



Сельскохозяйственные МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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. Приказ
Минобрнауки РФ № 118 от 24.02.2021 г.

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 распро-
страняется под лицензией Creative Commons
Attribution 4.0 License. Нарушение закона
будет преследоваться в судебном порядке.

НАД НОМЕРОМ РАБОТАЛИ:

В.В. Бижаев,
Л.А. Горелова,
С.В. Гришуткина,
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

© ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2023

Выходит 4 раза в год
(Свободная цена)
Дата выхода в свет 21.03.2023
Формат 60 x 90/8. Объем 10,0 печ. л.
Тираж 500 экз
Отпечатано в типографии
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Андрей Юрьевич Измайлов

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

Дорохов Алексей Семенович

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

Михаил Никитиевич Ерохин

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

Юрий Анатольевич Иванов

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Российской академии наук, директор Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства, г. Подольск, 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 направления 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 проблем и новых технологий Казахского национального агроуниверситета, г. Алматы, Республика Казахстан

Даврон Рустамович Норчаев

доктор технических наук, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории «Механизации садоводства и овощеводства» Научно-исследовательского института механизации сельского хозяйства Республики Узбекистан, г. Карши, Кашкардарьинская 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 Института истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация, https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=124382



SCIENTIFIC-THEORETICAL JOURNAL

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. of the nomenclature approved by Order No. 118 of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation dated February 24, 2021

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.,
Gorelova L.A.,
Grishutkina S.V.,
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; Director of the All-Russian Scientific and Research Institute of Livestock Mechanization, Podolsk, 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. Chernouvanov

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

Published 4 times a year (open price).

Publication date is 21.03.2023,

The format is 60 x 90/8. The volume is 10.0 print's sheets. The circulation is 500 copies.

Printed by FSBSI FSAC VIM.



ИСТОРИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ

- Ценч Ю.С.**
Вклад лауреатов золотой медали имени В.П. Горячкина в развитие агроинженерной науки4
- Морозов Н.М., Кирсанов В.В., Ценч Ю.С.**
Историко-аналитическая оценка развития процессов автоматизации и роботизации в молочном животноводстве11

ЗЕРНОУБОРОЧНАЯ ТЕХНИКА

- Черников В.Г., Ростовцев Р.А., Романенко В.Ю.**
Исследование технологий уборки льна льноуборочными машинами19

АВТОМАТИЗАЦИЯ И РОБОТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ

- Хорт Д.О., Кутырев А.И., Смирнов И.Г., Моисеев Г.В., Соловьев В.И.**
Управление движением сельскохозяйственной автономной роботизированной платформы25

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

- Курбанов Р.К.**
Алгоритм расчета времени полета беспилотного воздушного судна для проведения аэросъемки35
- Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Миронова А.В.**
Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин41

БИОМАШИННЫЕ СИСТЕМЫ

- Керимов М.А., Иванов Д.В.**
Биоэнергетическая модель растительного сырья и оценка технологий производства кормов51

ТЕХНИКА ДЛЯ ОВОЩЕВОДСТВА

- Богданов А.В., Гриценко А.В., Ческидов М.В., Штриккер Л.А.**
Разработка вертикальной прогирочной установки и определение ее основных параметров62

ТЕХНИКА ДЛЯ ЖИВОТНОВОДСТВА

- Павкин Д.Ю., Хакимов А.Р., Шкирин А.В., Юрочка С.С., Игнатенко Д.Н.**
Моделирование влияния проточного устройства анализа качества молока на поток в доильной установке70

ПОСЛЕУБОРОЧНАЯ ОБРАБОТКА СЕМЯН И ЗЕРНА

- Загоруйко М.Г., Павлов С.А., Башмаков И.А.**
Повышение эффективности сушки семян в реверсивной зерносушилке76

HISTORY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

- Tsench Yu.S.**
Contribution of the V.P. Gorychkin Gold Medal laureates to the agroengineering science development 4
- Morozov N.M., Kirsanov V.V., Tsench Yu.S.**
Historical and analytical assessment of automation and robotization for milking processes 11

GRAIN HARVESTING MACHINERY

- Chernikov V.G., Rostovtsev R.A., Romanenko V.Yu.**
Flax harvesting technologies for flax harvesting machines 19

AUTOMATION AND ROBOTIZATION OF PROCESSES

- Khort D.O., Kutyrev A.I., Smirnov I.G., Moiseev G.V., Soloviev V.I.**
Agricultural autonomous robotic platform motion control 25

INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

- Kurbanov R.K.**
Algorithm for calculating the flight time of an unmanned aerial vehicle for aerial photography 35
- Lobachevskiy Ya.P., Mironov D.A., Mironova A.V.**
Increasing the operating lifetime of wearable working bodies of agricultural machines 41

BIOMACHINE SYSTEMS

- Kerimov M.A., Ivanov D.I.**
Bioenergy model of plant raw materials and assessment of feed production technologies 51

MACHINERY FOR VEGETABLE GROWING

- Bogdanov A.V., Gritsenko A.V., Cheskidov M.V., Shtrikker L.A.**
Development of a vertical mashing machine and specifying its main parameters 62

EQUIPMENT FOR ANIMAL HUSBANDRY

- Pavkin D.Yu., Khakimov A.R., Shkirin A.V., Yurochka S.S., Ignatenko D.N.**
Simulating the influence of a flow-through device for milk quality analysis on the flow rate in the milking machine 70

POST-HARVEST PROCESSING OF SEEDS FOR GRAIN

- Zagoruyko M.G., Pavlov S.A., Bashmakov I.A.**
Improving the efficiency of seed drying in a reversible grain dryer 76

Вклад лауреатов золотой медали имени В.П. Горячкина в развитие агроинженерной науки (к 300-летию Российской академии наук)

Юлия Сергеевна Ценч,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: vimasp@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. В практике работы Российской академии наук установлено по основным научным направлениям периодически на конкурсной основе присуждать золотые медали имени выдающихся отечественных ученых аграрной науки. По профилю агроинженерной науки такая медаль посвящена основоположнику учения о сельскохозяйственных машинах академику Василию Прохоровичу Горячкину. (*Цель исследования*). Обобщить историко-научный материал для воссоздания целостной картины научного наследия последователей В.П. Горячкина, которые вошли в историю агроинженерной науки как лауреаты золотой медали его имени. (*Материалы и методы*). В статье приведено краткое изложение развития научных идей В.П. Горячкина в трудах крупных отечественных ученых в области агроинженерной науки (*Результаты и обсуждение*). Воссоздана целостная картина научных достижений учеников В.П. Горячкина с 1971 по 2022 год, удостоенных медалями его имени. За более чем 50-летний период медали имени В.П. Горячкина вручены пятнадцати выдающимся ученым: В.А. Желиговскому (1971 г.), И.И. Артоболовскому (1974 г.), П.И. Василенко (1977 г.), И.А. Будзко (1986 г.), Г.Е. Листопаду (1989 г.), Н.И. Кленину (1992 г.), Н.В. Краснощекову (1995 г.), В.И. Черноиванову (1998 г.), И.П. Ксеневичу (2001 г.), Л.П. Кормановскому (2004 г.), В.М. Кряжкову (2008 г.), В.И. Сыроватке (2011 г.), Э.В. Жалнину (2014 г.), А.И. Завражнову (2018 г.), М.Н. Ерохину (2022 г.). (*Выводы*) Выдающиеся российские ученые, лауреаты золотой медали имени академика В.П. Горячкина внесли огромный вклад в дальнейшее развитие агроинженерной науки и образования, формирование фундаментальных научных школ, разработку теоретических и практических основ создания инновационных технологий, систем и комплексов машин.

Ключевые слова: агроинженерная наука, выдающиеся ученые, академик, Россельхозакадемия, Российская академия наук, золотая медаль, лауреат.

■ **Для цитирования:** Ценч Ю.С. Вклад лауреатов золотой медали имени В.П. Горячкина в развитие агроинженерной науки // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №1. С. 4-10. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-4-10. EDN TZOOLY.

Contribution of the V.P. Gorychkin Gold Medal Laureates to the Agroengineering Science Development

Yuliya S. Tsench,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: vimasp@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. In the practice of the Russian Academy of Sciences, it is established in the main scientific areas to periodically award gold medals named after outstanding domestic scientists of agrarian science on a competitive basis. According to the profile of agroengineering science, such a medal is dedicated to the founder of the doctrine of agricultural machines, Academician Vasily Prokhorovich Goryachkin. (*Research purpose*). To carry out a survey of the agricultural engineering science from the historical perspective, summarize its scientific achievements and recreate a holistic picture of the scientific heritage left by the followers of V.P. Goryachkin, who are known in the agricultural engineering science as laureates of the Gold Medal of the Russian Academy of Sciences named after V.P. Goryachkin. (*Materials and methods*). The article traces the development of scientific ideas of V.P. Goryachkin in the works of renowned domestic scientists in the agricultural engineering sciences. (*Results and discussion*). The

article presents a holistic picture of the scientific achievements from 1971 to 2022 made by the followers of V.P. Goryachkin, those who were awarded the Gold Medal named after him. For more than 50 years, fifteen outstanding scientists have been awarded the Gold Medal of the Russian Academy of Sciences named after V.P. Goryachkin, in particular: V.A. Zheligovsky (1971), I.I. Artobolevsky (1974), P.I. Vasilenko (1977), I.A. Budzko (1986), G.E. Listopad (1989), N.I. Klenin (1992), N.V. Krasnoshchekov (1995), V.I. Chernoiivanov (1998), I.P. Ksenevich (2001), L.P. Kormanovsky (2004), V.M. Kryazhkov (2008), V.I. Syrovatke (2011), E.V. Zhalnin (2014), A.I. Zavrazhnov (2018), M.N. Erokhin (2022). (*Conclusions*) Outstanding Russian scientists, laureates of the Academician V.P. Goryachkin gold medal made a huge contribution to the further development of agroengineering science and education, the formation of fundamental scientific schools, the development of theoretical and practical foundations for the creation of innovative technologies, systems and machine complexes.

Keywords: agroengineering science, outstanding scientists, Academician, Russian Agricultural Academy, Russian Academy of Agricultural Sciences, Russian Academy of Sciences, gold medal, laureate.

■ **For citation:** Tsench Yu.S. Vklad laureatov zolotoy medalii imeni V.P. Goryachkina v razvitie agroinzhenernoy nauki (k 300-letiyu Rossiyskoy Akademii Nauk) [Contribution of the V.P. Goryachkin Gold Medal laureates to the agroengineering science development (On the 300th Anniversary of the Russian Academy of Sciences)]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 17. N1. 4-10 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-4-10. EDN TZOOLY.

В практике работы Российской академии наук установлено по основным научным направлениям периодически на конкурсной основе присуждать золотые медали имени выдающихся отечественных ученых аграрной науки. По профилю агроинженерной науки такая медаль посвящена основоположнику учения о сельскохозяйственных машинах академику Василию Прохоровичу Горячкину.

Цель исследования. Обобщить историко-научный материал для воссоздания целостной картины научного наследия учеников и последователей В.П. Горячкина, которые вошли в историю агроинженерной науки как лауреаты золотой медали его имени. Осуществить анализ инноваций, представляющих научную и историческую ценность, отраженных в трудах лауреатов золотой медали им. В.П. Горячкина с 1971 по 2022 год.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. В 2024 г. Российская академия наук встретит свой трехсотлетний юбилей, что станет значимым событием для отечественного и мирового научного сообщества. Три века тому назад был заложен фундамент, на который и десятилетия спустя опирались не только служители науки, но и вся страна в своем движении к развитию, прогрессу и процветанию. Как в годы спокойного труда, так и в дни испытаний мудрость, интеллект и мощный потенциал академии поддерживали нашу страну и создавали условия для ее дальнейшего развития.

Весомый вклад в создание потенциала российской науки внесли и ученые-аграрии, усилиями которых были созданы тысячи новых высокопродуктивных сортов растений и пород животных, ресурсосберегающих экологически безопасных технологий. Представителями российской агроинженерной науки созданы высокоэффективные системы и комплексы сельскохозяйственных машин и оборудования для растениеводства и животноводства, мобильные энергетические

средства, оборудование для перерабатывающих отраслей.

Развитие научных основ инженерной сферы сельского хозяйства во многом определялось новым научным направлением – земледельческой механикой, творцом которой был выдающийся ученый и педагог Василий Прохорович Горячкин. Славные традиции горячкинской школы продолжала и развивала плеяда его учеников и последователей. Горячкинская земледельческая механика положила начало широкому спектру актуальных направлений отечественной агроинженерной науки и образования, а организаторские усилия В.П. Горячкина способствовали созданию первых агроинженерных вузов, научных институтов и машиноиспытательных станций, формированию научно-технического потенциала механизации сельского хозяйства [1].

Ведущая роль в координации деятельности агроинженерных научных учреждений принадлежала Отделению механизации и электрификации сельского хозяйства ВАСХНИЛ, созданному наряду с другими отделениями в апреле 1956 года (в соответствии с Постановлением Совета Министров СССР № 454 от 4 апреля 1956 года) [1].

К столетию со дня рождения Василия Прохоровича 2 октября 1968 года ВАСХНИЛ учредил золотую медаль имени В.П. Горячкина за выдающиеся достижения в области земледельческой механики, механизации и электрификации сельского хозяйства.

В октябре 2013 года в рамках реформы Российской академии наук произошло объединение государственных академий РАН и Россельхозакадемии с РАН [1].

Постановлением Президиума РАН № 168 от 30 июня 2015 года с целью увековечения памяти выдающегося ученого и организатора отечественной агроинженерной науки В.П. Горячкина президиум РАН учредил золотую медаль имени В.П. Горячкина как научную на-

граду, присуждаемую за выдающиеся работы в области земледельческой механики и механизации сельского хозяйства. Медаль присуждается один раз в четыре года на конкурсной основе отечественным выдающимся ученым в области агроинженерной науки.

Золотой медалью имени В. П. Горячкина с 1971 года удостоены пятнадцать выдающихся ученых:

В.А. Желиговский (1971 г.),
 И.И. Артоболевский (1974 г.),
 П.И. Василенко (1977 г.),
 И.А. Будзко (1986 г.),
 Г.Е. Листопад (1989 г.),
 Н.И. Кленин (1992 г.),
 Н.В. Краснощеков (1995 г.),
 В.И. Черноиванов (1998 г.),
 И.П. Ксеневиц (2001 г.),
 Л.П. Кормановский (2004 г.),
 В.М. Кряжков (2008 г.),
 В.И. Сыроватка (2011 г.),
 Э.В. Жалнин (2018 г.),
 А.И. Завражнов (2018 г.),
 М.Н. Ерохин (2022 г.) [1, 2].

Ученики и последователи В.П. Горячкина, лауреаты золотой медали его имени, творчески развивая оставленное им огромное научное наследие, внесли существенный вклад в развитие агроинженерной науки и образования, создание современных высокоэффективных средств механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства [2].

Напомним об этих лауреатах.



Академик ВАСХНИЛ
 Владислав
 Александрович
 Желиговский

Владислав Александрович Желиговский – первый лауреат золотой медали имени В.П. Горячкина; присуждена за развитие науки «Земледельческая механика» в 1971 году [2].

В трудах академика В.А. Желиговского получили развитие методы проектирования и расчета сельскохозяйственных машин и орудий, представлены разработанные им приборы и приспособления для исследования технологических и физико-механических свойств обрабатываемых материалов, даны теоретические основы процесса резания материалов лезвием. Владиславом Александровичем разработана теория технологического процесса вспашки, где почва рассматривается как дисперсная среда, состоящая из трех фаз – твердой, жидкой и газообразной, выяснена роль каждой фазы в процессе деформации и крошения почвы плугами с различной формой их рабочей поверхности. Он создал новую техническую дисциплину «Механическая технология сельскохозяйственных

материалов», состоящую из трех основных частей – учения о технологических процессах, учения о технологических свойствах сельскохозяйственных материалов и учения о рабочих органах сельскохозяйственных машин и орудий.

материалов», состоящую из трех основных частей – учения о технологических процессах, учения о технологических свойствах сельскохозяйственных материалов и учения о рабочих органах сельскохозяйственных машин и орудий.



Академик ВАСХНИЛ
 Иван
 Иванович
 Артоболевский

его расчета. Его фундаментальная работа «Теория механизмов и машин», отличающаяся строгостью изложения, неоднократно переиздавалась в нашей стране и за рубежом. В теории пространственных механизмов, изложенной в его монографии под таким же названием, И.И. Артоболевский первым дал решение задачи об определении скоростей и ускорений общего вида пространственного семизвенного механизма. Эта монография – один из первых в мировой литературе фундаментальных трудов по теории механизмов и машин. В 1967 году Институт инженеров-механиков Великобритании наградил И.И. Артоболевского золотой медалью имени Джеймса Уатта.

Золотой медалью имени В.П. Горячкина Иван Иванович Артоболевский награжден за совокупность фундаментальных работ по проблемам земледельческой механики в 1974 году [2].

Академиком П.М. Василенко написаны фундаментальные монографии по теории, расчету и проектированию сельскохозяйственных машин. В таких трудах, как «Культиваторы», «Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин», «Автоматизация процессов сельскохозяйственного производства» даны теоретические основы совершенствования существующих и создания новых конструкций сельскохозяйственных машин. Целый ряд созданных им конструкций посевных машин, культиваторов, свеклоуборочных, кукурузоуборочных машин, новых рабочих органов опрыскивателей – результат его научных изысканий в свете дальнейшего разви-

Академик И.И. Артоболевский был одним из первых учеников В.П. Горячкина. Под его руководством изучал проблемы теории машин и механизмов, разработал единую классификацию механизмов, которые разбил на пять семейств по признакам, обеспечивающим единые методы их исследования и проектирования, что легло в основу стройной научной базы для теории машин и механизмов, позволяющей значительно облегчить разработку общих методов



Академик ВАСХНИЛ
 Петр
 Мифодиевич
 Василенко

тия научных идей В.П. Горячкина.

За многолетнюю работу по подготовке инженерных и научно-педагогических кадров, весомый вклад в развитие науки о механизации сельского хозяйства академику П.М. Василенко была присуждена золотая медаль имени В.П. Горячкина в 1977 году [2, 3].



*Академик ВАСХНИЛ
Игорь
Александрович
Будзко*

Научные труды и разработки академика И.А. Будзко относятся к сфере электрификации сельского хозяйства. В них он изложил результаты обширных исследований режима работы систем сельского электроснабжения, на основе которых разработаны методы и устройства автоматического контроля, сигнализации, защиты и обнаружения мест повреждений в сети, повышающие надежность электроснабжения сельского хозяйства.

И.А. Будзко опубликовал ряд учебников для студентов энергетических факультетов. Он автор более 100 изобретений. Его разработки внедрены во многих регионах страны в системах сельского электроснабжения.

Золотая медаль имени В.П. Горячкина присуждена академику И.А. Будзко за цикл работ по электрификации сельского хозяйства в 1986 году [2, 4].

Академик Г.Е. Листопад посвятил свои труды широкому спектру инженерных проблем сельскохозяйственного производства. Георгий Ефремович является одним из разработчиков теории программирования урожая сельскохозяйственных культур (постановка, обоснование, разработка оптимального метода и производственная проверка). Автор трехтомника «Программирование урожая», цикла научных статей по этой проблеме, в том числе и в зарубежных изданиях. В течение многих лет был организатором научных конференций по земледельческой механике. Под редакцией Г.Е. Листопада вышло в свет несколько изданий учебников, которые широко используются в сельскохозяйственных вузах России и стран СНГ при изучении курса «Сельскохозяйственные машины».

Золотая медаль имени В.П. Горячкина присуждена академику Г.Е. Листопаду в 1989 году за серию работ по развитию земледельческой механики и научному обоснованию программирования урожая [2].



*Академик ВАСХНИЛ
Георгий
Ефремович
Листопад*



*Профессор
Николай
Иванович
Кленин*

Профессор Н.И. Кленин – крупный ученый в области почвообрабатывающих и уборочных технологий и технических средств.

Установил закономерности изменения прочностных и деформационных свойств растений, плодов, почвы при высокоскоростном и вибрационном воздействии на них, разработал теорию и расчет молотильных устройств комбайнов, теорию очеса семян льна, выявил закономерности изменения энергетических показателей работы зерноуборочных, зерноочистительных и льноуборочных машин.

Руководитель научной школы по созданию аксиально-роторных зерноуборочных комбайнов. Автор нескольких учебников для факультетов механизации сельского хозяйства.

Н.И. Кленин был избран почетным доктором Венгерского аграрного университета им. Св. Иштвана в г. Геделле.

Золотая медаль имени В.П. Горячкина присуждена Николаю Ивановичу Кленину в 1992 году за цикл работ по созданию теории и методов расчета аксиально-роторных зерноуборочных комбайнов [2, 3].

Академиком Н.В. Краснощевым созданы научные основы воздействия деформаторов на почвенную среду, которые позволили создать систему проектирования техники для засушливого земледелия и новые типы рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Н.В. Краснощев разработал и предложил для условий засушливого земледелия систему эффективного использования машинно-тракторных агрегатов. Результатом этих исследований стали новые формы производственных отношений и организации труда, выполнение работ на повышенных скоростях, введение новых ресурсосберегающих операций в технологии производства растениеводческой продукции, что дало возможность существенно повысить эффективность сельскохозяйственного производства в засушливых регионах.

Золотой медалью имени В.П. Горячкина Николай Васильевич Краснощев награжден в 1995 году за цикл научных работ по механизации почвозащитного земледелия, разработке адаптивных машин и способов их эффективного использования [2].



*Академик
Россельхозакадемии
Николай
Васильевич
Краснощев*



*Академик РАН
Вячеслав
Иванович
Черноиванов*

Научные труды академика В.И. Черноиванова посвящены созданию научных основ технологий диагностики, технического сервиса и ремонта сельскохозяйственных машин и оборудования, организации и технологии восстановления их деталей, перспективным направлениям развития технического сервиса в агропромышленном комплексе Российской Федерации, разработке нормативно-технической документации, ресурсос-

берегающих технологий, ремонтно-технологического оборудования для технического сервиса машин, научным основам технической эксплуатации сельскохозяйственных машин, инновационным методам повышения износостойкости, упрочнения и восстановления деталей машин.

Академик В.И. Черноиванов – один из основателей нового научно-технического направления – теории биомашинных систем.

Золотой медалью имени В.П. Горячкина академик Вячеслав Иванович Черноиванов награжден в 1998 году за цикл работ по развитию научных основ технического сервиса машин для агропромышленного комплекса [2, 4].

Академик И.П. Ксеневич – видный ученый в области теории, создания, экономики и организации производства наземных тягово-транспортных систем и сельскохозяйственной техники. Он внес большой вклад в теорию и конструирование тракторов и мобильных энергетических средств, в создание новой скоростной техники. Руководитель научной школы по проблеме проектирования тракторов и сельскохозяйственных машин на основе блочно-модульного принципа и базовых конструкций. И.П. Ксеневич является разработчиком теоретических основ проектирования параметрических рядов тракторов различного назначения и различных тяговых классов.

Золотой медалью имени В.П. Горячкина Иван Павлович Ксеневич награжден в 2001 году за цикл работ по решению актуальных проблем динамики мобильных машин [2].

Академик РАН Л.П. Кормановский – видный ученый в области комплексной механизации животноводства и кормопроизводства. Разработал научные основы проектирования поточно-конвейерной технологии содержания молочного скота, методических ре-



*Академик РАН
Леонид
Петрович
Кормановский*

комендаций по определению оптимальных комплексов машин и технологических линий для животноводческих ферм на основе вычислительной техники, доильных установок, доильных роботов и манипуляторов. Научный руководитель проектов по разработке систем машин для животноводства и кормопроизводства. Автор множества научных трудов по механизации молочного животноводства.

Золотой медалью имени В.П. Горячкина академик Л.П. Кормановский награжден в 1995 году за цикл научных работ по созданию новых технологий и технических средств для доения коров [2].

Академик РАН В.М. Кряжков – видный ученый в области технического сервиса, ремонта и эксплуатации сельскохозяйственных машин.

Автор научных трудов в сфере технологий и технических средств для растениеводства, эффективных энергоносителей для АПК на основе различных видов газа и биотоплива, автоматизации мобильных и стационарных процессов в сельскохозяйственном производстве. Основатель научной школы по надежности и долговечности машин, созданию высокопрочных элементов конструкций, улучшению систем очистки масла, топлива и воздуха.

Под руководством академика В.М. Кряжкова и при его непосредственном участии разработаны концепции развития инженерно-технической сферы агропромышленного комплекса, технического сервиса и ремонта тракторов и энергосредств, транспортно-технологического обслуживания сельскохозяйственных предприятий и другие.

Золотой медалью имени В.П. Горячкина академик В.М. Кряжков награжден в 1995 году за создание научных основ технического сервиса и ремонта тракторов и сельскохозяйственных машин [2].

Академик В.И. Сыроватка – видный ученый в области электромеханизации животноводства и кормопроизводства, машинных технологий и технических средств приготовления комбикормов.

Под его руководством создано и развивается новое научное направление – механизированные технологии приготовления кормов. Большой вклад внес в основы расчета поточных линий и машин для приготовления кормов, теорию измельчения сельскохозяй-



*Академик РАН
Валентин
Митрофанович
Кряжков*



*Академик
Россельхозакадемии
Иван
Павлович
Ксеневич*



*Академик РАН
Владимир
Иванович
Сыроватка*

ственных материалов, на базе которой созданы новые эффективные технологии дробления зерна, смешивания микроэлементов и лекарств, приготовления высокоомогенных лечебных и азотированных кормов.

Под научным руководством академика В.И. Сыроватки создан ряд принципиально новых кормоприготовительных машин.

Золотой медалью имени В.П. Горячкина академик В.И. Сыроватка награжден в 1995 году за

создание научных основ измельчения сельскохозяйственных материалов и создание эффективных технических средств для приготовления кормов [2, 5].

Профессор Э.В. Жалнин – крупный ученый в области механизации уборки и послеуборочной обработки зерновых, зернобобовых, масличных и крупяных культур. Своими научными трудами обогатил теорию технологических процессов и технических систем зерноуборочных комбайнов.

Руководитель научной школы по технологиям комбайновой уборки сельскохозяйственных культур. Разработчик инновационной технологии и комплекса оборудования для обмолота зерновых культур на стационаре. Руководитель работ по созданию системы машин и оборудования для уборки и послеуборочной обработки сельскохозяйственных культур.

Золотой медалью имени В.П. Горячкина профессор Э.В. Жалнин награжден в 2014 году за монографию «Аксиоматизация земледельческой механики» [2, 6].

Им предложена семиблочная структура дисциплины «земледельческая механика», ее аксиоматические массивы, поля и направления их формализации. Обобщены постулаты В.П. Горячкина и изложены пути их развития в наши дни. Для моделирования процессов земледельческой механики предложена октетная система факторного пространства, сформулированы семь фундаментальных аксиом, представлены аксиоматические таблицы функционалов и даны примеры их применения. Приведены десять признаков фундаментальности земледельческой механики. Рассмотрены пять признаков современного информационного взрыва. Предложены направления формализации земледельческой механики в контексте цифровой экономики. В монографию включены дополнительные разделы, посвященные дальнейшему разви-



*Профессор
Эдуард
Викторович
Жалнин*

тию земледельческой механики, основанной великим российским ученым В.П. Горячкиным еще в начале прошлого века [9, 10].

Академик А.И. Завражнов внес существенный вклад в развитие теории и методов проектирования машин и технологических линий для приготовления и раздачи кормов на животноводческих фермах и комплексах в системе «человек–машина–животное»; является автором математических моделей и алгоритмов расчетов машин и технологических линий приготовления и раздачи кормов, рассматриваемых как биотехническая система; математической модели, учитывающей влияние на продуктивность коров системы кормления, температуры воздуха, сдвига времени кормления и других.

Руководитель научной школы по созданию инновационных технологий и средств механизации в интенсивном садоводстве, переработке продукции растениеводства и ее хранении. Под руководством академика А.И. Завражного разработаны эффективные комплексы машин и оборудования для питомниководства и садоводства, включающие технические средства для обработки почвы, ухода за насаждениями, уборки плодов, их транспортировки и переработки.

Золотой медалью имени В.П. Горячкина академик А.И. Завражнов награжден в 2018 году за создание научных основ создания комплексов машин для интенсивного садоводства [2].



*Академик РАН
Михаил
Никитчевич
Ерохин*

Академик РАН М.Н. Ерохин – известный ученый в области технического обслуживания сельскохозяйственной техники и повышения ее надежности, внесший крупный вклад в решение фундаментальных проблем определения износа и долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин, износостойкости материала рабочего органа и давления почвы на рабочую поверхность орудия. М.Н. Ерохиным разработаны математические модели для определения износостойкости сталей и наплавочных материалов различных по химическому составу и твердости с целью прогнозирования ресурса рабочих органов в условиях абразивного изнашивания. Разработаны технологии изготовления рабочих органов почвообрабатывающих машин по критериям износостойкости, ударной вязкости, прочности, с использовани-



*Академик РАН
Анатолий
Иванович
Завражнов*

ем белых износостойких чугунов и технической керамики. Создан ряд технологических процессов повышения износостойкости трибосопряжений. Новизна научно-технических разработок подтверждена многими авторскими свидетельствами на изобретения и патентами.

Золотой медалью имени В.П. Горячкина академик М.Н. Ерохин награжден в 2022 году за создание научных основ надежности и долговечности сельскохозяйственной техники [2-8].

Выводы. Выдающиеся российские ученые, лауреаты

золотой медали имени академика В.П. Горячкина внесли огромный вклад в дальнейшее развитие агроинженерной науки и образования, формирование фундаментальных научных школ, разработку теоретических и практических основ создания инновационных технологий, систем и комплексов машин. Созданная в результате использования этих научных достижений современная сельскохозяйственная техника обеспечила интенсивное развитие аграрного производства, способствовала подлинной продовольственной безопасности нашей страны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ценч Ю.С. Становление и развитие научно-технического потенциала механизации сельского хозяйства России: дис. ... д-ра техн. наук. М.: ВИМ. 2021. 412 с.
2. Ведущие ученые агроинженерной науки России. Изд. 2-е. доп. М.: Росинформагротех. 2005. 160 с.
3. Ценч Ю.С. Становление и развитие агроинженерных высших учебных заведений России. М.: ВИМ. 2020. 62 с.
4. Ценч Ю.С. Агроинженерная наука в СССР в 1945-1965 гг. // *Технический сервис машин*. 2020. Т. 58. N2(139). С. 156-170.
5. Лачуга Ю.Ф., Лысенко Е.Г., Орстик Л.С. и др. Агроинженерная наука России: становление, современное состояние, стратегия развития. М.: Росинформагротех. 2007. 346 с.
6. Жалнин Э.В. Аксиоматизация земледельческой механики. Начальные положения. М.: ВИМ. 2002. 203 с.
7. Ерохин М.Н., Зайцева Н.Л., Алдошин Н.В. Василий Прохорович Горячкин: страницы жизни. М.: Росинформагротех. 2020. 280 с.
8. Кленин Н.И. МГАУ. На рубеже веков. М.: Росинформагротех. 2000. 140 с.
9. Жалнин Э.В. Аксиоматизация земледельческой механики (начальные положения). М.: ФНАЦ ВИМ. 2019. 268 с.
10. Жалнин Э.В. Академик Василий Прохорович Горячкин, его ученики и последователи. М.: ФНАЦ ВИМ. 2021. 143 с.

