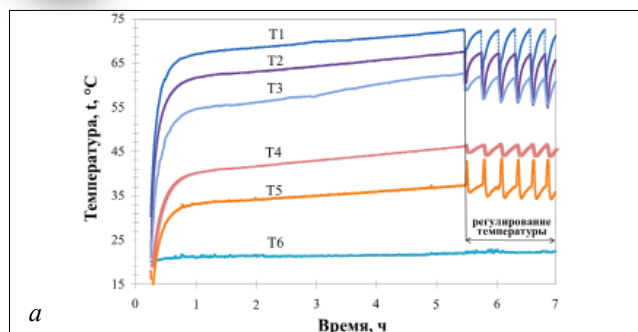


Рис. 4. Изменение в процессе сушки яблок в термоэлектрической установке: а – температуры в характерных точках (Т1-Т6); б – относительной влажности воздуха на входе (φ_{a1}) и на выходе (φ_{a2})

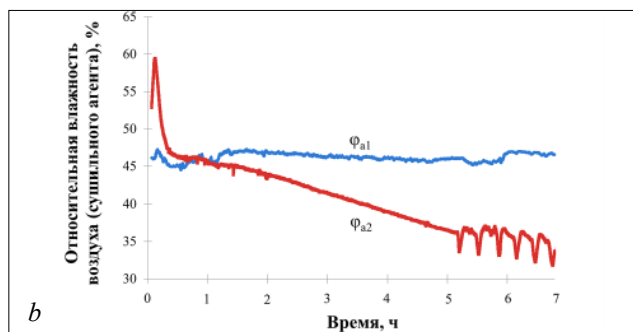


Fig. 4. Changes in the thermoelectric unit during the apple drying process: а – temperatures at characteristic points (T1-T6); б – air relative humidity at the inlet (φ_{a1}) and at the outlet (φ_{a2})

Таблица 1					Table 1		
ПАРАМЕТРЫ ЯБЛОК ДО И ПОСЛЕ СУШКИ НА ЛАБОРАТОРНОМ ОБРАЗЦЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ APPLE DRYING PARAMETERS IN THE LABORATORY PROTOTYPE OF A THERMOELECTRIC DRYING UNIT							
До сушки				После сушки			
№ поддона	Масса поддона и яблок, г	Масса поддона, г	Масса яблок, г	Масса поддона и яблок, г	Масса яблок, г	Количество испаренной влаги	
						г	%
1	446,4	171,6	274,8	235,7	64,1	210,7	76,67
2	438,5	170,4	268,1	233,3	62,9	205,2	76,54
3	420,1	173,4	246,7	225,3	51,9	194,8	78,96
4	462,3	172,4	289,9	236,4	64	225,9	77,92
5	444,6	175,4	269,2	233,8	58,4	210,8	78,31
Всего	2211,9	863,2	1348,7	1167,2	304	1044,7	

Таблица 2				Table 2			
ПАРАМЕТРЫ ЯБЛОК ДО И ПОСЛЕ СУШКИ В КОНВЕКТИВНОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ «РОТОР СШ-002»							
APPLE DRYING PARAMETERS IN ROTOR SH-002 CONVECTIVE DRYER							
До сушки				После сушки			
№ поддона	Масса поддона и яблок, г	Масса поддона, г	Масса яблок, г	Масса поддона и яблок, г	Масса яблок, г	Количество испаренной влаги	
						г	%
1	623	252,6	370,4	351	98,4	272	73,43
2	593	252,4	340,6	353	100,6	240	70,46
3	634	252,0	382,0	377	125	257	67,28
4	619	252,3	366,7	387	134,7	232	63,27
5	583	251,9	331,1	381	129,1	202	61,01
Всего	3052	1261,2	1790,8	1849	587,8	1203	

Таблица 3				Table 3			
СРАВНЕНИЕ БЫТОВЫХ КОНВЕКТИВНЫХ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК ПО РАСХОДУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА 1 КГ ИСПАРЕННОЙ ВЛАГИ ПРИ СУШКЕ ЯБЛОК							
COMPARISON OF HOUSEHOLD CONVECTIVE DRYERS IN TERMS OF ENERGY CONSUMPTION PER 1 KG OF EVAPORATED MOISTURE DURING THE APPLE DRYING PROCESS							
Модель установки		Мощность, потребляемая из сети, Вт		Количество поддонов		Расход энергии, кВт·ч на 1 кг испаренной влаги	
№ 1 «Ветерок-2»		600		5		2,6	
№ 2 Hyundai HYFD-S1202		500		12		2,5	
№ 3 Vitek VT 5054		300		5		2,6	
№ 4 Redmond RFD-0159		250		5		2,5	
№ 5 Kitfort KT-1903		250		5		2,6	
№ 6 «Мастерица»		150		5		2,8	
№ 7 «РОТОР СШ-002»		520		5		2,8	
№ 8 Лабораторный образец		240		5		2,2	

жения сушильного агента в рабочей камере (*рис. 1*), что подтверждается результатами испытаний (*табл. 1*). В серийно выпускаемых бытовых конвективных установках (*табл. 3*) для более равномерного процесса сушки продукта необходимо периодически менять местами верхние и нижние поддоны.

*Электрическая схема управления
термоэлектрической сушильной установкой*

Питание электрической схемы управления осуществляется от сети 220 В 50 Гц (рис. 5). Защита элементов схемы от перегрузки и при возникновении аварийных режимов осуществляется автоматическим выключателем *QFI*. Индикатором подачи напряжения служит светодиод *VDI*. В состав схемы управления установкой входят:

- $U1$ – блок измерения температуры и влажности и регулирования процесса сушки продукта с датчиками температуры ET и влажности EM ;
- $U2$ – импульсный блок питания термоэлектрического модуля $\sim 220\text{В}/-24\text{В}$ и током нагрузки до 20А , позволяющий в определенных пределах изменять выходное напряжение на элементах Пельтье; термоэлектрический модуль на элементах Пельтье, работающий в режиме теплового насоса;
- $U3$ – импульсный блок $\sim 220\text{В}/-12\text{В}$ и током нагрузки до 3А для питания двигателей вентиляторов $M1$ и $M2$ и индикатора окончания сушки. Контроль и регулирование процесса производится косвенным методом посредством замера параметров теплоносителя (температуры, влажности) в сушильной установке.

Первый канал блока измерения *UI* осуществляет регулирование температуры включением и отключением термоэлектрического модуля контактом реле регулятора *UIK1*. Второй канал измеряет влажность в камере и при достижении заданного значения включает светодиод «Окончание сушки». Влажность сушильного агента, уходящего из сушильной камеры, измеряемая на втором канале *UI*, задается конечной влажностью продукта согласно ГОСТ 32896-2014.

Датчики температуры и влажности блока *UI* размещены в сушильной камере. Верхнее предельное значение температуры режима сушки зависит от обрабатываемого материала и лимитируется соответствующими нормативными документами. Движение основной массы сушильного агента обеспечивает вентилятор *MI* по замкнутому контуру: нагреватель (элементы Пельтье «горячая сторона») – сушильная камера – нагреватель.

Термоэлектрическая сушильная установка для овощей и фруктов отвечает требованиям технологии процесса и позволяет поддерживать температурные режимы теплового агента в требуемом диапазоне.

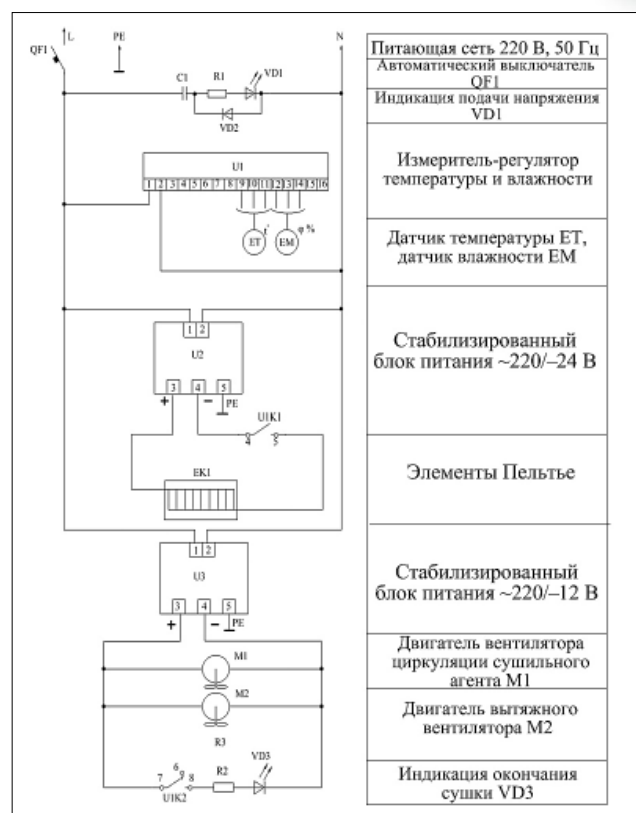


Рис. 5. Электрическая схема управления термоэлектрической сушильной установкой

Fig. 5. Electrical control circuit for the thermoelectric dryer

*Расчет теплового баланса
термоэлектрической сушильной установки*

Уравнение внутреннего теплового баланса исследуемой установки будет иметь вид:

$$q_{\text{OX}} + q_{\text{a}} = q_{\text{M}} + q_{\text{K}} + kq_{\text{a}} - c_{\text{K}} \cdot \theta_1, \quad (1)$$

где $q_{\text{ок}}$ – удельное количество теплоты, утилизируемой из удаляемого сушильного агента, которое подводится к радиатору холодного спая термоэлектрического модуля, кДж/кг влаги; q_3 – удельное количество теплоты, произведенной током в термоэлементе, кДж/кг влаги; $c_{\text{ж}}$ – теплоемкость жидкости во влажном продукте при начальной температуре продукта на входе в сушилку θ_1 (приравниваем к температуре окружающей среды), кДж/(кг·°C); $q_{\text{м}}$ – удельный подвод теплоты в сушилке на нагревание высушиваемого продукта, кДж/кг влаги; $q_{\text{к}}$ – удельные потери теплоты поверхностью корпуса сушильной установки в окружающую среду, кДж/кг влаги; $q_{\text{а}}$ – удельные потери теплоты с отработанным сушильным агентом (воздухом), кДж/кг влаги; k – коэффициент, учитывающий долю утилизируемой теплоты из удаляемого сушильного агента радиатором холодного спая модуля (0,88-0,80).

Суммарное удельное количество теплоты, утилизируемой из удаляемого сушильного агента, которое подводится к радиатору холодного спая термоэлек-

трического модуля $q_{\text{ох}}$, и удельное количество теплоты, произведенной током в термоэлементе q_3 , составляет величину удельного количества теплоты, отбираемого сушильным агентом от радиатора горячего спая термоэлектрического теплового насоса q_r [18].

Подвод удельный теплоты в сушильной установке на нагревание продукта

$$q_m = \frac{G_2 \cdot c_m \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{W} + c_{\text{ж}} \cdot (\theta_2 - \theta_1), \quad (2)$$

где G_2 – производительность сушилки по конечному (высушенному) продукту, кг/с; c_m – теплоемкость высушенного продукта, кДж/(кг·°C) [для яблок принимаем среднее значение $c_m = 3,88$ кДж/(кг·°C)]; W – количество влаги, удаляемой из высушиваемого продукта, кг/с; θ_2 – температура продукта на выходе из сушилки, °C. Параметры G_2 и W определяются при расчете материального баланса сушилки [13].

Принимаем температуру продукта на выходе из сушилки θ_2 равной температуре мокрого термометра $t_{2\text{м}}$. Процесс теоретической сушки принимаем адиабатным, находим $t_{2\text{м}}$ с помощью i - d диаграммы состояния влажного воздуха по начальным параметрам сушильного агента (температуре t_1 и влагосодержанию d_1).

Теплоемкость высушенного продукта можно определить по формуле:

$$c_m = \frac{c_c \cdot 100 + c_{\text{ж}} \cdot \varphi_2}{100 + \varphi_2}, \quad (3)$$

где c_c – теплоемкость абсолютно сухого материала, кДж/(кг·°C); φ_2 – конечная влажность продукта после завершения процесса сушки, %.

Удельные потери теплоты поверхностью корпуса сушильной установки в окружающую среду q_k принимаем в зависимости от влажности материала 125-420 кДж/кг испаренной влаги (для яблок принимаем меньшее значение) или 10-12% от значения удельного подвода теплоты в установке на нагревание высушиваемого продукта q_m (Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. М.: Химия. 1995. 368 с.). Также потери теплоты поверхностью корпуса сушилки в окружающую среду можно определить по коэффициенту теплопередачи через стенки корпуса K_c [13].

Удельные потери теплоты с отработанным сушильным агентом (воздухом)

$$q_a = \frac{G_a c_a (t_2 - t_0)}{W}, \quad (4)$$

где G_a – расход сушильного агента в процессе сушки, кг/с; c_a – теплоемкость агента сушки (воздуха), кДж/(кг·°C); t_2 – температура отработанного воздуха, удаляемого из установки, °C; t_0 – температура окружающей среды, °C.

Расход сушильного агента в процессе сушки

$$G_a = \frac{W}{d_2 - d_1}, \quad (5)$$

где $d_1 = d_0$ – влагосодержание воздуха на входе в установку (воздух, проходящий через радиатор горячего спая термоэлектрической сборки, нагревается при постоянном влагосодержании $d = \text{const}$), кг/кг; d_2 – влагосодержание воздуха на выходе из установки, кг/кг.

Расчет радиатора горячего спая термоэлектрического теплового насоса «воздух-воздух» сушильной установки

Целью расчета является определение конструктивных параметров воздушного радиатора (рис. 6), которые позволят с минимальными потерями передавать теплоту с горячей стороны термоэлектрического модуля сушильному агенту (воздуху).

Исходные данные для расчета: ΣQ – теплопроизводительность термоэлементов, Вт; λ_r – коэффициент теплопроводности материала радиатора, Вт/(м·°C); b – толщина ребра, м; h – расстояние между ребрами, м; H – высота ребра, м; L и B – размер воздушного радиатора вдоль и поперек ребер, соответственно, м; A – толщина основания радиатора, м.

В варианте с принудительным обдувом радиатора скорость воздуха v между ребрами воздушного радиатора принимаем равной от 2 до 4 м/с, исходя из анализа конструкций аналогичных установок [19].

Для определения коэффициента теплоотдачи α_r необходимо задать скорость воздуха w_a , выбрать коэффициент кинематической вязкости ν в зависимости от температуры воздуха, омывающего ребра радиатора, и определить критерий Рейнольдса Re . В зависимости от полученного значения Re (ламинарный или турбулентный режим течения) определяем критерий Нуссельта Nu по одной из формул (Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия. 1977. 344 с.):

при ламинарном режиме течения (для воздуха)

$$Nu_L = 0,57 Re_L^{0,5}, \quad (6)$$

при турбулентном режиме течения (для воздуха)

$$Nu_L = 0,032 Re_L^{0,8}. \quad (7)$$

Определяем коэффициент теплоотдачи α_r потока сушильного агента (воздуха) к поверхности ребер радиатора по формуле:

$$\alpha_r = Nu \lambda_a / L, \quad (8)$$

где λ_a – коэффициент теплопроводности воздуха при установленной температуре, Вт/(м·°C).

Габаритные размеры воздушного радиатора определяют по выражению, позволяющему выбрать наиболее рациональное соотношение между толщину

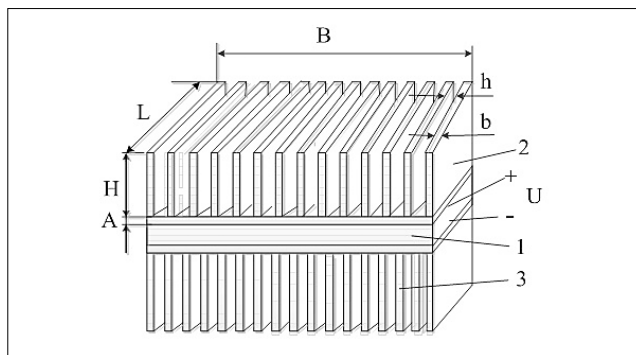


Рис. 6. Схема термоэлектрического теплового насоса «воздух-воздух»: 1 – термоэлектрический элемент Пельтье; 2 и 3 – ребра воздушного радиатора соответственно горячего и холодного контура

Fig. 6. Diagram of an air-to-air thermoelectric heat pump: 1 – Peltier thermoelectric element; 2 – hot circuit air radiator fins; 3 – cold circuit air radiator fins

ной ребра b и его высотой H , при котором достигается наибольший теплообмен при одинаковом расходе металла на ребра радиатора [19]:

$$H = 1,419 \frac{b}{2} \sqrt{\frac{2\lambda_r}{\alpha_r b}}. \quad (9)$$

Площадь поверхности теплообмена с сушильным агентом одного ребра радиатора:

$$F'_r = 2HL. \quad (10)$$

Теплота передается через суммарную площадь поверхности радиатора F_r и может быть выражена через уравнение теплового потока:

$$\sum Q = K_r F_r \Delta t_a, \quad (11)$$

где $\sum Q$ – тепловой поток горячего контура термоэлектрической сборки (теплового насоса), Вт (определяется на основании технической характеристики термоэлектрических модулей); K_r – коэффициент теплопередачи горячей поверхности термоэлектрических модулей сушильному агенту, Вт/(м²·°C); F_r – площадь поверхности всех ребер радиатора, м²; $\Delta t_a = t_{a1} - t_{a2}$ – задаваемая разность температуры воздуха на входе и выходе из радиатора, °C.

$$K_r = \frac{1}{1/\alpha_r + A/\lambda_r}. \quad (12)$$

Количество ребер радиатора

$$N = F_r / F'_r. \quad (13)$$

С учетом принятой скорости теплоносителя w_a площадь (сечение) воздушного канала, в котором должен быть установлен воздушный радиатор

термоэлектрического модуля:

$$f_c = G_a / w_a. \quad (14)$$

Выводы. В соответствии с предложенной функциональной схемой изготовлен лабораторный образец термоэлектрической сушильной установки. Проведены лабораторные исследования процесса сушки яблок для сравнения показателя энергозатрат на испарение 1 кг влаги разработанного образца с некоторыми серийно выпускаемыми сушилками бытового назначения.

Сушка продукта осуществляется сушильным агентом (нагретым воздухом) с частичной рециркуляцией и рекуперацией теплоты удаляемого воздуха. Получены графики изменения температуры в контрольных точках и относительной влажности сушильного агента на входе и на выходе из установки, характеризующие динамику процесса сушки. Приведены параметры яблок до и после сушки в термоэлектрической установке, а также в традиционной серийно выпускаемой конвективной сушилке.

Конструкция разработанного лабораторного образца термоэлектрической сушильной установки обеспечивает более равномерный процесс сушки продукта за счет наличия боковых воздушных каналов и более эффективной организации движения сушильного агента в рабочей камере в отличие от традиционных конвективных сушилок.

В конце процесса сушки яблок разница по количеству испаренной влаги в поддонах термоэлектрической установки не превышает 2,5% (в традиционной конвективной сушилке – более 12,5% даже при периодической перестановке верхних и нижних поддонов).

Применение термоэлектрического теплового насоса с рекуперацией теплоты отработанного агента позволяет уменьшить мощность нагревателя сушильного агента и снизить расход электроэнергии на процесс сушки до 20% по сравнению с традиционными серийно выпускаемыми бытовыми сушильными установками. Приведены формулы расчета радиатора горячего спая термоэлектрического теплового насоса «воздух-воздух» для обоснования параметров термоэлектрической сборки различной производительности сушильных установок предложенной конструкции.

Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию режимов работы конвективной термоэлектрической сушильной установки с учетом текущей влажности высушиваемого продукта, объема рециркуляционного воздуха и количества подмешиваемого наружного воздуха в процессе сушки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kudryashev G.S., Tretyakov A.N., Batishev S.V. et al. Characteristics of the cost of electricity consumption in agricultural production. *IOP: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 677. 32087. DOI: 10.1088/1755-1315/677/3/032087.
2. Неверов Е.Н., Короткий И.А., Горелкина А.К. и др. Ис-

- следование параметров работы дегидрататора для реализации конвективной сушки влагосодержащих пищевых продуктов // *Известия Нижневолжского агро-университетского комплекса*. 2023. N2(70). С. 466-479. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-02-55.
3. Очиров В.Д., Федотов В.А. Определение времени и скорости нагрева измельченных плодов яблок при терморadiационной сушке // *Вестник КрасГАУ*. 2018. N1(136). С. 89-95. EDN: SCBYTT.
 4. Алтухов И.В., Очиров В.Д., Федотов В.А. Экспериментальная ИК-установка для сушки плодов и овощей // *Вестник ИрГСХА*. 2017. N81-2. С. 90-96. EDN: ZFOTTR.
 5. Гасанов У.Р., Магеррамова С.А. Эффективность работы энергосберегающей мини-зерносушилки с комбинированной системой теплоснабжения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N6. С. 9-14. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-6-9-14.
 6. Лобачевский Я.П., Павлов С.А. Инфракрасная сушка семян в псевдооживленном слое // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N5. С. 39-43. DOI: 10.22314/2618-6748-2018-12-5-39-43.
 7. Надеев А.А., Бараков А.В., Дубанин В.Ю. и др. Экспериментальное исследование процесса сушки силикагеля в аппарате с центробежным псевдооживленным слоем // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2018. Т. 14. N2. С. 44-50. EDN: YVOGXY.
 8. Надеев А.А., Бараков А.В., Прутских Д.А. и др. Экспериментальное исследование конвективной сушилки с центробежным псевдооживленным слоем // *Вестник ИГЭУ*. 2021. N2. С. 5-13. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.005-013.
 9. Altukhov I.V., Bykova S.M., Lukina G.V. et al. Automation of the drying process of agricultural raw materials to obtain products of high nutritional value. *IOP: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 421. 32019. DOI: 10.1088/1755-1315/421/3/032019.
 10. Романова Е.В., Орлов А.Ю. Возможности использования тепловых насосов в процессе сушки // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2008. Т. 14. N3. С. 591-596. EDN: KXPDP.
 11. Коновалов В.И., Романова Е.В., Гатапова Н.Ц. Сушка с тепловыми насосами в химической промышленности: возможности и экспериментальная техника // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2011. Т. 17. N1. С. 153-178. EDN: NEEHUB.
 12. Барыкин Р.А., Пойманов В.В., Шахов С.В. Разработка вакуум-сублимационных сушилок с использованием термоэлектрических модулей // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2014. N1(59). С. 47-50. EDN: SDHAXD.
 13. Тихомиров Д.А., Трунов С.С., Кузьмичев А.В. и др. Принцип построения энергосберегающей сушильной установки с применением термоэлектричества // *Электро-технологии и электрооборудование в АПК*. 2021. Т. 68. N1(42). С. 16-22. DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-1-16-22.
 14. Тихомиров Д.А., Яшин И.С., Хименко А.В. и др. Физическое моделирование процесса сушки с применением термоэлектрического теплового насоса // *Техника и оборудование для села*. 2023. N1(307). С. 40-45. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-1-40-45.
 15. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Kuzmichev A.V., et al. Energy-efficient thermoelectric unit for microclimate control on cattle breeding premises. *Energy Reports*. 2020. Vol. 6S6. 293-305. DOI: 10.1016/j.egy.2020.08.052.
 16. Тихомиров Д.А., Хименко А.В., Кузьмичев А.В. Напольный обогрев поросят с применением термоэлектрического теплового насоса // *Техника и оборудование для села*. 2021. N9(291). С. 28-32. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-9-28-32.
 17. Яшин И.С., Тихомиров Д.А. Обзор современных сушильных установок для овощей и фруктов и способы повышения их энергоэффективности // *Агротехника и энергообеспечение*. 2022. N4(37). С. 175-181. EDN: FIHPRQ.
 18. Шостаковский П. Современные решения термоэлектрического охлаждения для радиоэлектронной, медицинской, промышленной и бытовой техники // *Компоненты и технологии*. 2010. N1(102). С. 102-109. EDN: LMCSSS.
 19. Капля В.И., Бурцев А.Г., Андриянов С.А. и др. Расчет режима работы элемента Пельтье, используемого в качестве охладителя в модуле осушки проб воздуха // *Инженерный вестник Дона*. 2017. N 2(45). 70. EDN: ZEONGH.

REFERENCES

1. Kudryashev G.S., Tretyakov A.N., Batishchev S.V. et al. Characteristics of the cost of electricity consumption in agricultural production. *IOP: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 677. 32087 (In English). DOI: 10.1088/1755-1315/677/3/032087.
2. Neverov E.N., Korotky I.A., Gorelkina A.K. et al. Investigation of the parameters of the dehydrator for the implementation of convective drying of moisture-containing foods. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2023. N2(70). 466-479 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2023-02-55.
3. Ochirov V.D., Fedotov V.A. The determination of time and speed of chopped apples heating during thermal and radiation drying process. *The Bulletin of KrasGAU*. 2018. N1(136). 89-95 (In Russian). EDN: SCBYTT.
4. Altukhov I.V., Ochirov V.D., Fedotov V.A. Experimental installation for drying fruits and vegetables. *Vestnik IrGSHA*. 2017. N81-2. 90-96 (In Russian). EDN: ZFOTTR.
5. Gasanov U.R., Magerramova S.A. Performance efficiency of an energy-saving mini dryer with a combined heat supply system. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N6. 9-14 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-6-9-14.
6. Lobachevsky Ya.P., Pavlov S.A. Infrared drying of seeds

- in a fluidized bed. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N5. 39-43 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-6748-2018-12-5-39-43.
7. Nadeev A.A., Barakov A.V., Dubanin V.Yu. et al. Experimental study of the silica gel drying process in the apparatus with centrifugal fluidized bed. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2018. Vol. 14. N2. 44-50 (In Russian). EDN: YVOGXY.
 8. Nadeev A.A., Barakov A.V., Prutskikh D.A. et al. Experimental study of convective dryer with centrifugal fluidized bed. *Vestnik IGEU*. 2021. N2. 5-13 (In Russian). DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.005-013.
 9. Altukhov I.V., Bykova S.M., Lukina G.V. et al. Automation of the drying process of agricultural raw materials to obtain products of high nutritional value. *IOP: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 421. 32019 (In English). DOI: 10.1088/1755-1315/421/3/032019.
 10. Romanova E.V., Orlov A.Yu. Possibilities of using heat pumps in drying process. *Transactions of the TSTU*. 2008. Vol. 14. N 3. 591-596 (In Russian). EDN: KXPDP.
 11. Konovalov V.I., Romanova E.V., Gatapova N.C. Drying with heat pumps in chemical industry: opportunities and experimental techniques. *Transactions of the TSTU*. 2011. Vol. 17. N1. 153-178 (In Russian). EDN: NEEHUB.
 12. Barykin R.A., Poymanov V.V., Shakhov S.V. Development of vacuum sublimation dryers using thermoelectric modules. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2014. N1(59). 47-50 (In Russian). EDN: SDHAXD.
 13. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Kuzmichev A.V. et al. The principle of building an energy-saving drying plant using thermoelectricity. *Electrical technology and equipment in the agro-industrial complex*. 2021. Vol. 68. N1(42). 16-22 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-1-16-22.
 14. Tikhomirov D.A., Yashin I.S., Khimenko A.V., et al. Physical modeling of the drying process using thermoelectric heat pump. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023. N1(307). 40-45 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2023-1-40-45.
 15. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Kuzmichev A.V. et al. Energy-efficient thermoelectric unit for microclimate control on cattle breeding premises. *Energy Reports*. 2020. Vol. 6S6. 293-305 (In English). DOI: 10.1016/j.egy.2020.08.052.
 16. Tikhomirov D.A., Khimenko A.V., Kuzmichev A.V. Floor heating of piglets using a thermoelectric heat pump. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021. N9(291). 28-32 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-9-28-32.
 17. Yashin I.S., Tikhomirov D.A. Review of modern drying installations for vegetables and fruits and ways to increase their energy efficiency. *Agrotekhnika i energoobespechenie*. 2022. N4(37). 175-181 (In Russian). EDN: FIHPRQ.
 18. Shostakovskii P. Modern thermoelectric cooling solutions for electronic, medical, industrial and household appliances. *Components and Technologies*. 2010. N1(102). 102-109 (In Russian). EDN: LMCSSS.
 19. Kaplya V.I., Burtsev A.G., Andriyanov S.A. et al. The calculation of peltier working mode using as a cooler in air drying module. *Engineering Journal of Don*. 2017. N 2(45). 70 (In Russian). EDN: ZEONGH.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Тихомиров Д.А. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования; лабораторные испытания сушильной установки;
 Хименко А.В. – доработка и оформление текста статьи, анализ и выбор расчетных зависимостей, формулирование цели исследования и общих выводов, формирование библиографического списка;
 Кузьмичев А.В. – анализ научных исследований и литературный обзор, лабораторные испытания термоэлектрической сушильной установки.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Tikhomirov D.A. – scientific guidance, formulating the main research directions; laboratory tests of the drying plant;
 Khimenko A.V. – manuscript revision and formatting, calculated dependencies analysis and selection, formulating the study purpose and general conclusions, formation of the reference list;
 Kuzmichev A.V. – research analysis and literature review; laboratory tests of the thermoelectric drying unit.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

10.01.2024

21.02.2024



Использование индивидуального привода колес трактора посредством электрической тяги

Антон Владиславович Бижаев,

канд. техн. наук, доцент,

e-mail: a.bizhaev@mail.ru;

Софья Михайловна Ветрова,

ассистент, аспирант,

e-mail: s.vetrova@rgau-msha.ru;

Алина Сергеевна Барчукова,

ассистент, аспирант,

e-mail: barchukova@rgau-msha.ru;

Николай Сергеевич Кривых,

учебный мастер,

e-mail: krivyh05@gmail.com

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

Реферат. В сельском хозяйстве основной технической единицей, выполняющей тяговые и приводные операции, считается трактор. Источником механической энергии для него служит дизельный двигатель с коэффициентом полезного действия около 40 процентов. У электродвигателей коэффициент полезного действия достигает 95 процентов, и это открывает возможности их использования в качестве независимого привода колес трактора. Рассмотрены существующие системы индивидуального привода колес, в которых установлено повышение эффективности работы машины до 20 процентов. Проведен анализ работы трактора с классической системой силового агрегата и с электроприводной системой. Рассмотрены факторы, влияющие на тягообразование трактора, и способы улучшения тягово-сцепных свойств мобильного средства. (*Цель исследования*) Оценка возможности использования индивидуального привода колес трактора при помощи электрической тяги. (*Материалы и методы*) Разработана концепция управления индивидуальным приводом колес. Построен алгоритм управления колесом с электроприводом. Предложена методика определения буксования для перехода электропривода колеса на соответствующий режим работы. Введен новый показатель «фактор буксования» для связи коэффициентов буксования и сцепления. Величина этого параметра служит индикатором для перехода электропривода в другой режим работы. (*Результаты и обсуждение*) Проведены тяговые испытания на тракторе МТЗ-82.1 при различных опорных поверхностях. Фактор буксования составляет: 0,71 для поля под посев, 0,86 для стерни, 1,19 для залежи и 1,74 для асфальтового покрытия. Для понимания реальной ситуации при работе колеса измерялся крутящий момент на колесе при помощи специального фиксирующего устройства. Получены значения углового смещения вала на 0,2 градуса при касательной силе тяги на колесе 3 килоньютона. (*Выводы*) Для трактора МТЗ-82.1 определен фактор буксования. Предложена математическая модель, связывающая сцепные свойства колеса с буксованием. Диапазон действия модели ограничивается предельным буксованием 30 процентов. Многофакторная характеристика позволит составить программу адаптивных условий для повышения эффективности работы колеса. Определена возможность замера крутящего момента колеса.

Ключевые слова: электротрактор, буксование, циркуляция мощности, индивидуальный привод, управление приводом колеса.

■ **Для цитирования:** Бижаев А.В., Ветрова С.М., Барчукова А.С., Кривых Н.С. Использование индивидуального привода колес трактора посредством электрической тяги // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №2. С. 78-85. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-78-85. EDN: XRYNEM.

Scientific article

Using Individual Tractor Wheel Drive Through Electric Traction

Anton V. Bizhaev,

Ph.D.(Eng.), associate professor,

e-mail: a.bizhaev@mail.ru;

Sofya M. Vetrova,

Ph.D.(Eng.) student, assistant,

e-mail: s.vetrova@rgau-msha.ru;

Alina S. Barchukova,

Ph.D.(Eng.) student, assistant,

e-mail: barchukova@rgau-msha.ru;

Nikolay S. Krivyh,

laboratory assistant,

e-mail: krivyh05@gmail.com

Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Abstract. In agriculture, tractors serve as the principal machinery for performing traction and driving operations. They are mainly powered by diesel engines with an efficiency of about 40 percent. Electric motors boast an efficiency of 95 percent, presenting the opportunity to serve as independent drives for tractor wheels. The study review existing individual wheel drive systems, revealing operational efficiency improvements of up to 20 percent. A comparative analysis was conducted between tractors using traditional power units and those equipped with electric drive systems. The study also examined factors affecting tractor traction and explored methods to enhance the traction capabilities of these vehicles. (*Research purpose*) The study aims to evaluate the feasibility of using electric traction for individual drive systems in tractor wheels. (*Materials and methods*) A concept for controlling individual wheel drives has been developed, as well as an algorithm specifically for managing electric wheels. Additionally, a method has been proposed for detecting slippage, which triggers the switching of the electric wheel drive to the appropriate mode. Furthermore, a new indicator, the «slip factor,» has been introduced to correlate slip with adhesion coefficients. The value of this parameter is used as a criterion for transitioning the electric drive to a different operational mode. (*Results and discussion*) Traction tests were conducted on the MTZ-82.1 tractor across various supporting surfaces. The measured slip factors were as follows: 0.71 for a cropped field, 0.86 for stubble, 1.19 for fallow land, and 1.74 for asphalt pavement. To accurately assess the wheel's performance under real conditions, torque measurements were taken using a specialized locking device. These measurements revealed angular displacements of the shaft by 0.2 degrees when subjected to a tangential traction force of 3 kilonewtons on the wheel. (*Conclusions*) The slip factor for the MTZ-82.1 tractor has been determined. A mathematical model has been proposed that links the wheel's adhesion properties with slipping. The model proves to be applicable up to a slip limit of 30 percent. This multifactorial approach enables the creation of an adaptive program to enhance wheel efficiency. Additionally, the capability to measure wheel torque has been established.

Keywords: electric tractor, slipping, power circulation, individual drive, wheel drive control.

■ **For citation:** Bizhaev A.V., Vetrova S.M., Barchukova A.S., Kriviyh N.S. Using individual tractor wheel drive through electric traction. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 78-85 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-78-85. EDN: XRYHEM.

Проблемы энергосбережения и токсичности двигателей внутреннего сгорания становятся все более актуальными. Дизельный двигатель внутреннего сгорания, устанавливаемый на тракторы, комбайны и другие мобильные машины, обладает невысокой эффективностью работы (порядка 40-45%) при наиболее благоприятных режимах [1]. При этом процесс образования механической мощности сопровождается выбросом с отработавшими газами токсичных и загрязняющих окружающую среду веществ [2].

Для решения проблем энергосбережения и токсичности двигателей внутреннего сгорания (ДВС) необходимо развивать новые технологии, в том числе с применением электрических и гибридных силовых агрегатов [3]. Некоторые существующие методы снижения токсичности не создают препятствий при совместном использовании электропривода и ДВС на мобильной машине. К таким методам относятся применение биотоплива, водородных топливных элементов и других альтернативных источников энергии [4, 5].

К основным факторам, влияющим на эффективность и производительность тракторов, относятся тягово-сцепные свойства колес с опорной поверхностью [6]. В целях обеспечения наилучшего режима работы при взаимодействии движителя с почвой можно использовать электрический привод, так как он обладает высоким быстродействием, гибкостью в управлении и широким диапазоном работы.

Наиболее перспективными электродвигателями считаются вентильные бесщеточные двигатели постоянного тока [7]. Они эффективны и неприхотливы по сравнению с щеточными или асинхронными электродвигателями [8]. В электрическом двигателе большее количество потребляемой энергии преобразуется в механическую, чем в ДВС, более плавная и бесшумная работа обеспечивает комфортное и тихое движение.

В гибридных технологиях в двигателе внутреннего сгорания обычно генерируется механическая энергия, которая преобразуется в электрическую и приводит электродвигатель в действие. Эти технологии широко распространены на автомобилях, а на тракторах находятся на стадии опытных разработок [9]. Считается, что работа ДВС ограничивает использование трактора в помещениях с недостаточной вентиляцией. Тем не менее, временный режим работы на запасенной электрической энергии при использовании электропривода вполне может применяться [10].

Наиболее важная особенность электрического двигателя в качестве привода трактора заключается в возможности индивидуального привода каждого колеса. Управление такой системой может быть реализовано с помощью автоматики.

На данный момент уже есть разработки автомобиля с индивидуальным приводом колес. С 2000 по 2001 г. компанией «НАМИ-Сервис» и ОГК СТ АМО ЗИЛ совместно разрабатывалась конструкторская

документация на автомобиль на базе ЗИЛ-49061 с гидрообъемной трансмиссией и индивидуальным приводом колес [11]. Позднее автомобиль сертифицирован под названием «Гидроход-49061». КПД этой машины по опытным данным был выше на 20% в одинаковых условиях [12].

Гидрообъемная трансмиссия (ГОТ) редко используется на автомобилях или тракторах ввиду сравнительно низкого КПД, порядка 70-80%. ГОТ устанавливается преимущественно на машинах с бесступенчатым изменением скорости, например комбайнах.

Недостатком механической трансмиссии считается низкий КПД на больших машинах, таких как карьерные самосвалы и строительная техника, поскольку из-за размеров деталей значительно увеличивается момент инерции [13].

Современные тракторы оснащены преимущественно механическими ступенчатыми трансмиссиями с ручным, гидравлическим или электрическим управлением. Такие трансмиссии обычно включают межколесные и промежуточные симметричные шестеренчатые дифференциалы, которые обеспечивают разделение крутящего момента по порвну и позволяют ведущим колесам вращаться с разными угловыми скоростями. С точки зрения маневрирования трактора дифференциал не вызывает проблем. Однако при прямолинейном движении касательная сила может быть одинаковой только в одинаковых условиях на ведущих колесах. Сцепление колеса с поверхностью и кинематический радиус колеса постоянно меняются, приводя к изменению касательной силы.

Симметричный дифференциал распределяет крутящий момент поровну между колесами, учитывая внутреннее трение [14]. Недостаток состоит в том, что разблокированный дифференциал обеспечивает на оба колеса одинаковый крутящий момент, который соответствует наименьшему значению, реализуемому одним из колес. Например, такая ситуация может возникнуть, когда одна сторона колес попадает в борозду, и коэффициенты сцепления на колесах будут разные [15]. Для предотвращения этого используется блокировка дифференциала, что позволяет жестко соединить две подсистемы при прямолинейном движении и полностью реализовать касательную силу тяги колеса с большим коэффициентом сцепления. Однако в реальной ситуации все колеса трактора работают в разных условиях, и при блокировке дифференциала их угловые скорости будут одинаковыми, но пройденные пути различаться. В результате одно колесо будет буксовать, а другое подтягиваться юзом, что вызовет кинематическое несоответствие, потери мощности и дополнительную нагрузку на трансмиссию [16].

Для улучшения тягово-сцепных свойств активно используются следующие решения.

1. Балластирование машины. Этот способ повышает вес машины и, соответственно, касательную силу тяги, создаваемую на движителях. Однако при этом увеличивается давление на почву [17].

2. Перераспределение веса орудия на колеса трактора за счет работы гидравлической системы управления навесным устройством. В этом случае энергия расходуется на работу гидравлической части.

3. Установка спаренных колес. Пятно контакта колеса с поверхностью увеличивается, однако это приводит к большим потерям из-за сопротивления качения колес.

4. Гибкое управление дифференциалом. При своевременной блокировке и разблокировке дифференциала можно частично компенсировать потери в тягообразовании. Но полностью от потерь избавиться невозможно, так как при блокировке дифференциала создается кинематическое несоответствие, начинается циркуляция мощности между колесами и опорной поверхностью [18].

Способ улучшения тягово-сцепных свойств в виде индивидуального привода колес и их гибкого управления не получил широкого применения. Созданы опытные образцы и проведены некоторые исследования в данной области, но конечный вариант подобной системы пока не предложен [19].

Цель исследования. Оценка возможности использования индивидуального привода колес трактора при помощи электрической тяги.

Материалы и методы. Повышение буксования ведущих колес трактора приводит к снижению тягового КПД. Кроме тягового усилия энергия расходуется на преодоление трения и деформацию колеса с опорной поверхностью. Современные технологии позволяют реализовать гибкое управление ведущими колесами с помощью электропривода. Путем оптимизации нагрузки на каждое колесо можно полностью отказаться от использования дифференциала, снизить буксование и проскальзывание.

Для разработки ведущего колеса с индивидуальным приводом необходимо создать алгоритм управления и смоделировать связанные с ним параметры. Потери, вызванные повышенным буксованием и жесткостью трансмиссии, возникают из-за краткосрочного увеличения нагрузки со стороны навесной системы и кинематического несоответствия ведущих колес. Это проявляется в разном расстоянии прохода колес с одинаковой угловой скоростью при жесткой работе трансмиссии. Современные системы электронного управления частично решают данную проблему, отслеживая буксование и другие параметры для динамической стабилизации машины.

Разработан примерный алгоритм управления электроприводом колеса, позволяющий поддерживать заданную частоту вращения колеса при условии постоянства действительной скорости трактора (рис. 1). Действительная и теоретическая скорость различаются поправкой на буксование. Таким образом, при наличии буксования теоретическая скорость будет всегда выше.

На текущий момент предложены несколько способов определения буксования [20]. В алгоритме используется разрабатываемая методика отслеживания краткосрочного ускорения колеса, и с учетом момента инерции системы определяются сцепные свойства поверхности.

Для связи буксования и сцепных свойств колеса вводится условный показатель «фактор буксования» на разных агрофонах. Определив по силе тока, питающего электропривод, крутящий момент на колесе (касательную силу тяги), можно оценить в первом приближении величину буксования.

В реальных условиях при движении машины буксование всегда больше нуля и увеличивается по мере возрастания нагрузки до точки максимального тягового усилия. Это связано с деформацией опорной поверхности и колеса. После достижения порогового значения силы тяги происходит срыв пласта или протектора колеса, и сила трения покоя переходит в силу трения скольжения.

Таким образом, моделирование буксования можно рассматривать как сумму характеристик, полученных путем аппроксимации буксования до и после активного перехода от силы трения покоя. Для первого случая можно использовать уравнение регрессии второго порядка, а для второго – функцию на основе гиперболы. В результате характеристика буксования будет иметь вид:

$$\delta = a_p P_{кр} + b_p P_{кр}^2 + \frac{R}{P_{кр} - P_{кр}} - \frac{R}{P_{кр}}, \quad (1)$$

где a_p и b_p – расчетные коэффициенты, зависящие от условий буксования (почвенный фон, износ протектора и т.д.); R – коэффициент плавности перехода от силы трения покоя к силе трения скольжения; $P_{кр}$ – усилие трактора на крюке; $P_{кр}$ – предельное усилие трактора на крюке при неизменных условиях тягово-сцепных свойств.

В свою очередь, предельная сила на крюке при переходе от силы трения покоя к силе трения качения (соответствует силе при срыве пласта почвы) упрощенно определяется по зависимости:

$$P_{кр} = \sqrt{\frac{\delta_{пр}}{a_p} + \left(\frac{b_p}{2a_p}\right)^2} - \frac{b_p}{2a_p}, \quad (2)$$

где $\delta_{пр}$ – буксование при предельной силе тяги на крюке трактора.

Характеристика буксования трактора обычно определяется для неизменных условий работы, ко-

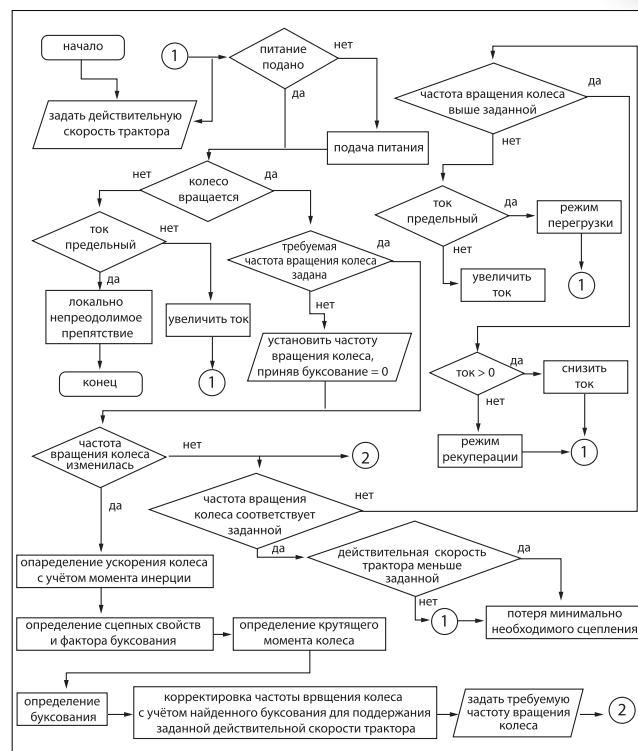


Рис. 1. Блок-схема алгоритма управления электроприводом колеса трактора

Fig. 1. Block diagram of the control algorithm for the electric drive of a tractor wheel

торые описываются коэффициентами a_p и b_p . При варьировании других факторов удобно использовать зависимость, характеризующую тенденцию изменения линии буксования. Для этого задается параметр, связанный с величиной фактора буксования F_6 при определенном режиме работы, который определяет условия изменения коэффициентов:

$$a_p = f(F_6) \text{ и } b_p = f(F_6). \quad (3)$$

Коэффициенты a_p и b_p устанавливаются эмпирическим путем при различных режимах работы трактора, и по ним осуществляется дальнейшее построение характеристики буксования. Эти коэффициенты будут зависеть от многих факторов, в том числе от типа агрофона, рисунка протектора, геометрии колеса, влажности, упругости почвы и т.д. Но для конкретного поля и трактора, а также других условий коэффициенты будут близки к постоянству, а значит ими удобно оперировать в текущих условиях. Причем трактору достаточно начать выполнение работы, и при переходных процессах коэффициенты определяются автоматически посредством электронных систем, содержащих алгоритм управления колесом. По показаниям с нескольких колес определение параметров более достоверное.

Для понимания реального протекания процессов на колесах трактора проведено экспериментальное исследование. Прежде чем реализовать полно-

ценный электропривод колеса с электронным управлением, был проведен анализ процессов на механической системе привода колес, поэтому объектом исследования выбран трактор МТЗ-82.1.

Для определения характера изменения момента на колесе, паразитной мощности и других потерь на колесе предлагается использовать экспериментальную установку (рис. 2).

Установка состоит из дисков с метками, закрепленных на выходных валах заднего моста трактора; датчиков, считывающих метки; динамометра для определения нагрузки на крюке; дополнительного колеса для измерения реальной скорости трактора (рис. 3) по известным методикам [20].

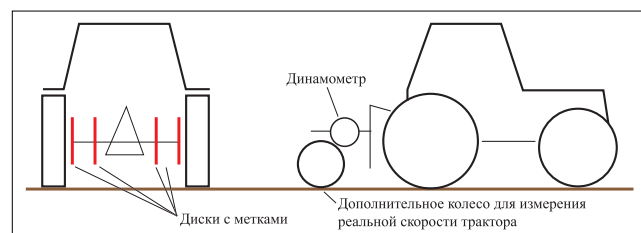


Рис. 2. Схема экспериментальной установки на тракторе

Fig. 2. Diagram of the experimental setup on a tractor



Рис. 3. Вид экспериментальной установки на тракторе МТЗ-82.1. Расположение оптических датчиков с метками на мосту (левый верхний) на валу, детальный вид (правый), дополнительное колесо с датчиком для измерения реальной скорости трактора (левый нижний)

Fig. 3. The experimental setup on the MTZ-82.1 tractor. The location of optical sensors with marks on the bridge (upper left), on the shaft in a detailed view (right), and an additionally extra wheel with a sensor for measuring the actual speed of the tractor (lower left)

На каждый диск диаметром 480 мм нанесены 400 меток, точность поворота диска 0,9 градуса позволяет с необходимой точностью замерить частоту вращения колес. Кроме того, расположение пары дисков на одном валу колеса позволяет измерить крутящий момент по величине скручивания

вала, так как отслеживается взаимный угол поворота одного диска относительно другого. Тяговое усилие измерялось при помощи цифрового тензометрического динамометра с пределом измерения 10 кН, что согласуется с текущими задачами.

Для калибровки измерительного оборудования трактор был установлен на тормозной стенд, в дальнейшем испытания проводились в полевых условиях на различных агрофонах. Трактор загружался прицепными орудиями в зависимости от необходимого тягового усилия.

Результаты и обсуждение. При анализе экспериментальных характеристик буксования трактора МТЗ-82.1 на различных агрофонах были получены коэффициенты a_p и b_p (рис. 4).

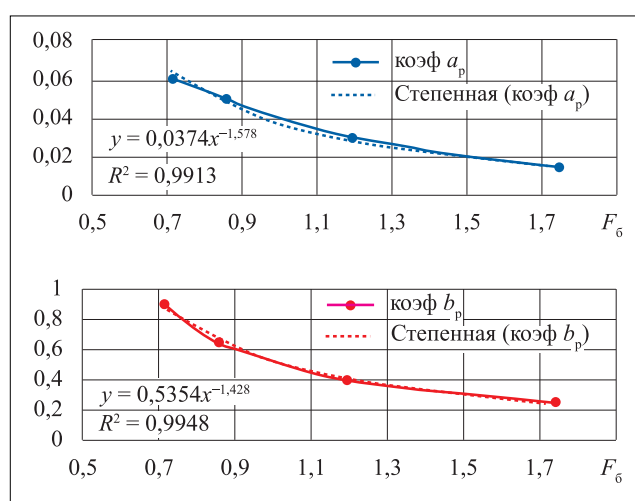


Рис. 4. Аппроксимация зависимости изменения коэффициентов a_p и b_p при работе трактора МТЗ-82.1 на различных агрофонах

Fig. 4. Approximation of the changes in coefficients a_p and b_p when operating the MTZ-82.1 tractor across various agricultural settings

С повышением мягкости агрофона, следовательно, с уменьшением фактора F_6 коэффициенты a_p и b_p увеличиваются. Предельная сила тяги на крюке также может изменяться при различных условиях сцепления колеса с поверхностью и определяться по зависимости от буксования.

Фактор буксования удобно привязать к допустимому буксованию при номинальном тяговом усилии, так как этот параметр для тракторов регламентируется. Фактор буксования можно определить как отношение тягового усилия, при котором буксование соответствует допустимому значению, к номинальному тяговому усилию трактора на крюке (рис. 5):

$$F_6 = P_{кб} / P_{кр}. \quad (4)$$

Если $F_6 = 1$, то на текущей характеристике буксования при достижении тягового усилия, соответ-

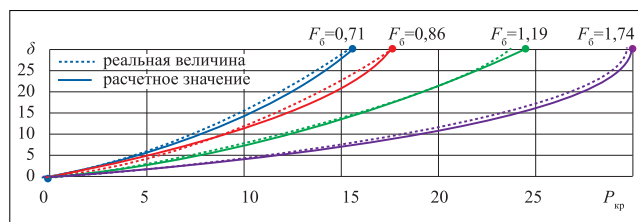


Рис. 5. Реальная и расчетная тяговая характеристика трактора МТЗ-80 по буксованию на различных агрофонах. При $F_6 = 0,71$ фон – поле под посев; при $F_6 = 0,86$ фон – стерня; при $F_6 = 1,19$ фон – залежь; при $F_6 = 1,74$ фон – асфальтовая дорога

Fig. 5. Actual and calculated traction characteristics of the MTZ-80 tractor related to slipping on various agricultural backgrounds. At $F_6 = 0,71$, the background is a seeded field; at $F_6 = 0,86$, the background is stubble; at $F_6 = 1,19$, the background is fallow; at $F_6 = 1,74$, the background is an asphalt road

ствующего номинальному, буксование станет равным допустимому значению. По существующим характеристикам аппроксимацией при постоянном значении коэффициента $R = 10$ получены зависимости коэффициентов:

$$a_p = 0,0374 F_6^{-1,578}, b_p = 0,5354 F_6^{-1,428}. \quad (4)$$

Параметр R в данной ситуации не изменяется при смене агрофона, несмотря на то, что он определяет диапазон крюкового усилия при условном переходе от силы трения покоя колеса к силе трения скольжения. Из полученных зависимостей видно, что каждый тип агрофона соответствует характеризующему его фактору буксования, и точность совпадения характеристик в рабочем диапазоне трактора сравнимо высока (средний коэффициент детерминации 0,98).

В результате измерений и обработки получены также показания с дисковых датчиков (рис. 6). Сплошными линиями на схеме показана работа при начальных условиях без нагрузки, пунктирными – при загрузке правого колеса. На вертикальной шкале отмечены логические уровни датчиков от 0 до 1, на горизонтальной – время в миллисекундах. Красная линия обозначает внешний диск с метками, синяя – внутренний диск с метками на валу.

Нагрузка величиной 3 кН подавалось на правое колесо и фиксировалось динамометром, за вычетом силы сопротивления качению. Левое колесо было без нагрузки.

Результаты приведены в виде логических уровней работы датчика на обнаружение меток для левого и правого колеса. На графике замечен сдвиг между дисками на валу привода правого колеса. Этот сдвиг выражает поворот одного диска относительно другого на одном валу, следовательно, вал при нагрузке на него подвергается скручиванию. В

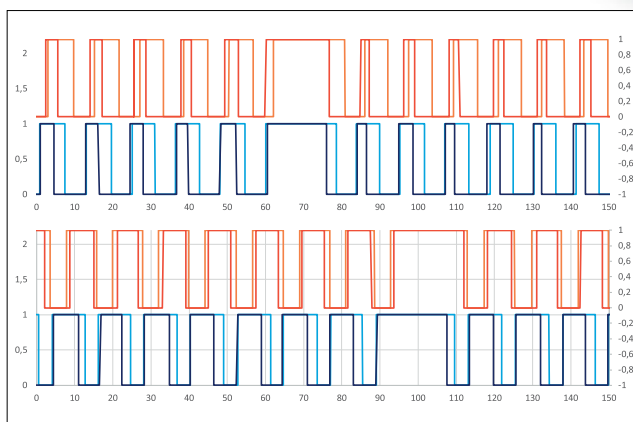


Рис. 6. Взаимное расположение меток дисков при вращении колес трактора: сверху – характеристика поворота дисков правого колеса; внизу – характеристика поворота дисков левого колеса

Fig. 6. The relative position of the disc marks as the tractor wheels rotate: top – the rotation characteristics of the right wheel discs; bottom – the rotation characteristics of the left wheel discs

данной ситуации скручивание составило 0,2 градуса. Нагрузку измеряли динамометром с учетом поправки на сопротивление качению колес трактора. Необходимые результаты можно использовать в дальнейшем для разработки алгоритмов управления индивидуальным приводом колес.

Выводы

Для работы колеса с индивидуальным электрическим приводом предложен алгоритм автоматизированного управления системой, который учитывает условия сцепления колеса с опорной поверхностью.

При полной оценке параметров паразитной мощности станет возможной реализация более точной математической модели, позволяющей создать систему анализа расчетов для ее внедрения в электронную систему управления независимым приводом колес.

Система может быть дополнена под различные задачи, ее математическая реализация имеет практическую ценность при использовании в тракторах электроприводных силовых агрегатов.

Предложенная математическая модель позволяет оценить характеристики буксования трактора при любых других условиях. Для трактора МТЗ-82.1 определен фактор буксования для разных агрофонов при прочих равных условиях: 0,71 – поле под посев, 0,86 – для стерни, 1,19 – для залежи и 1,74 – для асфальтового покрытия.

Диапазон действия модели ограничивается предельной силой тяги на крюке, в данном случае соответствующей буксованию 30%, что актуально для определения параметров работы тракторов.

При управлении колесом с индивидуальным приводом такая модель может быть заложена для опре-

деления тягово-сцепных свойств. Определение параметра по многофакторной характеристике позволит составить программу адаптивных условий для повышения эффективности работы тракторного колеса. Определена возможность замера крутящего момента

на колесе при помощи разработанной системы дисков. В рассматриваемых условиях скручивание вала составило 0,2 градуса при приложении нагрузки 3 кН к одному колесу. Это оправдывает применение такой системы для решения аналогичных задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Кривых Н.С., Беденко А.Е. Преимущества и недостатки электродвигателя в сравнении с ДВС // *Промышленность и сельское хозяйство*. 2023. N10(63). С. 15-17. EDN: RADKQI.
- Касимов Е.А. Технология снижения выбросов ДВС // *Тенденции развития науки и образования*. 2022. N92-9. С. 62-64. DOI: 10.18411/trnio-12-2022-422.
- Ситдииков В.М., Дударева Н.Ю., Ишемгузин А.А., Даутов И.А. Снижение токсичности отработавших газов в камере сгорания двигателя внутреннего сгорания // *Труды НАМИ*. 2022. N4(291). С. 85-95. DOI: 10.51187/0135-3152-2022-4-83-95.
- Бижаев А.В., Девянин С.Н. Снижение токсичности отработавших газов дизеля путем подачи топлива с водой в камеру сгорания // *АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо*. 2019. Т. 18. N12. С. 586-588. EDN: QIUPAC.
- Ощепков П.П., Заев И.А., Смирнов С.В., Бижаев А.В. Исследование биодизельного топлива с добавками пальмового масла и перекиси водорода // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N3. С. 48-53. DOI: 10.22314/2073-7599-2019-13-3-48-53.
- Кутьков Г.М., Соловейчик А.А., Сидоров М.В. Теория и расчет полноприводного трактора // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2014. Т. 8. N2. С. 8-14. EDN: SDCFRТ.
- Chau K., Chan C., Liu C. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid vehicles. *Transactions on Industrial Electronics*. 2008. 55(6). 2246-2257. DOI: 10.1109/TIE.2008.918403.
- Якушев А.Я., Назирхонов Т.М., Викулов И.П., Марков К.В. Определение основных параметров асинхронного тягового электродвигателя // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2019. Т. 16. Вып. 4. С. 592-601. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-592-601.
- Бижаев А.В. Исследование параметров трактора с электроприводным силовым агрегатом // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N4. С. 33-42. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42.
- Бижаев А.В., Девянин С.Н., Чумаков В.Л. Энергетические и экономические параметры работы трактора с электроприводом колёс // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26. N1. С. 53-58. DOI: 10.26897/2687-1149-2024-1-53-58.
- Лепешкин А.В. Опыт использования и перспективы создания многоприводных колесных машин повышенной проходимости // *Известия МГТУ МАМИ*. 2010. N2 (10). С. 54-65. EDN: NCCXTP.
- Лепешкин А.В. Показатели оценки эффективности передачи и преобразования энергии трансмиссией и двигателем колесной машины // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2014. N11. С. 29-35. EDN: UAHLQF.
- Köller S., Uerlich R., Westphal C., Franck M. Design of an electric drive axle for a heavy truck. *ATZheavyduty worldwide*. 2021. 14. 20-25. DOI: 10.1007/s41321-021-0420-8.
- Лустенков М.Е. Исследование кинематических и силовых характеристик автомобильного дифференциала повышенного трения // *Актуальные вопросы машиноведения*. 2022. Т. 11. С. 7-10. EDN: CINQRZ.
- Анчуков В.В., Алюков А.С. Имитационное моделирование системы автоматического управления блокировкой дифференциалов грузовых автомобилей // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. 2018. Т. 18. N3. С. 68-79. DOI: 10.14529/engin180308.
- Прядкин В.И., Гудков В.В., Сокол П.А. Анализ подходов по исследованию явления циркуляции мощности в трансмиссии полноприводного автомобиля // *Лесотехнический журнал*. 2019. Т. 9. N3(35). С. 205-224. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.3/19.
- Иовлев Г.А., Побединский В.В., Ильин М.А. и др. Особенности балластирования сельскохозяйственных тракторов различных тяговых классов // *Известия Международной академии аграрного образования*. 2022. N61. С. 42-53. EDN: NEEQYS.
- Горшков Ю.Г., Калугин А.А., Золотых С.В. Средняя вероятностная оценка проходимости сельскохозяйственной техники в условиях деформируемых грунтов // *Научная жизнь*. 2018. N3. С. 67-74. EDN: ХРСКЕН.
- Косицын Б.Б., Котиев Г.О., Мирошниченко А.В. и др. Определение характеристик трансмиссий колёсных и гусеничных машин с индивидуальным электроприводом ведущих колёс // *Труды НАМИ*. 2019. N3(278). С. 22-35. EDN: JUOYZM.
- Иванов А.Б., Таркинский В.Е., Ревенко В.Ю. К вопросу определения буксования сельскохозяйственных тракторов // *Техника и оборудование для села*. 2021. N3(285). С. 14-19. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-3-14-18.

REFERENCES

- Krivykh N.S., Bedenko A.E. Advantages and disadvantages of an electric motor in comparison with an internal combustion engine. *Industry and Agriculture*. 2023. N10(63). 15-17 (In Russian). EDN: RADKQI.
- Kasimov E.A. Technology for reducing internal combustion engine emissions. *Trends in the development of science*

- and education. 2022. N92-9. 62-64 (In Russian). DOI: 10.18411/trnio-12-2022-422.
3. Sitdikov V.M., Dudareva N.Yu., Ishemguzhin A.A., Dautov I.A. Emission control and reduction in the combustion chamber of an internal combustion engine. *Trudy NAMI*. 2022. N4(291). 85-95 (In Russian). DOI: 10.51187/0135-3152-2022-4-83-95.
 4. Bizhaev A.V., Devyanin S.N. Diesel exhaust gas toxicity reduction by supplying fuel with water to the combustion chamber. *AutoGasFilling Complex + Alternative Fuel*. 2019. Vol. 18. N12. 586-588 (In Russian). EDN: QIUPAC.
 5. Oshchepkov P.P., Zaev I.A., Smirnov S.V., Bizhaev A.V. Study of biodiesel fuel with palm oil and hydrogen peroxide additives. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019. Vol. 13. N3. 48-53 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2019-13-3-48-53.
 6. Kutkov G.M., Soloveitchik A.A., Sidorov M.V. Theory and calculation of an all-wheel drive tractor. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2014. Vol. 8. N2. 8-14 (In Russian). EDN: SDCFR7.
 7. Chau K., Chan C., Liu C. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008. 55(6). 2246-2257 (In English). DOI: 10.1109/TIE.2008.918403.
 8. Yakushev A.Ya., Nazirkhonov T.M., Vikulov I.P., Markov K.V. Determination of the main parameters of an asynchronous traction electric motor. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2019. Vol. 16. N4. 592-601 (In Russian). EDN: LBZMYU.
 9. Bizhaev A.V. Research of tractor power unit with electric drive parameters. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N4. 33-42 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42.
 10. Bizhaev A.V., Devyanin S.N., Chumakov V.L. Energy and economic operating parameters of tractor equipped with electrically driven wheels. *Agricultural Engineering*. 2024. Vol. 26. N1. 53-58 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2024-1-53-58.
 11. Lepeshkin A.V. Experience in the use and prospects for the creation of multi-wheel wheeled vehicles with increased cross-country capability. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2010. N2 (10). 54-65 (In Russian). EDN: NCCXTP.
 12. Lepeshkin A.V. Indices for efficiency estimation of energy transfer and conversion by transmission and mover of wheeled vehicle. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2014. N11. 29-35 (In Russian). EDN: UAHLPQ.
 13. Köller S., Uerlich R., Westphal C., Franck M. Design of an electric drive axle for a heavy truck. *ATZheavy duty world wide*. 2021. 14. 20-25 (In English). DOI: 10.1007/s41321-021-0420-8.
 14. Lustenkov M.E. Study of the kinematic and power characteristics of an automobile limited-slip differential. *Current issues of machine science*. 2022. Vol. 11. 7-10 (In Russian). EDN: CINQRZ.
 15. Anchukov V.V., Alyukov A.S. Simulation modeling of the automatic control system for differential locks of trucks. *Bulletin of the South Ural State University*. 2018. Vol. 18. N3. 68-79 (In Russian). DOI: 10.14529/engin180308.
 16. Pryadkin V.I., Gudkov V.V., Sokol P.A. Analysis of approaches to research the phenomenon of power circulation in a transmission of all-wheel-drive vehicle. *Forestry Engineering Journal*. 2019. Vol. 9. N3(35). 205-224 (In Russian). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.3/19.
 17. Iovlev G.A., Pobedinsky V.V., Ilyin M.A. et al. Features of ballasting agricultural tractors of different traction classes. *Proceedings of the International Academy of Agrarian Education*. 2022. N61. 42-53 (In Russian). EDN: NEEQYS.
 18. Gorshkov Yu.G., Kalugin A.A., Zolotykh S.V. Average probabilistic assessment of the patency of agricultural machinery in conditions of deformable soils. *Scientific Life*. 2018. N3. 67-74 (In Russian). EDN: XPCKEH.
 19. Kositsyn B.B., Kotiev G.O., Miroshnichenko A.V. et al. Characterization of transmissions of wheeled and tracked vehicles with individual drive wheels. *Trudy NAMI*. 2019. N3(278). 22-35. EDN: JUOYZM.
 20. Ivanov A.B., Tarkivsky V.E., Revenko V.Yu. To the issue of determining agricultural tractor slipping. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021. N3(285). 14-19 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-3-14-18.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Бижаев А.В. – разработка методики исследования, анализ экспериментов данных, научное руководство;
Ветрова С.М. – формирование характеристик по результатам эксперимента, редактирование графической части;
Барчукова А.С. – изучение состояния вопроса, анализ литературы;
Кривых Н.С. – проведение экспериментов для снятия характеристик с трактора, обработка полученных данных.
Авторы одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Bizhaev A.V. – development of research methodology, analysis of experimental data, scientific supervision;
Vetrova S.M. – formation of characteristics based on the experimental results, graphical content editing;
Barchukova A.S. – investigating the current state of the topic, literature review;
Krivyykh N.S. – conducting experiments to obtain tractor characteristics, collected data processing.
The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