REFERENCES

1. Tsench Yu.S. Stanovlenie i razvitie nauchno-tekhnicheskogo potentsiala mekhanizatsii sel'skogo khozyaystva Rossii: dis. ... d-ra tekhn. Nauk [Formation and development of the scientific and technical potential of the agriculture mechanization in Russia: Dr.Sc. thesis]. Moscow: VIM. 2021. 412 (In Russian).
2. Vedushchie uchenye agroinzhenernoy nauki Rossii. Izd. 2-e. dop [Leading scientists of agroengineering science in Russia]. Moscow: Rosinformagrotekh. 2005. 160 (In Russian).
3. Tsench Yu.S. Stanovlenie i razvitie agroinzhenernykh vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii [Establishment and development of agroengineering higher educational institutions in Russia]. Moscow: VIM. 2020. 62 (In Russian).
4. Tsench Yu.S. Agroinzhenernaya nauka v SSSR v 1945-1965 gg [Agroengineering science in the USSR in 1945-1965.] *Tekhnicheskiiy servis mashin*. 2020. Vol. 58. N2(139). 156-170 (In Russian).
5. Lachuga Yu.F., Lysenko E.G., Orsik L.S., et al. Agroinzhenernaya nauka Rossii: stanovlenie, sovremennoe sostoyanie, strategiya razvitiya [Agroengineering science of Russia: formation, current situation, development strategy]. Moscow: Rosinformagrotekh. 2007. 346 (In Russian).
6. Zhalnin E.V. Aksiomatizatsiya zemledel'cheskoy mekhaniki. Nachal'nye polozheniya [Axiomatization of agricultural mechanics. Fundamentals]. Moscow: VIM. 2002. 203 (In Russian).
7. Erokhin M.N., Zaytseva N.L., Aldoshin N.V. Vasilii Prokhorovich Goryachkin: stranitsy zhizni [Vasily Prokhorovich Goryachkin: pages of life]. Moscow: Rosinformagrotekh. 2020. 280 (In Russian).
8. Klenin N.I. MGAU. Na rubezhe vekov [MGAU. At the turn of the century]. Moscow: Rosinformagrotekh. 2000. 140 (In Russian).
9. Zhalnin E.V. Aksiomatizatsiya zemledel'cheskoy mekhaniki (nachal'nye polozheniya). Moscow: FSAC VIM. 2019. 268 (In Russian).
10. Zhalnin E.V. Akademik Vasilii Prokhorovich Goryachkin, ego ucheniki i posledovateli. Moscow: FSAC VIM. 2021. 143 (In Russian).

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

19.01.2023
28.02.2023

Историко-аналитическая оценка развития процессов автоматизации и роботизации в молочном животноводстве

Николай Михайлович Морозов,
академик РАН, доктор экономических наук,
главный научный сотрудник, e-mail: vim@vim.ru;

Владимир Вячеславович Кирсанов,
член-корреспондент РАН, доктор технических наук,
профессор, заведующий отделом,
e-mail: kirvv2014@mail.ru;
Юлия Сергеевна Ценч,
доктор технических наук, заведующий отделом

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Показали основные пути развития машинных технологий от ручного способа доения до роботизированного. Отметили неоднозначность экспертных оценок по поводу внедрения роботизации доения. (*Цель исследования*) Провести историко-аналитическую и технико-экономическую оценки различных вариантов автоматизации доения коров на молочных фермах, определить общую капиталоемкость различных вариантов перехода от ручного способа к автоматизированным и роботизированным технологиям доения коров, а также капиталоемкость отдельных этапов перехода к механизированному доению в ведра, в молокопровод, к автоматизированному доению в залах, роботизированному доению в индивидуальных боксах и доильных залах. (*Материалы и методы*) Проанализировали революционные переходы, связанные с кардинальной сменой технологий, изменением способа содержания и организационно-экономических форм ведения производства, модернизационные переходы – с полной или частичной заменой оборудования без принципиальной смены технологии, а также реверсные обратные переходы – с вынужденным возвратом к прежней более экономичной технологии. (*Результаты и обсуждение*) Рассмотрели 7 основных путей развития машинного доения – от ручного способа до автоматизированного и роботизированного доения коров продолжительностью 100-110 лет. Определили, что их суммарная оценочная капиталоемкость для условной эталонной фермы на 1000 голов составляет 78,0-474,5 миллионов рублей в современных цифрах. Ввели понятие условной единицы, равной стоимости доильного агрегата ДАС-2В, то есть примерно 0,2 миллиона рублей на текущий момент. (*Выводы*) Установили наиболее затратные пути, а также предложили оптимальный наименее капиталоемкий путь перехода от традиционного доения к автоматизированному почетвертному доению в залах, по функциональности не уступающему доению в роботах. Выявили возможность модернизационного перехода на роботизированное доение в залах путем поэтапной замены автоматизированных манипуляторов доения, управляемых оператором, на роботизированные манипуляторы без участия человека и без смены технологии. **Ключевые слова:** молочное животноводство, доение коров, машинная технология, автоматизация и роботизация доения, молокопровод, доильный зал, доильный робот.

■ **Для цитирования:** Морозов Н.М., Кирсанов В.В., Ценч Ю.С. Историко-аналитическая оценка развития процессов автоматизации и роботизации в молочном животноводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №1. С. 11-18. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-11-18. EDN BJDTTU.

Historical and Analytical Assessment of Automation and Robotization for Milking Processes

Nikolay M. Morozov,
member of the Russian Academy of Sciences,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: vim@vim.ru;

Vladimir V. Kirsanov,
corresponding member of the Russian Academy of Science,
Dr.Sc.(Eng.), professor, head of department,
e-mail: kirvv2014@mail.ru;
Yulia S. Tsench,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher, head of department,
e-mail: vimasp@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper shows the main ways of machine technology development from manual milking to robotic and notes the ambiguity of expert assessments regarding the introduction of robotic milking. (*Research purpose*) To conduct historical, analytical

and feasibility studies of various options for automating cow milking on dairy farms, to determine the overall capital intensity of various options for the transition from manual to automated and robotic cow milking technologies, as well as the capital intensity of individual transition stages such as mechanized bucket milking, pipeline milking, automated milking in milking parlors, robotic milking in individual boxes and milking parlors. (*Materials and methods*) The paper analyzes the revolutionary transitions associated with a drastic change in technology, a change in the way of keeping cows and a change in the organizational and economic forms of operations; the modernization transitions, those with a complete or partial replacement of equipment but without a fundamental change in technology; and the reverse transfer transitions - a forced return to the previous more economical technology. (*Results and discussion*) We considered 7 main ways of developing machine milking over 100-110 years from the manual milking method to the automated and robotic ones. It is determined that their total estimated capital intensity for a hypothetical reference farm per 1000 heads accounts for 78.0-474.5 million rubles in modern figures. The concept of a standardized unit is introduced, that is equal to the price of the DAS-2V milking unit, that is, approximately 0.2 million rubles at the moment. (*Conclusions*) The research reveals the most costly transition ways, the optimal least capital-intensive way of transition from traditional milking to automated quarter-by-quarter milking in parlors, whose functionality is up to the robotic milking. The modernization transition to robotic milking in parlors is proved to be possible by gradual replacement of the automated milking manipulators controlled by an operator with the robotic unmanned manipulators and without any changes in technology.

Keywords: dairy farming, milking cows, machine technology, automation and robotization of milking, pipeline milking, milking parlor, milking robot.

For citation: Morozov N.M., Kirsanov V.V., Tsench Yu.S. Istoriko-analiticheskaya otsenka razvitiya protsessov avtomatizatsii i robotizatsii v molochnom zhivotnovodstve [Historical and analytical assessment of automation and robotization for milking processes]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N1. 11-18 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-11-18. EDN BJDTTU.

Средства механизации и способы организации доения коров занимают одно из ведущих мест в системе машин для механизации и автоматизации молочных ферм. Процесс доения относится к наиболее трудоемким (35-50% всех затрат на производство молока) и ответственным технологическим процессам из-за непосредственного воздействия рабочих органов (доильных стаканов) на соски животных при извлечении молока из вымени.

Ведущий тренд развития технологий и технических средств доения – поэтапная автоматизация и постепенное замещение малопроизводительного доильного оборудования с переносными ведрами и молокопроводом, используемого при привязном содержании животных (типы 1, 2) на автоматизированные доильные залы различных конфигураций «Елочка», «Параллель», «Карусель» и доильные роботы (типы 3, 4) при беспривязном содержании животных (рис. 1) [1-3]. По экспертным оценкам, удельный вес доильных установок 1-го и 2-го типов в России на мелких и средних фермах составляет 75-80%. Мегафермы используют в основном импортное высокопроизводительное станочное доильное оборудование типа «Параллель», «Карусель», требующее импортозамещения. Зарубежных доильных роботов в нашей стране эксплуатируют всего около 1000 единиц [3]. Это связано с их высокой стоимостью (12-16 млн руб.). Из-за отсутствия поставок запчастей вследствие санкций их дальнейшее использование достаточно проблематично.

Основные факторы, которые надо учитывать при внедрении доильных роботов:

- стоимость робота и его сервисного обслуживания;
- стоимость замещаемой им рабочей силы;
- наличие устойчивой связи по интернету, без которого невозможна их эффективная эксплуатация.

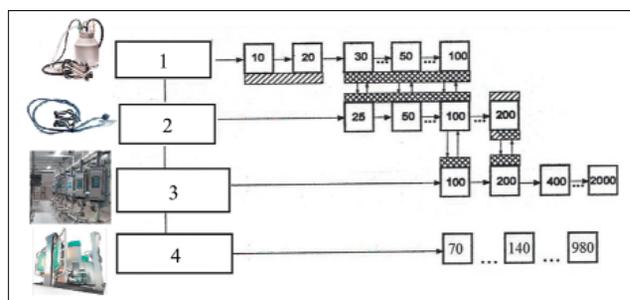


Рис. 1. Модернизированный ряд автоматизированных и роботизированных доильных установок для различных типов ферм (10-2000 голов): 1 – установки 1-го типа с переносными ведрами; 2 – установки 2-го типа с молокопроводом; 3 – установки 3-го типа «Тандем», «Елочка», «Параллель», «Карусель»; 4 – роботизированные технологические модули различной вместимости

Fig. 1. A modernized range of automated and robotic milking machines for various farm sizes (10-2000 heads): 1 – 1st type facilities with portable buckets; 2 – 2nd type facilities with a milk pipeline; 3 – 3rd type facilities such as "Tandem", "Herringbone", "Parallel", "Carousel"; 4 – robotic technological modules of various capacities

Развитие автоматизированных и роботизированных технологий в молочном животноводстве может осуществляться по нескольким сценариям [6-8]:

- перевод механизированных коровников привязного содержания 100-200 голов с морально и физически устаревшим оборудованием на роботизированное доение с установкой 2-4-х роботов типа «монобокс» (один на 50 голов);

- для более крупных ферм (400 голов и более) рациональнее строительство доильного зала с модернизированными доильными аппаратами почетвертного доения, которые впоследствии можно дооснастить и трансформировать в роботизированный вариант. В доильной траншее оператору удобнее приучать животных к роботизированному доению и в случае необходимости есть возможность вмешаться в процесс;

- для ферм на 1000 и более голов целесообразно использование статичных залов типа «Параллель» или вращающихся доильных залов «Карусель», также с постепенным переводом их в роботизированные системы.

Ввиду неоднозначности оценок, высказываемых экспертами по поводу роботизации доения, следует провести более тщательный технико-экономический анализ их применения в различных условиях хозяйствования. Применение роботов – это пока самый капиталоемкий и затратный путь даже для условий Европы с их высокой стоимостью рабочей силы, не говоря уже о России [9].

Различным аспектам автоматизации и роботизации доения посвящено достаточно много публикаций и исследований [10-12]. К основным преимуществам использования доильных роботов относят повышение продуктивности на 10-15% и качества молока в результате снижения количества соматических клеток и бактериальной обсемененности вследствие более тщательной очистки сосков перед доением и лучшего управления вакуумом при почетвертном доении, которое пока не доступно в доильных залах. Хотя фирма «Мильклайн» (Италия) утверждает, что создала такой аппарат с управляемой почетвертной пульсацией для доильных залов, однако отключения выдоенных сосков от подсоскового вакуума, как в работе, при этом не осуществляется, что вызывает определенные сомнения в адекватности режима роботизированному доению [13].

Дискуссионный характер применения доильных роботов на фермах различных типоразмеров делает актуальной технико-экономическую оценку различных вариантов модернизации доильного оборудования для молочных ферм.

Цель исследования – историко-аналитическая и технико-экономическая оценки различных вариантов автоматизации доения коров на молочных фермах.

Основные задачи исследования:

- определение общей капиталоемкости различных вариантов перехода от ручного способа доения к ме-

ханизированным, автоматизированным и роботизированным технологиям на примере фермы на 1000 голов;

- определение капиталоемкости структурных составляющих (этапов) перехода от ручного доения к механизированному доению в ведра, в молокопровод, автоматизированному доению в залах, роботизированному доению в индивидуальных боксах и доильных залах;

- сравнительная оценка капиталоемкости революционных, модернизационных и реверсных обратных этапов при внутрихозяйственной смене технологий доения коров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Функционально-стоимостной анализ составных частей доильного робота показал, что примерно 50% его стоимости приходится на роботизированный манипулятор доения с системой технического зрения, который затрачивает на обработку сосков и подключение доильных стаканов 1,5-2,0 мин против 10-15 с у оператора машинного доения, что превышает регламентируемые нормы времени на эти операции, рекомендуемые Правилами машинного доения (не более 60 с) [14-15]. Это связано с физиологией лактирующих животных и выделением гормона окситоцин, действие которого ограничено пределами 5-7 мин, после чего молокоотдача прекращается.

Таким образом, наряду с экономической дороговизной приобретения и использования доильных роботов существует еще и физиологическая проблема сокращения времени обработки сосков и надевания доильных стаканов из-за технических трудностей распознавания сосков вымени системой машинного зрения. В дальнейшем эта техническая проблема может быть решена, однако для этого потребуются усложнение конструкции и использование более дорогостоящих сенсоров, что в свою очередь приведет к повышению стоимости оборудования.

Что касается отечественных разработок в этой сфере, то в отделе механизации и автоматизации животноводства ФНАЦ ВИМ разработан прототип отечественного доильного робота, который проходит этап лабораторных испытаний. При этом существует проблема локализации производства отдельных комплектующих и сенсоров.

Различные варианты модернизации доильного оборудования были представлены в виде ориентированного структурного графа и различных путей перехода от ручного к механизированному и далее к автоматизированному и роботизированному доению животных (рис. 2) [15]. Сравнительная оценка капиталоемкости этих вариантов поможет выбрать оптимальные пути модернизации доильного оборудования.

Проанализированы несколько ключевых путей развития технологий машинного доения – от ручного до автоматизированного и роботизированного до-

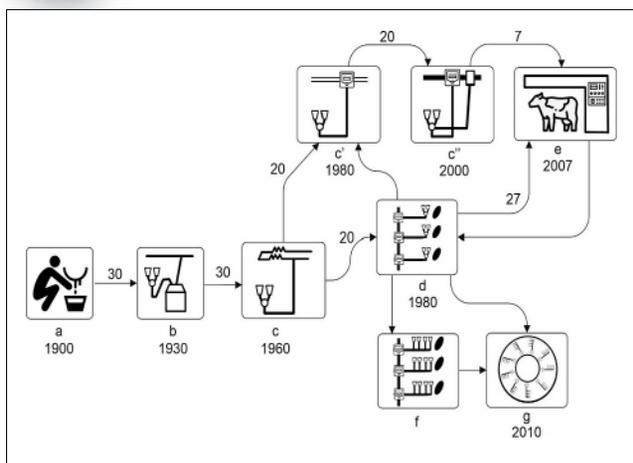


Рис. 2. Структурный граф развития средств механизации доения от ручного способа до роботизированного доения: а – ручное доение; б – механизированное доение в ведро; с – механизированное доение в молокопровод; с' – доение в модернизированный стеклянный молокопровод (АДМ-8А); с'' – доение в модернизированный молокопровод из нержавеющей стали УДМ-200; д – автоматизированное доение в залах («Елочка», «Параллель», «Карусель»); е – роботизированное почетвертное доение в индивидуальных (групповых) роботах; ф – автоматизированное почетвертное доение в залах («Елочка», «Параллель», «Карусель»); г – роботизированное почетвертное доение в залах типа «Карусель» (Де Лаваль, Геа Фарм)

Fig. 2. Diagram of the milking mechanization development from manual to robotic milking: a – manual milking; b – mechanized bucket milking; c – mechanized pipeline milking; c' – milking with a modernized glass milk line (ADM-8A); c'' – milking with an upgraded milk pipeline made of stainless steel UDM-200; d – automated milking in milking parlors ("Herringbone", "Parallel", "Carousel"); e – robotic quarter-by-quarter milking with individual (group) robots; f – automated quarter-by-quarter milking in parlors ("Herringbone", "Parallel", "Carousel"); g – robotic quarter-by-quarter milking in carousel-type parlors (De Laval, GEA Pharm)

ения (средняя продолжительность цикла 100-110 лет). Они включают революционные, модернизационные и обратные (нежелательные) реверсные переходы. Здесь и далее под революционным переходом (РП) будем понимать кардинальную смену технологий, связанную с изменением способа содержания и организационно-экономических форм ведения производства. Под модернизационным переходом (МП) подразумевается полная или частичная замена оборудования без принципиальной смены технологии (способа содержания и ведения производства). Реверсный обратный (нежелательный) переход (РО) означает возврат к прежней технологии, например, от беспривязного содержания с доением в залах к привязному содержанию с доением коров в стойлах в 80-е годы прошлого столетия.

Такой подход позволит оценить масштабность реконструкции, капиталоемкость различных путей и этапов перехода на новые технологии, аномальность

и преждевременность перехода в отдельных случаях. Наряду с анализом общей капиталоемкости путей модернизации доильного оборудования следует оценить капиталоемкость отдельных ее этапов (от механизированного к автоматизированному и роботизированному доению), показать при этом оптимальные пути перехода для различных типоразмеров ферм, чтобы избежать повышенной капиталоемкости модернизации и возможных при этом ошибок выбора направления модернизации доильного оборудования, которое считается системообразующим фактором при выборе вариантов реконструкции или нового строительства молочной фермы.

Результаты и обсуждение. Первый путь (а, б, с, д), классический, длился около 80 лет – от ручного способа до автоматизированного доения в залах в 80-е годы прошлого века («Елочка», «Тандем», «Параллель», «Карусель»). Его капиталоемкость K_1 можно оценить следующим образом:

$$K_1 = K_{ab}^{p1} + K_{bc}^{m1} + K_{cd}^{p2}, \quad (1)$$

где K_{ab}^{p1} , K_{bc}^{m1} , K_{cd}^{p2} – соответственно, капиталоемкость этапа первого революционного перехода от ручного доения к механизированному в ведра (1930 г.), первого модернизационного перехода от доения в ведро к молокопроводу (1960 г.) и второго революционного перехода от молокопровода к доильному залу (1980 г.).

Капиталоемкость второго пути (а, б, с, с', с'', е) перехода от ручного доения к роботизированному (продолжительностью около 107 лет), минуя автоматизированные доильные залы, можно выразить так:

$$K_2 = K_{ab}^{p1} + K_{bc}^{m1} + K_{cc}^{m2} + K_{c'e}^{m3} + K_{c'e}^{p3}, \quad (2)$$

где K_{cc}^{m2} – капиталоемкость второго этапа модернизации доильных установок с молокопроводом (от «Даугавы» и АДМ-8 до АДМ-8А-1-2, 1960-1980 гг.);

$K_{c'e}^{m3}$ – капиталоемкость третьего этапа модернизации доильных установок с молокопроводом в «нулевые» годы (от АДМ-8А-1-2 со стеклянным молокопроводом до молокопровода УДМ-100-200 из нержавеющей стали, 1980-2000 гг.) [16];

$K_{c'e}^{p3}$ – капиталоемкость третьего революционного этапа перехода некоторых хозяйств с молокопроводов на доение в роботах (2000-2007 гг.) получение первого опыта.

Следует отметить, что последний этап представляет революционный переход от технологии привязного содержания к доению в роботах, минуя доение в залах. Такой вариант реалистичен, поскольку коровники привязного содержания рассчитаны на 100-200 коров и вариант их реконструкции под беспривязное содержание потребует установки небольшого количества доильных роботов-монобоксов (2-4 ед.). При этом возможен поэтапный переход от реконструкции одного коровника к другому, когда не требуется вне-

дрять сразу десяток роботов одновременно.

Рассмотрим капиталоемкость третьего пути (a, b, c, d, c', c'', e) продолжительностью около 107 лет, то есть второй вариант перехода от ручного доения к роботизированному в монобоксах через доильные залы с многократной сменой технологий привязного и беспривязного содержания:

$$K_3 = K_{ab}^{p1} + K_{bc}^{m1} + K_{cd}^{p2} + K_{dc}^{p01} + K_{c'e}^{m3} + K_{c''e}^{p3}, \quad (3)$$

где K_{dc}^{p01} , – продолжительность первого реверсного обратного перехода от доения в залах к доению в стойлах (в 80-е годы).

Особенность этого пути – наличие реверсного обратного перехода от доильного зала (беспривязного содержания) к стойловому молокопроводу (привязному содержанию) t_{dc}^{p0} , происходившему из-за обезличивания животных при беспривязном содержании по причине отсутствия в то время систем идентификации, программ управления стадом и др. Это резко ухудшало показатели ферм, и был осуществлен практически одномоментно повсеместный обратный переход в 80-е годы к привязи с демонтажом доильных залов [1]. Такой путь наиболее затратный, поскольку связан как минимум с 3-кратной затратной революционной сменой технологий, 2-кратной модернизационной заменой оборудования и одним нежелательным реверсным обратным переходом от доения в залах к доению в стойлах с последующим третьим революционным переходом $t_{c'e}^{p3}$ от доения в стойловом молокопроводе к доению в роботах.

Четвертый путь (a, b, c, d, e), продолжительностью около 107 лет, представляет собой развитие классического пути (1) с переходом в конце на доильные роботы:

$$K_4 = K_{ab}^{p1} + K_{bc}^{m1} + K_{cd}^{p2} + K_{de}^{p4}. \quad (4)$$

При этом последняя составляющая K_{de}^{p4} предполагает четвертую революционную смену технологий (от доильных залов к роботам).

Пятый путь (a, b, c, d, e, d), продолжительностью примерно 107 лет, предполагает второй капиталоемкий чрезвычайно затратный реверсный обратный переход K_{cd}^{p02} от доения в индивидуальных роботах к доению в автоматизированном роторном зале. Такая вынужденная мера может возникнуть при расширении фермы с возвратом к доильным залам для повышения производительности труда и сокращения издержек производства:

$$K_5 = K_{ab}^{p1} + K_{bc}^{m1} + K_{cd}^{p2} + K_{dc}^{p4} + K_{cd}^{p02}. \quad (5)$$

Единичный в России шестой путь (a, b, c, d, g) – это развитие классического пути (1) с модернизацией на последнем этапе (K_{dg}^{m4}) автоматизированных залов в роботизированные, с установками типа «Карусель» для мегаферм (110 лет):

$$K_6 = K_{ab}^{p1} + K_{bc}^{m1} + K_{cd}^{p2} + K_{dg}^{m4}. \quad (6)$$

И наконец, наименее затратный и капиталоемкий и более физиологичный переход K_7 (a, b, c, d, f, g), продолжительностью 122 года, в начале на автоматизированное почетвертное доение в залах K_{df}^{m5} , по функциональности не уступающее доению в роботах, с последующим постепенным модернизационным переходом (докапитализация) на роботизированное доение в зале путем поэтапной замены автоматизированных манипуляторов доения, управляемых оператором, на полностью роботизированные манипуляторы без участия человека [17]:

$$K_7 = K_{ab}^{p1} + K_{bc}^{m1} + K_{cd}^{p2} + K_{df}^{m5} + K_{fg}^{m6}. \quad (7)$$

Чтобы сравнить капитальные затраты на различных этапах, за условную единицу капиталоемкости (K_y) приняли стоимость доильной установки с переносными ведрами ДАС-2В на 100 гол. – примерно 0,2 млн руб. (таблица). Это самый простой – минимальный и неделимый – вариант инвестиций в механизацию доения. Размер капитализации ограничим условной эталонной фермой на 1000 гол. с целью возможности применения на ней и проведения сравнительной оценки всех имеющихся типов доильных установок. Тогда примерную капиталоемкость различных этапов модернизации системообразующего фактора (процесса доения) можно определить с учетом рыночной стоимости поставляемого доильного оборудования, полагая, что в ходе модернизации на последующих этапах сохраняется базовая часть установки от предыдущего этапа:

$$K_{ab}^{p1} = 10C_{\text{дас-2в}} = 10 \cdot 0,2 \text{ млн.р.} = 10 K_y; \quad (8)$$

$$K_{cd}^{p2} = (C_{\text{ркб}} + C_{\text{сдз}} + 2C_{\text{уде-24А}}) : C_{\text{дас-2в}} = (55,0 + 7,5 + 2 \cdot 6,0) : 0,2 = 372,5 K_y;$$

$$K_{c'e}^{p3} = (C_{\text{ркб}} + 4C_{\text{дрл}}) : C_{\text{дас-2в}} = (55,0 + 17 \cdot 16,0) : 0,2 = 1635 K_y;$$

$$K_{de}^{p4} = 17C_{\text{дрл}} : C_{\text{дас-2в}} = 17 \cdot 16,0 : 0,2 = 1360 K_y;$$

$$K_{bc}^{m1} = (5C_{\text{даугава}} - 5C_{\text{дас-2в}}) : C_{\text{дас-2в}} = (5 \cdot 0,5 - 5 \cdot 0,2) : 0,2 = 7,5 K_y;$$

$$K_{cc'}^{m2} = (5C_{\text{адм-8А}} - 5C_{\text{даугава}}) : C_{\text{дас-2в}} = (5 \cdot 0,7 - 5 \cdot 0,5) : 0,2 = 5 K_y;$$

$$K_{c'c''}^{m3} = (5C_{\text{удм-200}} - 5C_{\text{адм-8А}}) : C_{\text{дас-2в}} = (5 \cdot 1,5 - 5 \cdot 0,7) : 0,2 = 20 K_y;$$

$$K_{dg}^{m4} = (C_{\text{АМРТМ}} - C_{\text{карусель}}) : C_{\text{дас-2в}} = (70,0 - 20,0) : 0,2 = 250 K_y;$$

$$K_{df}^{m5} = (2C_{\text{уде-24Ач}} - 2C_{\text{уде-24А}}) : C_{\text{дас-2в}} = (2 \cdot 9,5 - 2 \cdot 6,0) : 0,2 = 35 K_y;$$

$$K_{fg}^{m6} = (2C_{\text{уде-24Рч}} - 2C_{\text{уде-24Ач}}) : C_{\text{дас-2в}} = (2 \cdot 24,0 - 2 \cdot 9,5) : 0,2 = 145 K_y;$$

$$K_{dc}^{p01} = (C_{\text{ркп}} + C_{\text{лз}} + 5C_{\text{удм-200}}) : C_{\text{дас-2в}} = (55,0 + 3,0 + 5 \cdot 1,5) : 0,2 = 327,5 K_y;$$

$$K_{cd}^{p02} = (C_{\text{дмр}} + C_{\text{сдз}} + 2C_{\text{уде-24А}}) : C_{\text{дас-2в}} = (3,0 + 7,5 + 2 \cdot 7,5) : 0,2 = 127,5 K_y,$$

Таблица		Table						
СТРУКТУРА КАПИТАЛОЕМКОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ПУТЕЙ И ЭТАПОВ РАЗВИТИЯ И МОДЕРНИЗАЦИИ ДОИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ STRUCTURE OF CAPITAL INTENSITY OF DIFFERENT WAYS AND STAGES OF MILKING EQUIPMENT DEVELOPMENT AND MODERNIZATION								
Этапы модернизации Stages of modernization	Пути перехода / Transition paths							этапы перехода* transition stages*
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	
K_{ab}^{p1}	+	+	+	+	+	+	+	РП
K_{cd}^{p2}	+	-	+	+	+	+	+	РП
$K_{c'e}^{p3}$	-	+	+	-	-	-	-	РП
K_{dc}^{p4}	-	-	-	+	+	-	-	РП
K_{bc}^{m1}	+	+	+	+	+	+	+	МП
K_{cc}^{m2}	-	+	-	-	-	-	-	МП
$K_{c'c'}^{m3}$	-	+	+	-	-	-	-	МП
K_{dg}^{m4}	-	-	-	-	-	+	-	МП
K_{df}^{m5}	-	-	-	-	-	-	+	МП
K_{fg}^{m6}	-	-	-	-	-	-	+	МП
K_{dc}^{po1}	-	-	+	-	-	-	-	РО
K_{cd}^{po2}	-	-	-	-	+	-	-	РО
Капиталоемкость всего / Total capital intensity: K_y^{**} млн. руб./ million rubles	390,0 78,0	1677,5 335,5	2372,5 474,5	1750,0 350,0	1877,5 375,5	640,0 128,0	570,0 114,0	-
*РП – революционный / revolutionary transition; МП – модернизационный / modernization transition; РО – реверсный обратный / reverse transfer transition; ** $K_y = 0,2$ млн руб. / 0.2 million rubles								

где C – стоимость доильных установок, а именно:

$C_{дас-2в}$ – для доения в ведра ДАС-2В;

$C_{даугава}$ – стеклянный молокопровод «Даугава»;

$C_{адм-8А}$ – модернизированный стеклянный молокопровод АДМ-8А;

$C_{удм-200}$ – молокопровод из нержавеющей стали УДМ-200;

$C_{дрл}$ – доильный робот (Лели);

$C_{амртм}$ – роботизированная доильная «Карусель» АМРТМ (Де Лаваль);

$C_{карусель}$ – автоматизированная карусель (Де Лаваль);

$C_{уде-24Ач}$ – автоматизированный доильный зал «Елочка» с почетвертным доением УДЕ-24АЧ (расчетная стоимость);

$C_{уде-24А}$ – автоматизированный доильный зал «Елочка» с традиционным доением УДЕ-24А;

$C_{уде-16рч}$ – роботизированный доильный зал «Елочка» с почетвертным доением (стоимость расчетная ≈ 24 млн руб.);

$C_{рkb}$ – стоимость реконструкции и оборудования коровника при переходе с привязного на беспривязное содержание;

$C_{сдз}$ – стоимость строительной части доильного зала;

$C_{рkp}$ – стоимость обратной реконструкции коровника с беспривязного на привязное содержание;

$C_{ддз}$ – стоимость демонтажа доильного зала;

$C_{дмр}$ – стоимость демонтажа роботов.

Выводы

1. Проанализированы 7 основных путей развития машинного доения – от ручного способа до автоматизированного и роботизированного доения коров продолжительностью 100-110 лет. Их суммарная оце-

ночная капиталоемкость для условной эталонной фермы на 1000 гол. составляет 78,0-474,5 млн руб. в современных цифрах. Введено понятие условной единицы, равной стоимости доильного агрегата ДАС-2В, то есть примерно 0,2 миллиона рублей на текущий момент.

2. Выявлены наиболее затратные пути модернизации доильного оборудования стоимостью 474,5 млн; 350,0 млн и 375,5 млн руб., включающие капиталоемкие этапы перехода на роботизированное доение с многократной сменой технологий (привязное – беспривязное – привязное) и обратные переходы от доения в роботах на доение в залах.

3. Предложен оптимальный, наименее капиталоемкий путь последовательной модернизации с переходом в конце от традиционного на почетвертное доение в залах, по функциональности не уступающее доению в роботах, с последующим (при необходимости) модернизационным переходом (докапитализацией) на роботизированное доение в зале путем поэтапной замены автоматизированных манипуляторов доения, управляемых оператором, на роботизированные манипуляторы без участия человека (без смены технологии).

4. Возможен также вариант модернизации, включающий в отдельных случаях прямой переход молокопровода при стойловом содержании на роботизированное доение в монобоксах (3-4 ед. на 200 гол.) для небольших ферм до 300 гол. после соответствующей реконструкции под беспривязное содержание.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лачуга Ю.Ф., Кирсанов В.В. Анализ цикличности развития техники и технологий в различных технологических укладах на примере молочного животноводства // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2021. N2. С. 54-58.
2. Кирсанов В.В., Цой Ю.А., Кормановский Л.П. Концепция создания доильного робота, совместимого с отечественным доильным оборудованием // *Вестник ВНИИМЖ*. 2016. N3(23). С. 13-20.
3. Бейлис В.М., Ценч Ю.С., Коротченя В.М., Старовойтов С.И., Кынев Н.Г. Тенденции развития прогрессивных машинных технологий и техники в сельскохозяйственном производстве // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N4 (33). С. 150-156.
4. Besier J., Schupbach-Regula G., Wellnitz O., Bruckmaier R.M. Technical note: Effects of attachment of hind teats before cleaning and attachment of front teats on milking characteristics in automatic milking systems. *Journal of dairy science*. 2017. 100. 3091-3095.
5. Мазитов Н.К., Шогенов Ю.Х., Ценч Ю.С. Сельскохозяйственная техника: решения и перспективы // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N3 (32). С. 94-100.
6. Федоренко В.Ф., Кирсанов В.В., Мишуrow Н.П. Анализ различных вариантов применения доильных роботов в молочном животноводстве // *Техника и оборудование для села*. 2021. N7(289). С. 33-37.
7. Ценч Ю.С., Маслов Г.Г., Трубилин Е.Г. К истории развития сельскохозяйственной техники // *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2018. N3(47). С. 117-123.
8. Годжаев З.Д., Шевцов В.Г., Лавров А.В., Ценч Ю.С., Зубина В.А. Стратегия машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России до 2030 года (Прогноз) // *Технический сервис машин*. 2019. N4(137). С. 220-229.
9. Шляйтцер Г. Кому бокс, а кому и карусель? // *Новое сельское хозяйство*. 2011. N6. С. 46-51.
10. Виннички С., Юговар Л., Морозов Н.М. Эффективность комплексной роботизации ферм КРС в Республике Польша // *Вестник ВНИИМЖ*. 2017. N2(26). С. 220-225.
11. Bruckmaier R.M., Macuhova J., Meyer H.H.D. Specific aspects of milk ejection in robotic milking: a review. *Livestock production science*. 2001. 72. 169.
12. Лобачевский Я.П., Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Аспекты цифровизации системы технологий и машин // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N3(36). С. 40-45.
13. Wildridge A.M., Thomson P.C., Garcia S.C., Jongman E.C., Kerrisk K.L. Transitioning from conventional to automatic milking: Effects on the human-animal relationship. *Journal of dairy science*. 2020. 103. 1608-1619.
14. Цой Ю.А., Кирсанов В.В., Петренко А.П. Функционально-стоимостный анализ роботизированных систем и выбор альтернативных вариантов добровольного доения коров // *Техника и оборудование для села*. 2014. N8. С. 33-36.
15. Морозов Н.М., Федоренко В.Ф., Кирсанов В.В., Мишуrow Н.П., Гелетий Д.Г. Прогнозирование периодичности среднесрочных и длинных циклов развития техники и технологий на примере молочного животноводства // *Техника и оборудование для села*. 2022. N4(298). С. 8-13.
16. Кирсанов В.В., Кравченко В.Н. Пути совершенствования оборудования для доения и первичной обработки молока // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2005. N9. С. 41.
17. Кирсанов В.В., Павкин Д.Ю., Рузин С.С., Цымбал А.А. Сравнительная технико-экономическая оценка автоматизированных и роботизированных доильных установок // *Агроинженерия*. 2020. N3(97). С. 39-43.

REFERENCES

1. Lachuga Yu.F., Kirsanov V.V. Analiz tsiklichnosti razvitiya tekhniki i tekhnologiy v razlichnykh tekhnologicheskikh ukladakh na primere molochnogo zhitovnovodstva [A method for determining stretching patterns of a group of stems in plant materials]. *Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka*. 2021. N2. 54-58 (In Russian).
2. Kirsanov V.V., Tsoy Yu.A., Kormanovskiy L.P. Kontseptsiya sozdaniya doil'nogo robota, sovmestimogo s otechestvennym doil'nym oborudovaniem [The concept of creating a milking robot, compatible with domestic milking equipment]. *Vestnik VNIIMZH*. 2016. N3(23). 13-20 (In Russian).
3. Beylis V.M., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M., Starovoytov S.I., Kynev N.G. Tendentsii razvitiya progressivnykh mashinnykh tekhnologiy i tekhniki v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [Trends in the development of advanced machine technologies and machinery in agricultural production]. *Vestnik VIESH*. 2018. N4(33). 150-156 (In Russian).
4. Besier J., Schupbach-Regula G., Wellnitz O., Bruckmaier R.M. Technical note: Effects of attachment of hind teats before cleaning and attachment of front teats on milking characteristics in automatic milking systems. *Journal of dairy science*. 2017. 100. 3091-3095 (In English).
5. Mazitov N.K., Shogenov Yu.Kh., Tsench Yu.S. Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: resheniya i perspektivy [Agricultural machinery: solutions and prospects]. *Vestnik VIESH*. 2018. N3(32). 94-100 (In Russian).
6. Fedorenko V.F., Kirsanov V.V., Mishurov N.P. Analiz razlichnykh variantov primeneniya doil'nykh robotov v molochnom zhitovnovodstve [Analysis of different options of use of milking robots in dairy livestock]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2021. N7(289). 33-37 (In Russian).
7. Tsench Yu.S., Maslov G.G., Trubilin E.G. K istorii razvitiya sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [On the history of agricultural machinery development]. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*. 2018. N3(47). 117-123 (In Russian).
8. Godzhaev Z.D., Shevtsov V.G., Lavrov A.V., Tsench Yu.S., Zubina V.A. Strategiya mashinno-tekhnologicheskoy modernizatsii sel'skogo khozyaystva Rossii do 2030 goda

- (Prognoz) [Strategy of machine-technological modernization of agriculture in Russia until 2030 (Forecast)]. *Tekhnicheskij servis mashin*. 2019. N4(137). 220-229 (In Russian).
9. Shlyaytser G. Komu boks, a komu i karusel'? [Some sees it boxing, others see it the carousel?] *Novoe sel'skoe khozyaystvo*. 2011. N6. 46-51 (In Russian).
 10. Vinnitski S., Yugovar L., Morozov N.M. Effektivnost' kompleksnoy robotizatsii ferm KRS v Respublike Pol'sha [The cattle farms complex robotics effectiveness in the Republic of Poland]. *Vestnik VNIIMZH*. 2017. N2(26). 220-225 (In Russian).
 11. Bruckmaier R.M., Macuhova J., Meyer H.H.D. Specific aspects of milk ejection in robotic milking: a review. *Livestock production science*. 2001. 72. 169 (In English).
 12. Lobachevskiy Ya.P., Beylis V.M., Tsench Yu.S. Aspekty tsifrovizatsii sistemy tekhnologiy i mashin [Aspects of digitalization of the system of technologies and machines]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N3(36). 40-45 (In Russian).
 13. Wildridge A.M., Thomson P.C., Garcia S.C., Jongman E.C., Kerrisk K.L. Transitioning from conventional to automatic milking: Effects on the human-animal relationship. *Journal of dairy science*. 2020. 103. 1608-1619 (In English).
 14. Tsoy Yu.A., Kirsanov V.V., Petrenko A.P. Funktsional'no-stoimostnyy analiz robotizirovannykh sistem i vybor al'ternativnykh variantov dobrovol'nogo doeniya korov [Value analysis of robotic systems and alternative choice of voluntary milking of cows]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2014. N8. 33-36 (In Russian).
 15. Morozov N.M., Fedorenko V.F., Kirsanov V.V., Mishurov N.P., Geletiy D.G. Prognozirovaniye periodichnosti srednesrochnykh i dlinnykh tsiklov razvitiya tekhniki i tekhnologii na primere molochnoy zhivotnovodstva [Forecasting the periodicity of medium-term and long cycles of development of machinery and technologies using the example of dairy farming]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2022. N4(298). 8-13 (In Russian).
 16. Kirsanov V.V., Kravchenko V.N. Puti sovershenstvovaniya oborudovaniya dlya doeniya i pervichnoy obrabotki moloka [Ways to improve milking equipment and primary milk processing]. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny*. 2005. N9. 41 (In Russian).
 17. Kirsanov V.V., Pavkin D.Yu., Ruzin S.S., Tsymbal A.A. Sravnitel'naya tekhniko-ekonomicheskaya otsenka avtomatizirovannykh i robotizirovannykh doil'nykh ustanovok [Comparative technical and economic assessment of automated and robotized milking plants]. *Agroinzheneriya*. 2020. N3(97). 39-43 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Морозов Н.М. – обоснование структурной оценки капиталоемкости различных путей и отдельных этапов перехода от ручного к роботизированному доению, введение условной единицы капиталоемкости;
 Кирсанов В.В. – использование графоаналитического метода оценки капиталоемкости модернизации доильного оборудования, определение семи основных путей перехода от ручного до роботизированного доения;
 Ценч Ю.С. – историко-аналитическая оценка основных этапов модернизации доильного оборудования с указанием общей продолжительности путей и отдельных ее этапов.
 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Morozov N.M. – substantiation of a structural assessment of the capital intensity of various ways and individual stages of the transition from manual to robotic milking, the introduction of a conventional unit of capital intensity;
 Kirsanov V.V. – use of a graph-analytical method for assessing the capital intensity of milking equipment upgrade, identifying seven main ways to move from manual to robotic milking;
 Tsench Yu.S. – historical and analytical assessment of the main stages of milking equipment modernization, indicating the total duration of the paths and modernization individual stages.
 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

15.12.2022
 27.02.2023

Исследование технологий уборки льна льноуборочными машинами

Виктор Григорьевич Черников,
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
e-mail: v.chernikov@fnclnk.ru;

Роман Анатольевич Ростовцев,
доктор технических наук, директор;
Владислав Юрьевич Романенко,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник

Федеральный научный центр лубяных культур, г. Тверь, Российская Федерация

Реферат. Технология уборки льна льноуборочными машинами зависит от входных воздействий, включающих: качественные показатели льноуборочных машин; конструктивные размеры рабочих органов; показатели условий работы; промежуточные переменные, отражающие динамические свойства рабочих органов и динамику потока льна. (*Цель исследования*) Установить закономерности и степень связи между качественными показателями работы (чистота теребления, очеса, растянутость ленты); конструктивными параметрами; динамическими свойствами машин и условиями уборки (высота и густота стеблестоя льна, рельеф поля, толщина и неравномерное расположение ленты льнотресты и так далее). (*Материалы и методы*) Разработали на основании системного анализа математические модели технологического процесса уборки льна. Представили информационные модели исследований основных льноуборочных машин. (*Результаты и обсуждение*) Показали, что наиболее характерными показателями условий работы льноуборочных машин служат высота стеблестоя льна $l(t)$, сантиметры; зона расположения семенных коробочек $a(t)$, сантиметры; и неровность поверхности поля $z(t)$, сантиметры. Выявили, что качество работы определяется чистотой очеса $n(t)$, проценты, растянутостью ленты льносоломы $\lambda(t)$, раз, расположением ее верхушечной $y_a(t)$ и корневой частей $y_k(t)$, сантиметры. Приняли в качестве оценочных показателей высоту теребления $h(t)$, сантиметры, колебания комбайна в продольно-вертикальной плоскости $Q(t)$, градусы, расположение верхушечной части лент льна перед очесывающим аппаратом. (*Выводы*) Разработали гидроустройство для регулировки высоты теребления $h(t)$ от 10 до 40 сантиметров в зависимости от стеблестоя льна. Констатировали, что важным резервом повышения чистоты очеса служит изменение ширины зоны очеса комбайна B_k , сантиметры. Создали для этого механизм перемещения очесывающего аппарата относительно зажимного транспортера в зависимости от высоты стеблестоя льна $l(t)$, сантиметры.

Ключевые слова: лен-долгунец, льнокомбайн, льнотеребилка, стеблестой, технология уборки льна.

■ Для цитирования: Черников В.Г., Ростовцев Р.А., Романенко В.Ю. Исследование технологий уборки льна льноуборочными машинами // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №1. С. 19-24. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-19-24. EDV PLFOHX.

Flax Harvesting Technologies for Flax Harvesting Machines

Viktor G. Chernikov,
Dr.Sc.(Eng.), professor, chief researcher,
e-mail: v.chernikov@fnclnk.ru;

Roman A. Rostovtsev,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher, director;
Vladislav Yu. Romanenko,
Ph.D.(Eng.), leading researcher

Federal Research Center for Bast Fiber Crops, Tver, Russian Federation

Abstract. The technology of flax harvesting depends on input impacts, including: flax harvester qualitative characteristics; working body parameters; indicators of working conditions; intervening variables reflecting the dynamic properties of the working bodies and the dynamics of the flax flow input. (*Research purpose*) To establish patterns and the degree of correlation between the qualitative operation indicators (pulling and deseeding quality, flax line stretching); design parameters; machine dynamic properties and harvesting conditions (height and density of flax stem, field surface, thickness and unevenness of flax straw, etc.). (*Materials and methods*) Based on system analysis, mathematical models of the technological process of flax harvesting were developed. Information models were introduced for examining the main flax harvesters. (*Results and discussion*) The paper shows that the most typical indicators of the flax harvester working conditions are the flax stem height $l(t)$, centimeters; the seed pod

area $a(t)$, centimeters; and field surface roughness $z(t)$, centimeters. It is found that the quality of operation is determined by the deseeding quality, percentages; the flax straw stretching, times; the location of its apical and root parts, centimeters. The estimated indicators are as follows: the pulling height $h(t)$, centimeters, the vibrations of the combine in the longitudinal-vertical plane $Q(t)$, degrees, the location of the apical part of the flax flaw in front of the stripper. (*Conclusions*) A hydraulic device was developed to adjust the pulling height from 10 to 40 centimeters, depending on the flax stem. An important reserve for increasing the deseeding quality is the change in the width of the deseeding zone of the V_k harvester, centimeters. For this purpose, a mechanism was created for moving the deseeder against the clamping conveyor, depending on the flax stem height $l(t)$, centimeters.

Keywords: fiber flax, flax harvester, flax puller, flax stem, flax harvesting technology.

For citation: Chernikov V.G., Rostovtsev R.A., Romanenko V.Yu. Issledovanie tekhnologii uborki lna lnouborochnymi mashinami [Flax harvesting technologies for flax harvesting machines]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N1. 19-24 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-19-24. EDV PLFOHX.

Льноуборочные машины работают в условиях изменяющихся внешних воздействий, что сказывается на производительности машин, качестве выполнения технологических процессов и конечного продукта [1, 2]. Актуальна задача комплексного исследования условий работы, динамических свойств и качества работы льноуборочных машин на основе проведения широких полевых испытаний, обработки и анализа большого количества первичной информации [3, 4, 18-21].

Цель исследования – установить закономерности и степень связи между качественными показателями работы (чистота тербления, очеса, растянутость ленты); конструктивными параметрами; динамическими свойствами машин и условиями уборки (высота и густота стеблестоя льна, рельеф поля, толщина и неравномерное расположение ленты льнотресты и так далее).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Важнейшее условие системного анализа – разработка математической модели технологического процесса, сбор и обработка информации [5, 6].

Разработали информационные модели исследований основных льноуборочных машин – льнотеребилки и льнокомбайна, которые представлены в виде схем на *рисунке*.

Для льноуборочных машин (льнотеребилка, льнокомбайн) наиболее существенны следующие показатели условий уборки: высота $l(t)$ и густота стеблестоя льна $u(t)$, зона расположения семенных коробочек $a(t)$, рельеф поля $z(t)$ [7, 8].

Технологический процесс уборки льна-долгунца льноуборочными машинами характеризуется и оценивается качественными показателями работы, которые служат как бы паспортом машины. Количество качественных показателей, составляющих вектор \vec{Y} для каждой льноуборочной машины различно, и зависит от ее конструкции и характера выполняемого процесса. Например, для льнотеребилных машин качественными показателями будут параметры ленты льна – растянутость $\lambda(t)$, расположение верхушечной $y_v(t)$ и корневой частей $y_k(t)$. Для льнокомбайна важный показатель качества так же чистота очеса $n(t)$ [9, 10].

Таблица		Table			
ЧИСЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ МОДЕЛИ ЛЬНОКОМБАЙНА NUMERICAL CHARACTERISTICS OF THE INPUT AND OUTPUT PROCESSES OF THE FLAX HARVESTER MODEL					
Процессы Processes	m	σ	$V, \%$	$\omega_{max}, 1/c$	$\omega_c, 1/c$
$l(t), \text{ см / см}$	78,83-89,6	5,4-7,6	6,9-8,5	0,9-1,1	4,0
$a(t), \text{ см / см}$	19,4-22,0	4,8-5,3	24,0-24,8	1,0; 4,05	5,0
$z(t), \text{ см / см}$	–	1,3-2,4	–	1,9-2,5	6,0
$u(t), \text{ шт./м}^2/\text{pieces/m}^2$	850-1390	405	29-47,6	1,0; 5,0	8,0
$L_p(t), \text{ мм / мм}$	1,6-2,0	0,8-1,1	50-54	1,2; 5,1	12,0
$L_1(t), \text{ мм / мм}$	3,7-7,0	0,6-3,6	17,8-51	1,8-2,4	6,0
$L_2(t), \text{ мм / мм}$	2,6-4,3	0,6-2,0	23-45	1,7-2,5	6,0
$y_v(t), \text{ см / см}$	–	6,5-7,8	–	0,9-1,6	10,0
$h(t), \text{ см / см}$	–	0,8-0,9	–	1,8-2,5	4,0
$Q(t), \text{ град. / degrees}$	–	1,1-1,2	–	0,8-1,2	3,0
$n(t), \%$	98-88	20-30	21-29	0,9-1,3	3,0
$\lambda(t), \text{ раз / times}$	1,2-1,5	0,3-0,6	26-40	1,5-4,0	10
$y_v(t), \text{ см / см}$	–	7,1-12	–	0,9-1,2	3,0
$y_k(t), \text{ см / см}$	–	5,4-8,3	–	1,2-4,5	3,0

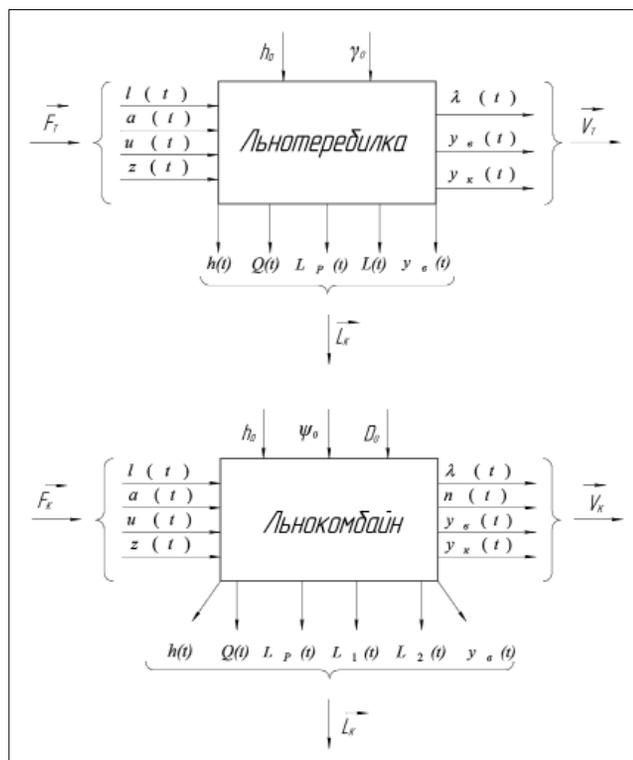


Рис. Информационные модели исследований: $l(t)$ – высота стеблестоя льна, см; $a(t)$ – зона расположения семенных коробочек, см; $u(t)$ – густота стеблестоя льна, шт./м²; $z(t)$ – неровность поверхности поля (рельеф), см; $n(t)$ – чистота очеса, %; $\lambda(t)$ – растянутость ленты льносолемы, раз; $y_a(t)$ – расположение верхушечной части ленты льна, см; $y_k(t)$ – расположение корневой части ленты льна, см; $Q(t)$ – колебания комбайна в продольно-вертикальной плоскости, град.; $h(t)$ – высота тербления, см; h_0 – установочное значение высоты тербления льна, см; $L_p(t)$ – толщина ленты в тербильном ручье, мм; $L_1(t)$ – средняя толщина ленты на входе в очесывающий аппарат, мм; $L_2(t)$ – средняя толщина ленты на выходе из очесывающего аппарата, мм; D_0 – диаметр очесывающего барабана, м; ψ_0 – угол наклона зуба, град.; γ_0 – угол наклона тербильного аппарата, град

Fig. Information models of research: $l(t)$ – the flax stem height, cm; $a(t)$ – the location of the seed pods, cm; $u(t)$ – the density of the flax stem, pcs/m²; $z(t)$ – the unevenness of the field surface (relief), cm; $n(t)$ – the purity of deseeding, %; $\lambda(t)$ – the flax straw stretching, times; $y_a(t)$ – the location of the apical part of the flax line, cm; $y_k(t)$ – the location of the root part of the flax line, cm; $Q(t)$ – vibrations of the combine in the longitudinal-vertical plane, degree; $h(t)$ – the height of the pulling, cm; h_0 – the set value of the flax pulling height, cm; $L_p(t)$ – the thickness of the input flax stream, mm; $L_1(t)$ – the average thickness of the flax input line, mm; $L_2(t)$ – the average thickness of the flax output line, mm; D_0 – the diameter of the deseeding drum, m; ψ_0 – the tilt angle of the tooth, degree; γ_0 – the tilt angle of the pulling device, degree

Результаты и обсуждение. Испытания льноуборочных машин выполнили на полях Тверской области. Запись процессов проводили в диапазоне рабочих скоростей $v = 1,0-1,8$ м/с. Ниже приведены обоб-

щенные данные испытаний и краткий анализ полученных материалов.

После математической обработки первичной информации с использованием специальных компьютерных программ получили (табл.) средние значения показателей m , среднеквадратические отклонения σ , коэффициент вариации V , а также спектры частот (частоты среза ω_c и частоты ω_{max} , при которых спектральные плотности имеют максимальное значение).

Из данных таблицы видно, что составляющие вектора \vec{F}_k условия колеблются в широких пределах. Так, например при средних значениях $m_L = 78,3-89,6$ см, $m_a = 19,4-22,0$ см и $m_u = 850-1390$ шт./м², среднеквадратическое отклонение составило $\sigma_L = 5,4-7,6$ см, $\sigma_a = 4,8-5,3$ см и $\sigma_u = 405$ шт./м² соответственно. Следует также отметить, что распределение высоты стеблестоя и длины зоны семенных коробочек оказалось близким к нормальному.

Особый интерес представляет анализ вектора \vec{L} . Относительная неравномерность густоты стеблестоя льна $u(t)$ вызывает изменение толщины ленты льна. Толщина ленты в тербильном ручье $L_p(t)$ колеблется в пределах 1,6-2,0 мм со среднеквадратическим отклонением $\sigma_{L_p} = 0,8-1,1$ мм. Процесс $L_p(t)$ имеет значительную полосу существенных частот до $\omega_c = 12,0$ 1/с. Средняя толщина слоя льна на входе в очесывающий аппарат $L_1(t)$ составляет $m_1 = 3,7-7,0$ мм при среднеквадратическом отклонении $\sigma_{L_1} = 0,6-3,6$ мм. Процесс $L_1(t)$ имеет более узкополосный спектр по сравнению с $L_p(t)$ до $\omega_c = 6,0$ 1/с. Таким образом, поперечный транспортер гасит высокочастотные составляющие и усиливает низкочастотные составляющие процесса.

Средняя толщина ленты на выходе из очесывающего аппарата $L_2(t)$ меньше чем на входе и составляет $m_{L_2} = 2,6-4,3$ мм при среднеквадратическом отклонении $\sigma_{L_2} = 0,6-2,0$ мм. По частотному составу процесс $L_2(t)$ идентичен процессу $L_1(t)$, то есть зажимной транспортер, уплотняя ленту льна в среднем на 65%, не меняет внутренней структуры процесса.

Из приведенных данных видно, что толщина льна в льноуборочном комбайне характеризуется значительными колебаниями. Это затрудняет работу очесывающего аппарата, а при резком изменении густоты стеблестоя льна может привести к забиванию тербильных секций и простоям льноагрегата. Кроме того, колебание толщины ленты льносолочки затрудняет процесс вылежки тресты.

Стабилизация толщины ленты играет существенную роль в повышении производительности и качества работы льноуборочных комбайнов. Полученная впервые статистика процессов может быть положена в основу разработки технических средств контроля и регулирования толщины ленты в условиях нормального функционирования.

Несколько своеобразна внутренняя структура зо-

ны очеса семенных коробочек [11-13].

Колебания верхушечной части ленты льна перед очесывающим аппаратом $y_{в1}(t)$ ($\sigma_{y_{в1}} = 6,5-7,8$ см) свидетельствуют, что зона очеса ленты льна $B_{л}$ не остается постоянной. В первом приближении ширина зоны очеса $B_{л}$ определяется расположением семенных коробочек на стеблях a и растянутостью Δl :

$$B_{л} = a + \Delta l. \quad (1)$$

Однако в реальных условиях ширина зоны очеса $B_{л}$ является случайной функцией $B_{л}(t)$, зависящей от условий уборки и динамических свойств уборки:

$$B_{л}(t) = e_a(t) + e_{\lambda}(t) + l(t), \quad (2)$$

где $e_a(t)$ – ширина зоны очеса, обусловленная длиной зоны коробочек;

$e_{\lambda}(t)$ – ширина зоны очеса, обусловленная растянутостью ленты;

$l(t)$ – колебания зоны очеса, обусловленные высотой стеблестоя льна [6].

Увеличение диаметра очесывающего барабана D_0 для повышения чистоты очеса нецелесообразно, так как увеличивается количество путанины в ворохе [14]. Важным резервом повышения чистоты очеса служит непрерывный контроль зоны очеса ленты льна и регулирование высоты тербления, угла наклона зубьев очесывающего аппарата или его положения относительно ленты льна [15-17].

Среднеквадратическое отклонение процесса изменения высоты тербления льна $h(t)$ от установочного значения h_0 при отсутствии управляющего воздействия составляет $\sigma_0 = 0,8-0,9$ см. Полоса существен-

ных частот находится в пределах $\omega_c = 0-4,0$ 1/с. На колебания процесса $h(t)$ влияют главным образом неровности поверхности поля. Влияние колебаний комбайна незначительно.

Анализ условий уборки, динамических свойств и качества работы льноуборочных машин позволяет разработать механизмы автоматизации, сигнализации и контроля выполнения технологических операций уборки льна.

Выводы. Установили зависимость качества работы льноуборочных машин от высоты стеблестоя льна $l(t)$, см; зоны расположения семенных коробочек $a(t)$, см; и неровности поверхности поля $z(t)$, см. Разработали гидроустройство регулирования высоты тербления от 10 до 40 см в зависимости от высоты стеблестоя льна.

Определили, что колебания верхушечной части лент льна перед очесывающим аппаратом $y_{в1}(t)$ свидетельствуют, что зона очеса ленты льна $B_{л}$ не остается постоянной и в реальных условиях эксплуатации является случайной функцией $B_{л}(t)$, зависящей от динамических свойств и условий уборки. Для качественного очеса разработали механизм смещения очесывающего аппарата относительно зажимного транспортера в зависимости от высоты стеблестоя льна.

С целью уменьшения времени на устранение забивок льном поперечный транспортер выполнили подъемным под углом 70° .

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ФГБНУ ФНЦ ЛК (№ FGSS-2022-0005).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Черников В.Г. Машины для уборки льна (конструкция, теория и расчет): монография. М.: Инфра-М. 1999. 209 с.
- Черников В.Г., Ростовцев Р.А., Романенко В.Ю. и др. Влияние характеристик условий работы на надежность и точность выполнения технологических процессов льноуборочными машинами // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2016. №4. С. 9-11.
- Понажев В.П. Усовершенствованные технологии семеноводства в льноводстве: монография. Тверь: Тверской государственный университет. 2006. 230 с.
- Шило И.Н., Дашков В.Н., Колос В.А. Ресурсосберегающие технологии сельскохозяйственного производства: монография. Минск: Белорусский государственный аграрный технический университет. 2003. 183 с.
- Лурье А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. М.: Колос. 1981. 282 с.
- Лурье А.Б., Черников В.Г., Озеров В.Г. Технологические основы автоматизации льноуборочных машин // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 1974. №5. С. 24-25.
- Зинцов А.Н. Научные основы отделения семенной части урожая от стеблей при раздельной уборке льна-долгунца. Караваево: Костромская ГСХА. 2019. 118 с.
- Кленин Н.И., Сакун В.А. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. М.: Колос. 1994. 751 с.
- Поздняков Б.А. Актуальные направления совершенствования системы машин для уборки льна-долгунца // *Техника и оборудование для села*. 2019. №8(266). С. 2-6.
- Ростовцев Р.А., Черников В.Г., Ущаповский И.В. и др. Основные проблемы научного обеспечения льноводства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. №3. С. 45-52.
- Черников В.Г., Порфирьев С.Г., Ростовцев Р.А. Очесывающие аппараты льноуборочных машин. М.: Издательство ВИМ. 2004. 237 с.
- Ковалев М.М., Галкин А.В. Анализ процесса очеса стеблей барабаном с поступательно-круговым движением гребней // *Достижения науки и техники АПК*. 2006. №4. С. 25-27.
- Ковалев М.М. Аппарат с поступательно круговыми движениями гребней: анализ процесса очеса стеблей // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 1994. №1. С. 25-27.
- Черников В.Г. Определение параметра интенсивности



- отрыва коробочек льна при работе очесывающего устройства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N4. С. 20-23.
15. Родионова Л.В. Сравнительный анализ очесывающих устройств поли- и монощелевого типа // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 1986. N5. С. 31-33.
16. Родионова А.Е. Технология выращивания и первичной переработки льна-долгунца. Тверь: Агросфера. 2008. 442 с.
17. Алдошин Н.В., Лылин М.А., Мосяков М.А. Уборка зернобобовых культур методом очеса // *Дальневосточный аграрный вестник*. 2017. N1(41). С. 67-74.
18. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С., Бейлис В.М. Создание и развитие систем машин и технологий для комплексной механизации технологических процессов в растениеводстве // *История науки и техники*. 2019. N12. С. 46-55.
19. Годжаев З.Д., Шевцов В.Г., Лавров А.В., Ценч Ю.С., Зубина В.А. Стратегия машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России до 2030 года (Прогноз) // *Технический сервис машин*. 2019. N4(137). С. 220-229.
20. Мазитов Н.К., Шогенов Ю.Х., Ценч Ю.С. Сельскохозяйственная техника: решения и перспективы // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N3(32). С. 94-100.
21. 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.

REFERENCES

1. Chernikov V.G. Mashiny dlya uborki l'na (konstruktsiya, teoriya i raschet): monografiya [Flax harvesting machines (design, theory and calculation): monograph.]. Moscow: Infra-M. 1999. 209 (In Russian).
2. Chernikov V.G., Rostovtsev R.A., Romanenko V.Yu., et al. Vliyaniye kharakteristik usloviy raboty na nadezhnost' i tochnost' vypolneniya tekhnologicheskikh protsessov l'nouborochnymi mashinami [Influence of the working conditions on the reliability and accuracy of flax harvester technological processes]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2016. N4. 9-11 (In Russian).
3. Ponazhev V.P. Usovershenstvovannyye tekhnologii semenovodstva v l'novodstve: monografiya [Improved technologies of seed production in flax growing: monograph.]. Tver': Tverskoy gosudarstvennyy universitet. 2006. 230 (In Russian).
4. Shilo I.N., Dashkov V.N., Kolos V.A. Resursosberegayushchie tekhnologii sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva: monografiya [Resource-saving technologies of agricultural production: monograph.]. Minsk: Belorusskiy gosudarstvennyy agrarnyy tekhnicheskyy universitet. 2003. 183 (In Russian).
5. Lur'e A.B. Statisticheskaya dinamika sel'skokhozyaystvennykh agregatov [Statistical dynamics of agricultural units.]. Moscow: Kolos. 1981. 282 (In Russian).
6. Lur'e A.B., Chernikov V.G., Ozerov V.G. Tekhnologicheskie osnovy avtomatizatsii l'nouborochnykh mashin [Technological fundamentals of flax harvester automation]. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny*. 1974. N5. 24-25 (In Russian).
7. Zintsov A.N. Nauchnyye osnovy otdeleniya semennoy chasti urozhaya ot stebley pri razdel'noy uborke l'na-dolguntsa [Scientific fundamentals for separating the crop seed part from the stems during separate harvesting of fiber flax]. Kharavaevo: Kostromskaya GSKHA. 2019. 118 (In Russian).
8. Klenin N.I., Sakun V.A. Sel'skokhozyaystvennyye i meliorativnyye mashiny [Agricultural and land reclamation machines]. Moscow: Kolos. 1994. 751 (In Russian).
9. Pozdnyakov B.A. Aktual'nye napravleniya sovershenstvovaniya sistemy mashin dlya uborki l'na-dolguntsa [Up-to-date areas of improving the system of machines for harvesting fiber flax]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2019. N8(266). 2-6 (In Russian).
10. Rostovtsev R.A., Chernikov V.G., Ushchapovskiy I.V., et al. Osnovnyye problemy nauchnogo obespecheniya l'novodstva [The main problems of scientific support of flax growing]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N3. 45-52 (In Russian).
11. Chernikov V.G., Porfir'ev S.G., Rostovtsev R.A. Ochesyvyayushchie apparaty l'nouborochnykh mashin [Strippers for flax harvesters]. Moscow: Izdatel'stvo VIM. 2004. 237 (In Russian).
12. Kovalev M.M., Galkin A.V. Analiz protsessa ochesa stebley barabanom s postupatel'no-krugovym dvizheniem grebney [Analysis of the stalk stripping process by a drum with progressive-circular motion of the ridges]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2006. N4. 25-27 (In Russian).
13. Kovalev M.M. Apparat s postupatel'no-krugovymi dvizheniyami grebney: analiz protsessa ochesa stebley [Machine with progressively circular movements of the ridges: analysis of the stalk stripping process]. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny*. 1994. N1. 25-27 (In Russian).
14. Chernikov V.G. Opredeleniye parametra intensivnosti otryva korobochek l'na pri rabote ochesyvyayushchego ustroystva [Determination of parameter of intensity of flax balls separation during comb deseeding operation]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2017. N4. 20-23 (In Russian).
15. Rodionova L.V. Sravnitel'nyy analiz ochesyvyayushchikh ustroystv poli- i monoshchelevogo tipa [Comparative analysis of stripping devices of poly- and mono-slit type]. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny*. 1986. N5. 31-33 (In Russian).
16. Rodionova A.E. Tekhnologiya vyrashchivaniya i pervichnoy pererabotki l'na-dolguntsa [Technology of cultivation and primary processing of fiber flax]. Tver': Agrosfera. 2008. 442 (In Russian).
17. Aldoshin N.V., Lylin M.A., Mosyakov M.A. Uborka zernobovovykh kul'tur metodom ochesa [Leguminous harvesting by the stripping method]. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik*. 2017. N1(41). 67-74 (In Russian).

18. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S., Beylis V.M. Sozdanie i razvitie sistem mashin i tekhnologiy dlya kompleksnoy mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov v rastenievodstve [Creation and development of machine systems and technologies for complex mechanization of technological processes in crop production]. *Istoriya nauki i tekhniki*. 2019. N12. 46-55 (In Russian).
19. Godzhaev Z.D., Shevtsov V.G., Lavrov A.V., Tsench Yu.S., Zubina V.A. Strategiya mashinno-tekhnologicheskoy modernizatsii sel'skogo khozyaystva Rossii do 2030 goda (Prognoz) [Strategy of machine-technological modernization of agriculture in Russia until 2030 (Forecast)]. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2019. N4(137). 220-229 (In Russian).
20. Mazitov N.K., Shogenov Yu.Kh., Tsench Yu.S. Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: resheniya i perspektivy [Agricultural machinery: solutions and prospects]. *Vestnik VIESH*. 2018. N3(32). 94-100 (In Russian).
21. Zhalnin E.V., Tsench Yu.S., P'yanov V.S. Metodika analiza tekhnicheskogo urovnya zernouborochnykh kombaynov po funktsional'nym i konstruktivnym parametram [Methods of analysis of the technical level of combine harvesters on functional and structural parameters]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. N2. 4-8 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Черников В.Г. – научное руководство, постановка проблемы, разработка теоретических предпосылок, формирование общих выводов;

Ростовцев Р.А. – определение методологии исследования, выбор и обоснование основных исследуемых параметров, формирование общих выводов;

Романенко В.Ю. – литературный анализ, проведение испытаний, анализ экспериментальных результатов, редактирование и доработка текста статьи, подготовка материала к публикации.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Chernikov V.G. – scientific supervision, problem statement, development of theoretical background, formation of general conclusions;

Rostovtsev R.A. – specifying the research methodology, selection and justification of the main study parameters, formation of general conclusions;

Romanenko V.Yu. – literature review, conducting experiments, analysis of experimental results, proofreading and finalizing the text of the article, preparing the material 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

23.01.2023
01.03.2023

Управление движением сельскохозяйственной автономной роботизированной платформы

Дмитрий Олегович Хорт¹,
кандидат сельскохозяйственных наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: dmitriyhort@mail.ru;
Алексей Игоревич Кутырев¹,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: alexeykutyrev@gmail.com;

Игорь Геннадьевич Смирнов¹,
доктор технических наук, заведующий отделом,
e-mail: rashn-smirnov@yandex.ru;
Георгий Викторович Моисеев²,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: grg.moiseev@gmail.com;
Владимир Игоревич Соловьев^{3,4},
доктор экономических наук, профессор,
заведующий кафедрой, e-mail: vs@ciars.ai

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

²Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Российская Федерация;

³ООО «ЦИАРС», Москва, Российская Федерация;

⁴Московский технический университет связи и информатики, Москва, Российская Федерация

Реферат. Предложили модель автономного движения роботизированной платформой адаптированной под условия промышленного плодового сада. (*Цель исследования*) Разработать систему управления движением автономной роботизированной колесной платформы на основе инерциальной и спутниковой навигации и расчета преодолеваемого пути для позиционирования в плодовом саду, с автоматическим выполнением различных технологических операций, таких как внесение удобрений, контроль роста и болезней, уборка урожая плодов. (*Материалы и методы*) Создали математическую модель для управления движением роботизированной платформы, учитывающую радиусы разворота трех типов, длину дуги выполняемой окружности, скорости движения в рядах садовых насаждений с использованием электронной карты сада. Использовали метод, который позволяет реализовать программу автоматического движения роботизированной платформы по типовому плодovому саду с применением минимального набора датчиков, существенно снижая нагрузку на процессор и память бортовых вычислителей. Разработали программное обеспечение на языке программирования *Python*, позволяющее строить маршрут движения роботизированной платформы, отображать траекторию движения с указанием точности позиционирования в каждой точке относительно деревьев в рядах садовых насаждений, скорости движения и угла поворота колес. (*Результаты и обсуждение*) Реализовали автономное выполнение роботизированной платформой заданных маршрутов, взаимодействие программы с аппаратной частью роботизированной платформы. Провели полевое тестирование разработанного программного обеспечения. (*Выводы*) Подтвердили заданную точность позиционирования роботизированной платформы в междурядьях садов интенсивного типа 3,5 метра, максимальное отклонение при движении по карте задания с использованием спутниковой навигации и инерциальной системы составило 164 миллиметра, что удовлетворяет агротехнические требования к механизированной уборке плодов.

Ключевые слова: автоматизация садоводства, роботизированная платформа, управление движением роботизированной платформы, построение маршрута, алгоритм управления, автономная навигация в садах.

■ **Для цитирования:** Хорт Д.О., Кутырев А.И., Смирнов И.Г., Моисеев Г.В., Соловьев В.И. Управление движением сельскохозяйственной автономной роботизированной платформы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №1. С. 25-34. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-25-34. EDN UXTRFN.

Agricultural Autonomous Robotic Platform Motion Control

Dmitriy O. Khort¹,
Ph.D.(Agri.), leading researcher,
e-mail: dmitriyhort@mail.ru;
Aleksey I. Kutyrev¹,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: alexeykutyrev@gmail.com;

Igor G. Smirnov¹,
Dr.Sc.(Eng.), head of the department,
e-mail: rashn-smirnov@yandex.ru;
Georgiy V. Moiseev²,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: grg.moiseev@gmail.com;
Vladimir I. Soloviev^{3,4},
Dr.Sc.(Econ.), professor, e-mail: vs@ciars.ai

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

²Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation;

³CIARS ILC, Moscow, Russian Federation;

⁴Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russian Federation

Abstract. A model of the movement of a robotic platform adapted to the conditions of an industrial orchard is proposed. (*Research purpose*) Development of a motion control system for an autonomous robotic wheeled platform based on inertial and satellite navigation and traversed path calculation, which will allow it to move in an apple orchard and automatically perform various technological operations, such as fertilization, growth diseases control of, fruit harvesting. (*Materials and methods*) A mathematical model was developed to control the movement of a robotic platform, taking into account the turning radii of three types, the length of the arc of the performed circle, the speed of movement in the garden plantation rows using a garden electronic map. The method used allows implementing a program for the robotic platform automatic movement around a typical orchard using a minimum set of sensors, significantly reducing the load on the onboard computer processor and memory. Software, developed in the Python programming language, enables plotting the robotic platform route, displaying the movement trajectory, and indicating the positioning accuracy at each point in relation to the trees in the garden plantation rows, the movement speed and the wheel rotation angle. (*Results and discussion*) The robotic platform managed to autonomously pass the preset routes, while the interaction of the software and the robotic platform hardware was provided. A field testing of the developed software was performed. (*Conclusions*) The specified accuracy of the robotic platform positioning was confirmed for the 3.5-meter aisles of intensive orchards. The maximum deviation from the task map using satellite and inertial navigation system was 164 millimeters, which complies with the agrotechnical requirements for mechanized fruit harvesting.

Keywords: gardening automation, robotic platform, robotic platform motion control, route setting, control algorithm, autonomous navigation in gardens.

■ **For citation:** Khort D.O., Kuttyrev A.I., Smirnov I.G., Moiseev G.V., Soloviev V.I. Upravlenie dvizheniem sel'skokhozyaystvennoy avtonomnoy robotizirovannoy platformy [Agricultural autonomous robotic platform motion control]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N1. 25-34 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-25-34. EDN UXTRFN.

Механизация сельского хозяйства позволила значительно повысить производительность труда. Однако в некоторых направлениях по-прежнему велика доля ручного труда. Например, в садоводстве она может составлять до 50% затрат [1-3]. В связи с этим актуальна разработка роботизированных решений. Известны примеры коммерческого использования автоматизированного колесного тракторного оборудования при подготовке и проведении посевных работ, борьбе с сорной растительностью и вредителями, прогнозировании урожайности и уборке зерновых культур.

Несмотря на то, что такие роботизированные машины начали создавать в конце 1960-х годов, роботы в садоводстве до сих пор не доведены до коммерческого использования, хотя было разработано много прототипов [4, 5]. В частности, существуют прототипы колесных платформ для сбора плодов с помощью манипуляторов. При движении в рядах садовых насаждений маршрут обычно планируют заранее в соответствии с навигацией по проходам, а не по отдельным деревьям [6-9]. Например, платформа, движущаяся по предварительно спроектированной карте сада с коррекцией на основе лазерного сканирования, может перемещаться по проходу, избегать препятствия [10]. В другом варианте реализовано беспилотное передвижение по садам с использованием компьютер-

ного зрения и ультразвуковых датчиков [11]. Полевые испытания в персиковом саду длиной 27 м и шириной 6,4 м показали, что среднеквадратичная ошибка позиционирования (*RMSE*) составила 3,5 см. Аналогичная платформа, использующая 2D-лидарную обработку с использованием фильтра частиц (*PF*) и фильтра Калмана (*KF*), в полевых испытаниях показала ошибку позиционирования 5,5 см для *PF* и 8,8 см для *KF* [12]. Однако эти платформы не могут совершать повороты между проходами в автоматическом беспилотном режиме. Платформа для перемещения контейнеров по садам, на базе *GPS*, с четырьмя колесами и независимым управлением, продемонстрировала в ходе полевых испытаний *RMSE* 6,0 см [13]. Кроме того, при перемещении по проходу, а также из ряда в ряд, возможно позиционирование, основанное на лазерном сканировании [14-18]. При адаптации подхода *B-patterns* в качестве оптимального маршрута роботизированной платформы в садах выбирается тот, где наиболее полезный путь [19].

Теория автоматического управления колесных платформ начала развиваться с момента миниатюризации вычислительных средств, которые можно на нее установить. Важным этапом в этой сфере стали уравнения движения. В исследованиях российских ученых рассматривается многофакторная модель дифференциальных уравнений движения колесной тех-

ники по сложной криволинейной траектории, что делает ее настройку и применение для работы в саду достаточно трудоемкой и требующей квалифицированных специалистов [20-23].

Цель исследования – разработка системы управления движением автономной роботизированной колесной платформы на основе инерциальной и спутниковой навигации и расчета преодолеваемого пути, что позволит ей перемещаться в плодовом саду и автоматически выполнять различные технологические операции, такие как внесение удобрений, контроль роста и болезней, уборка урожая плодов.

Материалы и методы. Роботизированная платформа построена по модульному принципу с открытой архитектурой для индивидуального формирования конфигурации в соответствующей ценовой категории, с учетом потребностей пользователя и особенностей садовых насаждений (рис. 1).

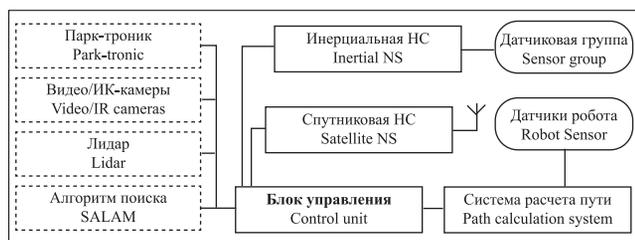


Рис. 1. Конфигурация навигационного и управляющего оборудования роботизированной платформы

Fig. 1. Configuration of the robotic platform navigation and control equipment

В наиболее простом варианте системы управления роботизированной платформы задействована навигация с помощью метода расчета преодолеваемого пути. Для этого используются низкоуровневые датчики, входящие в состав механизмов управления платформы (положения рулевой рейки, скорости вращения ведущих колес и др.). Применяя известные алгоритмы и зная угол поворота колес и количество их оборотов, можно рассчитать, в каком направлении и на какое расстояние сместится роботизированная платформа относительно начальной точки. Однако при таком способе происходит накопление ошибки вследствие неточности измерений, люфтов механических частей и неровности поверхности почвы.

Для повышения точности и коррекции вышеперечисленных ошибок следует использовать более точные навигационные системы, построенные на принципах инерциальной или спутниковой навигации. Современные спутниковые навигационные системы (СНС) с кинематической технологией реального времени имеют небольшую антенну, обеспечивают точность позиционирования не более 10 см. Высокой степени точности способствует сочетание с удаленной базовой станцией управления и коррекции, которая постоянно расположена на земле в пределах радио-

видимости и накапливает координаты местоположения робота. Недостаток СНС – его зависимость от стабильности спутникового сигнала.

Для защиты от его пропадания или искажения рекомендуется в паре с СНС использовать инерциальную навигационную систему (ИНС). Она работает по принципу расчета пути, но уже на специализированной группе датчиков. В состав таких датчиков могут входить акселерометры, электронные гироскоп и компас, которые позволяют определять угловое и пространственное положение роботизированной платформы с высокой точностью, путем расчета ускорений по каждой из осей. Такие системы в настоящее время используются на беспилотных воздушных судах. Однако датчики в такой системе чувствительны к резким толчкам при езде по неровной поверхности почвы.

В результате проведенного анализа предлагается в базовом варианте системы навигации и управления роботизированной платформой комбинировать СНС, ИНС и систему расчета пути для взаимной коррекции относительно друг друга, с резервированием на случай выхода из строя одной или нескольких из них. Для этого все вышеперечисленные системы поставляют первично обработанные данные в блок управления, где происходят фильтрация, комбинирование данных из разных каналов и формирование окончательных координат пространственного и углового положения роботизированной платформы в рядах насаждений. Если дополнительно оснастить платформу радиоинтерфейсом, то возможно взаимодействие с устройством оператора (ноутбуком, планшетом, смартфоном и т.д.) и установленным на него программным обеспечением (ПО). ПО обеспечивает загрузку и корректировку программы и маршрута движения в рядах садовых насаждений, помогает отслеживать статус выполненных технологических операций и работоспособность бортовых систем.

ПО роботизированной платформы в соответствии с архитектурой построено на модульной основе и состоит из нескольких основных элементов (рис. 2).

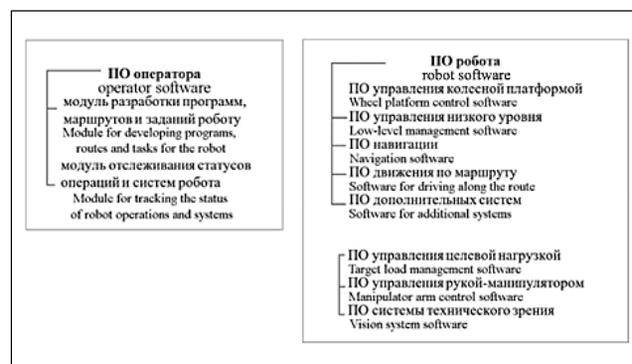


Рис. 2. Элементы программного обеспечения роботизированной платформы

Fig. 2. Elements of the robotic platform software

ПО состоит из операторской и бортовой частей. Первая содержит модуль, обеспечивающий построение маршрута движения и постановки задачи на выполнение технологических операций, а также модуль отслеживания и визуализации статуса выполняемых операций и состояния систем роботизированной платформы. Бортовая часть также делится на две составляющие: ПО управления колесной платформой и ПО управления рабочими органами (технологическими адаптерами).

В результате анализа существующих систем управления мы предложили адаптированную под условия промышленного плодового сада модель движения колесной роботизированной платформы. Известно, что в таком саду деревья расположены рядами с установленным интервалом посадки. Роботизированная платформа должна перемещаться в междурядье, делая развороты в конце ряда для заезда в следующее. Соответственно, маршрут движения роботизированной платформы можно описать типовыми траекториями, состоящими из участков прямых и дуг окружностей постоянного радиуса. Перемещение роботизированной платформы сводится к основным типовым траекториям (рис. 3).

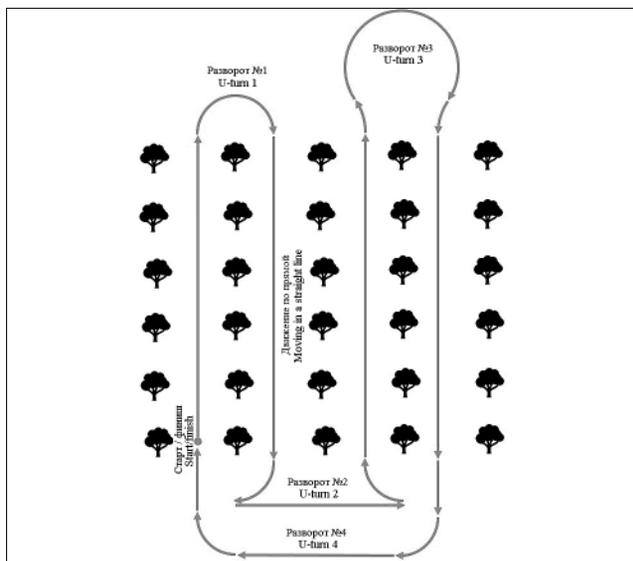


Рис. 3. Типичная траектория движения роботизированной платформы

Fig. 3. Typical trajectory of robotic platform movement

Предусмотрены 4 варианта возможных разворотов:

- № 1 – при заезде в соседний ряд;
- № 2 – при ограничении ширины поворотной полосы;
- № 3 – при недостаточном радиусе поворота роботизированной платформы для заезда в соседний ряд;
- № 4 – при переезде в конкретный ряд или завершении выполнения технологической операции.

Роботизированная платформа реализована на 4-колесном шасси, с двумя ведущими и двумя поворотными колесами. Чтобы реализовать указанные выше

маневры, необходимо построить математическую модель движения роботизированной платформы по ним. Для этого введены условные обозначения характеристик платформы и пространственно-угловых положений (рис. 4).

Наложим на обрабатываемый сад плоскую систему координат XOY . Ось OX направлена на север, а OY на запад. Величинами x и y обозначим координаты роботизированной платформы, привязанные к центру передней оси (геометрический центр поворотных колес), а величиной φ – курс или азимут (угол поворота роботизированной платформы относительно направления на север).

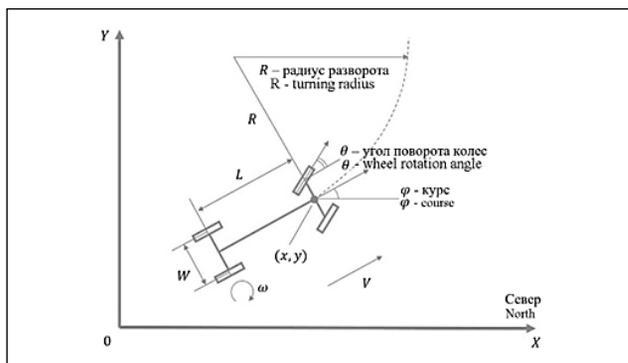


Рис. 4. Обозначения пространственно-углового положения роботизированной платформы: L – колесная база; W – ширина колеи; V – скорость движения робота; ω – угловая скорость вращения задних ведущих колес

Fig. 4. Designations of the spatial-angular position of the robotic platform: L – wheelbase; W – track width; V – speed of the robot movement; ω – angular rotation speed of the rear driving wheels

Управлениями высокого уровня считаются:

- радиус разворота R ;
- длина дуги выполняемой окружности $\Delta\varphi$;
- скорость движения V .

Длина дуги совпадает с изменением курса роботизированной платформы при повороте, поэтому обозначается той же величиной (рис. 5). Эти величины может задавать оператор при формировании маршрута объезда сада, либо их можно вычислить по нарисованной оператором траектории движения.

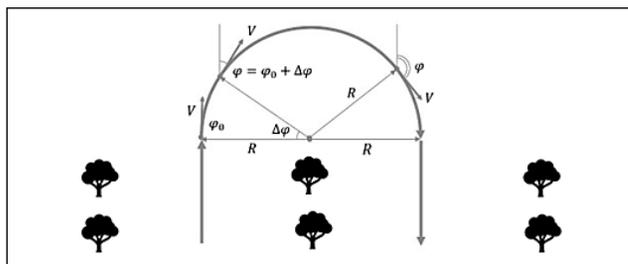


Рис. 5. Управление высокого уровня: V – скорость движения; φ – азимут; R – радиус разворота

Fig. 5. High-level controls: V – the speed of movement; φ – azimuth; R – turning radius

Для реализации заданного поворота необходимо ввести управления низкого уровня: угол поворота передних колес θ и угловую скорость вращения задних колес ω . Отрицательная скорость будет обозначать движение роботизированной платформы задним ходом.

Чтобы выполнить поворот необходимого радиуса, надо повернуть колеса на угол θ и вращать с угловой скоростью ω , которые рассчитываются формулам:

$$\theta = \pm a \sin L/R; \tag{1}$$

$$\omega = \pm V/r, \tag{2}$$

где r – радиус колес.

Знаки « \pm » здесь и далее обозначают разные направления движения.

Двигаться нужно до тех пор, пока азимут роботизированной платформы не изменится на угол $\Delta\varphi$:

$$\varphi = \varphi_0 \pm \Delta\varphi. \tag{3}$$

Используя параметрическую запись уравнения окружности в полярных координатах, находим, что роботизированная платформа переместится в точку:

$$x = x_0 \pm V \cos \Delta\varphi; \tag{4}$$

$$y = y_0 \pm V \sin \Delta\varphi. \tag{5}$$

Устремляя к минимальному пределу шаг разворота $\Delta\varphi$, получаем систему дифференциальных уравнений, описывающих движение колесного робота по дуге окружности:

$$\dot{x} = V \cos \varphi; \tag{6}$$

$$\dot{y} = V \sin \varphi; \tag{7}$$

$$\dot{\varphi} = V/R^*. \tag{8}$$

Подставляя вместо V и R значения управлений θ и ω , получаем систему дифференциальных уравнений движения робота по дуге окружности:

$$\dot{\varphi} = \omega r \sin \theta / L; \tag{9}$$

$$\dot{x} = \omega r \cos \varphi; \tag{10}$$

$$\dot{y} = \omega r \sin \varphi. \tag{11}$$

Если предположить, что прямая – это дуга окружности бесконечного радиуса, то данная система подходит и для описания движения робота по участкам прямой:

$$\dot{\varphi} = 0; \tag{12}$$

$$\dot{x} = \omega r \cos \varphi; \tag{13}$$

$$\dot{y} = \omega r \sin \varphi. \tag{14}$$

Таким образом, с помощью предлагаемых дифференциальных уравнений движения колесной роботизированной платформы можно переводить нарисованные оператором сложные траектории движения в набор управлений ($V, R, \Delta\varphi$) (рис. 6).

Разработанной математической моделью можно пользоваться даже при наличии у роботизированной

платформы только базовой системы расчета пути (рис. 1). При установке СНС и/или ИНС измеренные текущие координаты робота (x, y, φ) сравниваются с плановыми значениями. При отклонениях управления низкого уровня (θ, ω) корректируются путем введения дополнительных слагаемых стабилизации движения по маршруту, выполняемому по определенному алгоритму (рис. 7).

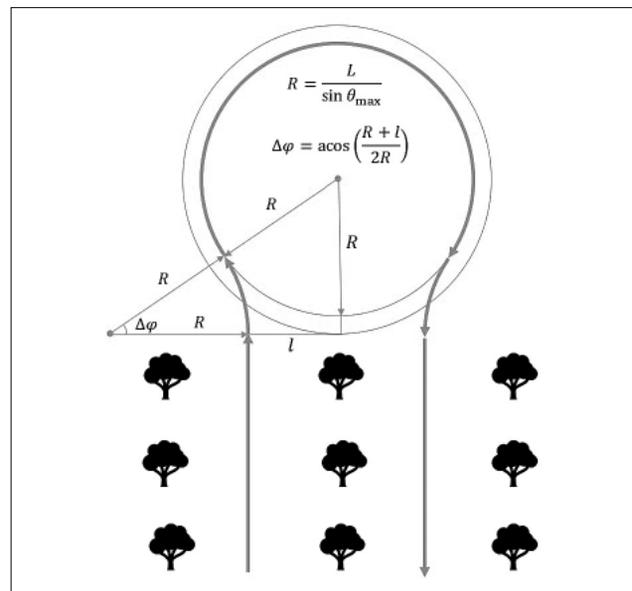


Рис. 6. Вычисление управлений на сложной траектории
Fig. 6. Calculation of complex trajectory control

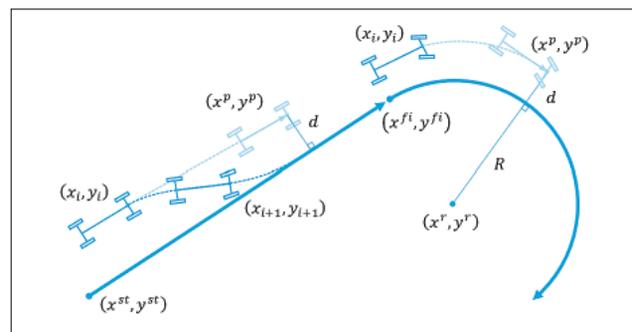


Рис. 7. Компенсация бокового отклонения
Fig. 7. Elimination of lateral deflection

В начальном положении мы имеем какие-то исходные значения управлений:

$$\theta = 0^\circ;$$

$$\omega = V/r.$$

На первом этапе дифференциальные уравнения движения робота интегрируем на n шагов вперед, чтобы получить прогнозируемое положение робота – точку (x^p, y^p) , в которую он придет через некоторое время, сохраняя текущие значения управлений (9)–(11).

Вторым шагом станет определение из прогнозной точки отклонения робота от линии заданного пути d . Так как маршрут разбит на участки прямых и дуг

окружностей, то это отклонение будет вычисляться по-разному.

Прямой участок задается координатами начала и конца отрезка (x^{st}, y^{st}) и (x^{fi}, y^{fi}) . Тогда отклонение рассчитывается по формуле расстояния от точки до прямой, заданной координатами двух точек:

$$d = \frac{(y^{fi} - y^{st})x^p - (x^{fi} - x^{st})y^p + x^{fi}y^{st} - y^{fi}x^{st}}{\sqrt{(y^{fi} - y^{st})^2 + (x^{fi} - x^{st})^2}}$$

Если участок поворота задается центром окружности (x^r, y^r) и радиусом дуги разворота R , то боковое отклонение робота вычисляется как разность расстояния до центра окружности и ее радиуса:

$$d = \sqrt{(x^p - x^r)^2 + (y^p - y^r)^2} - R.$$

На третьем этапе для компенсации бокового отклонения необходимо вычислить доворот передних колес $\Delta\theta$, позволяющий вернуться на заданную траекторию:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{\max} \tanh d,$$

где $\tanh(\dots)$ – гиперболический тангенс, позволяющий плавно компенсировать боковое отклонение;

$\Delta\theta_{\max}$ – максимальный диапазон подруливания колес.

Затем уточняем текущий угол поворота колес θ на величину $\Delta\theta$:

$$\theta^{\text{н}} = \theta + \Delta\theta.$$

Наконец, интегрируем основную систему дифференциальных уравнений. Тем самым определяем новое пространственно-угловое положение робота – точку, в которую он переместится, и новый курс:

$$\varphi_{i+1} = \varphi_i + \dot{\varphi};$$

$$x_{i+1} = x_i + \dot{x};$$

$$y_{i+1} = y_i + \dot{y}.$$

Повторяем алгоритм до тех пор, пока не будет достигнута некоторая окрестность ε конечной точки (x^{fi}, y^{fi}) :

$$\sqrt{(x_{i+1} - x^{fi})^2 + (y_{i+1} - y^{fi})^2} \leq \varepsilon.$$

Представленный метод позволяет реализовать программу автоматического движения роботизированной платформы по типовому плодовому саду с применением минимального набора датчиков, существенно снижая нагрузку на процессор и память бортовых вычислителей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для построения маршрута движения роботизированной платформы разработали ПО, позволяющее отображать траекторию движения с указанием точности позиционирования в каждой точке относительно деревьев в рядах садовых насаждений, скорости движения и угла поворота колес.

С помощью программного модуля выдаются координаты X , Y , скорости и азимута движения, а также визуализируются перемещения платформы по заданным типовым траекториям разворота в интенсивном саду (рис. 8).

ПО разработано на языке программирования *Python*. Реализовано взаимодействие программы с аппаратной частью роботизированной платформы. Для этого настроена передача данных через последовательный порт (COM-порт) и разработана программа для проверки передачи данных, результатом которой стало перемещение роботизированной платформы в зависимости от данных, выдаваемых программой.

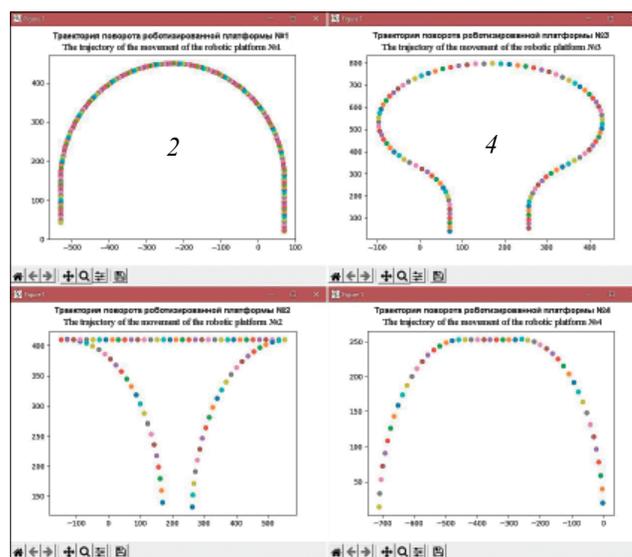


Рис. 8. Заданные типовые траектории разворота роботизированной платформы в интенсивном саду: № 1 – разворот через ряд; № 2 – разворот с помощью заднего хода; № 3 – разворот большого радиуса; № 4 – разворот с проездом по прямой
Fig. 8. The specified typical turn trajectories of a robotic platform in an intensive garden: № 1 – a turn through a row; № 2 – a reverse turn; № 3 – a large radius turn; № 4 – a turn with a straight line

Для создания маршрута в интерфейсе разработанного ПО возможно использование следующих команд:

1. Нажатие на левую кнопку мыши (ЛКМ) позволит построить маршрут выполнения технологической операции (красным обозначатся деревья, которые необходимо обработать).

2. Нажатие на правую кнопку мыши (ПКМ) – выделить пропуски в рядах деревьев, обработка которых не требуется (выделятся черным).

3. Нажатие на ЛКМ в свободном месте – отметить точки остановки роботизированной платформы (синим цветом).

После создания маршрута движения визуализируется траектория объезда точек остановки платформы. Роботизированная платформа начинает движение. При этом в левом верхнем углу отображаются время, угол поворота колес и скорость их вращения. При за-

крытии программы формируется файл *output.xlsx*, в котором сохраняется построенный маршрут движения (рис. 9).

После настройки передачи данных автоматически запускается выполнение маршрута, для которого требуются данные от аналогового датчика угла поворота рулевой части. Для обеспечения точности получаемых данных применен фильтр скользящего среднего.