01.04.2024

21.05.2024

EDN: YJOGUK

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-86-91



Научная статья

УДК 631.358



Автоматизированный комбинированный агрегат с универсальным почвообрабатывающим адаптером

Бадри Хутаевич Ахалая,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: badri53@yandex.ru;

Юлия Сергеевна Ценч,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: vimasp@mail.ru;
Анастасия Владимировна Миронова,
научный сотрудник,
e-mail: timchenko-anastasia93@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Показали, что применение автоматизированного комбинированного агрегата с универсальным адаптером для поверхностной обработки почвы является актуальным и перспективным направлением развития сельскохозяйственной техники. (*Цель исследования*) Разработка автоматизированного комбинированного агрегата с универсальным адаптером, улучшающим качество почвы и повышающим устойчивость движения агрегата. (*Материалы и методы*) Почвообрабатывающий адаптер состоит из двух дугообразных сегментов, установленных в передней части на общей оси с возможностью вращения, а задние части содержат мини-гидроцилиндр, дистанционно связанный с беспроводным исполнительным механизмом гидросистемы агрегата. На дугообразных сегментах находятся сменные режущие насадки. Длина сегментов 25 сантиметров. На общей оси вместе с сегментами установлены сверху держатель под углом 40-45 градусов к горизонтальной плоскости и снизу саблевидный щелеватель под углом 15-20 градусов. (*Результаты и обсуждение*) Установили, что разработанный агрегат с инновационным адаптером позволяет осуществлять одновременно три операции: подрезание почвы в горизонтальной плоскости, рыхление, уничтожение сорняков. Отметим, что изменение ширины захвата устройства автоматизировано из кабины трактора. Конструкция агрегата способствует повышению качества обработки почвы, повышает устойчивость движения, защищает сегменты от износа и сокращает затраты на изготовление. (*Выводы*) Предлагаемый комбинированный агрегат для обработки почвы обеспечивает крошение, выравнивание, прикатывание и щелевание почвы, позволяет улучшить инфильтрацию почвы. Расположение держателя и щелевателя с наклоном к горизонтальной плоскости соответственно 40-45 и 15-20 градусов снижает тяговое сопротивление агрегата и сокращает энергетические затраты.

Ключевые слова: комбинированный агрегат, почвообрабатывающий адаптер, мини-гидроцилиндры, щелеватели, дугообразные сегменты, рабочие органы.

■ **Для цитирования:** Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С., Миронова А.В. Автоматизированный комбинированный агрегат с универсальным почвообрабатывающим адаптером // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №2. С. 86-91. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-86-91. EDN: YJOGUK.

Scientific article

Automated Combined Unit with Universal Tillage Adapter

Badri Kh. Akhalaya,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: badri53@yandex.ru;

Yulia S. Tsench,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: vimasp@mail.ru;
Anastasia V. Mironova,
researcher,
e-mail: timchenko-anastasia93@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper shows that using an automated combined unit with a universal tillage adapter for surface tillage represents a relevant and promising direction in the development of agricultural machinery. (*Research purpose*) The study aims to develop

an automated combined unit equipped with a universal adapter designed to improve soil quality and increase the stability of the unit's movement. (*Materials and methods*) The tillage adapter consists of two arc-shaped segments mounted at the front on a common axis that allows rotation. The rear sections contain a mini-hydraulic cylinder, which is remotely connected to the wireless actuator of the unit's hydraulic system. The arcuate segments are equipped with replaceable cutting attachments and measure 25 centimeters in length. Mounted on a common axis with these segments, a holder is installed at the top at an angle of 40-45 degrees to the horizontal plane, while a saber-shaped slotter is positioned at the bottom at an angle of 15-20 degrees. (*Results and discussion*) It was discovered that the developed unit, equipped with an innovative adapter, facilitates three simultaneous operations: cutting the soil in a horizontal plane, loosening the soil, and eliminating weeds. Additionally, the working width of the device can be automated adjusted from the tractor cabin. The design of the unit improves tillage quality, increases movement stability, protects segments from wear and reduces manufacturing costs. (*Conclusions*) The proposed combined soil tillage unit provides crumbling, leveling, rolling and slicing of soil, and improves soil infiltration. The location of the holder and slotting device with an inclination to the horizontal plane of 40-45 and 15-20 degrees, respectively, reduces the traction resistance of the unit and reduces energy costs.

Keywords: combined unit, soil-cultivating adapter, mini-hydraulic cylinders, slotters, arcuate segments, working parts.

■ **For citation:** Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S., Mironova A.V. Automated combined unit with universal tillage adapter. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 86-91 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-86-91. EDN: YJOGUK.

Агротехнический и технико-экономический эффект процессов поверхностной обработки почвы может быть достигнут за счет сокращения объема почвенного пласта. Необходимое рыхление почвы в пределах задаваемой глубины и ширины обрабатываемого пласта может быть сплошным или полосным [1]. В зависимости от типа рабочих органов форма и площадь поперечного сечения пласта могут различаться. Форма сечения пласта определяется профилем дна слоя [2]. Профиль может быть: ровным (лемешные плуги, плоскорезные орудия, культиваторы); гребнистым (чизельные орудия, зубовые бороны); волнообразным (дисковые орудия, игольчатые бороны, фрезы); ступенчатым (плуги с почвоуглубителями и разноглубинными корпусами, культиваторы со стрельчатыми и рыхлящими лапами, плоскорезы-щелеватели); щелевым (щелерезы-кратователи) [3, 4].

Указанные способы обработки почвы с разнопрофильной формой дна слоя, включающие некоторые специальные противоэрозионные приемы (почвоуглубление, щелевание, ступенчатое рыхление), применяются исходя из агротехнической целесообразности [5, 6]. Известно, что ровный профиль дна борозды, образуемый плугами и другими орудиями основной обработки, зачастую способствует уплотнению подпахотного слоя почвы, образованию так называемой плужной подошвы и отрицательно сказывается на развитии растений, поскольку препятствует проникновению влаги к корням [7, 8].

В связи с этим целесообразно применять способы обработки и технические средства, обеспечивающие неровную поверхность подпахотного слоя: гребнистую, волнообразную, щелевую, дренированную [9, 10].

Исходя из агротехнических требований, можно наметить приемы поверхностной обработки почвы, учитывая ряд аспектов:

- снижение глубины обрабатываемого слоя;
- замена сплошной глубокой обработки ступенчатой или ярусной;
- применение полосной и щелевой обработки [11, 12].

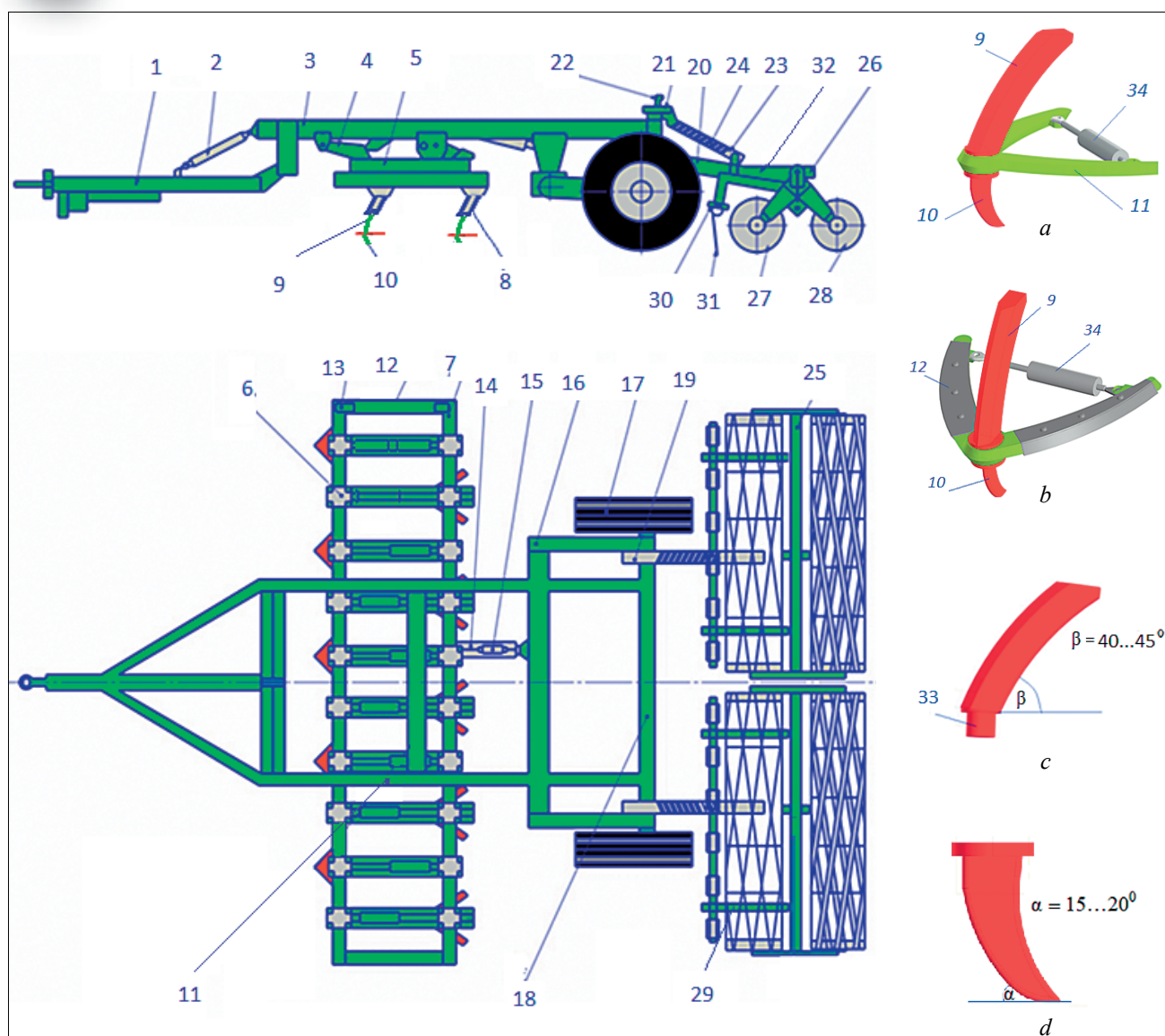
Целесообразность применения указанных приемов минимальной обработки почвы должна определяться их агротехнической и почвозащитной эффективностью, которая может быть установлена только опытным путем [13, 14].

Цель исследования: разработка автоматизированного комбинированного агрегата с универсальным почвообрабатывающим адаптером [15], улучшающим качество обработки почвы и повышающим устойчивость движения агрегата.

Материалы и методы. В ФНАЦ ВИМ разработана конструкция автоматизированного почвообрабатывающего агрегата [16]. Его применение позволяет дистанционно из кабины трактора изменять ширину захвата, рыхлить почву с подрезанием сорной растительности и проводить щелевание [17]. Схема агрегата приведена на *рисунке*.

В состав комбинированного агрегата с универсальным почвообрабатывающим адаптером входят: сница 1, талреп 2, шарнирно соединенные с несущей рамой 3, звенья 4 параллелограммного механизма 5 с передней 6 и задней 7 балками, на которых установлены стойки 8, держатель 9, щелеватель 10 (Патент RU2780062 C1).

На несущей раме 3 расположены продольные 11, переставные 12 по ширине и поперечная 13 балки. На балке 11 размещен присоединенный к раме гидроцилиндр 14 с гидрозамком 15. Гидроцилиндр соединен с кареткой 16, на которой установлены опор-



Автоматизированный комбинированный агрегат с универсальным почвообрабатывающим адаптером: а – почвообрабатывающий адаптер без насадок, б – почвообрабатывающий адаптер с насадками; с – держатель с осью; д – щелеватель

Automated combined unit with universal tillage device: а – tillage device without attachments; б – tillage device with attachments; с – holder with axis; д – slot

но-транспортные колеса 17. На раме 3 с помощью задней балки 18 крепятся стойки 19, с ними шарнирно соединен поворотный механизм 20 с рычагом 21, положение катков регулируется с помощью болта 22. Рычаг 21 шарнирно связан с тягой 23 с закрепленной на ней пружинной 24 и регулировочной рейкой 32. Поворотный механизм (дышло) 20 связан шарниром с кронштейнами рамки 25 секции катков. Положение рамки 25 регулируется за счет изменения длины тяги 26.

Поворотный механизм 20 и рамка 25 катков 27 и 28 соединены сверху посредством тяги 29. Такая регулировка необходима при изменении общей глубины обработки и наклона дышла 20. На поворотном механизме 20 закреплена регулируемая по высоте

установки рамка 30 с боронкой 31 с пружинными зубьями и регулировочной рейкой 32, на ней расположены отверстия, позволяющие изменять длину участка между пальцами для крепления на рамке 25.

Почвообрабатывающий адаптер содержит два дугообразных сегмента 11 длиной 25 см. На общей оси 33 сверху установлен держатель 9, а снизу щелеватель 10. Щелеватель и держатель выполнены саблевидной формы с углом наклона к горизонтальной плоскости 15-20° и 40-45° соответственно. Максимальная ширина средней части щелевателя 6-8 см, его фронтальная площадь вдвое меньше, чем держателя. Щелеватель установлен с возможностью демонтажа.

Рабочие кромки дугообразных сегментов 11 снабжены сменными режущими насадками 12 с заклеп-

ками для крепления. Дугообразная форма сегмента длиной 25 см позволяет обрабатывать почву с подрезанием сорной растительности при большей ширине захвата (до 40-45 см), чем у стандартных лап культиватора

Нормой для культиваторов является использование универсальных лап типоразмера 3 (плоско-режущие стрельчатые) с шириной захвата 270 мм, толщиной металла 5 мм; а также типоразмера 5 (универсальные стрельчатые рыхлительные) с захватом 330 мм толщиной 6 мм [18].

Результаты и обсуждение. Перед началом работы на жестко закрепленные на общей оси 33 держатель 9 и щелеватель 10 насаживаются два дугообразных сегмента 11 через отверстия и на них с помощью заклепок крепят сменные режущие насадки 12. Мини-гидроцилиндр 34, связанный с гидросистемой агрегата, дистанционно устанавливает заданную ширину захвата (10-45 см).

Во время работы агрегата сегментная пара 11 с помощью насадок 12 подрезает почву на установленную глубину с одновременным уничтожением сорной растительности. Держатель 9 помимо закрепления сегментной пары рыхлит почву, а щелеватель обеспечивает щелевой прорез.

В зависимости от изменения условий работы оператор из кабины трактора меняет положение сегментов на требуемую ширину захвата дистанционно с помощью беспроводного исполнительного механизма [19, 20].

Комбинированный агрегат с дополнительным почвообрабатывающим адаптером повышает качество обработки почвы, устойчивость движения, экономическую эффективность работы.

Выводы

Комбинированный агрегат обеспечивает крошение, выравнивание, прикатывание и щелевание почвы.

Наличие такого дополнительного рабочего органа, как щелеватель, позволяет не только улучшить инфильтрацию почвы, но и повысить устойчивость движения агрегата.

За счет расположения держателя и щелевателя с наклоном к горизонтальной плоскости под углом соответственно 40-45° и 15-20° снижается тяговое сопротивление агрегата и сокращаются энергетические затраты.

Ширина захвата щелевателя комбинированного агрегата регулируется в автоматизированном режиме из кабины трактора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тухтакузиев А. Обеспечение равномерности глубины обработки почвы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №3. С. 34-38. DOI: 10.22314/2073-7599-2019-13-3-34-38.
2. Абдулхаев Х.Г., Халилов М.М. Обоснование параметров ножей выравнивателя-рыхлителя // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №3. С. 44-47. DOI: 10.22314/2073-7599-2019-13-3-44-47.
3. Лобачевский Я.П., Лискин И.В., Сидоров С.А. и др. Разработка и технология изготовления почвообрабатывающих рабочих органов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. №4. С. 3-8. EDN: WLZXPД.
4. Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Миронова А.В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №1. С. 41-50. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50.
5. Ценч Ю.С., Ахалая Б.Х., Миронова А.В. Почвообрабатывающе-посевной агрегат для восстановления эрозионно опасных земельных угодий // *Техника и оборудование для села*. 2022. №12 (306). С. 16-20. DOI: 10.33267/2072-9642-2022-12-16-20.
6. Джибилов С.М., Гулуева Л.Р. Технология и агрегат для восстановления экологического состояния горных лугов и пастбищ // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №2. С. 20-27. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-20-27.
7. Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С., Миронова А.В. Почвообрабатывающий агрегат с устройством автоматизированного регулирования ширины захвата // *Техника и оборудование для села*. 2023. №9 (315). С. 12-15. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-9-12-15.
8. Старовойтов С.И., Гринь А.М. Плужный корпус для прецизионной обработки почвы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №1. С. 47-52. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-1-47-52.
9. Джибилов С.М., Гулуева Л.Р. Агрегат для щелевания деградированных горных лугов и пастбищ на базе мини-трактора // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №4. С. 68-73. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-68-73.
10. Мударисов С.Г., Рахимов З.С. Влияние технических средств и технологий на механическую эрозию почвы на склонах // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. Т. 14. №2. С. 17-22. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-2-17-22.
11. Спирин А.П., Сизов О.А., Ахалая Б.Х. Ресурсосберегающая машинная технология возделывания яровых зерновых культур в засушливых районах Поволжья // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2009. №2 (9). С. 38-41. EDN: KDNDIR.
12. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сизов О.А. Перспективные пути применения энерго и экологически эффективных машинных технологий и технических средств // *Сельскохозяйственные машины и технологии*.

- гии. 2013. N4. С. 8-11. EDN: QZKYNV.
13. Лачуга Ю.Ф., Измайллов А.Ю., Лобачевский Я.П., Мазитов Н.К. Почвообрабатывающая техника: пути импортозамещения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N2. С. 37-42. DOI: 10.22314/207375992017.2.3741.
 14. Измайллов А.Ю., Лобачевский Я.П., Хорошенков В.К. и др. Оптимизация управления технологическими процессами в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N3. С. 4-11. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-3-4-11.
 15. Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х., Старовойтов С.И., Шогенов А.Х. Многооперационная комбинированная машина // *Техника и оборудование для села*. 2022. N10 (304). С. 14-17. DOI: 10.33267/2072-9642-2022-10-14-17.
 16. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И., Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С. Цифровые технологии в почвообработке // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2019. N1 (30). С. 191-197. EDN: ZAWQJF.
 17. Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х. Автоматизированный многофункциональный почвообрабатывающий агрегат // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2017. N6. С. 55-58. EDN: ZXLBDL.
 18. Камбулов С.И., Пархоменко Г.Г., Бабенко О.С., Божко И.В. Влияние параметров рабочего органа культиватора на качество крошения почвенного пласта // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N1. С. 41-46. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-1-41-46.
 19. Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х., Миронова А.В., Золотарев А.С. Многооперационный почвообрабатывающий агрегат // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24. N4. С. 28-31. DOI: 10.26897/2687-1149-2022-4-28-31.
 20. Халилов Ш.М., Халилов М.Б., Жук А.Ф. Комбинированные почвообрабатывающие машины и результативность их применения // *Известия Дагестанского ГАУ*. 2019. N2(2). С. 87-92. EDN: XVXPBL.

REFERENCES

1. Tukhtakuziev A. Ensuring the uniformity of tillage depth. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019. Vol. 13. N3. 34-38 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2019-13-3-34-38.
2. Abdulkhaev Kh.G., Khalilov M.M. Determining the parameters of leveler-ripper shanks. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019. Vol. 13. N3. 44-47 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-201913-3-44-47.
3. Lobachevskiy Ya.P., Liskin I.V., Sidorov S.A. et al. Working out and production technique of soil cultivating working tools. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2016. N4. 3-8 (In Russian). EDN: WLZXPД.
4. Lobachevskiy Ya.P., Mironov D.A., Mironova A.V. Increasing the operating lifetime of wearable working bodies of agricultural machines. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N1. 41-50 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50.
5. Tsench Yu.S., Akhalaya B.Kh., Mironova A.V. Soil-cultivating and sowing unit for the restoration of erosion-hazardous land. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022. N12 (306). 16-20 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2022-12-16-20.
6. Dzhibilov S.M., Guluyeva L.R. Restoring technology and a seeding unit for recovering mountain meadow and pasture ecosystems. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N2. 20-27 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-20-27.
7. Akhalaya B.H., Tsench Yu.S., Mironova A.V. Tillage unit with an automated control device adjusting the width of the grip. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023. N9 (315). 12-15 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2023-9-12-15.
8. Starovoytov S.I., Grin A.M. Working tool for precision tillage. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N1. 47-52 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-1-47-52.
9. Dzhibilov S.M., Guluyeva L.R. Unit for splitting degraded mountain meadows and pastures based on a mini tractor. *Agricultural Machinery and Technologies*. Vol. 16. N4. 68-73 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-68-73.
10. Mudarisov S.G., Rakhimov Z.Sh. Impact of the technical means and technologies on mechanical soil erosion on slopes. *Agricultural Machinery and Technologies*. Vol. 14. N2. 17-22 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-2-17-22.
11. Spirin A.P., Sizov O.A., Akhalaya B.H. Resource-saving machine technology of spring cultivation grain crops in the arid regions of the Volga region. *Agricultural Machinery and Technology*. 2009. N2(9). 38-41 (In Russian). EDN: KDNDIR.
12. Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Sizov O.A. Promising ways of using energy and environmentally efficient machine technologies and technical means. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2013. N4. 8-11 (In Russian). EDN: QZKYNV.
13. Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Mazitov N.K. Soil-cultivating machinery: ways of import substitution. *Agricultural Machinery and Technology*. 2017. N2. 37-42 (In Russian). DOI: 10.22314/207375992017.2.3741.
14. Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Khoroshenkov V.K. etc. Optimization of technological process management in plant growing. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N3. 4-11 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-3-4-11.
15. Akhalaya B.Kh., Shogenov Yu.Kh., Starovoytov S.I., Shogenov A.Kh. Multi-operational combined machine. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022. N10(304). 14-17 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2022-10-14-17.
16. Lobachevsky Ya.P., Starovoytov S.I., Akhalaya B.H.,

- Tsench Yu.S. Digital technologies in tillage. *Innovations in Agriculture*. 2019. N1 (30). 191-197 (In Russian). EDN: ZAWQJF.
17. Akhalaya B.Kh., Shogenov Yu.Kh. Automated multifunctional soil-processing unit. *Russian Agricultural Sciences*. 2017. N6. 55-58 (In Russian). EDN: ZXLBDL.
18. Kambulov S.I., Parkhomenko G.G., Babenko O.S., Bozhko I.V. Influence of the cultivator working body parameters on the soil crumbling quality. *Agricultural Machinery and Technologies*. Vol. 16. N1. 41-46 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-1-41-46.
19. Akhalaya B.Kh., Shogenov Yu.Kh., Mironova A.V., Zolotarev A.S. Multi-operational tillage unit. *Agricultural Engineering*. 2022. Vol. 24. N4. 28-31 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2022-4-28-31.
20. Khalilov Sh.M., Khalilov M.B., Zhuk A.F. Combined tillage machines and performance of their application. *Dagestan GAU Proceedings*. 2019. N2(2). 87-92 (In Russian). EDN: XVXPBL.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Ахалая Б.Х. – разработка конструктивных схем и параметров автоматизированного комбинированного агрегата с универсальным почвообрабатывающим адаптером, определение методики исследования;

Ценч Ю.С. – постановка цели исследования, критический анализ, формирование общих выводов;

Миронова А.В. – сбор аналитических и практических материалов по теме исследования, доработка текста статьи, подбор и формирование списка литературы.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Akhalaya B.Kh. – development of design schemes and parameters of an automated combined unit with a universal tillage adapter, determination of the research methodology;

Tsench Yu.S. – setting the research goal, critical analysis, forming general conclusions;

Mironova A.V. – collection of analytical and practical materials on the research topic, revision of the text, selection and formation of a list of references.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

02.04.2024

23.05.2024



Параметры кассеты для роботизированного загрузочного устройства селекционной сеялки

Андрей Сергеевич Чулков,
 кандидат технических наук,
 ведущий научный сотрудник,
 e-mail: andrei.chulkov@mail.ru;

Людмила Сергеевна Шибряева,
 доктор химических наук,
 ведущий научный сотрудник,
 e-mail: lyudmila.shibryaeva@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. В кассетных селекционных сеялках кассетное загрузочное устройство последовательно перемещает кассеты с семенным материалом к высевашему аппарату сеялки. (*Цель исследования*) Выполнить расчет геометрических параметров и выбрать материал кассеты для разработки роботизированного кассетного загрузочного устройства селекционной сеялки. (*Материалы и методы*) Геометрические параметры кассет определены на основе кассетного загрузочного устройства селекционной сеялки СССэ-6 и исходных данных по нормам селекционного посева. Методом ИК-Фурье-спектроскопии в диапазоне волновых чисел 400-4000 см⁻¹ идентифицировали полимерный материал, который пригоден для изготовления кассет и направляющей пластины селекционной сеялки. (*Результаты и обсуждение*) Используя различные конструктивные решения кассет, применяемых ранее в загрузочном устройстве, определили геометрические параметры кассет, ячеек и блоков кассет, направляющих пластин. В задачи исследования входил выбор возможного полимерного материала для изготовления кассеты при помощи 3D-моделирования. Для этого требовалось идентифицировать вид полимерного материала образцов пластиковых кассет и направляющих пластин, которые применяются в загрузочном устройстве селекционной сеялки СССэ-6. Качественный анализ состава образцов определяли методом инфракрасной спектроскопии на ИК-Фурье-спектрометре Simex FT-801. (*Выводы*) Провели расчет геометрических параметров кассетного блока для их моделирования и изготовления и дальнейшей разработки роботизированного кассетного загрузочного устройства. Установлено, что оно изготовлено из сополимера акрилонитрила, полибутадиена и стирола (ABS-пластика), имеющего коэффициент трения скольжения 0,47-0,54. Для уменьшения коэффициента трения кассет при движении по направляющим пластинам при их изготовлении в состав ABS вводят шликующие добавки, например, керамид.

Ключевые слова: селекционная сеялка, кассетное загрузочное устройство, конструкция кассет, технологический процесс, полимерные материалы, спектроскопия.

■ Для цитирования: Чулков А.С., Шибряева Л.С. Параметры кассеты для роботизированного загрузочного устройства селекционной сеялки // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №2. С. 92-97. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-92-97. EDN: PYXCIN.

Scientific article

Parameters of a Robotic Loading Device for Selection Seeder

Andrey S. Chulkov,
 Ph.D.(Eng.), leading researcher,
 e-mail: andrei.chulkov@mail.ru;

Ludmila S. Shibryaeva,
 Dr.Sc.(Chem.), leading researcher,
 e-mail: lyudmila.shibryaeva@yandex.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. In cassette-type selection seeders, a cassette loading device sequentially conveys cassettes filled with seed material to the planting mechanism of the seeder. (*Research purpose*) The research aims to calculate the geometric parameters and identify the cassette material in the development of a robotic cassette loading device for the selection seeder. (*Materials and methods*) The geometric parameters of the cassettes are determined based on the existing cassette loading device of the model SSS-2-6 selection seeder and the selection sowing specifications. Fourier transform infrared spectroscopy with the wavenumber range of 400-4000 cm⁻¹ is used to identify a polymer material suitable for manufacturing cassettes and a guide plate for a selection seeder. (*Results and discussion*) The geometric parameters of cassettes, cells, cassette blocks, and guide plates are determined by using various design solutions employed in previous cassettes for the loading device.

The objectives of the study also encompass the selection of polymer material for the manufacture of the cassette using 3D modeling techniques. To accomplish this, it was necessary to identify the specific polymer material of the plastic cassette and guide plate samples currently used in the loading device of the *SSSe-6* selection seeder. The qualitative composition of these samples is determined by infrared spectroscopy using a *Simex FT-801* Infrared Fourier spectrometer. (*Conclusions*) The geometric parameters essential for modeling, manufacturing and further development of a robotic cassette loading device are calculated. It has been established that the device is made of a copolymer consisting of acrylonitrile, polybutadiene and styrene (known as ABS plastic), which has a sliding friction coefficient approximately 0.47-0.54. In order to decrease the coefficient of cassette friction when driving along the guide plates, additives like ceramide can be introduced into ABS during their production enhancing its sliding properties.

Keywords: selection seeder, cassette loading device, cassette design, technological process, polymer materials, spectroscopy.

For citation: Chulkov A.S., Shibryaeva L.S. Parameters of a robotic loading device for selection seeder. *Agricultural machinery and technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 92-97 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-92-97. EDN: PYXCIN.

Главная задача селекционной науки и практики – создание новых сортов зерновых и других сельскохозяйственных культур с высокой продуктивностью, устойчивостью к почвенно-климатическим условиям, сочетающих полезные свойства и признаки [1]. В связи с этим большую роль имеют разработки, направленные на обеспечение научно-инновационного развития агропромышленного комплекса [2]. Приоритетной тенденцией в промышленном растениеводстве является внедрение ресурсосберегающих технологии и совершенствование селекционной техники, в том числе для посева зерновых культур [3]. Минимизации трудозатрат, повышение производительности и эффективности селекционно-семеноводческого процесса способствует применение автоматизированных и роботизированных систем [4, 5].

Цель исследования – выполнить расчет геометрических параметров и выбрать материал кассеты для разработки роботизированного кассетного загрузочного устройства (РКЗУ) селекционной сеялки.

Материалы и методы. Для разработки конструкции РКЗУ определяли геометрические параметры, материал кассет и направляющих пластин, по которым перемещаются кассеты с семенами. За основу были приняты геометрические размеры кассет загрузочного устройства селекционной сеялки СССР-6 с учетом исходных нормативов селекционного посева согласно ОСТ 46 73-78.

При выборе материала для изготовления кассеты применялся метод инфракрасной спектроскопии. Исследование проводилось с помощью ИК-Фурье-спектрометра *Simex FT-801* (НПФ «Симекс», г. Новосибирск) с использованием алмазной НПВО-приставки в диапазоне волновых чисел 400-4000 см⁻¹ с накоплением и усреднением 26 сканов. Запись спектров проводилась в фирменном ПО *Zair 3.5*, математическая обработка спектральных дан-

ных – в ПО *Origin 8* с использованием сглаживания по методу Савицкого-Голея (5-й порядок функции, 31 точка).

Результаты и обсуждение. В настоящее время на втором этапе селекционных работ с зерновыми культурами применяются кассетные селекционные сеялки отечественного производства (СКС-6-10, СКС-6А, СН-10Ц(К), СССР-6, другие) а также зарубежных компаний (*HALDRUP*, Германия, *WINTERSTEIGER AG*, Австрия и др.) [6, 7]. Посадочный материал подается к автономным порционным высевальным аппаратам через кассетные загрузочные устройства (КЗУ) [8]. При этом каждый следующий блок кассет с семенами оператор вручную устанавливает на рабочем столе. Актуальной задачей является разработка технического средства, позволяющего исключить ручные операции [9, 10]. Анализ конструкций основных типов кассетно-загрузочных устройств показал, что наиболее перспективно при посеве семян зерновых роботизированное загрузочное кассетное устройство (РКЗУ) селекционной сеялки [11].

Принято решение разработать и внедрить такое устройство, взяв за основу КЗУ сеялки СССР-6 производства ФГБНУ ФНАЦ ВИМ [12, 13]. Количество ячеек в кассете соответствует числу высевальных аппаратов, в данной модели сеялки 6 ячеек. Геометрические параметры кассеты определяются количеством ячеек и их объемом. Размер одной ячейки рассчитывается по нормативам посева семян на делянке. Согласно ОСТ 46 73-78 должно быть высеяно 500 семян зерновых культур, столько семян гарантированно вмещается в ячейку объемом 50 мл.

Разработана модель кассеты с шестью ячейками на 50 мг (*рис. 1а*). Кассеты размещаются последовательно на направляющей пластине прямоугольной формы и образуют блок (*рис. 1б*). Размеры направляющей пластины и блока зависят от геометрических размеров и количества кассет в блоке.

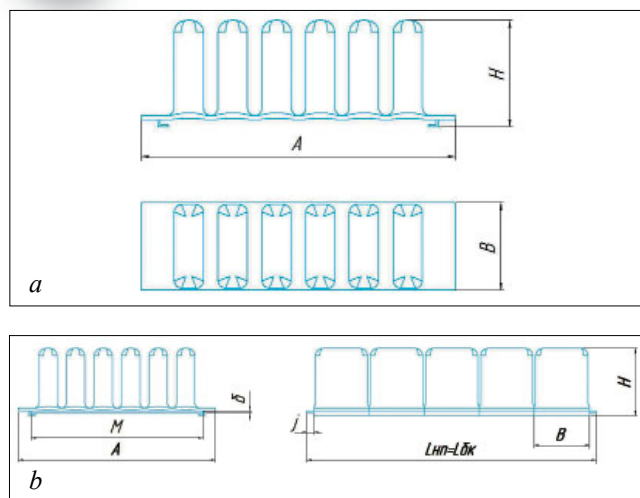


Рис. 1. Модель кассеты для семян с шестью ячейками (а) и блок кассет (б)

Fig. 1. A seed cassette model with six cells (a) and a cassette block (b)

Ширина направляющей пластины M зависит от расстояния между пазами на кассете, при помощи которых кассета устанавливается на пластину с зазором не менее 1 мм. Толщина пластины δ соответствует ширине паза на кассете (зазор не менее 0,5 мм). Длина направляющей пластины $L_{\text{н.п}}$ (и кассетного блока $L_{\text{б.к}}$) соответствует ширине кассеты (B) и количеству кассет (n) в блоке с учетом удлинения пластины с торцевых сторон (конструкционный размер $j = 7,5$ мм):

$$L_{\text{б.к}} = L_{\text{н.п}} = B \cdot n + 2j.$$

Геометрические параметры блока кассет и его составляющих для разрабатываемой конструкции роботизированного устройства определены по размерам КЗУ сеялки СССэ-6:

- кассета – длина $A = 215$ мм, ширина $B = 60$ мм, высота $H = 73$ мм;
- направляющая пластина – ширина $M = 187$ мм, длина $L_{\text{н.п}} = 315-615$ мм (при конструкции РКЗУ с количеством кассет $n = 5-10$ шт.);
- толщина $\delta = 3$ мм;
- блок кассет – ширина $A = 215$ мм, длина $L_{\text{б.к}} = 315-615$ мм (в зависимости от количества кассет в блоке $n = 5-10$ шт.), высота $H = 73$ мм.

При работе роботизированного загрузочного устройства кассеты скользят по направляющей пластине и участку рабочего стола высевающего аппарата с отверстиями для выгрузки семян. Для свободного перемещения элементы конструкции загрузочного устройства должны быть выполнены из материала с коэффициентом трения скольжения как можно меньшим.

При визуальном контроле образцов пластиковых кассет, направляющих пластин и блоков кассет (рис. 2), которые в настоящее время использу-



Рис. 2. Кассета для семян (а) и блок кассет (б) селекционной сеялки СССэ-6

Fig. 2. A seed cassette (a) and a cassette block (b) of the SSSe-6 selection seeder

ются в селекционной сеялке ССС-2-6, выявлен ряд проблем: быстрое старение материала, хрупкость при старении, выгорание и пожелтение под солнечными лучами. Также на образцах не было маркировки вида полимерного материала, из которого они изготовлены.

Для понимания возможности устранить перечисленные недостатки был проведен качественный анализ состава материала кассет и направляющей пластины и выбраны возможные полимеры:

- полиэтилен низкого и высокого давления;
- полипропилен;
- поликарбонат;
- полистирол;
- поливинилхлорид и его пластификат;
- сополимер акрилонитрила, полибутадиена и стирола (АВС-пластик);
- полиэтилентерефталат.

Исходя из практического опыта предположили, что материалом образцов мог быть любой из них, кроме поликарбоната. Сравнительная характеристика полимерных материалов для потенциального использования для изготовления некоторых узлов и деталей приведена в таблице.

Для идентификации материала применялся метод ИК-Фурье-спектроскопии с использованием алмазной приставки нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) в диапазоне волновых чисел $400-4000 \text{ см}^{-1}$ (рис. 3).

По ИК-спектрам визуально заметно практически полное совпадение спектральных линий материала кассеты и направляющей. Таким образом, пришли к выводу, что образцы изготовлены из полимера одного вида, и в дальнейшем анализировался только один из спектров. По виду спектра предварительно сделано предположение, что это АВС-пластик [14].

Таблица					
СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ					
COMPARATIVE ANALYSIS OF POLYMER MATERIALS FOR THEIR PROSPECTIVE USE IN MANUFACTURING THE COMPONENTS AND PARTS OF THE ROBOTIC LOADING CASSETTE DEVICE					
Коэффициент трения скольжения	Температура плавления, °С	Метод изготовления изделий	Температура рабочая, °С	Ударо-стойкость	Устойчивость к УФ-излучению
Полиэтилен низкого и высокого давления (ПЭВД, ПЭНД)					
0,25	100	Литье под давлением	–100-80	Стойкий	Стойкий
Полипропилен (ПП)					
0,3-0,4	165	Литье под давлением	0-90	Стойкий	Есть марки, стойкие к излучению
Полистирол (ПС)					
0,35	170	Литье под давлением	–40-70	Стойкий	Не очень стойкий, требуются фотосенсибилизаторы
Сополимер акрилонитрила, полибутадиена и стирола (ABS)					
0,47-0,54	170	Литье под давлением 3D-печать	–60-85	Стойкий	Не очень стойкий, требуются фотосенсибилизаторы
Полиэтилентерефталат (ПЭТ или ПЭТФ)					
0,25	255	Литье под давлением	–20-115	Хрупкий	Можно использовать марки ПЭТ, прозрачные для УФ-лучей

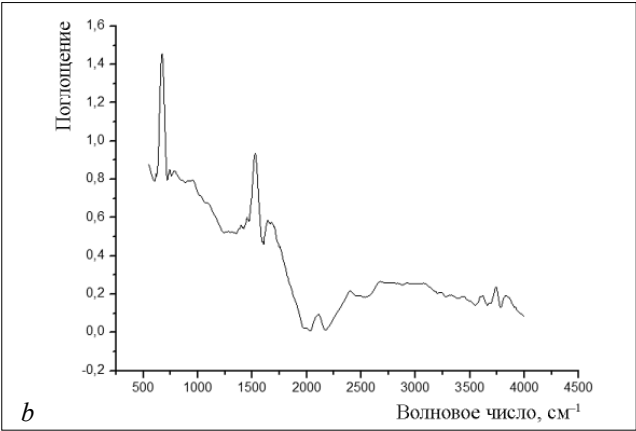
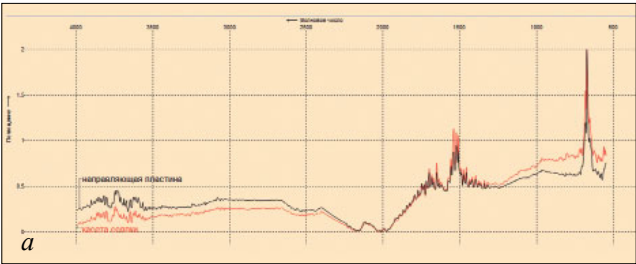
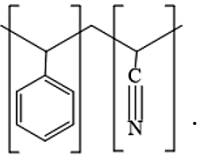


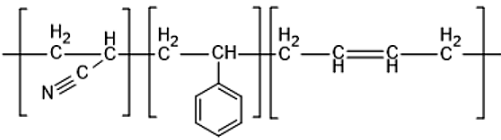
Рис. 3. Исходные спектры материалов кассеты и пластины (а) и сглаженный спектр (b)
Fig. 3. Original spectra of cassette and plate materials (a) and smoothed spectrum (b)

Далее исследовали качественный анализ состава материала [15]. Анализ ИК-спектроскопии подразумевает соотнесение волнового числа (или длины волны) каждого пика с волновым числом (или длиной волны), характеризующим соответствующую функциональную химическую группу, и построение его примерной структурной формулы.

На спектрограмме заметны пять пиков: $\sim 671\text{ см}^{-1}$ и $\sim 968\text{ см}^{-1}$ (связи $\text{C}=\text{C}$, колебания замещенных ароматических соединений); $\sim 1477\text{ см}^{-1}$ и $\sim 1527\text{ см}^{-1}$ (колебания бензольного кольца); $\sim 2125\text{ см}^{-1}$ (нитрилы и изонитрилы). По итогам анализа была составлена примерная структурная формула полимера:



Наиболее близким к данной формуле является сополимер акрилонитрила, бутадиена и стирола:



Таким образом подтверждено, что исследованные образцы направляющих пластин и блоков кассет селекционной сеялки СССэ-6 изготовлены из ABS-пластика.

ABS – один из самых распространенных конструкционных полимеров. Он может использоваться для изготовления изделий методом 3D-печати с высокой точностью. Исходя из технических и технологических требований к изготовлению РКЗУ и в сравнении с другими пластиковыми материалами (таблица), ABS представляется наиболее подходящим для элементов РКЗУ селекционной сеялки при условии введении фотосенсибилизаторов и добавок, увеличивающих скольжение (керамида).