Рис. 9. Интерфейс программного модуля для построения маршрута движения роботизированной платформы
 Fig. 9. Interface of the software module for building the route of the robotic platform

Реализовано автономное выполнение роботизированной платформой заданных маршрутов (табл. 1). Проведено полевое тестирование разработанного ПО в составе роботизированной платформы (рис. 10).

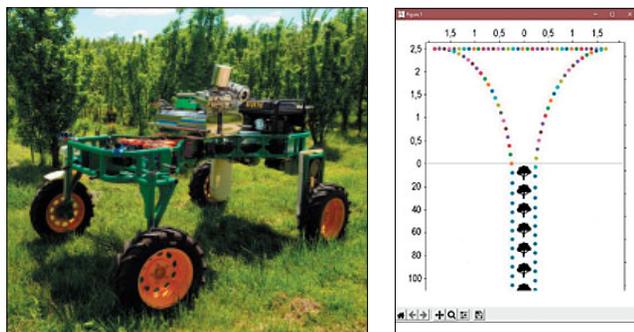


Рис. 10. Полевое тестирование разработанного ПО в составе роботизированной платформы
 Fig. 10. Field testing of the software developed as part of a robotic platform

В результате анализа полученных экспериментальных данных подтверждена заданная точность позиционирования. После сопряжения и калибровки маяков погрешность местоположения, спроектированная с помощью разработанного ПО, не превышает 3 см.

Установлены максимальные и минимальные значения отклонения от оси междурядья при движении роботизированной платформы по карте задания с помощью разработанного ПО и при движении роботизированной платформы по карте задания с использо-

Таблица 1		Table 1
ХРОНОЛОГИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ МАРШРУТА «СБОР УРОЖАЯ ПЛОДОВ ЯБЛОНИ С РАЗВОРОТОМ С ПОМОЩЬЮ ЗАДНЕГО ХОДА» CHRONOLOGY OF THE ROUTE «HARVESTING APPLE FRUITS WITH A REVERSE TURN»		
№	Старт программы, начало движения, с Start of the program, start of movement, s	0
1	Установка скорости передвижения вдоль линии ряда, км/ч Setting the speed of movement along the row line, km/h	5
2	Движение вдоль линии ряда, с Movement along the row line, sec	220
3	Старт разворота с помощью заднего хода, с Starting a U-turn with the help of the reverse gear, sec	5
4	Установка скорости передвижения в повороте, км/ч Setting the movement speed for a turn, km/h	1,5
5	Начало поворота рулевой части налево, с The beginning of turning the steering part to the left, s	0
6	Поворот завершен, угол $\approx 30^\circ$, выполнение поворота налево на 90° , с The turn is completed, the angle is $\approx 30^\circ$, performing a 90° left turn, s	24
7	Поворот завершен, остановка, включение заднего хода, с The turn is completed, stop, starting the reverse gear, s	14
8	Движение задним ходом завершенно, остановка, поворот рулевой части налево, с The reverse movement is completed, stop, turning the steering part to the left, sec	24
9	Поворот завершен, угол $\approx 30^\circ$, выполнение поворота налево на 90° , с The turn is completed, the angle is $\approx 30^\circ$, performing a 90° left turn, s	14
10	Поворот завершен, движение прямо, вдоль линии ряда, с The turn is completed, the movement is straight, along the row line, s	220
11	Установка скорости передвижения вдоль линии ряда, км/ч Setting the speed of movement along the row line, km/h	5
12	Старт разворота с помощью заднего хода, с Starting a turn with the help of the reverse gear, s	0
13	Установка скорости передвижения в повороте, км/ч Setting the movement speed for a turn, km/h	1,5
14	Начало поворота рулевой части налево, с The beginning of turning the steering part to the left, s	5
15	Поворот завершен, угол $\approx 30^\circ$, выполнение поворота налево на 90° , с The turn is completed, the angle is $\approx 30^\circ$, performing a 90° left turn, s	24
16	Поворот завершен, остановка, включение заднего хода, с The turn is completed, stop, starting the reverse gear, s	14
17	Движение задним ходом завершенно, остановка, поворот рулевой части налево, с The reverse movement is completed, stop, turning the steering part to the left, s	24
18	Поворот завершен, угол $\approx 30^\circ$, выполнение поворота налево на 90° , с The turn is completed, the angle is $\approx 30^\circ$, performing a 90° left turn, s	14
19	Остановка платформы, с / Platform stop, s	12
20	Итого продолжительность выполнения маршрута, с Total, calculation of the route duration, s	614

Таблица 2

Table 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ПОЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА / RESULTS OF THE FIELD EXPERIMENT

Варианты движения Movement options	Отклонения, мм / Deviation, mm			Дисперсия по генеральной совокупности, мм ² Population variance, mm ²
	минимум minimum	максимум maximum	среднеквадратическое root mean square	
По карте задания According to the task map	-229	212	118	17659
По карте задания с использованием спутниковой и инерциальной навигационных систем According to the task map using satellite and inertial navigation systems	-102	164	42	2828

ванием спутниковой и инерциальной навигационных систем (табл. 2, рис. 10).

Максимальные отклонения от осевой линии междурядья при движении по карте задания с использованием СНС и ИНС уменьшились на 22,6%, а среднеквадратическое отклонение – на 64,2% (рис. 11).

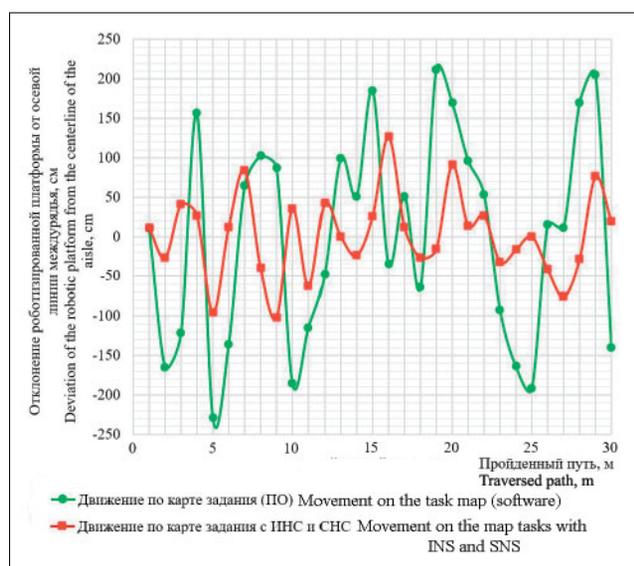


Рис. 11. Фрагмент графика зависимости пройденного пути от отклонения роботизированной платформы от осевой линии междурядья

Fig. 11. A fragment of the graph showing the dependence of the traversed path length on the deviation of the robotic platform from the aisle centerline

Выводы. Разработали систему управления движением автономной роботизированной колесной платформы на основе инерциальной и спутниковой навигации и расчета преодолеваемого пути. Разработанное ПО позволяет проектировать маршрут движения, обеспечивает перемещение в плодовом саду и автоматическое выполнение различных технологических операций, таких как внесение удобрений, контроль роста и болезней, уборка урожая плодов. Разработанная математическая модель для управления движением роботизированной платформы в рядах садовых насаждений с использованием карты сада позволяет осуществлять вычисление управлений на сложной траектории в режимах *online* и *offline*.

В результате проведения полевых исследований подтверждена заданная точность позиционирования роботизированной платформы в междурядьях садов интенсивного типа 3,5 м. Максимальное отклонение при движении по карте задания с использованием СНС и ИНС составило 164 мм, что удовлетворяет агротехнические требования к механизированной уборке плодов.

Хронология выполнения маршрута «Сбор урожая плодов яблони с разворотом с помощью заднего хода» выполнена за 614 с на длине ряда 740 м, при этом устойчивое движение платформы вдоль линии ряда осуществлялось в течение 440 секунд, на выполнение разворота с помощью заднего хода было затрачено 82,5 с, что не превышает 15% затрат времени на холостой разворот и соответствует требуемой производительности при эксплуатации машинных агрегатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Shafi, U., Mumtaz R., García-Nieto J., Hassan S.A., Zaidi S.A.R., Iqbal N. Precision agriculture techniques and practices: From considerations to applications. *Sensors*. 2019. N9. 3796.
- Moysiadis V., Sarigiannidis P., Vitsas V., Khelifi A. Smart farming in Europe. *Computer Science Review*. 2021. N39. 100345.
- Blok P., Boheemen K., van Evert F.K., IJsselmuiden J., Kim G.-H. Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N157. 261-269.
- Himesh S. Digital revolution and Big Data: A new revolution in agriculture. *CAB Reviews*. 2018. N13. 1-7.
- Zhang Y. The Role of Precision Agriculture. *Resource*. 2019. N19. 9.
- Khort D.O., Kutyrev A.I., Smirnov I.G. Research into the Parameters of a Robotic Platform for Harvesting Apples. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. N463. 149-159.
- Bochtis D., Griepentrog H.W., Vougioukas S., Busato P., Burruto R., Zhou K. Route planning for orchard operations. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N157. 261-269.



puters and Electronics in Agriculture. 2015. N113. 51-60.

8. Khort D., Kutuyev A., Filippov R., Semichev S. Development control system robotic platform for horticulture. *E3S Web of Conferences*. 2021. N262. 01024.
9. Andersen J.C., Ravn O., Andersen N.A. Autonomous rule-based robot navigation in orchards. Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Lecce, Italy. 2010. Vol. 43(16). 43-48.
10. Radcliffe J., Cox J., Bulanon D.M. Machine vision for orchard navigation. *Computers in Industry*. 2018. N98. 165-171.
11. Harper N., McKerrow P. Recognising plants with ultrasonic sensing for mobile robot navigation. *Robotics and Autonomous Systems*. 2001. N34(2-3). 71-82.
12. Blok P., Boheemen K., van Evert F.K., IJsselmuiden J., Kim G.-H. Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N157. 261-269.
13. Jones M.H., Bell J., Dredge D., Seabright M., Scarfe A., Duke M., MacDonald B. Design and testing of a heavy-duty platform for autonomous navigation in kiwifruit orchards. *Biosystems Engineering*. 2019. N187. 129-146.
14. Park H., Kwon J., Hwang T., Kim D.A. Development of Effective Object Detection System Using Multi-Device LiDAR Sensor in Vehicle Driving Environment. *Journal of the KoreaInstitute of Electronic Communication Sciences*. 2018. Vol. 13(2). 313-320.
15. Kim M., Bae S., Kim H. Real-Time 3D-LiDAR Object Detection in Autonomous Vehicle Systems Using Cluster-Based Candidates and DeepLearning. *Journal of the institute of control robotics andsystems*. 2019. Vol. 25(9). 795-801.

16. Zong C.G., Ji Z.J., Yu Y., Shi H. Research on obstacle avoidance method for mobile robot based on multisensor information fusion. *Sensors and Materials*. 2020. N32. 1159-1170.
17. Teixid M., Pallej T., Font D., Tresanchez M., Moreno J., Palacn J. Two-Dimensional RadialLaser Scanning for Circular Marker Detection and External Mobile Robot Tracking. *Sensors*. 2012. N12. 16482-16497.
18. Garrido M. Active optical sensors for tree stem detection and classification in nurseries. *Sensors*. 2014. N14(6). 10783-10803.
19. Luan P.G., Thinh N.T. Real-Time Hybrid Navigation System-Based Path Planning and Obstacle Avoidance for Mobile Robots. *Applied Sciences*. 2020. N10. 3355.
20. Ненайденко А.С., Поддубный В.И., Валекжанин А.И. Моделирование управления движением колесной сельскохозяйственной машины в режиме реального времени // *Тракторы и сельхозмашины*. 2018. N3. С. 32-38.
21. 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.
22. Бейлис В.М., Ценч Ю.С., Коротченя В.М., Старовойтов С.И., Кынев Н.Г. Тенденции развития прогрессивных машинных технологий и техники в сельскохозяйственном производстве // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N4 (33). С. 150-156.
23. Годжаев З.Д., Шевцов В.Г., Лавров А.В., Ценч Ю.С., Зубина В.А. Стратегия машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России до 2030 года (Прогноз) // *Технический сервис машин*. 2019. N4(137). С. 220-229.

REFERENCES

1. Shafi, U., Mumtaz R., García-Nieto J., Hassan S.A., Zaidi S.A.R., Iqbal N. Precision agriculture techniques and practices: From considerations to applications. *Sensors*. 2019. N9. 3796 (In English).
2. Moysiadis V., Sarigiannidis P., Vitsas V., Khelifi A. Smart farming in Europe. *Computer Science Review*. 2021. N39. 100345 (In English).
3. Blok P., Boheemen K., van Evert F.K., IJsselmuiden J., Kim G.-H. Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N157. 261-269 (In English).
4. Himesh S. Digital revolution and Big Data: A new revolution in agriculture. *CAB Reviews*. 2018. N13. 1-7 (In English).
5. Zhang Y. The Role of Precision Agriculture. *Resource*. 2019. N19. 9 (In English).
6. Khort D.O., Kutuyev A.I., Smirnov I.G. Research into the Parameters of a Robotic Platform for Harvesting Apples. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. N463. 149-159 (In English).
7. Bochtis D., Griepentrog H.W., Vougioukas S., Busato P., Beruto R., Zhou K. Route planning for orchard operations. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2015. N113. 51-60 (In English).
8. Khort D., Kutuyev A., Filippov R., Semichev S. Development control system robotic platform for horticulture. *E3S Web of Conferences*. 2021. N262. 01024 (In English).
9. Andersen J.C., Ravn O., Andersen N.A. Autonomous rule-based robot navigation in orchards. Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Lecce, Italy. 2010. Vol. 43(16). 43-48 (In English).
10. Radcliffe J., Cox J., Bulanon D.M. Machine vision for orchard navigation. *Computers in Industry*. 2018. N98. 165-171 (In English).
11. Harper N., McKerrow P. Recognising plants with ultrasonic sensing for mobile robot navigation. *Robotics and Autonomous Systems*. 2001. N34(2-3). 71-82 (In English).
12. Blok P., Boheemen K., van Evert F.K., IJsselmuiden J., Kim G.-H. Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N157. 261-269 (In English).
13. Jones M.H., Bell J., Dredge D., Seabright M., Scarfe A., Duke M., MacDonald B. Design and testing of a heavy-duty platform for autonomous navigation in kiwifruit orchards. *Biosystems Engineering*. 2019. N187. 129-146 (In English).

14. Park H., Kwon J., Hwang T., Kim D.A. Development of Effective Object Detection System Using Multi-Device LiDAR Sensor in Vehicle Driving Environment. *Journal of the KoreaInstitute of Electronic Communication Sciences*. 2018. Vol. 13(2). 313-320 (In English).
15. Kim M., Bae S., Kim H. Real-Time 3D-LiDAR Object Detection in Autonomous Vehicle Systems Using Cluster-Based Candidates and DeepLearning. *Journal of the institute of control robotics and systems*. 2019. Vol. 25(9). 795-801 (In English).
16. Zong C.G., Ji Z.J., Yu Y., Shi H. Research on obstacle avoidance method for mobile robot based on multisensor information fusion. *Sensors and Materials*. 2020. N32. 1159-1170 (In English).
17. Teixid M., Pallej T., Font D., Tresanchez M., Moreno J., Palacn J. Two-Dimensional Radial Laser Scanning for Circular Marker Detection and External Mobile Robot Tracking. *Sensors*. 2012. N12. 16482-16497 (In English).
18. Garrido M. Active optical sensors for tree stem detection and classification in nurseries. *Sensors*. 2014. N14(6). 10783-10803 (In English).
19. Luan P.G., Thinh N.T. Real-Time Hybrid Navigation System-Based Path Planning and Obstacle Avoidance for Mobile Robots. *Applied Sciences*. 2020. N10. 3355 (In English).
20. Nenaydenko A.S., Poddubnyy V.I., Valekzhanin A.I. Modelirovanie upravleniya dvizheniem kolesnoy sel'skokhozyaystvennoy mashiny v rezhime real'nogo vremeni [Simulation of the movement control of a wheeled agricultural machine in real time]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2018. N3. 32-38 (In Russian).
21. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.A.P., Tsench Yu.S., et al. O sinteze robotizirovannogo sel'skokhozyaystvennogo mobil'nogo agregata [About the synthesis of a robotic agricultural mobile unit]. *Vestnik rossiyской sel'skokhozyaystvennoy nauki*. 2019. N4. 63-68 (In Russian).
22. Beylis V.M., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M., Starovoytov S.I., Kynev N.G. Tendentsii razvitiya progressivnykh mashinnykh tekhnologiy i tekhniki v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [Trends in the development of advanced machine technologies and machinery in agricultural production]. *Vestnik VIESH*. 2018. N4(33). 150-156 (In Russian).
23. Godzhaev Z.D., Shevtsov V.G., Lavrov A.V., Tsench Yu.S., Zubina V.A. Strategiya mashinno-tekhnologicheskoy modernizatsii sel'skogo khozyaystva Rossii do 2030 goda (Prognoz) [Strategy of machine-technological modernization of agriculture in Russia until 2030 (Forecast)]. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2019. N4(137). 220-229 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

- Хорт Д.О. – формулирование основных направлений исследований, составление алгоритма управления технологическими процессами, разработка объекта исследований, интерпретация общих выводов;
- Кутырев А.И. – разработка теоретических предпосылок, проведение полевых исследований, составление хронологии выполнения маршрута, обработка результатов исследований, формирование общих выводов;
- Смирнов И.Г. – научное руководство, обоснование актуальности исследования, постановка проблемы, составление плана экспериментальных исследований;
- Моисеев Г.В. – литературный анализ, разработка программного кода ПО, визуализация интерфейса программного модуля;
- Соловьев В.И. – формирование конфигурации навигационного и управляющего оборудования роботизированной платформы.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

- Khort D.O. – formulating the research main directions, goals and objectives, developing an algorithm for controlling technological processes, interpretation of general conclusions, development of the research object;
- Kutyrev A.I. – development of theoretical prerequisites, conducting field research, building a chronology of the route, processing research results, forming general conclusions;
- Smirnov I.G. – scientific guidance, substantiation of the study relevance, problem statement, drawing up a plan for experimental research;
- Moiseev G.V. – literature review, software code development, visualization of the interface of the software module;
- Soloviev V.I. – formation of the configuration of navigation and control equipment of the robotic platform.

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

14.09.2022
15.11.2022

Алгоритм расчета времени полета беспилотного воздушного судна для проведения аэросъемки

Рашид Курбанович Курбанов,

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: smedia@vim.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Показали возможность использования дополнительного подвесного оборудования для проведения аэросъемки с помощью беспилотного воздушного судна. Отметили, что ряд параметров беспилотника и дополнительного подвесного оборудования не учитывается программным обеспечением при расчете времени полета дрона на одном заряде аккумуляторной батареи. (*Цель исследования*) Разработать алгоритм для расчета времени полета беспилотного воздушного судна с установленным подвесным оборудованием. (*Материалы и методы*) Изучили технические характеристики *DJI Phantom 4 pro* и *DJI Matrice 200v2*, а также спецификации мультиспектральных камер *Parrot Sequoia*, *MicaSense Altum*, устанавливаемых на беспилотник. Использовали результаты научных исследований по расчету времени полетного задания в зависимости от длины маршрута и емкости аккумуляторной батареи. (*Результаты и обсуждение*) Установили, что максимальное время полета беспилотника с дополнительным подвесным оборудованием сокращается из-за повышенной массы, потребляемой им мощности, времени предполетной подготовки, полетной нагрузки, необходимости возврата в точку взлета и сохранения ресурса аккумуляторной батареи. Рассчитали максимальное время полета *DJI Phantom 4 pro* и *DJI Matrice 200v2* с мультиспектральными камерами *Parrot Sequoia*, *MicaSense Altum* – 8 и 18 минут соответственно, при минимальной полетной нагрузке. Определили метод расчета количества аккумуляторных батарей для проведения аэросъемки с дополнительным подвесным оборудованием. (*Выводы*) Разработали алгоритм для расчета времени полета беспилотника с дополнительным подвесным оборудованием, учитывающий параметры, не включенные в расчет времени полета стандартным программным обеспечением.

Ключевые слова: цифровое сельское хозяйство, беспилотное воздушное судно, аэрофотосъемка, мультиспектральная камера, подвесное оборудование, полетное задание, время полета.

■ **Для цитирования:** Курбанов Р.К. Алгоритм расчета времени полета беспилотного воздушного судна для проведения аэросъемки // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №1. С. 35-40. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-35-40. EDN LFBYUM.

Algorithm for Calculating the Flight Time of an Unmanned Aerial Vehicle for Aerial Photography

Rashid K. Kurbanov,

Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: smedia@vim.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper shows the possibility of using unmanned aerial vehicles with additional outboard equipment for aerial photography. It is noted that some parameters of the drone and additional suspension equipment are not taken into account by the software when calculating the drone flight time for one battery charge. (*Research purpose*) To develop an algorithm for calculating the flight time of an unmanned aerial vehicle with installed outboard equipment. (*Materials and methods*) The technical characteristics of *DJI Phantom 4 pro* and *DJI Matrice 200v2* were studied, as well as the specifications of *Parrot Sequoia*, *MicaSense Altum* multispectral cameras mounted on the drone. The existing research results are used to calculate the flight mission time depending on the route length and the battery capacity. (*Results and discussion*) It is found that the maximum flight time of a drone with additional outboard equipment is reduced due to the additional equipment mass, increased power consumption, the pre-flight preparation time, the need to return to the take-off point and the necessity to preserve the battery life and save the flight load. The maximum flight time calculated for *DJI Phantom 4 pro* and *DJI Matrice 200v2* with multispectral cameras *Parrot Sequoia*,

MicaSense Altum is 8 minutes and 18 minutes, respectively, with a minimum flight load. A method for calculating the number of batteries for aerial photography with additional outboard equipment is determined. (*Conclusions*) An algorithm for calculating the flight time of an unmanned aerial vehicle with additional outboard equipment is developed, the parameters ignored by the standard software in the flight time calculation are taken into account.

Keywords: digital agriculture, unmanned aerial vehicle, aerial photography, multispectral camera, outboard equipment, flight mission, flight time.

For citation: Kurbanov R.K. Algorithm rascheta vremeni poleta bespilnogo vozdušnogo sudna dlya provedeniya aérosemki [Algorithm for calculating the flight time of an unmanned aerial vehicle for aerial photography]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N1. 35-40 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-35-40. EDN LFJBYM.

В сельском хозяйстве большое распространение получили беспилотные воздушные суда (БВС) для мониторинга состояния почв и растений [1-6]. Для повышения эффективности использования ресурсов БВС и оптимизации процесса аэро съемки на борт БВС, кроме RGB камер, устанавливают дополнительное подвесное оборудование (мультиспектральные, гиперспектральные камеры, лазерные сканеры) [7-12]. Однако для его крепления отсутствуют серийно выпускаемые подвесы [13]. Внешние пилоты вынуждены самостоятельно разрабатывать необходимые крепежные элементы [12-13].

Предполетная подготовка беспилотника начинается с его осмотра, установки мультиспектральной камеры или другого подвесного оборудования с помощью специального подвеса [14-17]. Затем настраивают и калибруют датчики БВС и мультиспектральной камеры [18, 19]. Во время предполетной калибровки расходуется заряд аккумуляторной батареи [20]. Подвесное оборудование увеличивает массу БВС и дополнительно расходует заряд аккумуляторов БВС. В итоге дополнительное подвесное оборудование и предполетная подготовка сокращают время одного полета и увеличивают общее время проведения аэро съемки.

Такие параметры, как масса дополнительного оборудования, потребляемая мощность, время предполетной подготовки и полетная нагрузка не учитываются программным обеспечением при расчете времени полета БВС на одном заряде аккумуляторной батареи. В связи с чем информация о времени и необходимом количестве аккумуляторов для проведения аэро съемки исследуемого участка будет некорректной. При расчете фактического полетного времени БВС на одном заряде аккумуляторной батареи необходимо принимать во внимание вышеперечисленные параметры.

Цель исследования – разработка алгоритма для расчета времени полета БВС с установленным подвесным оборудованием.

Материалы и методы. В исследовании использовали технические характеристики БВС *DJI Phantom 4 pro* и *DJI Matrice 200v2*, а также мультиспектральных

камер: *Parrot Sequoia*, *MicaSense Altum* (рис. 1) [21-24].

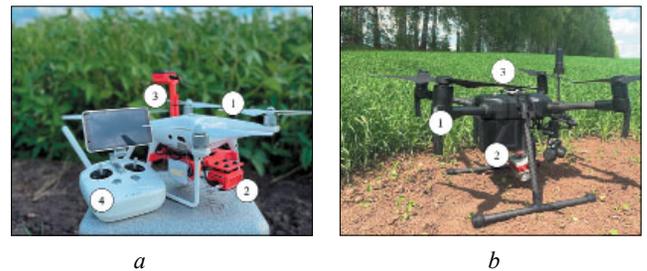


Рис. 1. Платформы на базе БВС, разработанные сотрудниками ФНАЦ ВИМ: а – БВС *DJI Phantom 4 pro* с мультиспектральной камерой *Parrot Sequoia*; б – БВС *DJI Matrice 200 v2* с мультиспектральной камерой *MicaSense Altum* (1 – БВС; 2 – крепление мультиспектральной камеры; 3 – крепление датчика освещенности; 4 – пульт управления БВС)

Fig. 1. UAV-based platforms developed by the FSAC VIM staff: a – UAV *DJI Phantom 4 pro* with *Parrot Sequoia* multispectral camera; b – UAV *DJI Matrice 200 v2* with *MicaSense Altum* multispectral camera (1 – UAV; 2 – multispectral camera mount; 3 – light sensor mount; 4 – UAV control panel)

Для расчета времени полетного задания t_{fly} , мин, использовали выражение [25]:

$$t_{\text{fly}} = \frac{N_y \cdot (L_x + 3 \cdot B_x)}{V_{\text{fly}} \cdot 60}, \quad (1)$$

где N_y – количество пролетов;

V_{fly} – скорость полета, м/с;

B_x – расстояние между центрами соседних изображений, м;

L_x – длина исследуемого участка, м.

Ожидаемое полетное время БВС в соответствии с емкостью аккумуляторной батареи t_{max} , мин, определяется формулой [26, 27]:

$$t_{\text{max}} = Q \cdot \frac{D_{\text{max}}}{I} \cdot 60, \quad (2)$$

где Q – емкость *LiPo* батареи, Ач;

D_{max} – максимальная разрядка аккумуляторной батареи, %;

I – сила тока, А.

Причем:

$$D_{\max} = 100\% - D_r - D_{\text{com}}, \quad (3)$$

где D_r – запас заряда аккумулятора, %;

D_{com} – разрядка аккумуляторной батареи в ходе подготовки БВС и безопасного возврата домой, %;

$$I = m \cdot \left(\frac{P}{V}\right), \quad (4)$$

где m – общая масса оборудования, которое поднимается в воздух, кг;

P – мощность, необходимая для подъема 1 кг оборудования, Вт/кг;

V – напряжение батареи, В.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Формула (2) применима при расчете полетного времени БВС без дополнительного оборудования и в безветренную погоду. Проведение аэросъемки в полевых условиях подразумевает дополнительные полетные нагрузки, например постоянный ветер до 5 м/с и его порывы до 20 м/с. Такие условия сокращают время полета БВС.

Принято считать, что полетная нагрузка, L_{fly} , %, зависит от средней скорости ветра и БВС, а также режима полета (таблица). Чем выше полетная нагрузка, тем меньше полетное время.

Перед каждым полетом следует подготовить БВС и подвесное оборудование, откалибровать и настроить камеры и компас. На предполетную подготовку уходит до 5% заряда аккумуляторной батареи. Для сохранения ее ресурса необходимо оставлять заряд на уровне ~15%. В зависимости от конфигурации поля и вида съемки для совершения безопасного возврата на точку взлета расходуется от 5 до 50% заряда аккумуляторной батареи. В расчетах используется минимальный уровень разряда аккумулятора, необходимый для совершения безопасного возврата на точку взлета. В результате до 20% заряда аккумуляторной батареи не участвуют в расчете полетного времени.

Дополнительное подвесное оборудование, подключенное к борту БВС, снижает его время полета. Чем больше сила тока, необходимая для работы дополнительного подвесного оборудования, тем меньше время полета БВС. В зависимости от технических харак-

теристик мультиспектральной камеры ее мощность варьируется, так как она меняет режим работы. Для обеспечения пиковых нагрузок мультиспектральных камер необходима сила тока: *Parrot Sequoia* – около 3 А, *MicaSense Altum* – 2 А.

С учетом перечисленных параметров, итоговая формула для расчета времени полета выглядит следующим образом:

$$t_{\max} = (Q - Q_{\text{ad}}) \cdot \frac{100\% - D_r - D_{\text{com}}}{(m_1 + m_2) \cdot \frac{P}{V}} \cdot 60 \cdot (1 - L_{\text{fly}}), \quad (5)$$

где m_1 – масса БВС, кг;

m_2 – масса подвесного оборудования, кг;

Q_{ad} – емкость аккумулятора, необходимая для работы дополнительного подвесного оборудования, Ач;
 L_{fly} – полетная нагрузка, %.

В соответствии с полученной формулой рассчитано время полета БВС с подвесным оборудованием на борту при полетной нагрузке 25; 50 и 75% (рис. 2). В соответствии с техническими характеристиками максимальное время полета БВС *DJI Matrice 200 v2* – 38 мин, *DJI Phantom 4 pro* – 30 мин. При аэрофотосъемке с минимальной полетной нагрузкой время полета *DJI Matrice 200 v2* с мультиспектральной камерой *MicaSense Altum* составит ~18 мин, *DJI Phantom 4 pro* с мультиспектральной камерой *Parrot Sequoia* ~8 мин. В рамках рассчитанного времени обеспечивается безопасность полета. Рассчитанное время может быть увеличено до 3 мин вследствие быстрой предполетной подготовки БВС (1% вместо 5%) и меньшего потребления мультиспектральной камеры (в расчете учитываются пиковые значения режима работы).