Выводы. Проведен расчет и представлены зависимости геометрических параметров блока кассет и его компонентов, по которым возможно осуществлять моделирование и изготовление при дальнейшей разработке роботизированного кассетного загрузочного устройства для высевальных аппаратов селекционной сеялки. По результатам качественного анализа инфракрасных спектров установлено, что кассета, направляющая пластина и сопрягае-

мые детали РКЗУ, по которым скользят кассеты, могут быть изготовлены из сополимера акрилонитрила, полибутадиена и стирола (ABS-пластика). Данный полимер, имеющий коэффициент трения скольжения $\mu_{ABS} \approx 0,47-0,54$, рекомендуется для изготовления кассет и деталей, по которым скользят кассеты, при условии введения в матрицу на этапе производства шликующих добавок, улучшающих скольжение (например, керамида).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Жалнин Э.В. Семеноводство России – приоритет импортозамещения // *Сельский механизатор*. 2016. №3. С. 2-3. EDN: VSLREX.
- Грабовец А.И. Проблемы селекции и семеноводства зерновых культур и перспективы научно-инновационного обеспечения агропромышленного комплекса регионов // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. №8. С. 10-13. DOI: 10.53859/02352451_2022_36_8_10.
- Бейлис В.М., Ценч Ю.С., Коротченя В.М. и др. Тенденции развития прогрессивных машинных технологий и техники в сельскохозяйственном производстве // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. №4 (33). С. 150-156. EDN: YTHPID.
- Zhu Q., Wu G., Chen L., et al. Structural design and optimization of seed separated plate of wheat wide-boundary sowing device. *Nongye Gongcheng Xuebao. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2019. 35(1). 1-11. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.01.001.
- Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. и др. О синтезе роботизированного сельскохозяйственного мобильного агрегата // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2019. №4. С. 63-68. DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/63-68.
- Yaropud V., Datsiuk D. By improving breeding seeder sowing device small seeded crops. *Vibrations in engineering and technology*. 2021. №1. 152-162. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-15.
- Beloev H., Borisov B., Adamchuk V., Petrychenko I. Theory of movement of the combined seeding unit. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2015. №7. 21-26. DOI: 10.1016/j.aaspro.2015.12.024.
- Измайлов А.Ю. Интеллектуальные технологии и роботизированные средства в сельскохозяйственном производстве // *Вестник Российской академии наук*. 2019. Т.89. №5. С. 536-538. DOI: 10.31857/S0869-5873895536-538.
- Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №4. С. 6-10. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
- Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С., Квас С.А. Технология комбинированного способа посева и высевальные аппараты для его осуществления // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. №4(33). С. 61-65. EDN: YTHPID.
- Чулков А.С., Шайхов М.М., Чаплыгин М.Е., Текушев А.Х. Кассетные загрузочные устройства для высевальных аппаратов селекционных сеялок // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2023. Т. 70. №2(50). С. 74-81. DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-2-74-81.
- Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С., Миронова А.В. Разработка и исследование дозирующей системы высевального устройства пневматической сеялки // *Техника и оборудование для села*. 2021. №6(288). С. 8-11. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-6-8-11.
- Чулков А.С., Текушев А.Х., Шайхов М.М. Разработка схемы размещения элементов автоматизированного управления и контроля селекционной сеялки // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2022. Т. 69. №4(49). С. 104-108. DOI: 10.22314/2658-4859-2022-69-4-104-108.
- Катаев Ю.В., Гончарова Ю.А., Свиридов А.С., Тужилин С.П. Применение технологий 3D-печати и 3D-сканирования при изготовлении и ремонте сельскохозяйственной техники // *Техника и оборудование для села*. 2023. №1(307). С. 34-38. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-1-34-38.
- Виснер Ф.Дж. Применение спектроскопии комбинационного рассеяния для исследования полимеров // *Пластические массы*. 2021. №3-4. С. 24-26. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-3-4-24-26.

REFERENCES

- Zhalnin E.V. Russian seed production – the priority of import substitution. *Selskiy mechanizator*. 2016. №3. 2-3 (In Russian). EDN: VSLREX.
- Grabovets A.I. Problems of grain crops breeding and seed production and prospects for scientific and innovative support of the agro-industrial complex of the regions. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2022. Vol. 36. №8. 10-13 (In Russian). DOI: 10.53859/02352451_2022_36_8_10.
- Beylis V.M., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M., et al. Trends in the development of advanced machine technologies and techniques in agricultural production. *Vestnik VIESH*. 2018. №4(33). 150-156 (In Russian). EDN: YTHPID.

4. Zhu Q., Wu G., Chen L., et al. Structural design and optimization of seed separated plate of wheat wide-boundary sowing device. *Nongye Gongcheng Xuebao. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2019. 35(1). 1-11 (In English). DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.01.001.
5. Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Tsench Yu.S. et al. About synthesis of robotic agriculture mobile machine. *Vestnik of the Russian agricultural science*. 2019. N4. 63-68 (In Russian). DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/63-68. EDN: GBEQZI.
6. Yaropud V., Datsiuk D. By improving breeding seeder sowing device small seeded crops. *Vibrations in engineering and technology*. 2021. N1. 152-162 (In English). DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-15.
7. Beloev H., Borisov B., Adamchuk V., Petrychenko I. Theory of movement of the combined seeding unit. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2015. N7. 21-26 (In English). DOI: 10.1016/j.aaspro.2015.12.024.
8. Izmaylov A.Yu. Intelligent technologies and robotic means in agricultural production. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2019. Vol. 89. N5. 536-538 (In Russian). DOI: 10.31857/S0869-5873895536-538.
9. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural machinery and technologies*. 2021. Vol. 15. N4. 6-10 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
10. Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S., Kvas S.A. Combined method of sowing and sowing machines for its implementation. *Vestnik VIESH*. 2018. N4(33). 61-65 (In Russian). EDN: YTHPDN.
11. Chulkov A.S., Shaykhov M.M., Chaplygin M.E., Tekushev A.Kh. Cassette loading units for hanging devices of breeding seeders. *Electrical technology and equipment in the agro-industrial complex*. 2023. Vol. 70. N2(50). 74-81 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-2-74-81.
12. Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S., Mironova A.V. Development and research of a pneumatic seed drill seedmetering unit. *Machinery and equipment for rural area*. 2021. N6(288). 8-11 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-6-8-11.
13. Chulkov A.S., Tekushev A.Kh., Shaykhov M.M. Development of the layout of automated control and monitoring system of breeding seeder. *Electrical technology and equipment in the agro-industrial complex*. 2022. Vol. 69. N4(49). 104-108 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2022-69-4-104-108.
14. Kataev Yu.V., Goncharova Yu.A., Sviridov A.S., Tuzhilin S.P. Application of 3D printing and 3D scanning technologies in manufacturing and repairing agricultural machinery. *Machinery and equipment for rural area*. 2023. N1(307). 34-38 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2023-1-34-38.
15. Weesner F.J. Confocal raman microscopy applications in the polymer industry. *Journal of Russian plastics*. 2021. N3-4. 24-26 (In Russian). DOI: 10.35164/0554-2901-2021-3-4-24-26.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Чулков А.С. – формулирование основных целей и задач исследования, составление начального варианта статьи, доработка текста и оформление материалов, формирование общих выводов, анализ литературных источников, итоговая переработка статьи;

Шибряева Л.С. – формулирование основных целей и задач исследования, выполнение спектроскопии, доработка текста и оформление материалов, анализ литературных источников, формирование общих выводов, итоговая переработка статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Chulkov A.S. – defining the research goals and objectives, initial manuscript drafting, finalizing the text and materials, drawing overall conclusions, literature review, and the article final revision

Shibryaeva L.S. – defining the research goals and objectives, setting the main research goals and objectives, conducting spectroscopy, finalizing the text and materials, literature review, drawing overall conclusions, and the article final revision

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

04.10.2023

14.11.2023

EDN: OAJICA

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-98-102



Научная статья

УДК 631.431.3



Определение фрикционных свойств ABS-пластика при контакте с суглинистой почвой

Сергей Андреевич Квас,
младший научный сотрудник,
e-mail: kvas.sergo@yandex.ru;

Андрей Сергеевич Золотарев,
младший научный сотрудник,
e-mail: zl200@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим возможность замены в почвообрабатывающих агрегатах стальных рабочих органов на полимерные. (*Цель исследования*) Определение зависимости фрикционных параметров акрилонитрилбутадиенстирола (ABS-пластик) от величины абсолютной влажности почвы и скорости движения агрегата при взаимодействии рабочего органа с суглинистой почвой. (*Материалы и методы*) Разработана лабораторная установка для изучения фрикционных свойств полимера при контакте с суглинистой почвой. Параметры трения и адгезии определяли при изменении абсолютной влажности почвенного материала. (*Результаты и обсуждение*) Построены графики зависимости фрикционных параметров ABS-пластика от абсолютной влажности почвы. Выявлено, что при абсолютной влажности почвы 18, 20 и 26 процентов коэффициент трения акрилонитрилбутадиенстирола соответственно равен 0,45, 0,5 и 0,6. Величина адгезии составляет 100, 145 и 700 паскалей при абсолютной влажности почвы соответственно 18, 20 и 28 процентов. После достижения абсолютной влажности почвы 26-28 процентов наблюдается снижение показателей трения и адгезии. (*Выводы*) Показатели фрикционных свойств ABS-пластика ниже, чем стали, однако значительно выше, чем фторопласта. Дальнейшие исследования в данной области позволят значительно повысить эффективность при выборе материала для изготовления рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов и снизить энергозатраты.

Ключевые слова: почвообрабатывающий агрегат, рабочий орган, ABS-пластик, суглинистая почва, влажность, технологические свойства, коэффициент трения скольжения, адгезия.

■ **Для цитирования:** Квас С.А., Золотарев А.С. Определение фрикционных свойств ABS-пластика при контакте с суглинистой почвой // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N2. С. 98-102. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-98-102. EDN: OAJICA.

Scientific article

Determining Friction Properties of ABS Plastic in Contact with Loamy Soil

Sergey A. Kvas,
junior researcher,
e-mail: kvas.sergo@yandex.ru;

Andrey S. Zolotarev,
junior researcher,
e-mail: zl200@yandex.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper explores the feasibility of substituting steel working bodies with polymer ones in soil-cultivating units. (*Research purpose*) The research aims to investigate how the friction parameters of acrylonitrile butadiene styrene (ABS plastic) are affected by variations in absolute soil moisture and speed of the unit during the interaction of its working body with loamy soil. (*Materials and methods*) A laboratory unit was developed to examine the friction characteristics of the polymer in contact with loamy soil. The study measures the friction and adhesion properties by altering the absolute moisture of loamy soil. (*Results and discussion*) Graphs were constructed to illustrate the relationship between of the friction parameters of acrylonitrile butadiene styrene (ABS plastic) on absolute soil moisture. It was determined that at absolute soil moistures of 18, 20 and 26 percent, the friction coefficients of acrylonitrile butadiene styrene are 0.45, 0.5 and 0.6, respectively. The adhesion values were recorded at 100, 145 and 700 pascals for absolute soil moistures of 18, 20 and 28 percent, respectively. A decrease in both friction and adhesion was observed when the soil moisture reached between 26% and 28%. (*Conclusions*) The friction properties of acrylonitrile butadiene styrene (ABS plastic) are lower than those of steel, yet significantly higher than those of fluoroplastic. Further research in this area is expected to significantly increase the efficiency of selecting materials for the manufacturing of working parts in soil-cultivating units, while also reducing energy costs.

Keywords: tillage unit, working body, acrylonitrile butadiene styrene (ABS plastic), loamy soil, humidity, moisture, technological properties, sliding friction coefficient, adhesion.

■ **For citation:** Kvas S.A., Zolotarev A.S. Determining friction properties of ABS plastic in contact with loamy soil. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 98-102 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-98-102. EDN: OAJICA.

Сопротивление движению рабочего органа сельскохозяйственной техники со стороны почвы зависит от ее механического состава, плотности, твердости, трения скольжения, адгезии, других технологических свойств и факторов. Снижению сопротивления может способствовать замена стальных рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов на синтетические. Современные полимерные материалы отличаются более низкими фрикционными показателями, а также их можно использовать для изготовления рабочих органов.

Трение скольжения – это контактная сила, вызванная сопротивлением скользящему движению двух объектов относительно друг друга, в данном случае почвы и рабочего органа агрегата. Адгезия проявляется в действии молекулярных сил притяжения на границе соприкосновения поверхностей различных твердых и (или) жидких материалов, что приводит к их связыванию. При взаимодействии крупных кусков почвы с рабочими поверхностями молекулярное притяжение ослабевает [1, 2]. Для частиц малых размеров влияние молекулярных сил на показатель адгезии становится важным фактором [3]. В количественном выражении величина адгезии P_a может характеризоваться усилием, затрачиваемым на отделение прилипшей почвы от поверхности рабочего органа [4, 5]. Российскими и зарубежными учеными установлено, что силы прилипания в случае повышения влажности почвы больше, чем при контакте с сухими почвами [6].

ABS-пластик – ударопрочная техническая термопластическая смола на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом [7]. Благодаря высокой механической прочности, жесткости, износостойкости и легкости в обработке это один из самых распространенных инженерных материалов для 3D-печати.

Цель исследований – определение зависимости фрикционных параметров ABS-пластика от абсолютной влажности почвы и скорости движения рабочего органа при взаимодействии с суглинистой почвой.

Материалы и методы. По предварительной оценке агрегатного и гранулометрического состава установлен тип почвы: это глинисто-пылеватый средне-тонкодисперсный средний суглинок, кислотность 5,6 ед. рН (слабокислая реакция).

Для определения коэффициента внешнего трения спроектирована и изготовлена лабораторная установка (рис. 1). Через свободно вращающийся ролик 4 консольной балки 2 перебрасывается гиб-

кая невесомая нить 9. Одним концом она связывается с размещенным на электронных весах 11 эталонным грузом 10, другим – с бюксой 12, заполненной почвой. Бюкса размещена на металлическом диске 7, сверху на нем расположен диск из испытуемого материала 8 [8]. Диски приводятся во вращение через вертикальный вал 6 электродвигателя 5, закрепленного на опоре 3. Компоненты установки смонтированы на общем основании 1.

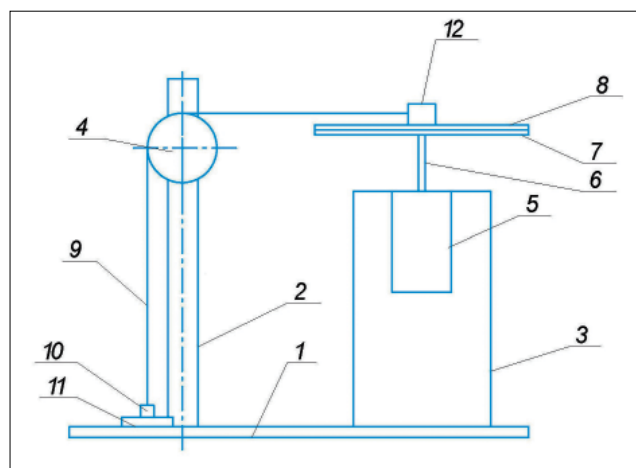


Рис. 1. Лабораторная установка для определения коэффициента внешнего трения

Fig. 1. Laboratory unit for determining the external friction coefficient

До начала вращения диска масса груза на весах неизменная. При вращении диск за счет силы трения увлекает бюксу за собой, но поскольку нить с грузом удерживает чашу, весы разгружаются.

Коэффициент внешнего трения

$$f = (m_1 - m_2) / m_3, \quad (1)$$

где m_1 – масса груза до вращения диска, г; m_2 – масса груза во время вращения диска, отображаемая на весах, г; m_3 – масса почвы внутри бюксы, г.

Пробы почвы высушивали в сушильном шкафу Memmert, бюксу с почвой взвешивали на электронных весах AND GF-3000 с ценой деления 0,01 г. Необходимую частоту вращения диска контролировали с помощью тахометра.

Предложена эмпирическая формула зависимости величины адгезии от влажности:

$$P_a = c_k \cdot w^2 + b_k \cdot w + a_k, \quad (2)$$

где c_k , b_k , a_k – коэффициенты испытываемых материалов; w – влажность почвы.

Исследовалось также влияние на величину адгезии длительности контакта и усилия начального

прижатия почвы [9]. При непродолжительном контакте величина адгезии уменьшается, а при более долгом и усилении начального прижатия почвы увеличивается [10, 11].

Увеличение начального давления с 0,005 до 0,035 МПа приводит к повышению усилия адгезии по отношению к стали в 2 раза [12]. В случае фторопласта при тех же условиях сила адгезии изменится на крайне малую величину, которой можно пренебречь [13]. С учетом этого считаем влажность почвы и время контакта определяющими факторами увеличения силы адгезии [14]. Из этих двух показателей влажность почвы влияет более существенно на величину адгезии [15].

Усилия отрыва определяли весовым методом, при этом грузовым плечом служит горизонтально расположенный и опирающийся на неподвижную призму жесткий рычаг со скользящим грузом [16] или гибкая нить. Измерение усилия отрыва с помощью силоизмерительной пружины реализовано в изобретении Г.Н. Чиркова (Вилде А., Руциныш А., Севостяновс Г. Влияние скорости на сопротивление скольжению почвы по стальной поверхности; сб. науч. тр. междунар. конф. «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». 2008. Т. 2. С. 84-89).

Известен прибор для определения величины адгезии конструкции ВИСХОМ (Ковалев Н.Г., Хайлис Г.А., Ковалев М.М. Сельскохозяйственные материалы (виды, состав, свойства). М.: ИК «Родник», 1998. С. 35). Прибор представляет собой диск и груз (чашку с песком), связанные переброшенной через ролик ниткой. Момент отрыва диска от поверхности почвы определяется при подсыпании песка в чашку. Недостаток данного способа заключается в его трудоемкости, поскольку песок в чашку необходимо периодически подсыпать и взвешивать после отрыва диска от поверхности.

В ФНАЦ ВИМ разработана лабораторная установка для определения величины адгезии [17] (рис. 2).

На основании 1 жестко закреплена стойка 2 со свободно вращающимся роликом 3, через него переброшена нить 4. Один конец нити связан с эталонным грузом 5, другой – с диском 6, который соприкасается с почвой нарушенной структуры, находящейся в емкости 8.

Почву определенной влажности размещают в емкость 8, в момент испытания ее поддерживает рукой исследователь, а груз 5 эталонной массы размещается на электронных весах 7. При вдавливания диска в почву емкость медленно опускается до отрыва диска 5 от поверхности почвы. В момент отрыва фиксируется показание электронных весов.

Величина адгезии

$$\sigma = 4g \cdot (m_1 - m_2) / \pi d^2, \text{ Па}, \quad (3)$$

где m_1 – масса груза, кг; m_2 – масса груза в момент

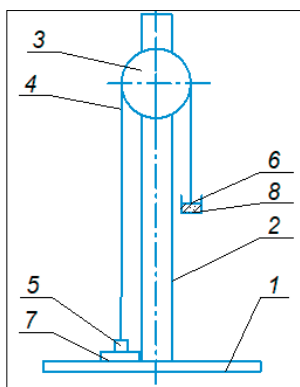


Рис. 2. Лабораторная установка для определения силы адгезии (разработка ВИМ)

Fig. 2. Laboratory unit for determining the strength of adhesion (developed in VIM)

отрыва диска от почвы, кг; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; d – диаметр диска, м.

Величина адгезии определялась при разных значениях абсолютной влажности суглинистой почвы. Образец высушивали до постоянной массы воздушно-тепловым методом [18] в сушильном шкафу Memmert при 100-105°C и взвешивали на весах ANDGF-3000. Если разность массы между двумя последовательными результатами не превышала 0,05 г, пробы охлаждали в эксикаторе 20-30 мин и фиксировали конечную массу бюксы с почвой.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. При минимальной величине абсолютной влажности почвы 18% и скорости движения рабочего органа агрегата 7,5 км/ч коэффициент трения скольжения ABS-пластика составил 0,39. Для стали данный параметр для среднего суглинка равен 0,51, для тяжелого суглинка и глины повышается до 0,68. Это свидетельствует о том, что по антифрикционным свойствам исследуемый полимерный материал превосходит сталь. При абсолютной влажности почвы 20% коэффициент трения скольжения составил 0,4, а при 26% увеличился до 0,6.

Установлена взаимосвязь абсолютной влажности почвы и коэффициента трения скольжения рабочего органа из разных материалов (рис. 3а). В экспериментах величина абсолютной влажности изменялась в интервале 18-35% при скорости движения 7,5 км/ч.

Вначале с увеличением абсолютной влажности почвы повышается и коэффициент трения скольжения, однако при достижении влажности 25-26% влага начинает выполнять функцию смазки и коэффициент трения снижается. Это обстоятельство хорошо согласуется с ранее полученными данными (Синеоков Г.Н., Панов И.М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин. М.: Машиностроение, 1977. С. 15).