Количество необходимых аккумуляторных батарей N , шт., для аэрофотосъемки зависит от площади исследуемого участка, поперечного и продольного перекрытия, скорости и высоты полета. При его расчете применимо выражение:

$$N = \left\lceil \frac{t_{\text{fly}}}{t_{\max}} \right\rceil. \quad (6)$$

Разработан алгоритм расчета времени полета БВС с подвесным оборудованием, подключенным к бор-

Изменение полетной нагрузки в зависимости от условий эксплуатации БВС CHANGE IN THE FLIGHT LOAD DEPENDING ON THE UAV OPERATING CONDITIONS			
Параметры Parameters	Минимальная нагрузка Minimum load	Средняя нагрузка Medium Load	Высокая нагрузка High load
Полетная нагрузка, % Flight load, %	25	50	70
Режим полета Flight mode	аэрофотосъемка челночным методом shuttle aerial photography	аэрофотосъемка челночным методом shuttle aerial photography	режим спорт, гонки sport/racing mode
Средняя скорость ветра, м/с Average wind speed, m/s	2	10	10
Средняя скорость БВС, м/с Average UAV speed, m/s	3	12	20

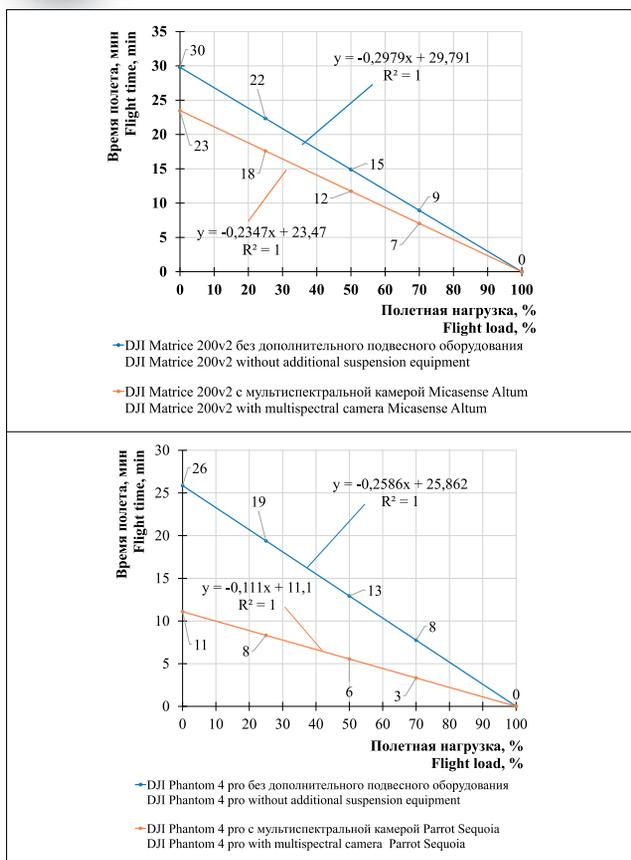


Рис. 2. Время полета БВС с подвесным оборудованием на борту
Fig 2. Flight time of the UAV with additional outboard equipment on board

ту БВС (рис. 3). При изменении параметров полетного задания по возможности меняются значения высоты, направления и скорости полета, продольного и поперечного перекрытия, площади участка. Если на перечисленные параметры повлиять невозможно, то t_{fly} не меняется.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Байгутлина И.А. Испытания новых типов БПЛА // *Практические аспекты применения современных беспилотных летательных аппаратов*. 2022. С. 168-186.
- Костин П.И. Применение беспилотных летательных аппаратов в лесном хозяйстве // *Вестник науки и образования*. 2022. N1-2(121). С. 60-62.
- Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Шогенов Ю.Х. Результаты научных исследований агроинженерных научных организаций по развитию цифровых систем в сельском хозяйстве (окончание) // *Техника и оборудование для села*. 2022. N4(298). С. 2-6.
- Лобачевский Я.П., Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Аспекты цифровизации системы технологий и машин // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N3(36). С. 40-45.
- Мазитов Н.К., Шогенов Ю.Х., Ценч Ю.С. Сельскохозяйственная техника: решения и перспективы // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N3 (32). С. 94-100.
- Ценч Ю.С., Маслов Г.Г., Трубилин Е.Г. К истории развития сельскохозяйственной техники // *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2018. N3(47). С. 117-123.
- Годжаев З.Д., Шевцов В.Г., Лавров А.В., Ценч Ю.С., Зубина В.А. Стратегия машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России до 2030 года (Прогноз) // *Технический сервис машин*. 2019. N4(137). С. 220-229.
- Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С., Бейлис В.М. Создание и развитие систем машин и технологий для комплексной механизации технологических процессов в растениеводстве // *История науки и техники*. 2019. N12. С. 46-55.
- 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.
- Аникеева И.А. Оценка рекомендуемых и допустимых значений показателей изобразительного качества по материалам, полученным различными аэрофотосъемоч-

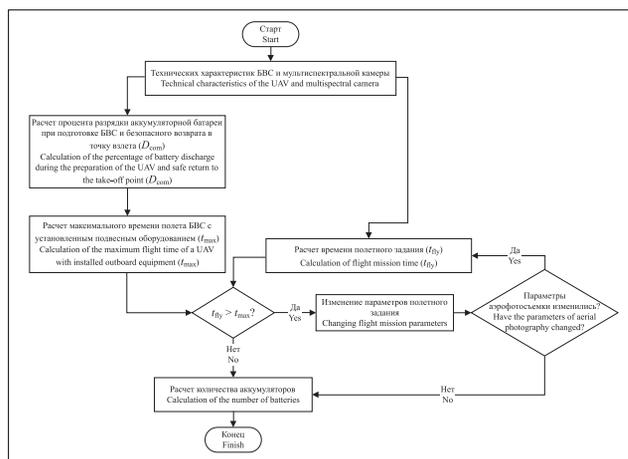


Рис. 3. Алгоритм расчета полетного времени БВС
Fig 3. The algorithm for calculating UAV flight time

Выводы. Разработан алгоритм расчета времени полета БВС с дополнительным подвесным оборудованием. Алгоритм учитывает параметры, которые не включены в стандартный расчет времени полета БВС: массу дополнительного оборудования, потребляемую мощность, время предполетной подготовки, безопасный возврат в точку взлета, сохранение ресурса аккумуляторной батареи и полетную нагрузку. С учетом этих факторов рассчитано время полета *DJI Matrice 200 v2* и *DJI Phantom 4 pro* с мультиспектральной камерой на борту и без нее. Время полета с камерами *MicaSense Altum* и *Parrot Sequoia* составит примерно 18 и 8 мин соответственно. Данный алгоритм позволит спланировать количество необходимых аккумуляторных батарей и точно рассчитать время для проведения аэро съемки с дополнительным подвесным оборудованием. В рамках рассчитанного времени обеспечиваются безопасный полет и предотвращение снижения емкости аккумуляторной батареи.



- ными системами для целей картографирования // *Геодезия и картография*. 2021. N9. С. 30-40.
11. Акинчин А.В., Левшаков Л.В., Линков С.А. и др. Информационные технологии в системе точного земледелия // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2017. N9. С. 16-21.
 12. Костомарин М. Н., Курбанов Р.К., Кынев Н.Г. Точное земледелие расширяет свои границы // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2018. N3. С. 7-9.
 13. Титович М.В., Таргонская М.В., Афанасьева Л.В. и др. Многофункциональная беспилотная мобильная платформа. Обеспечение точного земледелия // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2018. N3(14). С. 898-900.
 14. Kurbanov R., Litvinov M. Development of a gimbal for the Parrot Sequoia multispectral camera for the UAV DJI Phantom 4 Pro. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. N012062.
 15. Морозов С.Е., Чернов В.Ю. Разработка модульного квадрокоптера // *Точная наука*. 2019. N54. С. 25-27.
 16. Przybilla H.-J., Gerke M., Dikhoff I., Ghassoun Y. Investigations on the geometric quality of cameras for UAV applications using the high precision UAV test field zollern colliery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. 2019. N42(2/W13). 531-538.
 17. Кузнецова И.А., Гильязов М.Р. Влияние высоты полета беспилотного летального аппарата при обработке данных в автоматизированных программных обеспечениях // *StudNet*. 2021. Т. 4. N5.
 18. Young D.J.N., Koontz M.J., Weeks J.M. Optimizing aerial imagery collection and processing parameters for drone-based individual tree mapping in structurally complex conifer forests. *Methods in Ecology and Evolution*. 2022. N13(7). 1447-1463.
 19. Степанов С.В., Волков С.С., Набатчиков А.В. Моделирование системы питания БПЛА ближнего действия // *Математика и математическое моделирование: Сб. материалов XVI Всероссийской молодежной научно-инновационной школы*. Саров: Интерконтакт. 2022. С. 31-32.
 20. Yeom J., Jung J., Chang A., Ashapure A., Maeda M., Maeda A., Landivar J. Comparison of vegetation indices derived from uav data for differentiation of tillage effects in agriculture. *Remote Sensing*. 2019. N11. 1548.
 21. Rosas J.T.F., de Carvalho Pinto F.d., de Queiroz, D.M., et al. Coffee ripeness monitoring using a UAV-mounted low-cost multispectral camera. *Precision Agriculture*. 2022. N23. 300-318.
 22. Rogers S.R., Manning I., Livingstone W. Comparing the spatial accuracy of digital surface models from four unoccupied aerial systems: photogrammetry versus LiDAR. *Remote Sensing*. 2020. N12. 2806.
 23. Daugela I., Visockiene J.S., Kumpiene J. Detection and analysis of methane emissions from a landfill using unmanned aerial drone systems and semiconductor sensors. *Detritus*. 2020. N10. 127-138.
 24. Beranek C.T., Roff A., Denholm B., Howell L.G., Witt R.R. Trialling a real-time drone detection and validation protocol for the koala (*Phascolarctos cinereus*). *Australian Mammalogy*. 2020. <https://doi.org/10.1071/AM20043>.
 25. Арзамасцев А.А. Задачи маршрутизации для беспилотных мультироторных летательных аппаратов // *Материалы и методы инновационных исследований и разработок: Сб. статей Международной научно-практической конференции Оренбург: Аэтерна*. 2018. С. 5-8.
 26. Арзамасцев А.А., Крючков А.А. Математические модели для инженерных расчетов летательных аппаратов мультироторного типа (часть 1) // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2014. N19 (6). С. 1821-1828.
 27. Лебедев А.Е. Актуальность использования литиево-полимерных батарей в современном оборудовании // *Сетевой научный журнал ОрелГАУ*. 2016. Т. 1(6). С. 139-151.

REFERENCES

1. Baygutlina I.A. Ispytaniya novykh tipov BPLA [Testing new types of UAVs]. *Prakticheskie aspekty primeneniya sovremennykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov*. 2022. 168-186 (In Russian).
2. Kostin P.I. Primeneniye bespilotnykh letatel'nykh apparatov v lesnom khozyaystve [Application of unmanned aircraft in forestry]. *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 2022. N1-2(121). 60-62 (In Russian).
3. Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Shogenov Yu.Kh. Rezul'taty nauchnykh issledovaniy agroinzhenernykh nauchnykh organizatsiy po razvitiyu tsifrovyykh sistem v sel'skom khozyaystve (okonchanie) [The results of scientific research of agro-engineering scientific organizations on the development of digital systems in agriculture]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2022. N4(298). 2-6 (In Russian).
4. Lobachevskiy Ya.P., Beylis V.M., Tsench Yu.S. Aspekty tsifrovizatsii sistemy tekhnologiy i mashin [Aspects of digitalization of the system of technologies and machines]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N3(36). 40-45 (In Russian).
5. Mazitov N.K., Shogenov Yu.Kh., Tsench Yu.S. Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: resheniya i perspektivy [Agricultural machinery: solutions and prospects]. *Vestnik VIESH*. 2018. N3(32). 94-100 (In Russian).
6. Tsench Yu.S., Maslov G.G., Trubilin E.G. K istorii razvitiya sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [On the history of agricultural machinery development]. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*. 2018. N3(47). 117-123 (In Russian).
7. Godzhaev Z.D., Shevtsov V.G., Lavrov A.V., Tsench Yu.S., Zubina V.A. Strategiya mashinno-tekhnologicheskoy modernizatsii sel'skogo khozyaystva Rossii do 2030 goda (Prognoz) [Strategy of machine-technological modernization of agriculture in Russia until 2030 (Forecast)]. *Tekhnicheskij servis mashin*. 2019. N4(137). 220-229 (In Russian).
8. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S., Beylis V.M. Sozдание i razvitie sistem mashin i tekhnologiy dlya kompleksnoy mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov v rastenievodstve [Cre-

- ation and development of machine systems and technologies for complex mechanization of technological processes in crop production]. *Istoriya nauki i tekhniki*. 2019. N12. 46-55.
9. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Tsifrovye tekhnologii i robotizirovannye tekhnicheskie sredstva dlya sel'skogo khozyaystva [Digital technologies and robotic devices in the agriculture]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2021. N15(4). 6-10 (In Russian).
 10. Anikeeva I.A. Otsenka rekomenduemykh i dopustimyykh znacheniy pokazately izobrazitel'nogo kachestva po materialam, poluchennym razlichnymi aerofotosemochnymi sistemami dlya tseley kartografirovaniya [Assessment of recommended and acceptable image quality indicators' values, based on materials, obtained with various aerial surveying systems for mapping purposes]. *Geodeziya i kartografiya*. 2021. N9. 30-40 (In Russian).
 11. Akinchin A.V., Levshakov L.V., Linkov S.A., et al. Informatsionnye tekhnologii v sisteme tochnogo zemledeliya [Information technology in the precision farming system] *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2017. N9. 16-21 (In Russian).
 12. Kostomakhin M.N., Kurbanov R.K., Kynev N.G. Tochnoe zemledelie rasshiryaet svoi granitsy [Technical support for modernization of AIC]. *Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2018. N3. 7-9 (In Russian).
 13. Titovich M.V., Targonskaya M.V., Afanas'eva L.V., et al. Mnogofunktional'naya bespilotnaya mobil'naya platforma. Obespechenie tochnogo zemledeliya [Multifunctional unmanned mobile platform. provision of exact agriculture]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2018. N3(14). 898-900 (In Russian).
 14. Kurbanov R., Litvinov M. Development of a gimbal for the Parrot Sequoia multispectral camera for the UAV DJI Phantom 4 Pro. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. N012062 (In English).
 15. Morozov S.E., Chernov V.Yu. Razrabotka modul'nogo kvadroptera [Development of a modular quadrocopter]. *Tochnaya nauka*. 2019. N54. 25-27 (In Russian).
 16. Przybilla H.-J., Gerke M., Dikhoff I., Ghassoun Y. Investigations on the geometric quality of cameras for UAV applications using the high precision UAV test field zollern colliery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. 2019. N42(2/W13). 531-538 (In English).
 17. Kuznetsova I.A., Gil'yazov M.R. Vliyaniye vysoty poleta bespilotnogo letalnogo apparata pri obrabotke dannykh v avtomatizirovannykh programmnykh obespecheniyakh [Influence of unmanned aircraft flight altitude during data processing in automated software]. *StudNet*. 2021. Vol. 4. N5 (In Russian).
 18. Young D.J.N., Koontz M.J., Weeks J.M. Optimizing aerial imagery collection and processing parameters for drone-based individual tree mapping in structurally complex conifer forests. *Methods in Ecology and Evolution*. 2022. N13(7). 1447-1463 (In English).
 19. Stepanov S.V., Volkov S.S., Nabatchikov A.V. Modelirovaniye sistemy pitaniya BPLA blizhnego deystviya [Modeling the power system of a short-range UAV]. *Matematika i matematicheskoe modelirovaniye: Sb. materialov XVI Vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-innovatsionnoy shkoly. Sarov: Interkontakt*. 2022. 31-32 (In Russian).
 20. Yeom J., Jung J., Chang A., Ashapure A., Maeda M., Maeda A., Landivar J. Comparison of vegetation indices derived from uav data for differentiation of tillage effects in agriculture. *Remote Sensing*. 2019. N11. 1548 (In English).
 21. Rosas J.T.F., de Carvalho Pinto F.d., de Queiroz, D.M., et al. Coffee ripeness monitoring using a UAV-mounted low-cost multispectral camera. *Precision Agriculture*. 2022. N23. 300-318 (In English).
 22. Rogers S.R., Manning I., Livingstone W. Comparing the spatial accuracy of digital surface models from four unoccupied aerial systems: photogrammetry versus LiDAR. *Remote Sensing*. 2020. N12. 2806 (In English).
 23. Daugela I., Visockiene J.S., Kumpiene J. Detection and analysis of methane emissions from a landfill using unmanned aerial drone systems and semiconductor sensors. *Detritus*. 2020. N10. 127-138 (In English).
 24. Beranek C.T., Roff A., Denholm B., Howell L.G., Witt R.R. Trialling a real-time drone detection and validation protocol for the koala (*Phascolarctos cinereus*). *Australian Mammalogy*. 2020 (In English).
 25. Arzamastsev A.A. Zadachi marshrutizatsii dlya bespilotnykh mul'tirotnykh letatel'nykh apparatov [Routing tasks for unmanned multi-rotor aerial vehicles]. *Materialy i metody innovatsionnykh issledovaniy i razrabotok: Sb. statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Orenburg: Aeterna*. 2018. 5-8 (In Russian).
 26. Arzamastsev A.A., Kryuchkov A.A. Matematicheskie modeli dlya inzhenernykh raschetov letatel'nykh apparatov mul'tirotnogo tipa (chast' 1) [Mathematical models for engineering calculations of aircrafts of multi-rotor type (Part1)]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2014. N19(6). 1821-1828 (In Russian)
 27. Lebedev A.E. Aktual'nost' ispol'zovaniya litievo-polimernykh batarey v sovremennom oborudovanii [The importance of using lithium-polymer batteries in modern equipment]. *Setevoy nauchnyy zhurnal OrelGAU*. 2016. Vol. 1(6). 139-151 (In Russian).

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

14.12.2022
21.02.2023

Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин

Яков Петрович Лобачевский,
академик-секретарь
Отделения сельскохозяйственных наук РАН,
доктор технических наук, профессор,
академик РАН, e-mail: vim@vim.ru;

Денис Александрович Миронов,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: nano.otdel@mail.ru;
Анастасия Владимировна Миронова,
научный сотрудник,
e-mail: timchenko-anastasia93@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что от характеристик рабочих органов существенно зависит эффективность эксплуатации сельскохозяйственных машин или орудий. Подчеркнули важность таких параметров, как надежность и ресурс, которые в значительной степени зависят от износостойкости, прочности, а также от конструктивных особенностей. (*Цель исследования*) Обосновать выбор современных эффективных направлений для повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельхозмашин, а также видов и характеристик применяемых материалов и технологических способов их упрочнения. (*Материалами и методы*) Изучили многолетний опыт работы ФНАЦ ВИМ по данному направлению. Провели предметный анализ соответствующей технической информации. (*Результаты и обсуждение*) Представили основы и условия абразивного изнашивания деталей сельхозмашин. Раскрыли понятие «конструкционной износостойкости». Проанализировали материалы (стали, твердые сплавы) рабочих органов сельхозмашин, используемых в России и за рубежом. Привели их основные сравнительные физико-механические характеристики. Предложили методику выбора базовых конструктивных параметров исходя из прочностных характеристик применяемых материалов. Сравнили наплавочные технологии упрочнения рабочих органов сельхозмашин. Обосновали наиболее эффективные технологические варианты, отдельные технико-экономические параметры, рекомендации по применению материалов. (*Выводы*) Доказали, что применение наплавочных технологий повышает ресурс рабочих органов в 1,5-4,5 раза при значительной экономической эффективности.

Ключевые слова: рабочие органы, износостойкость, ресурс рабочих органов, твердые сплавы, стали, упрочняющие технологии, наплавочные технологии, экономическая эффективность.

Для цитирования: 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. EDN IEUNKO.

Increasing the Operating Lifetime of Wearable Working Bodies of Agricultural Machines

Yakov P. Lobachevskiy,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
member of the Russian Academy of Sciences,
academician-secretary of the Department of Agricultural
Sciences the Russian Academy of Sciences,
e-mail: vim@vim.ru;

Denis A. Mironov,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: nano.otdel@mail.ru;
Anastasiya V. Mironova,
researcher,
e-mail: timchenko-anastasia93@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The efficiency of agricultural machine and tool operation is noted to significantly depend on the characteristics of the working bodies. The paper emphasizes the importance of working bodies' reliability and operating lifetime which largely depend on wear resistance, strength, as well as design features. (*Research purpose*) To substantiate the choice of effective modern directions to increase the operating lifetime of wearable agricultural machine working bodies, the choice of types and characteristics of the

materials used and technological methods for their hardening. (*Materials and methods*) The many years' experience of the FNAC VIM in this area has been studied. A concept analysis of the relevant technical information has been conducted. (*Results and discussion*) The basics and conditions of abrasive wear of agricultural machinery parts are presented. The concept of "structural wear resistance" is clarified. The paper analyzes the materials (steels, hard alloys) of the working bodies of the agricultural machines used in Russia and abroad. Their main comparative physical and mechanical characteristics are pointed out. A method is proposed for selecting basic design parameters based on the strength characteristics of the materials used. Surfacing technologies for hardening the agricultural machine working bodies are compared. The paper substantiates the most effective technological options, individual technical and economic parameters, recommendations for the use of materials. (*Conclusions*) It is proved that the use of surfacing technologies leads to a 1.5-4.5-times increase in the operating lifetime of working bodies and significant economic efficiency.

Keywords: working bodies, wear resistance, operating lifetime of working bodies, hard alloys, steels, hardening technologies, surfacing technologies, economic efficiency.

■ **For citation:** Lobachevskiy Ya.P., Mironov D.A., Mironova A.V. Osnovnye napravleniya povysheniya resursa bystroiznashivaemykh rabochikh organov sel'skokhozyaystvennykh mashin [Increasing the operating lifetime of wearable working bodies of agricultural machines]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N1. 41-50 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50. EDN IEUNKO.

При проведении подготовительных операций для обработки почвы, посевов, ухода за ними и уборки механизированные сельскохозяйственные орудия и рабочие органы подвергаются жесткому абразивному воздействию. Функциональные нарушения в работе сельхозмашин, обусловленные износом деталей, лимитируют длительность эксплуатации. Затраты на ремонт, замену изношенных изделий, а также расходы, связанные с потерями урожайности вследствие вынужденных простоев, некачественной работой изношенных деталей составляют одну из крупнейших статей в сметной стоимости производства сельхозкультур [1].

Обеспечение высокой износостойкости деталей – обязательное условие надежной работы сельхозмашин и получения максимального экономического эффекта от их применения, поскольку именно вследствие износа теряется работоспособность 80-90% подвижных элементов и рабочих органов сельскохозяйственных орудий [2].

Среди различных видов изнашивания деталей наиболее распространено абразивное, когда твердые частицы разрушают поверхностный слой деталей. С изысканием способов повышения сопротивления абразивному изнашиванию связано обеспечение оптимальной долговечности большинства машин и оборудования, применяемых в сельском хозяйстве (рис. 1) [3, 4].

Различают восемь типичных закономерностей абразивного изнашивания конструктивных разновидностей деталей (рис. 1). Самый простой закон изнашивания – линейный (тип I).

При известном предельном износе W_n легко подсчитать срок службы детали:

$$T_d = W_n / K,$$

где K – переходный коэффициент, характеризуемый углом наклона прямой на графике.

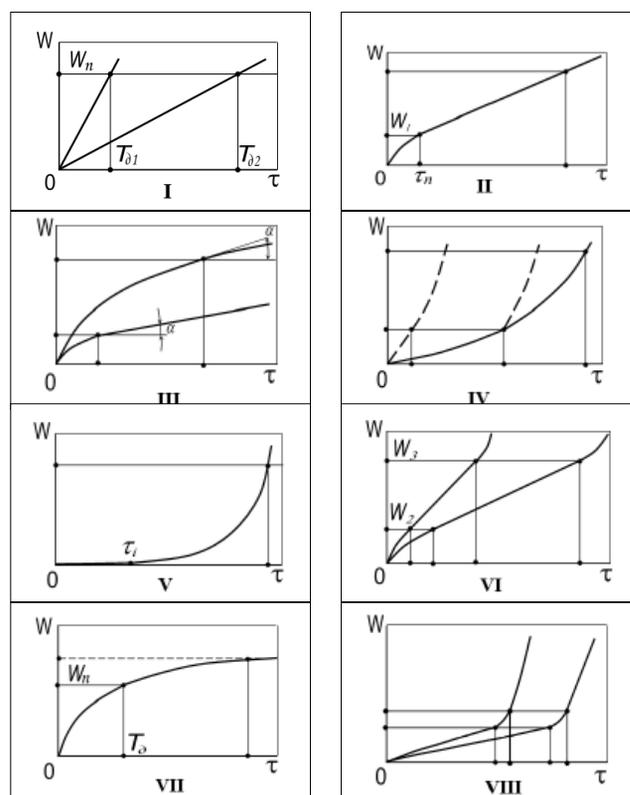


Рис. 1. Типовые графики динамики изнашивания: τ – наработка на изделие (мото-часы, гектары, обороты); W – величина износа (мм, см); τ_n ; T_d – период приработки; W_1 , W_2 , W_3 – критические точки, характеризующие изменения ускорения параметров изнашивания; W_n – предельно допустимые износы

Fig 1. Typical graphs of wear dynamics; τ is the mean time to failure (motor-hours, hectares, revolutions); W is the amount of wear (mm, cm); τ_n ; T_d is running-in period; W_1 , W_2 , W_3 are critical points characterizing changes in the acceleration of wear parameters; W_n - maximum permissible wear

Такая закономерность изнашивания характерна, например, для отвалов плугов, гидротранспортных

устройств. Износ этих элементов не сопровождается существенным изменением условий их эксплуатации, что объясняет постоянство скорости изнашивания.

Закон динамики изнашивания II типа характеризуется периодом приработки длительностью τ_n и последующим стабильным характером изнашивания (шарниры, подшипники скольжения, некоторые двухслойные детали, склонные к относительно устойчивому самозатачиванию).

Монотонное и непрерывно продолжающееся до предельного износа W_n снижение скорости изнашивания наблюдается у монометаллических не самозатачивающихся деталей и инструментов, шестеренок и др. (рис. 1, тип III).

Прогрессирующее увеличение скорости изнашивания отражает отрицательное влияние износа на условия трения деталей, например в гусеничных цепях (рис. 1, тип IV).

График динамики изнашивания V типа характеризуется периодом ($0 - \tau_1$) отсутствия износа с последующим возрастанием скорости изнашивания. Обычно это происходит при наличии латентного (скрытого) периода в процессе изнашивания; при появлении динамических нагрузок вследствие роста зазоров (подшипники скольжения с пылезащитными уплотнениями).

График VI иллюстрирует изменение ускорения изнашивания при значениях износов W_2 и W_3 , имеющих место при изменении внешних условий работы детали (например, механического состава или твердости почвы и др.).

Для динамики изнашивания деталей с пружинным нагружением характерен вид зависимости типа графика VII.

Тип VIII отражает изнашивание деталей с изменяющимися свойствами их материалов по глубине, например цементированных, с послойным изменением износостойкости материала [5].

Распространенность абразивного изнашивания обусловлена не только тем, что многие детали машин, их рабочие органы и инструмент по характеру выполняемых функций неизбежно соприкасаются с материалами, способными вызвать абразивный процесс изнашивания (почвой, грунтом, растительной массой и др.). Абразивное изнашивание подавляет менее интенсивные процессы изнашивания деталей и в тех случаях, когда контакт с посторонними твердыми частицами не связан с работой машины, а обусловлен загрязненностью среды, поскольку практически крайне сложно полностью исключить загрязненность твердыми частицами окружающего воздуха, воды, смазочных материалов, горючего и различных технологических сред, контактирующих с трущимися поверхностями деталей сельскохозяйственных машин [6].

Цель исследования – обосновать выбор современных эффективных направлений для повышения

ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельхозмашин, а также видов и характеристик применяемых материалов и технологических способов их упрочнения.

МАТЕРИАЛАМИ И МЕТОДЫ. Рабочие органы сельскохозяйственных машин разнообразны: лемехи, отвалы, полевые доски плугов; лапы, наральники, долоты культиваторов; диски борон, луцильщики, дисковых плугов; лезвия, диски сошников посевных и посадочных машин; лемехи и ножи различных овощеуборочных машин; сегменты, бичи, ножи и противорезущие брусья зерноуборочных и кормоуборочных машин; распылители ядохимикатов машин для защиты растений и др. (рис. 2). Рабочий орган существенно влияет на качество технологического процесса, его энергоемкость, а также в значительной мере определяет характеристики надежности машины.

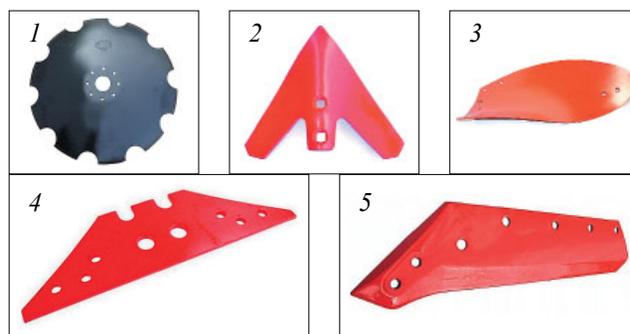


Рис. 2. Основные рабочие органы сельскохозяйственных машин: 1 – диск бороны; 2 – лапа культиватора; 3 – полевая доска; 4 – отвал; 5 – лемех для плугов

Fig. 2. The main working bodies of agricultural machines: 1 – harrow disc; 2 – cultivator paw; 3 – field board; 4 – dump; 5 – ploughshare

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. При выборе материалов рабочих органов необходимо учитывать следующие основные факторы:

- прочность;
- упругие, пластические, ударные свойства;
- износостойкость собственно материала, плотность;
- коррозионную стойкость;
- возможность использования материалов с целью повышения «конструкционной износостойкости»;
- экономический;
- технологический и др.

Наиболее значимые из них – прочность и износостойкость [7, 8].

Понятие «конструкционной износостойкости» включает в себя не только износостойкость материала, но и конструктивные особенности детали. Изготовление из материала высокой износостойкости – не достаточное условие длительного срока службы. Конструкционная износостойкость определяется значением и характером распределения давлений, эффек-

Сталь Steel	Химический состав, масс.% / Chemical composition, wt. %					Твердость, HRC Hardness HRC	Предел прочности, МПа Ultimate tensile strength, MPa	δ , %
	C	Si	Mn	Cr	прочие other			
45	0,42-0,50	0,17-0,37	0,50-0,80	до 0,25	–	39-43	850-1000	7-8
40X	0,36-0,44	0,17-0,37	0,50-0,80	0,80-1,10	Ni – до 0,30 Cu – 0,30	41-45	1150-1350	6-7
Л53	0,44-0,52	0,17-0,37	0,50-0,80	до 0,25	–	40-44	900-1150	6-7
65Г	0,62-0,70	0,17-0,37	0,90-1,2	до 0,25	–	38-42	1000-1180	6-7
60С2	0,57-0,65	1,50-2,00	0,60-0,90	до 0,30	Ni – до 0,25 Cu – 0,20	41-45	1150-1350	6-7
30ХГСА	0,28-0,34	0,90-1,20	0,80-1,10	0,80-1,10	Ni – до 0,30 Cu – 0,30	46-50	1480-1610	7-8

тивностью смазывания, количеством и размерами твердых частиц в контакте трущихся деталей, распределением износа по рабочим поверхностям и многими другими факторами, зависящими от конструкции детали [5].

Помимо выбора конструкции и материалов используют также двухслойные лезвия, упрочняют наиболее изнашиваемые поверхности твердыми сплавами и др [9, 10].

В качестве материала основы рабочих органов сельхозмашин в крупносерийном производстве в России применяют в основном стали марок 45; 40X; Л53; 65Г; 60С2; 30ХГСА (табл. 1) [11].

В Европе режущие рабочие органы почвообрабатывающих и уборочных машин производят из более прочных легированных сталей, имеющих временное сопротивление (предел прочности) $\sigma_b = 1600-2000$ МПа и соответствующую рабочую твердость (табл. 2) [11].

В Германии, Норвегии для изготовления нагруженных рабочих органов сталь дополнительно легируют титаном, ниобием и другими элементами.

В России имеются аналогичные разработки легированных борсодержащих сталей 30Г2Р или 25Х-ТЮР, но в широком серийном производстве металлургического листового проката по ряду причин, имеющих в основном организационно-экономическую основу, их пока нет. Новейшие разработки высокопрочных износостойких полностью конкурентоспособных борсодержащих сталей для высоконагруженных рабочих органов сельхозмашин проведены сотрудниками ЦНИИ КМ «Прометей» при участии ученых ФНАЦ ВИМ (табл. 3) [1, 12]. Высоколегированные стали различаются уровнем прочности.

Изучили относительную износостойкость и твердость различных сталей для изготовления рабочих органов сельхозмашин машин (табл. 4) [12].

Сталь Steel	Содержание элементов ¹ , % (масс.) / Composition of the elements ¹ , % (wt.)							Твердость, HRC Hardness HRC
	C	Si (max)	Mn	P (max)	S (max)	Cr	B ²	
20MnB4	0,17-0,23	0,40	0,70-1,30	0,035	0,040	–	0,0008-0,0050	41-47
20MnB5	0,17-0,23	0,40	1,00-1,60	0,035	0,040	–	0,0008-0,0050	41-45
30MnB5	0,27-0,33	0,40	1,00-1,60	0,035	0,040	–	0,0008-0,0050	47-53
35MnB4	0,32-0,38	0,40	0,70-1,30	0,035	0,040	–	0,0008-0,0050	51-57
35MnB5	0,32-0,38	0,40	1,00-1,60	0,035	0,040	–	0,0008-0,0050	50-56
39MnB5	0,36-0,42	0,40	1,00-1,60	0,035	0,040	–	0,0008-0,0050	53-59
27MnCrB5-2	0,24-0,30	0,40	1,10-1,50	0,035	0,040	0,30-0,70	0,0008-0,0050	47-53
34MnCrB5-2	0,31-0,37	0,40	1,10-1,50	0,035	0,040	0,85-1,25	0,0008-0,0050	50-56
34CrB4	0,31-0,37	0,40	0,50-0,90	0,035	0,040	0,85-1,25	0,0008-0,0050	50-56
40MnCrB4-2	0,37-0,43	0,40	0,70-1,10	0,035	0,040	0,30-0,70	0,0008-0,0050	53-59
39MnCrB6-2	0,36-0,42	0,40	1,35-1,5	0,035	0,040	0,30-0,70	0,0008-0,0050	53-59
45MnCrB4-2	0,42-0,48	0,40	0,70-1,10	0,035	0,040	0,30-0,70	0,0008-0,0050	56-62

¹ В сталях присутствуют в небольших количествах определенные элементы, которые следует рассматривать как примеси: 0,40% Cu; 0,08% Mg, 0,30% Ni. / Steels contain small amounts of certain elements, which should be considered impurities: 0.40% Cu; 0.08% Mg, 0.30% Ni.
² Содержание бора вплоть до 0,0005 % считается приемлемым, если требования к закаливанию еще актуальны / Boron content up to 0.0005% is considered acceptable if the hardening requirements are still valid.

Таблица 3

Table 3

**ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОПЫТНЫХ ПАРТИЙ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬХОЗМАШИН
CHEMICAL COMPOSITION AND PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF PILOT BATCHES OF METAL ROLLING FOR THE PRODUCTION
OF WORKING BODIES OF AGRICULTURAL MACHINES**

Марка металлопроката Rolled metal mode	Плавка Smelting	Химический состав, мас.% / Chemical composition, wt. %							Углеродный эквивалент, % Carbon equivalent, %	Предел прочности, МПа Ultimate tensile strength, MPa	Содержание лигирующих элементов, % Content of alloying elements, %	Твердость, HRC Hardness, HRC	
		C	Si	Mn + Ni + Cu	Cr + Mo	Ti + V + Nb	Al	Ca					B
Б 1200	1	0,30	0,10– 0,45	1,60	0,60	0,09	–	0,03	0,003	0,63	1410	10,8	46-48
	2	0,35		1,60	0,59	0,08	0,01			0,68	1480	9,5	47-49
Б 1500	3	0,37		2,06	1,15	0,06	–	0,03	0,003	0,83	1720	9,0	50-52
	4	0,39		2,17	1,18	0,07	0,06			0,87	1780	8,5	51-53
Б 1700	5	0,45	–	2,43	1,66	0,11	–	–	–	1,07	2060	8,0	54-58

При проведении в ФНАЦ ВИМ эксплуатационно-ресурсных сравнительных испытаний рабочих органов сельхозмашин, изготовленных из опытных сталей Б1500 и Б1700, выявлено преимущество до 15% по характеристикам износостойкости в сравнении с аналогами из ведущих зарубежных фирм *Lemken* (ФРГ) и *Kuhn* (Франция).

Применение сталей повышенной прочности позволяет изготавливать рабочие органы из проката уменьшенной (до 30%) толщины, что существенно снижает металлоемкость сельхозмашин, а также создает возможность повышения ресурса деталей к критериям предельных состояний, например затуплению режущей кромки.

Толщину листа материала рабочего органа (*B*) следует выбрать исходя из данных по нагрузкам, действующим на деталь, и прочностных характеристик используемого материала. В качестве примера приведем методику Сидорова С.А. для определения тол-

щины материалов основы нагруженных рабочих органов почвообрабатывающих машин [13].

Толщина листа рабочего органа определяется по обобщенной эмпирической зависимости, имеющей вид гиперболической функции:

$$B \geq \frac{A + c \cdot \sigma_b}{\mu \cdot \sigma_b} \sum F_{x \max}, \text{ мм},$$

где σ_b – предел прочности стали, МПа;

$$\Sigma F_{x \max} = (1,6 \dots 2,3) \cdot \Sigma F_{cp.x};$$

$\Sigma F_{x \max}$ – максимальное тяговое сопротивление, действующее в обычных условиях на рабочий орган (корпус плуга, лапу культиватора, диск бороны и др.), Н;

$\Sigma F_{cp.x}$ – усредненное почвенное тяговое сопротивление рабочего органа, Н;

A, мм·МПа/Н; *c*, мм/Н; μ – постоянные эмпирические коэффициенты (табл. 5).

Приведем упрощенную формулу, определяющую

Таблица 4

Table 4

**ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК МЕТАЛЛОПРОКАТА,
ИСПОЛЗУЕМОГО В ПРОИЗВОДСТВЕ НАГРУЖЕННЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬХОЗМАШИН
WEAR RESISTANCE OF VARIOUS GRADES OF ROLLED METAL USED IN THE PRODUCTION OF LOADED WORKING BODIES OF AGRICULTURAL MACHINES**

Сталь Steel	Твердость, HRC Hardness, HRC	Коэффициент относительной износостойкости материала (при различном уровне нагрузки) Relative wear resistance coefficient of the material (at different load levels)
45 (эталон / benchmark)	40-43	1,00
65Г	38-41	1,07-1,09
30ХГСА	45-50	1,04-1,06
Импортная типа 30MnB5 / Imported type 30MnB5	52-53	1,47-1,53
Опытная Б 1200 / Experimental Б 1200	46-48	1,18-1,21
Опытная Б 1500 / Experimental Б 1500	50-53	1,50-1,56
Опытная Б 1700 / Experimental Б 1700	54-58	1,68-1,78

Таблица 5 Table 5

ЭМПИРИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ДЛЯ ЗАВИСИМОСТИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ ТОЛЩИНУ ЛИСТА МАТЕРИАЛА ЛЕЗВИЙНЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ
EMPIRICAL COEFFICIENTS FOR THE DEPENDENCE THAT DETERMINES THE SHEET THICKNESS OF THE MATERIAL FOR THE BLADE WORKING BODIES

Виды рабочего органа / Types of working bodies	A, мм·МПа/Н	c, мм/Н	μ
Лемех плуга (цельный) / Ploughshare (solid)	2,5	0,002	5
Лемех плуга с накладным или приставным долотом Ploughshare with overhead or attached chisel:			
лемех / ploughshare	2,5	0,002	6
долото / bit	2,5	0,002	4
Отвал плуга (грудь и крыло) / Plough blade (chest and wing)	2,5	0,002	10
Стрельчатая лапа культиватора / Cultivator's wing share	2,5	0,002	1
Сферический диск тяжелой бороны, дискатора, лесного дискового культиватора Concave disc of a heavy harrow, disc harrow, forest disc cultivator	2,5	0,002	1,3
Сферический диск луцильника и полевой бороны Concave disc cultivator and field harrow	2,5	0,004	1

толщину места лезвийного почворезущего рабочего органа в зависимости не от тягового сопротивления ($\Sigma F_{x \max}$), а от действующего на наиболее нагруженную часть детали почвенного удельного контактно-давления ($P_{уд}$).

$$B \geq (0,01 \dots 0,013) \left[\frac{\text{мм}}{\text{МПа}^2} \right] \cdot P_{уд} [\text{МПа}] \cdot \sigma_v [\text{МПа}]; \text{ мм.}$$

Для различных типов изделий и почвенно-эксплуатационных условий $\Sigma F_{x \max}$ обычно находится в пределах 800-8000 Н, а $P_{уд}$ – 0,08-0,90 МПа.

С целью более существенного повышения износостойкости и срока службы многие рабочие органы сельхозмашин упрочняются, а иногда восстанавливаются различными видами износостойких твердосплавных покрытий. Как уже отмечалось, важны не

только повышение износостойкости материала детали, но и конструктивные особенности нанесения износостойкого покрытия, которые в процессе изнашивания обеспечат детали дополнительное увеличение ресурса, то есть повышение «конструкционной износостойкости» [14, 15].

Наибольшее распространение нанесение твердых сплавов получило в производстве лезвийных рабочих органов почвообрабатывающих, кормо-, овощеуборочных и посевных машин. Двухслойные лезвия с твердосплавным покрытием в процессе эксплуатации имеют повышенную линейную износостойкость и лучшую форму лезвия. Иногда процесс изнашивания (формообразования) двухслойного лезвия называют «самозатачиванием». По мнению авторов, пра-

Таблица 6 Table 6

ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОРОШКОВЫЕ СПЛАВЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В РФ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬХОЗМАШИН
WEAR-RESISTANT POWDER ALLOYS USED IN THE RUSSIAN FEDERATION FOR HARDENING AGRICULTURAL MACHINERY PARTS

Марки твердого сплава Hard alloy grades	Среднее содержание элементов, % / Average content of elements, %								другие элементы Other elements	Средняя твердость HRC Mean hardness. HRC	Коэффициент относительной износостойкости в абразивной среде (относительно стали 45) Relative wear resistance coefficient in abrasive environment (with regard to steel 45)
	C	Cr	Ni	Si	Mn	B	W	Fe			
ПГ-С27	3,9	26,0	1,7	1,5	1,1	–	0,3	остальное the rest	Mo 0,1	55,5	3,3-3,7
ПГ-УС25	4,9	38,0	1,4	2,1	2,5	–	–		–	56,5	3,6-4,1
ПГ-ФБХ-6-2	4,5	34,0	–	1,7	2,7	1,7	–		–	58,0	4,2-4,7
ПР-ФМИ	3,5	–	–	2,5	12,0	3,0	–		–	56,0	4,0-4,4
ПС-14-60	4,8	35,7	1,3	2,5	0,7	0,2	–		Cu 0,8	57,0	3,4-3,8
Релит «3» (cast tungsten carbide, WC)	3,8	–	–	–	–	–	96,1	0,15	–	–	–
ПГ-10Н-01	0,8	17,0	остальное	4,3	–	3,5	–	5	–	60,0	2,9-3,4
ПГ-СР4	0,8	16,5		3,7	–	3,3	–	–	–	60,0	3,0-3,5
ПР-Н67Х18-С5Р4	1,2	17,5		–	4,5	–	4,3	–	–	62,0	3,2-3,7

вильнее классифицировать этот процесс как уменьшение темпов затупления или улучшение условий формообразования лезвия [16, 17].

Нанесение износостойких покрытий позволяет на практике повысить ресурс рабочих органов сельхозмашин в 1,5-4,5 раза.

При упрочнении и восстановлении деталей сельхозмашин в России применяют относительно дешевые твердые сплавы на основе высоколегированных чугунов ПГ-С27, ПГ-УС25, ПГ-ФБХ-6-2, ПР-ФМИ, ПС-14-60 и, несколько реже, сплавы с добавками «рэлита зернового» и самофлюсующиеся сплавы ПР-Н67Х18С5Р4, ПГ-СР4, ПГ-10Н-01 на никелевой основе (табл. 6).

В ФНАЦ ВИМ в сотрудничестве с НИТУ МИСиС ведутся разработки новых твердых сплавов, в основном с увеличенным содержанием бора, марганца и добавками литого карбида вольфрама (WC) [10, 12].

За рубежом наибольшее применение имеют сплавы с содержанием литого карбида вольфрама. Рабочие органы сельхозмашин упрочняют также сплавами на кобальто-никелевой основе, имеющими в своем составе 1,4-2,7% углерода, 1,0-1,6% кремния, 25-33% хрома, 11-18% вольфрама (Австрия, Венгрия, Швейцария и др.).

В сельскохозяйственном машиностроении России используются главным образом наплавочные методы нанесения твердосплавных покрытий. Это объясняется необходимостью высокой адгезии покрытия с основой в связи с тяжелыми условиями эксплуатации большинства деталей. Методы напыления имеют ограниченное применение. Наиболее распространена индукционная наплавка твердых сплавов. При этом методе используется нагрев изделия и сплава токами высокой частоты (ТВЧ). К преимуществам индукционной наплавки следует отнести простоту в обслуживании и высокую производительность. Но индукционная наплавка имеет также существенные недостатки, которые в ряде случаев не позволяют добиться требуемых параметров и качества упрочнения [4, 15].

Наплавка ТВЧ имеет большие технологические ограничения по толщине наносимых материалов (не более 1,5-1,7 мм) и их химическому составу. Индукционная наплавка рабочих органов, имеющих сложные геометрические поверхности, затруднена или невозможна. При индукционной наплавке основной металл и твердый сплав часто перегреваются, что негативно сказывается на их свойствах.

Более перспективны дуговые способы наплавки твердых сплавов, в частности разработанная в России разновидность плазменной дуговой наплавки – высокопроизводительная экономичная технология (рис. 3) [18]. В плазменную ионизированную дугу транспортирующим и защитным газом подается порошок и наплавляется на деталь. С помощью вибратора плазмотрон имеет возможность колебаться. По-

крытия наносятся различной ширины (до 35 мм). Отсутствуют ограничения по химическому составу и свойствам наносимых плазмой материалов.

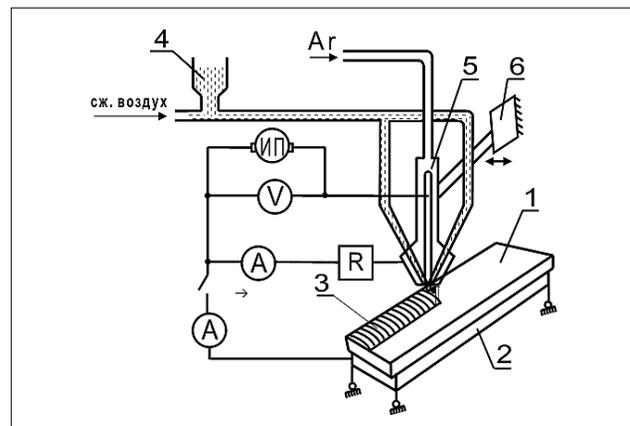


Рис. 3. Принципиальная схема установки плазменной наплавки рабочих органов сельскохозяйственных машин: 1 – наплавляемая деталь; 2 – механизм перемещения; 3 – наплавленный слой; 4 – дозатор; 5 – водоохлаждаемый плазмотрон; 6 – вибратор; ИП – источник питания; R – балластный реостат (сопротивление)

Fig. 3. Schematic installation diagram for plasma surfacing of agricultural machine working bodies: 1 – welded part; 2 – movement mechanism; 3 – deposited layer; 4 – dispenser; 5 – water-cooled plasma torch; 6 – vibrator; ИП – power supply; R – ballast rheostat (resistance)

В отличие от известной технологии плазменной наплавки в среде аргона, при разработанной новой технологии этот газ используется только для плазмообразования (рис. 3). Ввиду того, что в сравнении с аргоном воздух является более теплотворным газом, удается повысить энергетическую эффективность процесса наплавки, увеличить сварочно-наплавочную скорость в 2,0-2,5 раза, сократить расход относительно дорогого аргона в 3,5-4,5 раза. В сравнении с наплавкой в среде аргона себестоимость нанесения покрытий в среде сжатого воздуха ниже в 2,3-2,6 раза. Данный факт и позволяет достаточно широко использовать представленный метод для упрочнения различных типов рабочих органов сельхозмашин (рис. 4).

Качество наплавки в среде воздуха несколько ниже в сравнении со стандартной технологией плазменной наплавки в среде аргона. С учетом использования новых технологических приемов, в частности изменения в конструкции плазмотрона, добавок в сплавы раскислителей для деталей сельхозмашин, эксплуатирующихся в жестких абразивных средах, качество наплавки приемлемое (рис. 4). По физико-механическим характеристикам нанесение покрытия уступает наплавке в аргоне не более 5-8%, при значительном экономическом выигрыше. Толщина наносимых в среде сжатого воздуха покрытий составляет 0,4-5,5 мм за один проход.



Рис. 4. Виды рабочих органов с упрочняющими твердосплавными покрытиями, наносимыми плазменной наплавкой в среде сжатого воздуха, изготавливаемые из высокопрочных сталей (30ХГСА, 30MnB5 и др.) мелкими сериями в ФНАЦ ВИМ
 Fig. 4. Types of working bodies with hardening hard-alloy coatings applied by plasma surfacing in compressed air, and made of high-strength steels (30KhGSA, 30MnV5, etc.) in small batches at the FNAC VIM

Перспективный способ упрочнения отдельных деталей почвообрабатывающих машин (наральников культиваторов, носков лемехов плугов и др.) – наплавка «намораживанием» (окунанием).

В опытно, мелкосерийном производстве и при восстановлении деталей сельскохозяйственных машин применяют и другие методы нанесения покрытий: газоплазменную, электродуговую, лазерную, электронно-лучевую наплавку, напыление самофлюсующихся сплавов с последующим оплавлением, гальваническое хромирование.

По данным ФНАЦ ВИМ, экономический эффект от применения в России упрочняющих наплавочных технологий в нагруженных деталях сельхозмашин непосредственно в сельскохозяйственном производстве составляет 18-57% от цены серийных неупрочненных аналогов в год, при рентабельности производства упрочненных изделий 25-35%.

Перспективным направлением последующих исследований считаем проведение лабораторных стендовых испытаний контрольных образцов материалов, используемых для изготовления и упрочнения рабочих органов. Будут проведены экспериментальные исследования рабочих органов сельхозмашин, упрочненных разработанным методом в реальных почвенных условиях.

Выводы. Основное направление повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельхозмашин – использование при их изготовлении высокопрочных сталей и упрочняющих, преимущественно наплавочных технологий в сочетании с обоснованием конструктивных параметров как собственно детали, так и упрочняющих слоев. Это обеспечивает не только линейную, но и «конструкционную» износостойкость. Упрочняющие технологии и современные наплавочные материалы твердосплавных покрытий позволяют повысить ресурс деталей сельхозмашин в сравнении с их монометаллическими аналогами в 1,5-4,5 раза.

Рекомендуется для производства рабочих органов сельхозмашин использовать низко- и среднеуглеродистые (0,25-0,45%) легированные бором, хромом и другими элементами стали с пределом прочности 1600-2100 МПа и относительным удлинением не ниже 7% с обоснованным выбором толщины листа материала детали.

В качестве упрочнения на детали сельхозмашин рекомендуется наносить относительно недорогие твердосплавные материалы на железной основе с содержанием 22-37% порошкового литого карбида вольфрама.

С эксплуатационной и экономической стороны наиболее эффективны дуговые способы наплавочного нанесения твердосплавных покрытий, в частности плазменная дуговая наплавка в среде сжатого воздуха. Толщина наплавленного слоя находится в пределах 0,4-5,5 мм. Экономическая эффективность использования упрочненных наплавленных деталей сельхозмашин в сравнении с неупрочненными в сельскохозяйственном производстве составляет 18-57% от цены серийного базового неупрочненного аналога в год.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сидоров С.А., Миронов Д.А., Миронова А.В., Рябов В.В. Повышение износостойкости и других ресурсных характеристик материалов рабочих органов почвообрабатывающих машин // *Металлург*. 2021. №5. С. 93-99.
2. Панов А.И., Пляка В.И., Лискин И.В., Миронова А.В. Закономерности изнашивания лезвий почвообрабатывающих рабочих органов // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина»*. 2020. №1(95). С. 19-24.
3. Миронов Д.А., Сидоров С.А., Лискин И.В. Прочностные и ресурсные характеристики почворезущих рабочих органов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №3. С. 39-43.
4. Измайлов А.Ю., Сидоров С.А., Лобачевский Я.П., Хорошенков В.К., Хлусова Е.И., Рябов В.В. Новые материалы и технологии нанесения твердосплавных покрытий для деталей почвообрабатывающих машин // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2016. №2. С. 66-69.



5. Сидоров С.А., Зволинский В.Н. Повышение прочностных характеристик рабочих органов почвообрабатывающих машин путем защиты определенных зон от интенсивного абразивного изнашивания // *Технический сервис машин*. 2019. N1(134). С. 179-193.
6. Сурус А.И., Блохин А.В., Лось А.М. Повышение эксплуатационных характеристик деталей сельскохозяйственных машин, работающих в условиях повышенного износа и коррозии // *Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения*. 2017. N1(16). С. 103-109.
7. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Лискин И.В., Миронов Д.А., Хорошенков В.К., Сидоров С.А. Повышение конструкционной прочности рабочих органов почвообрабатывающих машин // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2018. N3. С. 57-60.
8. Сидоров С.А., Миронов Д.А., Хорошенков В.К., Хлусова Е.И. Наплавочные методы повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельхозмашин // *Сварочное производство*. 2015. N10. С. 35-40.
9. Дудников А.А., Беловод А.И., Пасюта А.Г., Келемеш А.А., Горбенко А.В. Технологические способы повышения долговечности и ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин // *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. N5/1(25). С. 4-7.
10. Sidorov S.A., Lobachevskii Y.P., Khoroshenkov V.K., Akhmedova T.S., Vorob'ev D.A. Wear and breakage resistance of hard alloy coatings strengthened with tungsten carbide. *Metallogist*. 2018. Vol. 61. N11-12. 1023-1028.
11. Соловьев С.А., Иванайский В.В., Ишков А.В., Кривочуров Н.Т., Лялякин В.П., Аулов В.Ф. Износостойкие композиционные покрытия для рабочих органов сельхозмашин. М.: РАН. 2019. 187 с.
12. Izmaylov A.Yu., Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., Khlusova E.I., Ryabov V.V. Novel high-alloy boron-containing steels for driven elements of tilling machines. *Metal Science and Heat Treatment*. 2017. Vol. 59. N3-4. 208-210.
13. Сидоров С.А. Методика расчета рабочих органов почвообрабатывающих машин на прочность // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2008. N12. С. 39-40.
14. Сидоров С.А., Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Золотарев А.С. Влияние геометрических и установочных параметров плужных рабочих органов на агротехнические и силовые характеристики // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N2. С. 10-16.
15. Ожегов Н.М., Добринов А.В., Ружьев В.А. Исследования методов упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин и разработка автоматической установки для нанесения на них упрочняющих покрытий // *Современные наукоемкие технологии*. 2017. N3. С. 28-31.
16. Лискин И.В., Алдошин Н.В., Горбачев И.В., Панов А.И. Совершенствование конструкции плужных лемехов с накладным долотом // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина»*. 2018. N1(83). С. 15-19.
17. Лискин И.В., Панов А.И., Горбачев И.В. результаты испытаний лемехов с накладным долотом // *Сельский механизатор*. 2017. N 5. С. 8-9.
18. Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., Lobachevskii Y.P., Akhmedova T.S. Improving wear resistance of agricultural machine components by applying hard-alloy thick-layer coatings using plasma surfacing. *Metallurgist*. 2017. Vol. 60. N11-12. 1290-1294.

REFERENCES

1. Sidorov S.A., Mironov D.A., Mironova A.V., Ryabov V.V. Povyshenie iznosostoykosti i drugikh resursnykh kharakteristik materialov rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh mashin [Increase of wear resistance and other resource characteristics of materials of working bodies of tillage machines]. *Metallurg*. 2021. N5. 93-99 (In Russian).
2. Panov A.I., Plyaka V.I., Liskin I.V., Mironova A.V. Zakonomernosti iznashivaniya lezviy pochvoobrabatyvayushchikh rabochikh organov [Wear patterns of soil cutting blades]. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina»*. 2020. N1(95). 19-24 (In Russian).
3. Mironov D.A., Sidorov S.A., Liskin I.V. Prochnostnye i resursnye kharakteristiki pochvrezhushchikh rabochikh organov [Strength and Durability Characteristics of Soil-Cutting Working Tools]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N3. 39-43 (In Russian).
4. Izmaylov A.Yu., Sidorov S.A., Lobachevskiy Ya.P., Khoroshenkov V.K., Khlusova E.I., Ryabov V.V. Novye materialy i tekhnologii naneseniya tverdospлавnykh pokrytiy dlya detaley pochvoobrabatyvayushchikh mashin [New materials and technologies for placing hard alloy covers for details of soil tillers]. *Vestnik rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki*. 2016. N2. 66-69 (In Russian).
5. Sidorov S.A., Zvolinskiy V.N. Povyshenie prochnostnykh kharakteristik rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh mashin putem zashchity opredelennykh zon ot intensivnogo abrazivnogo iznashivaniya [Improving the strength characteristics of the working tillage machinery organs by protecting certain areas from intense abrasive wears]. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2019. N1(134). 179-193 (In Russian).
6. Surus A.I., Blokhin A.V., Los' A.M. Povyshenie ekspluatatsionnykh kharakteristik detaley sel'skokhozyaystvennykh mashin, rabotayushchikh v usloviyakh povyshennogo iznosa i korrozii [Improving the performance of parts of agricultural machines, working in conditions of high wear and corrosion resistance]. *Konstruirovaniye, ispol'zovaniye i nadezhnost' mashin sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya*. 2017.

- N1(16). 103-109 (In Russian).
7. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Liskin I.V., Mironov D.A., Khoroshenkov V.K., Sidorov S.A. Povyshenie konstruktsionnoy prochnosti rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh mashin [Increasing the structural strength of tillage machine working bodies]. *Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka*. 2018. N3. 57-60 (In Russian).
 8. Sidorov S.A., Mironov D.A., Khoroshenkov V.K., Khlusova E.I. Naplavochnye metody povysheniya resursa bystroiznashivaemykh rabochikh organov sel'khoz mashin [Surfacing methods for increasing the durability of agricultural machine working bodies]. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2015. N10. 35-40 (In Russian).
 9. Dudnikov A.A., Belovod A.I., Pasyuta A.G., Kelemesh A.A., Gorbenko A.V. Tekhnologicheskie sposoby povysheniya dolgovechnosti i resursa rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh mashin [Techniques to increase the durability and working life of tillage machine working bodies]. *Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva*. 2015. N5/1(25). 4-7 (In Russian).
 10. Sidorov S.A., Lobachevskii Y.P., Khoroshenkov V.K., Akhmedova T.S., Vorob'ev D.A. Wear and breakage resistance of hard alloy coatings strengthened with tungsten carbide. *Metallurgist*. 2018. Vol. 61. N11-12. 1023-1028 (In English).
 11. Solov'ev S.A., Ivanayskiy V.V., Ishkov A.V., Krivochurov N.T., Lyalyakin V.P., Aulov V.F. Iznosostoykie kompozitsionnye pokrytiya dlya rabochikh organov sel'khoz mashin [Wear-resistant composite coatings for agricultural machine working bodies of]. Moscow: RAN. 2019. 187 (In Russian).
 12. Izmaylov A.Yu., Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., Khlusova E.I., Ryabov V.V. Novel high-alloy boron-containing steels for driven elements of tilling machines. *Metal Science and Heat Treatment*. 2017. Vol. 59. N3-4. 208-210 (In English).
 13. Sidorov S.A. Metodika rascheta rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh mashin na prochnost' [Stress calculation method for tillage machine working bodies]. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny*. 2008. N12. 39-40 (In Russian).
 14. Sidorov S.A., Lobachevskiy Ya.P., Mironov D.A., Zolotarev A.S. Vliyanie geometricheskikh i ustanovochnykh parametrov pluzhnykh rabochikh organov na agrotekhnicheskie i silovye kharakteristiki [Influence of geometric and setup parameters of the arrangement of working tools on agrotechnical and power characteristicS]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N2. 10-16 (In Russian).
 15. Ozhegov N.M., Dobrinov A.V., Ruzh'ev V.A. Issledovaniya metodov uprochneniya rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh mashin i razrabotka avtomaticheskoy ustanovki dlya naneseniya na nikh uprochnyayushchikh pokrytiy [Investigations of methods of strengthening the working organs of tillage machines and the development of an automatic plant for applying hardening coatings on them]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2017. N3. 28-31 (In Russian).
 16. Liskin I.V., Aldoshin N.V., Gorbachev I.V., Panov A.I. Sovershenstvovanie konstruktсии pluzhnykh lemekhov s nakladnym dolotom [Improving the design of ploughshares with a composite chisel]. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina»*. 2018. N1(83). 15-19 (In Russian).
 17. Liskin I.V., Panov A.I., Gorbachev I.V. Rezul'taty ispytaniy lemekhov s nakladnym dolotom [Test results for shares with overhead chisel]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2017. N 5. 8-9 (In Russian).
 18. Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., Lobachevskii Y.P., Akhmedova T.S. Improving wear resistance of agricultural machine components by applying hard-alloy thick-layer coatings using plasma surfacing. *Metallurgist*. 2017. Vol. 60. N11-12. 1290-1294 (In English).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Лобачевский Я.П. – научное руководство, формирование основных направлений исследования;

Миронов Д.А. – сбор и анализ аналитических и практических материалов, формирование общих выводов;

Миронова А.В. – анализ научных источников по теме исследования, доработка текста.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Lobachevskiy Ya.P. – scientific supervision, overall research design;

Mironov D.A. – data collection and analysis, drawing general conclusions;

Mironova A.V. – analysis of scientific sources on the research topic, manuscript 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

15.12.2022

20.02.2023

Биоэнергетическая модель растительного сырья и оценка технологий производства кормов

Мухтар Ахмиевич Керимов,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: martan-rs@yandex.ru;

Дмитрий Владимирович Иванов,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: dmit.vlad.ivanov@ya.ru

Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что эффективность функционирования технологических процессов в сельскохозяйственном производстве принято оценивать по экономическим, эксплуатационным и относительным критериям. Показали, что такая оценка при решении прикладных задач часто оказывается некорректной. Наиболее полно это несоответствие выявили при функционировании биотехнической системы «оператор – корм – машина – животное». Подтвердили необходимость и актуальность объективного анализа энергетических потоков, реализуемых в биотехнической системе, а также взаимодействие энергопотоков между собой и с внешней средой. (*Цель исследования*) Обосновать методологический подход к оценке эффективности производства кормов на основе биоэнергетического анализа технологий их заготовки. (*Материалы и методы*) Провели сравнительный анализ показателей накопления обменной энергии растениями до момента начала их уборки и параметров снижения содержания обменной энергии растительного сырья с учетом технологических воздействий на него. (*Результаты и обсуждение*) Выявили, что затраты 1 мегаджоуля механической энергии при возделывании злако-травяной кормосмеси обеспечивают получение 121 мегаджоуля обменной энергии. Определили расчетное содержание обменной энергии в злако-травяной кормосмеси, равное 44 850 мегаджоулей на гектар (1950 мегаджоулей на тонну) при удельных затратах механической энергии на возделывание кормосмеси 370,6 мегаджоуля на гектар (16,1 мегаджоуля на тонну). (*Выводы*) Установили, что динамика энергонакопления при выращивании растительного сырья и характер снижения его энергосодержания в процессе приготовления и хранения корма имеют общую и устойчивую во времени тенденцию. Доказали линейный характер тренда роста энергонакопления для различных видов кормовых культур и снижения энергосодержания кормов. Предложили критерии оценки эффективности затрат механической энергии на выращивание кормовых культур, переработку растительного сырья и хранение корма. Разработали математическую модель, которая позволяет проводить исследования неявных переменных в сложной системе накопления и энтропии обменной энергии корма, принимать оптимальные инженерные решения по обоснованию и совершенствованию технологий возделывания, уборки и приготовления кормов, а также их эффективному использованию.

Ключевые слова: животноводство, качество кормов, силос, сенаж, технологии кормозаготовки, эффективность использования кормов, биоконверсия, обменная энергия корма, пооперационный расход механической энергии, энтропия энергии корма.

■ **Для цитирования:** Керимов М.А., Иванов Д.В. Биоэнергетическая модель растительного сырья и оценка технологий производства кормов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №1. С. 51-61. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-51-61. EDN HSQHVC.

Bioenergy Model Of Plant Raw Materials And Assessment Of Feed Production Technologies

Mukhtar A. Kerimov,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: martan-rs@yandex.ru;

Dmitriy V. Ivanov,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: dmit.vlad.ivanov@ya.ru

Saint-Petersburg State Agrarian University (SPbSAU), St. Petersburg, Russian Federation.

Abstract. It is noted that the effectiveness of the technological processes in agriculture is usually evaluated according to economic, operational and relative criteria. Such an estimate often proves to be inaccurate for solving applied problems. The functioning of the biotechnical system "operator – feed – machine – animal" reveals this discrepancy to the highest extent. The paper confirms the necessity and relevance of a fact-based analysis of energy flows in the biotechnical system, as well as the energy flows interaction with each other and with the external environment. (*Research purpose*) To substantiate a methodological approach to assessing

the fodder production efficiency based on a bioenergetic analysis of fodder production technologies. (*Materials and methods*) The research involves the comparative analysis of exchange energy accumulation by plants before harvesting and the parameters of its reduction in the plant raw materials, taking into account technological impacts. (*Results and discussion*) It is obtained that a one-megajoule input of mechanical energy in the cultivation of cereal-grass forage mixtures provides 121 megajoules of exchange energy. The exchange energy content in the cereal-grass forage mixture is calculated to be 44,850 megajoules per hectare (1950 megajoules per ton) while the specific mechanical energy consumption amounts to 370.6 megajoules per hectare (16.1 megajoules per ton) for the feed mixture cultivation. (*Conclusions*) It is established that the dynamics of energy accumulation during the vegetable raw material cultivation and the character of a decrease in its energy content during fodder preparation and storage have a sustainable common trend. The growth trend of energy accumulation is proved to have a linear character for both various types of fodder crops and the decrease in the feed energy content. Efficiency assessment criteria are proposed for the mechanical energy consumption during fodder crop cultivation, plant material processing and feed storage. A mathematical model is developed making it possible to study implicit variables in a complex system of accumulation and entropy of feed exchange energy, take optimal engineering decisions to justify and improve the technologies for feed cultivation, harvesting and preparation, as well as its effective use.