Выявлена взаимосвязь адгезии с абсолютной влажностью почвы (рис. 3б). Минимальное значение адгезии, равное 100 Па, соответствует величине

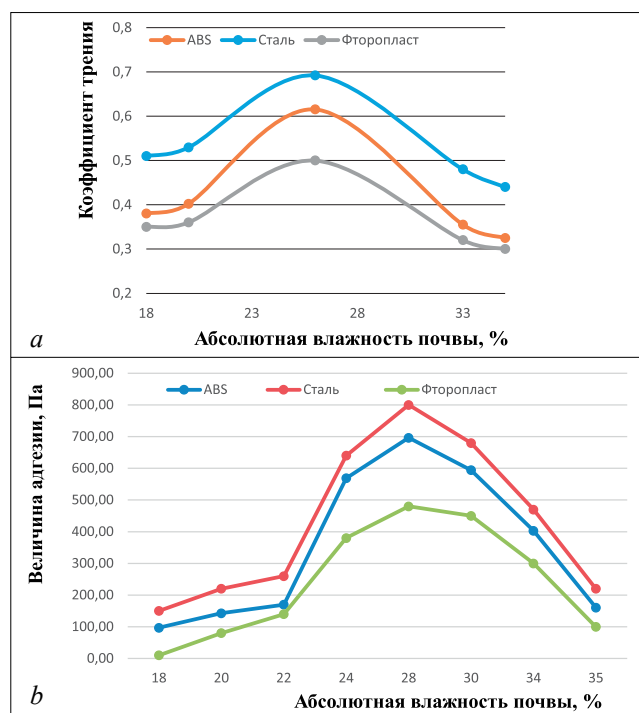


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения скольжения рабочего органа (а) и адгезии суглинистой почвы (б) от абсолютной влажности почвы

Fig. 3. Dependence of the sliding friction coefficient of the working body (a) and adhesion of loamy soil (b) on the absolute soil moisture

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Старовойтов С.И., Ахалая Б.Х., Квас С.А. Адгезия сверхвысокомолекулярного полиэтилена и суглинистой почвы // *Сельский механизатор*. 2020. N12. С. 16-17. DOI: 10.47336/0131-7393-2020-12-16-17.
2. Пархоменко Г.Г., Божко И.В., Громаков А.В., Пахомов В.И. Использование пластика в конструкциях почвообрабатывающих рабочих органов // *Тракторы и сельхозмашины*. 2017. N8. С. 8-15. DOI: 10.17816/0321-4443-66312.
3. Marinin M.A., Karasev M.A., Pospekhov G.B. et al. Engineering and geological parameters for heap leaching of gold from low-grade sandy clay ores: a feasibility study. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023. N9. 22-37. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_22.
4. Старовойтов С.И., Ценч Ю.С., Коротченя В.М., Личман Г.И. Технические системы цифрового контроля качества обработки почвы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N1. С. 16-21. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21.
5. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И., Чемисов Н.Н. Энергетическая и технологическая оценка почвообрабатывающего рабочего органа // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. N5. С. 10-13. EDN: UMQUX.
6. Лобачевский Я.П. Прочностные и деформационные свойства связанных задерненных почв // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2011. N3. С. 18-20. EDN: NVAWBR.
7. Аржакова О.В., Аржаков М.С., Бадамшина Э.Р. и др. Полимеры будущего // *Успехи химии*. 2022. Т. 91. N12. С. 5062. DOI: 10.57634/RCR5062.
8. Kun D., Kárpáti Z., Fekete E., Móczó J. The role of interfacial adhesion in polymer composites engineered from lignocellulosic agricultural waste. *Polymers*. 2021. 13(18). 3099. DOI: 10.3390/polym13183099.
9. Макаренко А.Н., Мартынова И.В. Результаты испытаний износостойкого покрытия // *Сельский механизатор*. 2021. N10. С. 22-23. EDN: UCSZZU.
10. Твердохлебов С.А., Аветисян О.М., Дуков С.С. Обоснование рациональности использования вибрационного орудия для обработки почвы // *Труды КубГАУ*. 2016. N123 (09). 54. DOI: 10.21515/1990-4665-123-054.
11. Алдошин Н.В., Голубев В.В., Васильев А.С. и др. Перспективы использования пластиковых деталей сельскохозяйственных машин // *АгроЭкоИнженерия*. 2023. N3(116). С. 20-34. DOI: 10.24412/2713-2641-2023-3116-20-33.
12. Денисов В.А., Задорожный Р.Н., Романов И.В. и др. Триботехнические свойства материалов для опор скольжения культиваторов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N4. С. 13-18. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-13-18.
13. Campbell C.S. Granular material flows. An overview. *Powder Technology*. 2006. Vol. 162. N3. 208-229. DOI: 10.1016/j.powtec.2005.12.008.
14. Fathani T.F., Legono D., Karnawati D. A numerical model

for the analysis of rapid landslide motion. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2017. Vol. 35. N5. 2253-2268. DOI: 10.1007/s10706-017-0241-9.

15. Дмитриев С.Ю., Дмитриев Ю.П., Ценч Ю.С. Комплекс машин АГРОМАШ для обработки залежных земель // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N2 (31). С. 40-47. EDN: RXFMCP.
16. Алябьев А.Ф., Котов А.А. Изменение тяговых свойств гусеничного движителя при замерзании-оттаивании почвы // *Техника и оборудование для села*. 2018. N4.

С. 10-13. EDN: YWXXOG.

17. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И. Теоретические и технологические аспекты работы рыхлительного рабочего органа // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. N5. С. 17-23. DOI: 10.22314/207375992016.5.1723.
18. Дворук В.И., Борак К.В., Бучко И.А., Кириенко Н.А. Влияние типа почвы на разрушение низколегированных сталей при изнашивании // *Трение и износ*. 2022. Т. 43. N6. С. 583-593. DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-6-583-593.

REFERENCES

1. Starovoytov S.I., Ahalaya B.H., Kvas S.A. Adhesion of ultra-high molecular weight polyethylene and loamy soil. *SelskiyMechanizator*. 2020. N12. 16-17 (In Russian). DOI: 10.47336/0131-7393-2020-12-16-17.
2. Parkhomenko G.G., Bozhko I.V., Gromakov A.V., Pakhomov V.I. The use of plastics in the construction of soil-working tools. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2017. N8. 8-15 (In Russian). DOI: 10.17816/0321-4443-66312.
3. Marinin M.A., Karasev M.A., Pospekhov G.B. et al. Engineering and geological parameters for heap leaching of gold from low-grade sandy clay ores: a feasibility study. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023. N9. 22-37 (In English). DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_22.
4. Starovoytov S.I., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M., Lichman G.I. Technical systems for digital soil quality control. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N1. 16-21 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21.
5. Lobachevskiy Ya.P., Starovoytov S.I., Chemisov N.N. Power and technological evaluation of soil cultivating working tool. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2015. N5. 10-13 (In Russian). EDN: UMQUSX.
6. LobachevskyYa.P. Strength and deformation properties of bonded blackened soils. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2011. N3. 18-20 (In Russian). EDN: NVAWBR.
7. Arzhakova O.V., Arzhakov M.S., Badamshina E.R., et al. Polymers for the future. *Russian Chemical Reviews*. 2022. Vol. 91. N12. 5062 (In Russian). DOI: 10.57634/RCR5062.
8. Kun D., Kárpáti Z., Fekete E., Móczó J. The role of interfacial adhesion in polymer composites engineered from lignocellulosic agricultural waste. *Polymers*. 2021. 13(18). 3099 (In English). DOI: 10.3390/polym13183099.
9. Makarenko A.N., Martynova I.V. Test results of wear-resistant coating. *Selskiy Mechanizator*. 2021. N10. 22-23 (In Russian). EDN: UCSZZU.
10. Tverdokhlebov S.A., Avetisyan O.M., Dukov S.S. Justification of rational use of vibrating tools for soil cultivation. *Works of the Kuban state agrarian university*. 2016. N123 (09). 54 (In Russian). DOI: 10.21515/1990-4665-123-054.
11. Aldoshin N.V., Golubev V.V., Vasiliev A.S. et al. Application potential of plastic parts of agricultural machines. *AgroEcoEngineering*. 2023. N3 (116). 20-34 (In Russian). DOI: 10.24412/2713-2641-2023-3116-20-33.
12. Denisov V.A., Zadorozhnyi R.N., Romanov I.V. et al. Tribotechnical properties of materials for cultivator sliding bearings. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N4. 13-18 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-13-18.
13. Campbell C.S. Granular material flows. An overview. *Powder Technology*. 2006. Vol. 162. N3. 208-229 (In English). DOI: 10.1016/j.powtec.2005.12.008.
14. Fathani T.F., Legono D., Karnawati D. A numerical model for the analysis of rapid landslide motion. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2017. Vol. 35. N5. 2253-2268 (In English). DOI: 10.1007/s10706-017-0241-9.
15. Dmitriev S.Yu., Dmitriev Yu.P., Tsench Yu.S. Complex of AGROMASH machines for processing fallow lands. *Vestnik VIESH*. 2018. N2 (31). 40-47 (In Russian). EDN: RXFMCP.
16. Alyabyev A.F., Kotov A.A. Change in hauling properties of a caterpillar mover in case of soil freezing and thawing. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2018. N4. 10-13 (In Russian). EDN: YWXXOG.
17. Lobachevskiy Ya.P., Starovoytov S.I. Theoretical and technological aspects of ripper working tools operation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2016. N5. 17-23 (In Russian). DOI: 10.22314/207375992016.5.1723.
18. Dvoruk V.I., Borak K.V., Buchko I.A., Kirienko N.A. Influence of soil type on breaking of low-alloy steels during wear. *Friction and Wear*. 2022. Vol. 43. N6. 583-593 (In Russian). DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-6-583-593.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку статьи. Авторы одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

The authors have made an equivalent contribution to the manuscript. The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

03.04.2024

31.05.2024

EDN: PHJYHJ

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-103-110



Научная статья

УДК 66.074.5;631.86;628.353



Техническое решение для очистки выбросов климатически активных газов

Александр Юрьевич Брюханов,
доктор технических наук, член-корреспондент РАН,
главный научный сотрудник,
e-mail: sznii@yandex.ru;

Эдуард Вадимович Васильев,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: sznii6@yandex.ru;
Семен Алексеевич Егоров,
ведущий инженер, e-mail: simon723132@yandex.ru

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Реферат. С повышением спроса на продовольственную продукцию и ростом объемов сельскохозяйственного производства увеличивается количество образуемых отходов и побочных продуктов, в том числе в отраслях животноводства. К способам утилизации побочных продуктов животноводства относится интенсивная переработка в установках различного типа, в том числе с применением процессов биодеструкции. Однако данный процесс связан с активным образованием выбросов углекислого газа, метана, закиси азота, аммиака. Для предотвращения негативного воздействия на окружающую среду предлагается внедрить систему очистки газовоздушных выбросов в линию переработки побочных продуктов животноводства. *(Цель исследования)* Разработать систему очистки выбросов климатически активных газов, в частности, аммиака, образующихся при интенсивной переработке биотехнологическим методом побочных продуктов животноводства. *(Материалы и методы)* С учетом свойств основных загрязняющих веществ определили возможные методы их удаления из выбросов. К таким методам относится сухая, мокрая, конденсационная и биологическая очистка. Наиболее оптимальным и эффективным выбран способ биоочистки. *(Результаты и обсуждение)* Разработали техническое решение для очистки газовоздушных выбросов в биофильтре с полимерным и органическим наполнителем. Предусмотрена цифровая система контроля и управления рабочим процессом. Особенностью предложенной конструкции является применение сменных фильтрующих картриджей и активной системы орошения. *(Выводы)* Определили основные параметры образующихся выбросов и методы их очистки. Очистка выбросов с цифровой системой контроля и управления рабочим процессом осуществляется последовательно в кожухотрубчатом конденсаторе и биофильтре. Удельная поверхность охлаждения равна $1,09 \cdot 10^{-3}$ квадратного метра на 1 метр кубический, удельный расход хладагента – 0,7 литров на 1 кубический метр. Установлены оптимальные параметры среды при очистке в биофильтре: температура 30 градусов Цельсия, влажность 45-55 процентов, показатель активной кислотности 8-8,4 единиц, время нахождения в фильтрующем слое 15-30 секунд. Данные параметры обеспечивают высокую степень очистки по аммиаку при длительной эксплуатации биофильтра.

Ключевые слова: животноводство, побочные продукты, интенсивная переработка, биотехнологические методы, выбросы, климатически активные газы, аммиак, очистка выбросов, конденсатор, биофильтр.

■ **Для цитирования:** Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Егоров С.А. Техническое решение очистки выбросов климатически активных газов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N2. С. 103-110. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-103-110. EDN: PHJYHJ.

Scientific article

Technical Solution for Purifying Emissions of Climate-Active Gases

Alexander Yu. Briukhanov,
Dr.Sc.(Eng.), corresponding member of the Russian
Academy of Sciences, chief researcher,
e-mail: sznii@yandex.ru;

Eduard V. Vasilev,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: sznii6@yandex.ru;
Semen A. Egorov,
lead engineer,
e-mail: simon723132@yandex.ru

Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The rising demand for food products and subsequent increase in agricultural production leads to heightened quantities of waste and by-products, particularly within the livestock industry. Traditional methods of livestock by-product disposal encompass intensive processing, including biodestruction processes. However, these processes tend to generate significant emissions of climate-active gases such as carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and ammonia. To mitigate environmental impacts, it is proposed to integrate an advanced gas-air emission purification system into the existing livestock by-product processing lines. (*Research purpose*) The objective is to develop a system for purifying emissions of climate-active gases, particularly ammonia, produced during the intensive biotechnological processing of livestock by-products. (*Materials and methods*) Based on the properties of the primary pollutants, possible methods for their removal from emissions were determined. Such methods include dry, wet, condensation, and biological treatment. The biopurification method was selected for its efficacy and optimal performance. (*Results and discussion*) As a technical solution, a sequential gas-air emission purification process was developed using biofilters equipped with a polymer carrier and organic substrates as fillers. The system is equipped with digital sensors for monitoring and controlling the operational workflow. A special feature of the proposed system design is the use of replaceable filter cartridges and an active irrigation system. (*Conclusions*) The research helped to identify main types, parameters and methods for purifying emissions of climate-active gases with a focus on ammonia. Emission purification with a digital workflow control system is carried out sequentially in a shell-and-tube condenser and a biofilter. The specific cooling surface is $1.09 \cdot 10^{-3}$ square meters per 1 cubic meter, the specific refrigerant consumption is 0.7 liters per 1 cubic meter. Optimal biofilter performance was attained at the temperature of 30 degrees Celsius, with 45-55 percent humidity, active acidity of 8-8.4 units, and residence time of 15-30 seconds in the filter layer. These conditions ensure a high degree of ammonia purification and long-term biofilter operation.

Keywords: livestock farming, by-products, intensive processing, biotechnological methods, emissions, climate-active gases, ammonia, emission treatment, emission purification, condenser, biofilter.

For citation: Briukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Egorov S.A. Technical solution for purifying emissions of climate-active gases. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18.N2. 103-110. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-103-110. EDN: PHJYHJ.

Для повышения эффективности агропромышленного комплекса активно внедряются интенсивные технологии. Нарастивание выпуска продукции приводит к увеличению количества образуемых отходов, которые необходимо утилизировать или переработать. Ежегодное количество таких отходов превышает 450 млн т, большая их часть приходится на навоз и помет, а на переработку и использование поступает около 200 млн т [1].

К способам утилизации побочных продуктов животноводства относится их интенсивная переработка в удобрение путем биоферментации [2]. В сравнении с пассивной переработкой, такой как длительное выдерживание или компостирование, значительно сокращается продолжительность утилизации с 3-6 месяцев до 6-8 суток. Ускорение процесса достигается за счет принудительной аэрации и перемешивания смеси в биореакторах различного типа.

Однако интенсификация процесса приводит к активному образованию выбросов, которые загрязняют атмосферу токсичными веществами и распространяют неприятный запах. Вариантом снижения негативного влияния на окружающую среду может быть внедрение системы очистки выбросов в технологическую схему переработки отходов.

Цель исследования – разработать систему очистки выбросов, образующихся при интенсивной переработке побочной продукции животноводства в биореакторной установке барабанного типа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. При разработке системы очистки первоочередной задачей является определение свойств образующихся в результате биогенерации выбросов, состава загрязняющих веществ, а также физических параметров, в частности, температуры и влажности.

В процессе аэробной ферментации органические вещества побочных продуктов животноводства минерализуются [3]. При правильном протекании ферментации, когда перерабатываемая смесь достаточно рыхлая и к ней поступает необходимое количество кислорода (воздуха), в выходящий из биореактора газовоздушный поток попадают углекислый газ, аммиак и закись азота [4]. На углекислый газ (CO_2) приходится основной объем загрязняющих веществ в выбросах. Его концентрация составляет от 5 до 25% об. от общего воздушного потока [5].

К токсичным загрязняющим веществам относятся соединения азота, выделяемые преимущественно в виде аммиака (NH_3) и закиси азота (N_2O) [6]. На NH_3 в среднем приходится 60-90% общего количество азота в выбросах, на N_2O – 5-25% [7]. Также в выбросах может присутствовать свободный азот (N_2) в пределах 1-5% от общей массы азотных соединений [8]. Концентрация NH_3 может составлять $100-1000 \text{ мг/м}^3$, N_2O – $30-300 \text{ мг/м}^3$ [9].

При уплотнении исходной перерабатываемой смеси в биореакторе могут образоваться крупные комки, в которые ограничивается поступление кис-

лорода. В таких зонах начинают развиваться анаэробные микроорганизмы и выделяются токсичные газы метан, сероводород, метил- и этилмеркаптаны [10].

Образование метана (CH_4) зависит от подготовки смеси к переработке, а также от режима работы биоферментатора. Чаще всего количество CH_4 в выбросах незначительное, в пределах 10-60 мг/м³. Сероводород (H_2S), метил- и этилмеркаптаны (MeSH , EtSH) практически не образуются при переработке побочных продуктов животноводства [11]. В более значимых количествах они выделяются при переработке смеси, в состав которой входит органическая составляющая твердых бытовых отходов [10].

Во время интенсивной переработки побочных продуктов животноводства в биореакторе барабанного типа температура смеси достигает 65-75°C, влажность среды при загрузке составляет 50-60%. Температура и влажность потока газовых выбросов составляют 60-70°C и 50-55%.

Для выбора способа удаления из выбросов загрязняющих веществ проведен анализ методов очистки. Так как основные загрязняющие компоненты выбросов – это аммиак, закись азота и метан, то в качестве возможных рассматривались сухой, мокрый, конденсационный и биологический методы очистки.

Единственным способом сухой газоочистки для эффективного удаления данных веществ является адсорбция [12]. Однако этот вариант достаточно дорогостоящий из-за высокой стоимости адсорбента, к тому же отработанный адсорбент тоже необходимо утилизировать. Немаловажный фактор заключается и в требовании к влажности поступающих в адсорбер выбросов.

Аппараты мокрой очистки более удобные. В них загрязняющие вещества растворяются в рабочей жидкости (абсорбенте) при прохождении через нее газовой смеси. В качестве рабочей жидкости обычно используется вода, в нее могут добавляться агенты, усиливающие взаимодействие с загрязняющим веществом. Мокрая очистка отлично подходит для обработки выбросов с высокой концентрацией и большим количеством различных соединений. Но обеспечение постоянного движения большого объема воды приводит к высоким энергозатратам. Кроме этого абсорберы достаточно трудоемкие в обслуживании.

Конденсационный метод применяют при повышенной температуре выбросов. Суть заключается в выделении из воздуха паров на рабочей поверхности конденсатора и переходе загрязняющих веществ из газовой смеси в жидкое. Поверхность аппарата, где происходит конденсация, дополнительно охлаждают. Чаще всего конденсаторы применяют на первом этапе удаления основ-

ной части загрязняющих веществ, а также для охлаждения газовых выбросов перед их доочисткой.

В последние 30 лет активно развиваются биологические методы очистки [13]. Их принцип основан на способности микроорганизмов преобразовывать широкий спектр загрязняющих веществ до конечных нетоксичных соединений, таких как углекислый газ и вода. Известно, что микроорганизмы утилизируют аммиак, сероводород, метан, толуол (C_7H_8) и многие другие соединения [14]. Чаще всего биофильтр представляет собой емкость, на ее дне расположены воздухопроводы для подачи газовой смеси. Над воздухопроводами расположен носитель (насадка) – фильтрующий слой, в котором находятся микроорганизмы. В качестве фильтрующего слоя используют природные материалы, такие как торф, кокосовое волокно, опилки, солому. Эти материалы обладают высокой пористостью, а также содержат различные минеральные вещества, необходимые для жизнедеятельности микроорганизмов.

Преимущества биофильтров:

- долговечность носителя (при поддержании оптимальных условий);
 - высокая производительность по объему очищаемого воздуха;
 - безотходность (при использовании в качестве носителя природных материалов);
 - низкое энергопотребление;
- недостатки:
- крупные габариты (при использовании классической конструкции, без активных систем поддержания влажности);
 - зависимость эффективности очистки от внешних факторов;
 - сложность в обслуживании (при использовании классической конструкции).

Биофильтры применяются для очистки воздуха из помещений, где содержатся животные, на водоочистных станциях, комплексах по сортировке и переработке твердых бытовых отходов [15].

Результаты и обсуждение. На основе проведенного исследования, а также анализа отечественной и зарубежной патентной базы разработано технологическое решение для очистки выбросов климатически активных газов с цифровой системой контроля и управления рабочим процессом. Схема очистки представлена на рисунке.

Поток выбросов в виде газовой смеси из воздуховода 1 поступает в конденсатор 2. Выбор кожухотрубчатого конденсатора обусловлен достаточно низким создаваемым аэродинамическим сопротивлением, а также более удобным способом удаления конденсата. В конденсаторе смесь охлаждается до 25-30°C и по воздуховоду 3 подается напорным вентилятором 4 в нижний модуль 5 филь-

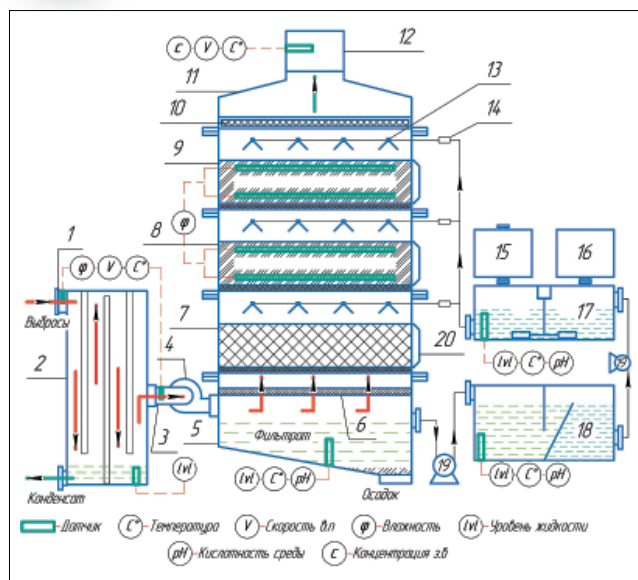


Рис. Технологическая схема очистки выбросов с системой контроля и управления

Fig. Technological scheme of an emission purification system with a digital workflow control and management system

традиционной колонны квадратного сечения. В этом модуле собирается сток (фильтрат), образуемый при орошении фильтрующих картриджей. В нижней части модуля предусмотрен уклон для облегчения удаления осадка. Для равномерного распределения потока по всей площади сечения фильтрационной колонны в нижнем модуле расположен рассеиватель 6 (перфорированная пластина).

Далее поток проходит через первый фильтрующий картридж 7 с полимерным носителем. Выбор полимерного наполнителя обусловлен тем, что на нем должно задерживаться 40-50% загрязняющих веществ [16]. В этом картридже наибольший объем абсорбированного аммиака преобразуется в нитрат. Скорость поступающего потока выбросов на первый картридж максимальная, что вызывает ускоренный вынос влаги с поверхности носителя [17]. В результате для поддержания процессов абсорбции и нитрификации требуется значительно больший расход жидкости, чем в верхних фильтрующих модулях 8 и 9. По этой причине в нижнем картридже нецелесообразно применять природные материалы, которые от влаги быстро уплотнятся и начнут разрушаться [18].

По конструкции фильтрующие картриджи аналогичны, но в двух верхних для более тонкой очистки от загрязняющих веществ предполагается использовать природный наполнитель. В верхнем модуле 11 колонны расположен каплеуловитель 10 для задержания и предотвращения уноса с воздушным потоком крупных капель при работе форсунок 13. Верхняя часть колонны сужается перед воздухоподом 12 очищенного воздуха.

Использование системы сменных фильтрующих картриджей облегчает обслуживание и замену носителя, а также подбор носителя под конкретный вид загрязняющих веществ и производительность системы очистки. Для замены картриджей предусмотрен люк 20.

Над всеми картриджами расположены линии форсунок 13, через которые распыляется питательный раствор, необходимый для развития микроорганизмов и утилизации ими загрязняющих веществ. Каждая линия оснащена электромагнитным клапаном 14 для раздельного включения форсунок и подачи точного количества жидкости. Активная система орошения позволит поддерживать оптимальную влажность носителя, благодаря чему удастся достигнуть высокой эффективности очистки по аммиаку при длительной эксплуатации.

Стекающий с картриджем фильтрат, собранный в нижнем модуле, перекачивается насосом 19 в бак денитрификации 18 и выдерживается до перехода основной части нитрата в азот. Очищенный от нитрата фильтрат передается в бак с жидкостью для орошения 17, и цикл использования жидкости в биофильтре замыкается.

Бак 17 оборудован мешалкой для равномерного распределения в растворе минеральных веществ, поступающих из контейнера 16. Для точной подачи воды при приготовлении орошающей жидкости используется расширительный бак 15.

В результате теоретического исследования определены характеристики технической системы очистки выбросов. Для конденсатора это удельная поверхность охлаждения F_y ($\text{м}^2/\text{м}^3$) и удельный расход хладагента V_y ($\text{л}/\text{м}^3$).

Использовалась методика расчета теплообменных аппаратов (Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию. М.: Химия, 1991. 496 с.) при исходных данных:

- температура потока выбросов на входе в конденсатор $T_{\text{квх}} = 60^\circ\text{C}$ и на выходе из него $T_{\text{квых}} = 30^\circ\text{C}$;
- температура хладагента на входе в конденсатор $T_{\text{вх}} = 15^\circ\text{C}$ и на выходе из него $T_{\text{вых}} = 25^\circ\text{C}$;
- коэффициент теплопередачи $k = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;
- влажность поступающих выбросов $W = 50\%$.

Необходимую площадь поверхности теплопередачи определили из основного уравнения теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_{\text{cp}}} \cdot K, \text{ м}^2/\text{м}^3, \quad (1)$$

где Q – тепловая нагрузка теплообменника, Вт; Δt_{cp} – средняя разность температур потоков, $^\circ\text{C}$; K – коэффициент запаса мощности (площади) оборудования, $K = 1,2$.

Тепловая нагрузка

$$Q = G \cdot C_{\text{ВЗ}} \cdot (T_{\text{КВХ}} - T_{\text{КВЫХ}}), \quad (2)$$

где G – количество поступающих в конденсатор выбросов, кг/с; $C_{\text{ВЗ}}$ – теплоемкость выбросов (воздуха с учетом температуры и влажности), Вт/(кг·°C).

Средняя разность температур потоков

$$\Delta t_{\text{ср}} = (\Delta t_{\text{Б}} - \Delta t_{\text{М}}) / \ln(\Delta t_{\text{Б}} / \Delta t_{\text{М}}), \quad (3)$$

где $\Delta t_{\text{Б}}$ и $\Delta t_{\text{М}}$ – большая и меньшая разность температур на концах теплообменника, °C.

Так как планируется прямоточное движение хладагента и выбросов, то большая разность температур определяется по формуле:

$$\Delta t_{\text{Б}} = T_{\text{КВХ}} - T_{\text{ВВХ}}, \quad (4)$$

а меньшая разность температур

$$\Delta t_{\text{М}} = T_{\text{КВЫХ}} - T_{\text{ВВЫХ}}. \quad (5)$$

С учетом исходных данных, удельная поверхность охлаждения

$$F_y = 1,09 \cdot 10^{-3} \cdot \text{м}^2/\text{м}^3.$$

Расход хладагента

$$V = 3.6 \cdot Q / (C_{\text{ВД}} \cdot (T_{\text{ВВЫХ}} - T_{\text{ВВХ}})), \text{ л/м}^3, \quad (6)$$

где $C_{\text{ВД}}$ – теплоемкость воды, Вт/(кг·°C). С учетом исходных данных удельный расход хладагента $V_y = 0,7 \text{ л/м}^3$.

Определены оптимальные параметры среды, в которой происходит очистка в биофильтре:

- температура 30°C. При температуре среды ниже 20°C значительно замедляется развитие микроорганизмов и скорость биоразложения аммиака. При температуре выше 40°C нитрифицирующие микроорганизмы погибают;

- влажность среды 45-55%. При влажности менее 40% снижается абсорбционная способность и значительно тормозится процесс нитрификации. При влажности более 65% начинается переуплотнение носителя, повышается аэродинамическое сопротивление, что затрудняет доступ кислорода;

- кислотность среды 8-8,4 ед. pH. При кислотности ниже 7 и выше 8,8 ед. pH процесс нитрификации существенно замедляется. При pH ниже 6 и выше 9 ед. останавливается процесс нитрификации;

- длительность нахождения в фильтрующем слое 15-30 секунд. Этот параметр определяется отношением толщины всего фильтрующего слоя к скорости потока выбросов. При слишком высокой скорости потока загрязняющие вещества не успеют абсорбироваться на поверхности носителя: снижается эффективность очистки, ускоряется вынос влаги с поверхности носителя и увеличивается расход воды на поддержание нужного уровня влажности.

Система контроля рабочих параметров очистки и управление процессом

Для высокоэффективного удаления и разложения загрязняющих веществ необходимо поддерживать оптимальные рабочие параметры среды. Данный функционал обеспечивает цифровая система контроля и управления технологическим процессом очистки. Контроль рабочих параметров осуществляется с помощью датчиков.

Первый комплект датчиков (скорости $V_{\text{ВП}}$, влажности ϕ и температуры C°) расположен на входе потока в конденсатор и выходе из него. Это необходимо для управления температурой хладагента и определения количества влаги на рабочей поверхности конденсатора. По этим данным в дальнейшем рассчитывается количество жидкости, подаваемой на форсунки орошения картриджа. В нижней части конденсатора установлен датчик уровня жидкости (lvl), по которому определяют необходимость удаления конденсата.

Следующий набор датчиков показателей фильтрата (lvl, C° и pH) установлен в нижнем модуле фильтрационной колонны. По уровню жидкости определяется необходимость включения насоса для перекачки фильтрата в бак денитрификации. По pH фильтрата контролируется эффективность разложения загрязняющих веществ, а также регулируется количество подаваемых минеральных соединений в бак с жидкостью системы орошения и количество подаваемой жидкости на форсунки.

С помощью специальных датчиков во втором и третьем фильтрующих картриджах отслеживается влажность носителя. Без этих показателей невозможно определить, сколько жидкости требуется для орошения картриджей. Влажность носителя критически важно знать, так как планируется использование природного носителя (торф, кокосовое волокно). Превышение влажности более чем на 10% от оптимального значения приведет к чрезмерному переуплотнению носителя и образованию анаэробных зон. Все это в совокупности повышает аэродинамическое сопротивление, а также ингибирует процесс нитрификации, снижая эффективность разложения загрязняющих веществ.

Датчики на выходе из биофильтра в воздуховод 12 контролируют скорость и температуру потока после его очистки. По скорости потока на входе в фильтрационную колонну и на выходе из нее определяется аэродинамическое сопротивление и по его динамике можно прогнозировать состояние носителя в верхних картриджах. Измерение температуры необходимо для контроля тепловой энергии выбросов, нужной для разогрева рабочей зоны биофильтра. Если ее недостаточно, то возможен дополнительный подогрев орошающей жидкости или установка нагревающего элемента в корпусе биофильтра.

Таблица		Table
Типы и места расположения датчиков контроля параметров TYPES OF SENSORS FOR PARAMETER MONITORING AND THEIR LOCATIONS		
Показатель	Тип датчика	Место установки*
Температура потока, °С	Канальный датчик температуры и влажности воздуха (°С, φ)	1, 3, 12
Влажность потока, %		
Скорость потока, м/с	Датчик перепада давления воздуха	1, 3, 12
Температура жидкости, °С	Погружной датчик pH и температуры воды (pH, °С)	5, 17, 18
Кислотность жидкости, ед. pH		
Уровень жидкости, мм	Датчик уровня жидкости поплавковый (lvl)	2, 5, 17, 18
Влажность носителя, %	Импедансный датчик влажности (φ)	8, 9
Концентрация загрязняющих выбросов, мг/м ³	Электрохимический датчик концентрации (C)	12

*Цифры соответствуют позициям на рисунке.

Также предполагается точка для отбора проб в выходном канале биофильтра с целью надзорного контроля. Использование автоматизированной системы отбора проб целесообразно на установках, рассчитанных на большую производительность, так как стоимость таких систем очень высокая и их применение на установках малых размеров будет нерентабельным.

Одинаковый набор датчиков (lvl, C°, pH) предполагается в баке денитрификации и баке с жидкостью для системы орошения. По уровню жидкости определяется момент включения перекачивающих насосов и подачи чистой воды. Контроль температуры необходим для поддержания денитрификации и при необходимости подогрева орошающей жидкости [18]. Контроль pH в баке денитрификации позволяет отслеживать процесс восстановления нитрата, а в баке с жидкостью для орошения определить количество минеральных соединений для добавления в раствор.

Типы датчиков и их расположение на технической схеме приведены в *таблице*.

Функционал системы:

- управление скоростью напорного вентилятора;
- управление перекачивающими насосами;
- управление электромагнитными клапанами форсунок;
- управление мешалкой в баке орошающей жидкости;
- управление клапаном подачи чистой воды в бак с орошающей жидкостью;
- управление заслонкой подачи минеральных веществ в бак с орошающей жидкостью;
- управление нагревающими элементами (при наличии).

Выводы. На основании анализа проведенных ранее исследований определены основные виды климатически активных газов в выбросах, образующихся при интенсивной переработке побочных продуктов животноводства. Выявлены наиболее эффективные методы очистки от углекислого газа, аммиака, закиси азота и метана, такие как сухая, мокрая, конденсационная и биологическая.

Предложена технико-технологическая схема очистки газовоздушных выбросов с цифровой системой контроля и управления рабочим процессом. Схема предполагает последовательную очистку в кожухотрубчатом конденсаторе и биофильтре. Особенно является конструкция биофильтра со сменными фильтрующими картриджами и активной системой орошения для поддержания влажности носителя в оптимальных пределах.

Предлагаемый вариант позволит достигнуть высокой эффективности очистки по аммиаку при длительной эксплуатации. Система сменных картриджей значительно снизит трудозатраты на обслуживание биофильтра, а также даст возможность подбирать тип носителя в зависимости от параметров выбросов. В совокупности это обеспечивает ускоренную разработку и внедрение системы очистки под различные задачи.

Для разработанной технической системы определены характеристики: удельная поверхность охлаждения $F_y = 1,09 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{м}^3$ и удельный расход хладагента $V_y = 0,7 \text{ л}/\text{м}^3$. Также определены оптимальные параметры среды, в которой происходит биологическая очистка от загрязняющих выбросов: температура 30°C, влажность 45-55%, активная кислотность 8-8,4 ед. pH, время нахождения в фильтрующем слое 15-30 секунд.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Морозов Н.М. Развитие технологий, способов механизации и автоматизации очистки помещений от экскрементов и приготовления органических удобрений // *Техника и технологии в животноводстве*. 2023. N2(50). С. 92-100. DOI: 10.22314/27132064-2023-2-92.
2. Шалавина Е.В., Брюханов А.Ю., Васильев Э.В. и др.

- Биоферментация органических отходов свиноводческого комплекса в установке барабанного типа // *Аграрная наука*. 2020. №6. С. 51-56. DOI: 10.32634/0869-8155-2020-339-6-51-56.
3. Архипченко И.А., Бакина Л.Г., Брюханов А.Ю. и др. Трансформации микробного сообщества и органического субстрата при аэробной ферментации помета // *Экология и промышленность России*. 2020. N24(8). С. 22-27. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-8-22-27.
 4. Зеников В.И. Управление микробиологическими процессами технологии аэробной ферментации // *Техника и технологии в животноводстве*. 2023. N3(51). С. 83-86. DOI: 10.22314/27132064-2023-3-83.
 5. Bai M., Impraim R., Coates T. et al. Lignite effects on NH_3 , N_2O , CO_2 and CH_4 emissions during composting of manure. *Journal of Environmental Management*. 2020. N271. 110960. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110960.
 6. Pan Y., Chang H., Song P. Effects of superphosphate as an additive on nutrient characteristics and NH_3 , CO_2 , CH_4 and N_2O emissions during pig manure composting. *Agronomy*. 2023. N13(560). DOI: 10.3390/agronomy13020560.
 7. Dhamodharan K., Sudharsan Varma V., Chitraichamy V. et al. Emission of volatile organic compounds from composting: A review on assessment, treatment and perspectives. *Science of the Total Environment*. 2019. N695. 133725. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133725.
 8. Bao M., Cui H., Lv Ya. et al. Greenhouse gas emission during swine manure aerobic composting: Insight from the dissolved organic matter associated microbial community succession. *Bioresource Technology*. 2023. N373. 128729. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.128729.
 9. Zhu Zh., Li L., Dong H., Wang Yu. Ammonia and greenhouse gas emissions of different types of livestock and poultry manure during storage. *Transactions of the ASABE*. 2020. N63. 1723-1733. DOI: 10.13031/trans.14079.
 10. Hwang H.Y., Kim S.H., Shim J., Park S.J. Composting process and gas emissions during food waste composting under the effect of different additives. *Sustainability*. 2020. N12. 7811. DOI: 10.3390/su12187811.
 11. Li D., Yuan J., Ding J. et al. Effects of carbon/nitrogen ratio and aeration rate on the sheep manure composting process and associated gaseous emissions. *Journal of Environmental Management*. 2022. N323. 116093. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116093.
 12. Орлов В.А., Саймуллов А.В., Мельник О.В. Изучение процесса появления дурно пахнущих запахов в канализационных сетях и анализ средств их удаления // *Вестник МГСУ*. 2020. N15(3). С. 409-431. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.409-431.
 13. Marycz M., Brillowska-Dabrowska A., Munoz R., Gebicki J. A state of the art review on the use of fungi in biofiltration to remove volatile hydrophobic pollutants. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 2022. N21(1). 225-246. DOI: 10.1007/s11157-021-09608-7.
 14. Usevičiūtė L., Baltrėnaitė-Gedienė E., Baltrėnas P., Dutta S. Acetone, xylene and ammonia removal enhancement in the biofilter packed with steam modified biochar. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2022. N30(3). 412-423. DOI: 10.3846/jeelm.2022.17412.
 15. Raj I., Vaidya A.N., Pandey R.A. et al. Recent advancements in the mitigation of obnoxious nitrogenous gases. *Journal of Environmental Management*. 2018. N205. 319-336. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.09.064.
 16. Vela-Aparicio D., Bautista C.J., Forero D. et al. Inoculation of compost biofilter for the simultaneous removal of H_2S and NH_3 under transient conditions of gas concentration. *Chemical Engineering Transactions*. 2022. N93. 157-162. DOI: 10.3303/CET2293027.
 17. Danila V.; Zagorskis A.; Januševičius T. Effects of water content and irrigation of packing materials on the performance of biofilters and biotrickling filters. A review. *Processes*. 2022. N10. 1304. DOI: 10.3390/pr10071304.
 18. Baltrėnas P., Janusevicius T., Zagorskis A. et al. Removal of ammonia by biofilters with straight and wavy lamellar plates. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2020. N18. 1-10. DOI: 10.1007/s13762-020-02916-5.

REFERENCES

1. Morozov N.M. Development of technologies, mechanization and automation's methods of premises from excrement cleaning and organic fertilizers' preparation. *Machinery and technologies in livestock*. 2023. N2(50). 92-100 (In Russian). DOI: 10.22314/27132064-2023-2-92.
2. Shalavina E.V., Briukhanov A.Yu., Vasilev E.V. et al. Biofermentation of organic waste from a pig-breeding complex in a drum-type installation. *Agrarian Science*. 2020. N6. 51-56 (In Russian). DOI: 10.32634/0869-8155-2020-339-6-51-56.
3. Arkhipchenko I.A., Bakina L.G., Bruhanov A.Yu. et al. Transformation in the microbial community and of organic substrate during aerobic fermentation of manure. *Ecology and Industry of Russia*. 2020. N24(8). 22-27 (In Russian). DOI: 10.32634/0869-8155-2020-339-6-51-56.
4. Zenikov V.I. Management of aerobic fermentation technologies' microbiological processes. *Machinery and technologies in livestock*. 2023. N3(51). 83-86 (In Russian). DOI: 10.22314/27132064-2023-3-83.
5. Bai M., Impraim R., Coates T. et al. Lignite effects on NH_3 , N_2O , CO_2 and CH_4 emissions during composting of manure. *Journal of Environmental Management*. 2020. N271. 110960 (In English). DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110960.
6. Pan Y., Chang H., Song P. Effects of superphosphate as an additive on nutrient characteristics and NH_3 , CO_2 , CH_4 , and N_2O emissions during pig manure composting. *Agronomy*. 2023. N13(2). 560 (In English). DOI: 10.3390/agronomy13020560.

7. Dhamodharan K., Sudharsan Varma V., Veluchamy C. et al. Emission of volatile organic compounds from composting: A review on assessment, treatment and perspectives. *Science of the Total Environment*. 2019. N695. 133725 (In English). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133725.
8. Bao M., Cui H., Lv Ya. et al. Greenhouse gas emission during swine manure aerobic composting: Insight from the dissolved organic matter associated microbial community succession. *Bioresource Technology*. 2023. N373. 128729 (In English). DOI: 10.1016/j.biortech.2023.128729.
9. Zhu Zh., Li L., Dong H., Wang Yu. Ammonia and greenhouse gas emissions of different types of livestock and poultry manure during storage. *Transactions of the ASABE*. 2020. N 63. 1723–1733 (In English). DOI: 10.13031/trans.14079.
10. Hwang H.Y., Kim S.H., Shim J., Park S.J. Composting process and gas emissions during food waste composting under the effect of different additives. *Sustainability*. 2020. N12. 7811 (In English). DOI: 10.3390/su12187811.
11. Li D., Yuan J., Ding J. et al. Effects of carbon/nitrogen ratio and aeration rate on the sheep manure composting process and associated gaseous emissions. *Journal of Environmental Management*. 2022. N323. 116093 (In English). DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116093.
12. Orlov V.A., Saimullov A.V., Melnik O.V. A study of the process of malodor formation in sewer networks and analysis of methods for its elimination. *Vestnik MGSU*. 2020. N15(3). 409-431 (In Russian). DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.409-431.
13. Marycz M., Brillowska-Dabrowska A., Munoz R., Gebicki J. A state of the art review on the use of fungi in biofiltration to remove volatile hydrophobic pollutants. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 2022. N21(1). 225-246 (In English). DOI: 10.1007/s11157-021-09608-7.
14. Usevičiūtė L., Baltrėnaitė-Gedienė E., Baltrėnas P., Dutta S. Acetone, xylene and ammonia removal enhancement in the biofilter packed with steam modified biochar. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2022. N30(3). 412-423 (In English). DOI: 10.3846/jeeim.2022.17412.
15. Raj I. Vaidya A.N., Pandey R.A. et al. Recent advancements in the mitigation of obnoxious nitrogenous gases. *Journal of Environmental Management*. 2018. N205. 319-336 (In English). DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.09.064.
16. Vela-Aparicio D., Bautista C.J., Forero D. et al. Inoculation of compost biofilter for the simultaneous removal of H₂S and NH₃ under transient conditions of gas concentration. *Chemical Engineering Transactions*. 2022. N93. 157-162 (In English). DOI: 10.3303/CET2293027.
17. Danila V., Zagorskis A., Januševičius T. Effects of water content and irrigation of packing materials on the performance of biofilters and biotrickling filter. A review. *Processes*. 2022. N10. 1304 (In English). DOI: 10.3390/pr10071304.
18. Baltrėnas P., Janusevicius T., Zagorskis A. et al. Removal of ammonia by biofilters with straight and wavy lamellar plates. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2020. N18. 1-10 (In English). DOI: 10.1007/s13762-020-02916-5.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Брюханов А.Ю. – научное руководство, формулирование основных целей и задач теоретических исследований, доработка текста;

Васильев Э.В. – определение методологии исследования, критический анализ и доработка решения, формирование общих выводов, итоговая переработка статьи;

Егоров С.А. – сбор и анализ материалов по теме исследования, составление начального варианта статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Briukhanov A.Yu. – scientific guidance, formulation of main goals and objectives of theoretical research, finalization of the text;

Vasilev E.V. – definition of research methodology, critical analysis and finalization of the solution, formation of general conclusions, final revision of the article;

Egorov S.A. – collecting and analyzing materials on the research topic, drafting the initial version of the article.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

04.03.2024

19.04.2024