Keywords: animal husbandry, feed quality, silage, haylage, forage harvesting technologies, feed utilization efficiency, bioconversion, feed exchange energy, mechanical energy consumption per operation, feed energy entropy.

For citation: Kerimov M.A., Ivanov D.I. Bioenergeticheskaya model' rastitel'nogo syriya i otsenka tekhnologii proizvodstva kormov [Bioenergy model of plant raw materials and assessment of feed production technologies]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N1. 51-61 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-51-61. EDN HSQHVC.

Биоцикл развития растений и биохимические превращения в процессе возделывания, уборки и хранения растительной массы представляют собой непрерывную цепь накопления и потери энергии [1-3].

Поиск новых и совершенствование известных приемов приготовления и хранения кормов на сегодняшний день помогают снизить энергетические, трудовые и материальные затраты.

По агротехническим требованиям уборку растительной массы необходимо провести в кратчайшие сроки с целью сохранения концентрации обменной энергии в 1 кг сухого вещества корма в пределах 10,0-10,5 МДж.

На качество стебельчатых кормов влияют условия в ходе заготовки (рис. 1).



Рис. 1. Влияние погодных, технических, технологических и организационных факторов на качество заготовки и приготовления стебельчатых кормов повышенной влажности

Fig. 1. Influence of weather, technical, technological and organisational factors on the quality of harvesting and preparation of high-moisture stalk fodder

Кормовая ценность растительной массы при силосовании зависит от продолжительности заполнения траншеи, уплотнения массы, герметизации от доступа воздуха и защиты от осадков представлены (рис. 2).

Модель изменения энергосодержания в растительном сырье базируется на трех элементах:

- динамике энергонасыщения корма, зависящей от природных факторов и агротехнических операций;
- постепенном или ступенчатом снижении энергосодержания корма (рассеивание его потенциальной энергии) под воздействием неблагоприятных внеш-

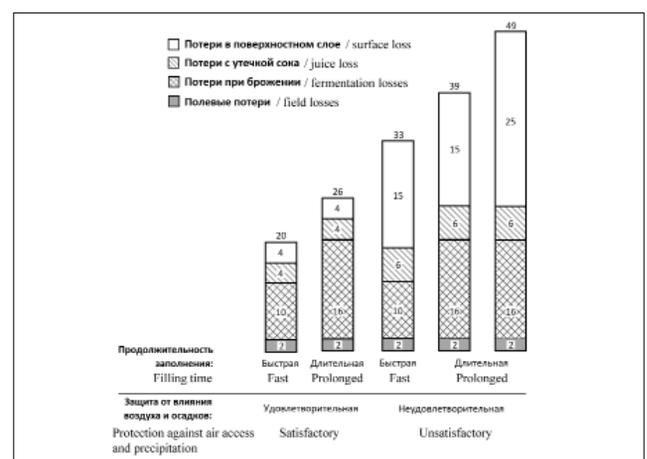


Рис. 2. Потери кормовой ценности (%) при силосовании растительной массы в зависимости от продолжительности заполнения траншеи, уплотнения массы, герметизации от доступа воздуха и защиты от осадков [3]

Fig. 2. Feed value loss (%) during the ensiling process, depending on the of trench filling duration, plant mass compaction, sealing against air access and protection against precipitation [3]



них факторов и биохимических процессов;

- остаточной энергии корма [4-6].

Для их характеристики используют содержание энергии, приходящееся на единицу массы, площади и т.д. Энергетическая оценка считается определяющим показателем производства животноводческой продукции животноводства [7-9]. Методы биоэнергетической оценки производственных процессов заготовки кормов позволяют выявить наиболее энергоемкие элементы применяемых технологий, полнее учесть ресурсы экономии энергии, определить направления повышения эффективности функционирования животноводческих ферм и комплексов.

Цель исследования – обоснование методологического подхода к оценке эффективности производства кормов на основе биоэнергетического анализа технологий их заготовки.

Материалы и методы. Исходным постулатом модели служит положение о том, что энергозатраты на выполнение совокупности необходимых технологических операций эффективны и целесообразны, если они обеспечивают рост содержания энергии в кормовых культурах при их возделывании или адекватно снижают потери (энтропию) этого показателя при хранении и использовании корма [10, 11].

Энергия корма в текущий момент времени (t) определяется из уравнения баланса энергии [12]:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 - \mathcal{E}_{\text{рас}}, \quad (1)$$

где \mathcal{E} – остаточная энергия корма на момент времени t , МДж;

\mathcal{E}_0 – энергия, накопленная растительным материалом к i -ому этапу его роста и преобразования, МДж;

$\mathcal{E}_{\text{рас}}$ – энергия, рассеянная в процессе скашивания растений, обработки и хранения корма, МДж.

Из уравнения рассеяния энергии известно [12]:

$$\mathcal{E}_{\text{рас}} = T \cdot S, \quad (2)$$

где T – абсолютная температура, К;

S – энтропия, МДж/К.

Тогда уравнение (1) примет вид:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 - T \cdot S. \quad (3)$$

Для исследования зависимости (3) реализован метод анализа размерностей, применяющийся при планировании экспериментов как прием сокращения числа переменных, а также используемый как способ анализа неявных переменных в сложных системах [13].

Энергию, полученную растительным материалом на i -ом этапе (\mathcal{E}_{oi}), а также сопутствующую энтропию (S_i) представим в виде аналитических выражений:

$$\mathcal{E}_{oi} = M_{oi} \cdot L_{oi}^2 \cdot \Theta_{oi}^{-2}, \quad (4)$$

где \mathcal{E}_{oi} – энергия, полученная растительным материалом на i -ом этапе, МДж;

M_{oi} – растительная масса, убранная на i -ом этапе, т;

$$S_i = M_{si} \cdot \Theta_{si}^{-2} \cdot T_{si}^{-1} \cdot L_{si}^2, \quad (5)$$

где M_{si} – энтропия, сопутствующая i -ому этапу воздействия на растительный материал, МДж/К;

T_{si} – абсолютная температура растительного материала, соответствующая i -ому этапу воздействия на него, К;

L_{si} – расстояние перевозки корма на i -ом этапе его преобразования, м;

Θ_{si} – время рассеивания энергии растительным материалом на i -ом этапе, ч.

Подставив формулы (4) и (5) в уравнение (3), получим:

$$\mathcal{E}_i = M_{oi} \cdot L_{oi}^2 \cdot \Theta_{oi}^{-2} - M_{si} \cdot L_{si}^2 \cdot \Theta_{si}^{-2}, \quad (6)$$

где $\mathcal{E}_i \neq 0$ и $M_{oi} \cdot L_{oi}^2 \cdot \Theta_{oi}^{-2} > M_{si} \cdot L_{si}^2 \cdot \Theta_{si}^{-2}$.

Выражение (6) отражает картину в целом. Однако остаются неучтенными ряд важных факторов:

- обменная энергия корма;
- мероприятия, направленные на ее рост;
- затраты механической энергии, связанные с выращиванием урожая, выполнением уборочных работ и кормоприготовительных операций;
- меры по снижению энтропии.

В остаточной энергии корма потребительский интерес вызывает лишь обменная энергия, направленная на производство продукции животноводства (приросты живой массы, молочную продуктивность и т.д.) [14-16]. Тогда остаточную энергию корма можно представить равенством:

$$\mathcal{E} = [O\mathcal{E}] = M_{O\mathcal{E}} \cdot L_{O\mathcal{E}}^2 \cdot \Theta_{O\mathcal{E}}^{-2}, \quad (7)$$

где $[O\mathcal{E}]$ – остаточная энергия в корме на момент времени t , кДж;

$M_{O\mathcal{E}}$ – масса корма на i -ом этапе его производства, т;

$L_{O\mathcal{E}}$ – перемещение корма от момента заготовки до i -ого этапа его использования, м;

$\Theta_{O\mathcal{E}}$ – время от момента заготовки корма до i -ого этапа его использования, ч.

Результаты и обсуждение. Чтобы произвести корм с максимальным удельным содержанием обменной энергии ($[O\mathcal{E}] \rightarrow \max$) на единицу массы или единицу площади, необходимо выполнить ряд технологических операций, затратив при этом некоторую механическую энергию (мощность) N_p , описываемую табличной формулой преобразования размерностей:

$$N = M \cdot L^2 \cdot \Theta^{-3}, \quad (8)$$

где N – затраты мощности при выполнении технологических операций, МДж/т;

L – длина пути, м;

Θ – время, необходимое для выполнения технологической операции, ч.

Суммарные затраты мощности на получение урожая составят:

$$N_p = \sum_{j=1}^m M_j \cdot L_j^2 \cdot \Theta_j^{-3}, \quad (9a)$$

или

$$N_p = (M_{1j} \cdot L_{1j}^2 + M_{2j} \cdot L_{2j}^2 \cdot \Theta_{2j}^{-3} + \dots + M_{mj} \cdot L_{mj}^2 \cdot \Theta_{mj}^{-3}), \quad (9b)$$

где $M_{1j} \cdot L_{1j}^2 \cdot \Theta_{1j}^{-3}, \dots, M_{mj} \cdot L_{mj}^2 \cdot \Theta_{mj}^{-3}$ – затраты мощности на выполнение операций по обработке почвы, внесению удобрений, посеву, уходу за растениями и др., Мдж/га, МДж/т.

Удельные энергозатраты на выполнение единичной операции машинным средством определяем по формуле:

$$\mathcal{E}_{oi} = \frac{3,6 \cdot N \cdot k}{Q}, \quad (10)$$

где \mathcal{E}_{oi} – удельные энергозатраты на единицу массы (площади), МДж/т, (МДж/га);

Q – производительность агрегата, т/ч (га/ч);

N – номинальная мощность технического средства, кВт;

k – коэффициент использования эксплуатационной мощности технического средства.

Выполнение технологической операции с затратами мощности N_j обеспечивает некоторый прирост обменной энергии $\Delta[O\mathcal{E}]$ возделываемого корма:

$$\Delta[O\mathcal{E}]_{oj} > M_{mj} \cdot L_{mj}^2 \cdot \Theta_{mj}^{-3}, \quad (11a)$$

или

$$M_{oj} \cdot L_{oj}^2 \cdot \Theta_{oj}^{-2} > M_{mj} \cdot L_{mj}^2 \cdot \Theta_{mj}^{-3} \dots \quad (11b)$$

Получив урожай с искомым содержанием обменной энергии корма, необходимо выполнить комплекс мероприятий, связанных с уборкой и подготовкой к длительному хранению при минимальном сопутствующем рассеянии энергии (энтропии) $S \rightarrow \min$ [17, 18].

Это в свою очередь потребует дополнительных затрат мощности:

$$N_{пх} = \sum_{i=1}^n M_i \cdot L_i^2 \cdot \Theta_{ni}^{-3}, \quad (12a)$$

где $N_{пх}$ – затраты на выполнение дополнительных технологических операций (грамбовка массы, загрузка в пластиковые мешки и др.), МДж.

или

$$N_{пх} = (M_{1i} \cdot L_{1i}^2 \cdot \Theta_{1i}^{-3} + M_{2i} \cdot \Theta_{2i}^{-3} + \dots + M_{ni} \cdot L_{ni}^2 \cdot \Theta_{ni}^{-3}), \quad (12b)$$

где $M_{1i} \cdot L_{1i}^2 \cdot \Theta_{1i}^{-3}, \dots, M_{ni} \cdot L_{ni}^2 \cdot \Theta_{ni}^{-3}$ – затраты мощности на выполнение уборки урожая, измельчение или прессование растительной массы, закладки и обработки корма в хранилище и др., МДж.

При выполнении каждой из названных операций снижение энтропии должно превышать затраченную мощность [19, 20].

В общем виде концепция может быть представлена на динамикой величины обменной энергии корма на

текущее время t , а также затрат механической мощности – нарастающим итогом на выполнение необходимых технологических операций (рис. 3). Левая часть схемы характеризует динамику накопления обменной энергии ($\Delta[O\mathcal{E}]_{oi}$) при возделывании растительного сырья вплоть до момента уборки ($t_{уб}$). Правая часть отражает динамику снижения содержания обменной энергии корма (ΔS_{oi}).

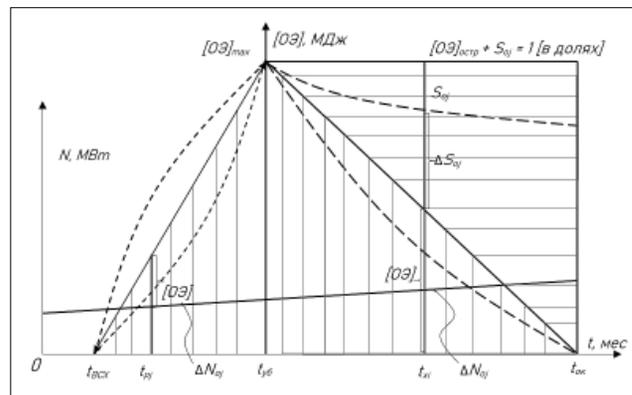


Рис. 3. Динамика обменной энергии корма $O\mathcal{E}$ и затрат механической мощности N :

– при возделывании кормовых культур (левая часть);
– при переработке и хранении массы с учетом энтропии S (правая часть)

Fig. 3 Dynamics of feed exchange energy $O\mathcal{E}$ and mechanical power input (N):

– during forage crop cultivation (left part);
– during mass processing and storage, taking into account entropy (S) (right part)

Желательно, чтобы затраты механической энергии на выполнение единичной операции возделывания культуры ΔN_{oj} были в разы меньше прироста обменной энергии корма $\Delta[O\mathcal{E}]_{oj}$, а затраты энергии на выполнение единичной операции на придание исходному корму состояния, пригодного для длительного хранения ΔN_{oi} , были в разы меньше величины предотвращенной энтропии (рассеивания) энергии корма ΔS_{oi} , то есть:

$$\Delta N_{oj} < \Delta[O\mathcal{E}]_{oj}, \quad (13)$$

или

$$\Delta N_{oj} < \Delta S_{oi}. \quad (14)$$

Процессы энергонакопления и энергосодержания корма будут эффективными, если суммарные затраты мощности N_p на возделывание кормовой культуры окажутся меньше обменной энергии, содержащейся в урожае:

$$(N_p) < [O\mathcal{E}]_{\max}, \quad (15a)$$

или

$$\sum_{j=1}^m M_{N_j} \cdot L_{N_j}^2 \cdot \Theta_{N_j}^{-3} < [O\mathcal{E}]_{\max}, \quad (15b)$$



Суммарные затраты мощности на переработку и подготовку к длительному хранению $N_{ПХ}$ должны быть меньше величины предотвращенной энтропии:

$$N_{ПХ} < \Delta S_n, \tag{16a}$$

или

$$\sum_{j=1}^n M_{N_i} \cdot L_{N_i}^2 \cdot \Theta_{N_i}^{-3} < \Delta S_n. \tag{16b}$$

Отношение максимального значения полученной обменной энергии к суммарным затратам мощности на возделывание культуры определяется коэффициентом эффективности затрат механической мощности на выращивание урожая:

$$\lambda = \frac{[OЭ]_{\max}}{N_p}, \tag{17a}$$

или

$$\lambda = \frac{M_{\max} \cdot L_{\max}^2 \cdot \Theta^{-2}}{\sum_{j=1}^m M_{N_j} \cdot L_{N_j}^2 \cdot \Theta_{N_j}^{-3}}. \tag{17b}$$

Отношения остаточной обменной энергии корма на момент скармливания его скоту $[OЭ]_{ост}$ к суммарным затратам мощности на приготовление и хранение корма $N_{ПХ}$ определяется коэффициентом эффективности затрат механической мощности на переработку и хранение корма:

$$\lambda_{Э} = \frac{[OЭ]_{ост}}{N_{ПХ}}, \tag{18a}$$

или

$$\lambda_{Э} = \frac{M_{OЭ_i} \cdot L_{OЭ_i}^2 \cdot \Theta_{OЭ_i}^{-2}}{\sum_{i=1}^n M_{N_i} \cdot L_{N_i}^2 \cdot \Theta_{N_i}^{-3}}. \tag{18b}$$

Остаточная обменная энергия корма $[OЭ]_{ост}$, выраженная в долях на текущий момент времени t , может быть представлена как

$$[OЭ]_{ост} + S_t = 1, \tag{19}$$

или

$$[OЭ]_{ост} = 1 - S_t, \tag{20}$$

где S_t – энтропия на время t , МДж/К·ч, которая может быть выражена через остаточную обменную энергию:

$$S_{терм.} = k \cdot L \cdot \Theta. \tag{21}$$

Отношение доли остаточной обменной энергии $[OЭ]$ на время t к доле энтропии S_t оценивается коэффициентом сохранности обменной энергии корма:

$$\tau_{OЭ} = \frac{[OЭ]_t}{S_t}. \tag{22}$$

Подставим значение S_t из формулы (21) и выполним соответствующие преобразования, тогда форму-

ла (22) примет вид:

$$\tau_{OЭ} = \left(\frac{1}{[OЭ]_t} - 1 \right)^{-1}. \tag{23}$$

Наилучшим в прикладном плане считаются технологии, обеспечивающие наибольшее значение коэффициента $\tau_{OЭ}$.

Энтропию как меру обесценивания энергии можно рассмотреть также в виде функции термодинамической системы, отражающей тепловое состояние корма во время выполнения тех или иных технологических операций.

Зная табличное значение размерности коэффициента теплопроводности:

$$k = M \cdot L \cdot \Theta^{-3} \cdot T^{-1}, \tag{24}$$

вычислим значение M :

$$M = k \cdot L^{-1} \cdot \Theta^3 \cdot T. \tag{25}$$

Подставив выражение (25) в формулу (5) и проведя соответствующие сокращения, определим величину термодинамической энтропии:

$$S_{терм.} = k \cdot L \cdot \Theta, \tag{26}$$

где k – коэффициент теплопроводности материала, влияющий на энтропию тепловой энергии (например, вследствие тепловыделения растительной резки).

Кормовая растительность различных видов существенно различается сроками и скоростью прироста массы, химическим составом, содержанием обменной энергии, пригодностью к консервации и другими параметрами. Отличаются друг от друга применяемые технологии, машины и оборудование для возделывания, уборки, переработки и хранения различных видов кормов. Неодинаков и расход материальных, трудовых и энергетических ресурсов.

Однако динамика энергонакопления в процессе выращивания кормового сырья и характер снижения его энергосодержания в процессе приготовления и хранения корма имеют общую и устойчивую во времени тенденцию.

Тренды роста энергонакопления для всех видов кормовых культур и тренды снижения энергосодержания кормов носят линейный характер (рис. 4).

На примере временного ряда схематически представлена динамика энергонасыщения озимых и яровых кормовых культур (восходящие кривые) и снижения их энергосодержания при уборке, переработке и хранении (нисходящие кривые).

Шкала ординат на схеме представлена единым показателем – удельным энергосодержанием, выраженным в процентах. Удельный показатель энергосодержания кормовой культуры на момент уборки принят равным 100%. Точка A соответствует появлению всходов, точки B и C – достижению культурой, соответственно, уровня 10 и 90% от максимума энергосодержания (точка D).

Зависимости роста энергонакопления во времени $\mathcal{E}_{\text{ИР}}(\%) = f(t, t_1)$ представлены кривыми $ABCD$ (для озимых) и $A_1B_1C_1D_1$ (для яровых кормов), которые могут быть описаны сложными математическими выражениями. Однако участки интенсивного роста BD и B_1D_1 с приемлемой погрешностью можно представить прямыми – трендами процентного роста энергонакопления для озимых $\mathcal{E}_{\text{ИР}}$ и яровых $\mathcal{E}_{\text{ИР}_1}$ соответственно:

$$\mathcal{E}_{\text{ИР}}(\%) = 2,25t - 440 \quad (27)$$

$$\text{и } \mathcal{E}_{\text{ИР}_1}(\%) = 1,29t - 311. \quad (28)$$

Кривые, описывающие снижение энергосодержания во времени, выражены как

$$\mathcal{E}_x(\%) = f(t, t_1).$$

Они также состоят из двух участков: кратковременного DE и D_1E_1 и долговременного – EF и E_1F_1 (рис. 4). Первый участок включает уборку, приготовление и закладку корма на хранение и характеризуется значительными механическими и качественными потерями, когда кормовое сырье, находящееся вне хранилища, подвергается интенсивному внешнему воздействию.

На втором участке кривой отражено постепенное снижение качественных показателей корма в ходе биохимических превращений, происходящих в процессе хранения. С некоторыми допущениями этот участок может быть представлен прямыми – трендами процентного снижения энергосодержания для озимых \mathcal{E}_x и яровых \mathcal{E}_{x_1} культур:

$$\mathcal{E}_x(\%) = 102,2 - 0,047t \quad (29)$$

$$\text{и} \quad \mathcal{E}_{x_1}(\%) = 103,2 - 0,04t_1. \quad (30)$$

Из приведенных зависимостей видно, что для зимнего периода кормления скота продолжительностью в 210-240 дней (с октября по март-апрель включительно) окупаемость вложений в корма озимого сева составляет 12-19 мес. Этот показатель достаточно велик и для кормов ярового сева – 6-12 мес.

При пересчете трендов роста энергонакопления и снижения энергосодержания в МДж в качестве реперных точек целесообразно использовать показатели удельного содержания обменной энергии (МДж/кг) для рассматриваемой кормовой культуры в период уборки (точка D) и в готовом корме на момент вскрытия хранилища (точка G) с привязкой к принятому временному ряду [6, 7].

Рассмотрим примеры построения по реперным точкам трендов роста удельного энергонакопления зеленой массы кукурузы ярового и поукосного сева и трендов снижения энергосодержания силоса, приготовленного из нее; озимой кормосмеси вики с овсом, убираемых на силос и сенаж; суданской травы поукосного сева, используемой на зеленый корм (рис. 5).

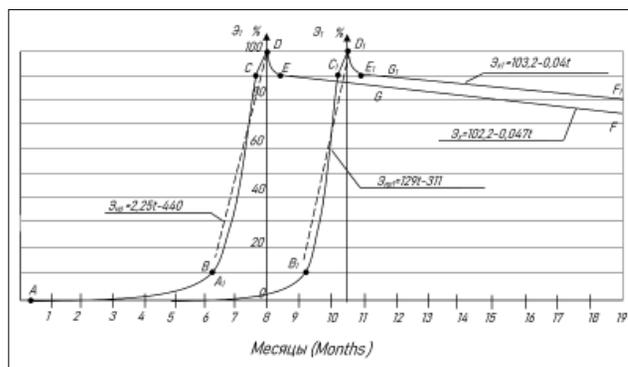


Рис. 4. Динамика энергонасыщения растительности (кривая $ABCD$) и энергосодержания приготовленной силосной массы из озимых (DEF) и яровых (соответственно, кривые $A_1B_1C_1D_1$ и $D_1E_1F_1$) кормовых культур, %

Fig. 4. Dynamics of vegetation energy saturation (curve $ABCD$) and a decrease in the energy content of prepared silage (curve DEF) for winter and spring (curves $A_1B_1C_1D_1$ and $D_1E_1F_1$) forage crops

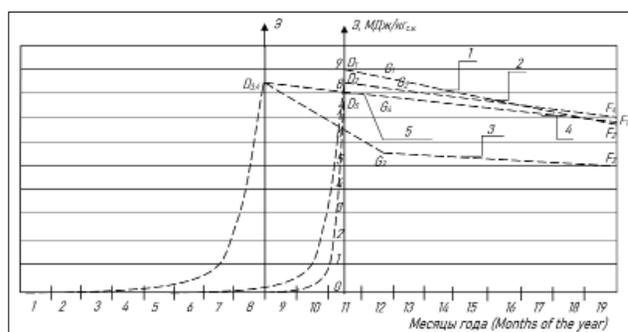


Рис. 5. Динамика энергосодержания в пересчете на 1 кг сухого вещества в процессе роста и хранения корма: 1 – для кукурузы ярового сева, убираемой на силос; 2 – для кукурузы поукосного сева, убираемой на силос; 3 – для озимой вики с овсом на силос; 4 – для озимой вики с овсом на сенаж; 5 – для суданской травы поукосного сева на зеленый корм

Fig. 5. Dynamics of energy content in terms of 1 kg of dry matter during the feed growth and storage: 1 – for spring corn harvested for silage; 2 – for corn harvested for silage; 3 – for winter vetch with oats for silage; 4 – for winter vetch with oats for haylage; 5 – for Sudanese grass harvested for green fodder

Приготовление сенажа из вико-овсяной кормосмеси сопровождается меньшей потерей обменной энергии корма, чем при заготовке силоса с влажностью 74%. Кукуруза и суданская трава поукосного (пожнивного) сева обладают достаточно высоким энергосодержанием – до 8,4 и 7,9 МДж/кг сухого вещества соответственно, что в большинстве случаев делает целесообразным возделывание их на зеленый корм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Получение высоких урожаев обеспечивается внесением больших доз минеральных и органических удобрений под основную обработку почвы, которую выполняют комбинированными агрегатами с рыхлением на 10-12 см. Для уничтожения всходов сорняков в допосевной период



проводят как минимум одну культивацию на глубину 6-8 см. Посев кормосмесей с междурядьем 15 см выполняют универсальными зернотравяными сеялками. Подвоз и загрузку семян в сеялки осуществляют автомобильными загрузчиками. При необходимости проводят осеннюю повсходную или весеннюю химическую обработку посевов.

Сравним технические характеристики и эксплуатационные показатели машин для возделывания злако-травяных кормосмесей, а также результаты расчета удельных затрат механической энергии на единицу урожая (табл. 1).

Суммарные удельные затраты мощности (механи-

ческой энергии) на выполнение вышеуказанных операций (с учетом урожайности зеленой массы 23 т/га) определим по формуле (96):

$$N_p^{уд} = (67,32 + 153,21 + 81,36 + 62,06 + 6,67) = 370,62 \text{ МДж/га.}$$

Средняя урожайность злако-травяных кормосмесей, убираемых в фазу колошения злаковых и бутонизации и цветения других культур, равна 23 т/га [15]. Тогда обменная энергия 1 т натурального корма для КРС составляет 1800-2100 МДж, или 44850 МДж на 1 га.

Приведенные выше удельные затраты механической энергии составляют 0,83% от энергии раститель-

Таблица 1

Table 1

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ МАШИН И АГРЕГАТОВ, ПРИНЯТЫХ ПРИ РАСЧЕТЕ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ВОЗДЕЛЫВАНИЕ 1 ГА (1 Т)¹ ЗЛАКОВО-ТРАВЯНЫХ КОРМОСМЕСЕЙ
TECHNICAL CHARACTERISTICS AND PERFORMANCE INDICATORS OF MACHINES AND UNITS ADOPTED FOR CALCULATING SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION DURING THE CULTIVATION OF 1 HA (1 T)¹ OF CEREAL-GRASS FORAGE MIXTURES

№ п.п.	Технологическая операция Technological operation	Технические средства Technical means	Номинальная мощность энергосредства, кВт Rated power of the energy facility, kW	Коэффициент использования мощности энергосредства Power utilization factor of the energy facility	Производительность агрегата, га/ч Unit capacity ² , ha/h	Удельные энергозатраты, МДж/га Specific energy consumption, MJ/ha
1	Внесение органических и минеральных удобрений под основную обработку почвы ³ Application of organic and mineral fertilizers for basic tillage ³	T-150K + ПРТ-10	121,5	0,8	5,0	2,92
2	Обработка почвы комбинированным агрегатом на глубину 10-12 см Soil cultivation with a combined unit to a depth 10-12 cm	K-701 + АК11-6	198,6	0,9	4,2	6,66
3	Лопастевая культивация на глубину 6-8 см Blade cultivation to a depth of 6-8 cm	T-150K + КП111-9	121,5	0,8	4,3	3,55
4	Посев злаково-травяной кормосмеси ⁴ Sowing the cereal-grass forage mixture ⁴	T-150K + сцепка гидрофиц. МТЗ-80/82 + СЗА-3,6(3)	121,5	0,8	6,2	2,69
5	Обработка посевов гербицидами от вредителей и болезней ⁵ Treatment of crops with herbicides against pests and diseases ⁵	МТЗ-80/82 + ОП-2000	55,2	0,7	24,0	0,29

¹ Урожайность на 1 га зеленой массы ржано-виковой кормосмеси принята равной 23 т/The yield per 1 ha of green mass of rye-vetch fodder mixture is assumed to be 23 tons.

² Производительность за 1 ч чистой работы/Productivity per 1 working hour.

³ Энергозатраты на подвоз и загрузку удобрений составляют 10% энергозатрат рассматриваемой операции/Energy consumption during fertilizer delivery and loading equals to 10% of the energy consumption for the operation under consideration.

⁴ Энергозатраты на подвоз и загрузку семян равны 10% энергозатрат рассматриваемой операции/Energy consumption during seed transportation and loading equals to 10% of the energy consumption for the operation under consideration.

⁵ Энергозатраты на приготовление и подвоз химраствора приняты равными 15% энергозатрат на основную операцию/Energy consumption during the preparation and delivery of the chemical solution is assumed equal to 15% of the energy consumption for the main operation.

ной массы кормосмесей, собранной с той же площади. Полученные значения не учитывают энергозатраты живого труда, а также прошлые энергозатраты на производство энергосредств и сельхозорудий, топливо-смазочных материалов, гербицидов, семян и др. Прошлые энергозатраты на отдельных операциях могут составлять до 200% прямых энергозатрат на их выполнение.

Экспериментальными исследованиями (Иванов Д.В., 2008-2012 гг.) установлено, что удельные затраты механической энергии на приготовление и раздачу стебельчатых кормов значительно превышают затраты механической энергии на их возделывание. Так, при отъеме 1 т силоса из хранилища траншейного типа с использованием агрегатов МТЗ-82 + ПГ-0,4 затраты механической энергии составляют 10,6 МДж, что на 23,3% выше удельных затрат, приходящихся на основную обработку почвы для выращивания растительной массы под названное количество силоса – 8,6 МДж.

Однако и в этом случае затраты совокупной энергии на выращивание рассматриваемых кормосмесей не достигают и 2% энергии, содержащейся в получаемых урожаях. Это подтверждает известный факт, что растениеводство вообще и сельскохозяйственное производство в частности, занимает лидирующее положение как в получении возобновляемой энергии, так и в отношении минимальных затрат механической энергии на накопление энергии растениями.

Отношение обменной энергии, содержащейся в 1 т злаково-травяной кормосмеси при $[OЭ]_{\text{сред}} = 1950$ МДж, к удельным затратам механической энергии равно:

$$N_p^{\text{уд}} = 370,62 \text{ МДж/га} : 23,00 \text{ т/га} = 16,11 \text{ МДж/т.}$$

Его оценивают коэффициентом эффективности затрат механической энергии (λ_3) на выращивание урожая:

$$\lambda_3 = \frac{1950 \text{ МДж/т}}{16,11 \text{ МДж/т}} = 121,04.$$

Таким образом, затраты 1 МДж механической энергии на возделывание злако-травяной кормосмеси принятой урожайности обеспечивают получение до 121 МДж обменной энергии корма.

Рассматриваемую модель можно применять для установления основных факторов, определяющих пооперационный расход и энтропию механической энергии, а также энергонасыщение продукта при возделывании растений.

Для операции возделывания злако-травяных кормосмесей установлены основные факторы, определяющие ее характер и эффективность, а исходными служат известные формулы энергонасыщения продукта и энтропии энергии (табл. 2).

Выводы

1. Предложили модель динамики энергосодержания растительных кормовых материалов, состоящую из двух последовательных этапов: энергонасыщения (выращивание урожая) в ходе прироста массы и увеличения обменной энергии корма, а затем снижения энергосодержания при переработке и хранении кормовой массы, характеризуемого энтропией. Оба этапа сопровождаются затратами механической энергии на выполнение необходимых и достаточных технологических операций.

Модель позволяет вести исследование неявных переменных в сложной системе накопления и энтропии обменной энергии корма, принимать научно обоснованные решения по выбору и совершенствованию технологий возделывания, уборки, переработки и подготовки кормов к хранению и эффективному использованию.

2. Составили обобщенные тренды роста удельного энергонасыщения озимых и яровых кормовых культур.

Таблица 2		Table 2
ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, УСТАНОВЛЕННЫЕ МЕТОДОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РАЗМЕРНОСТЕЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПООПЕРАЦИОННЫЙ РАСХОД МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ЭНЕРГОНАСЫЩЕНИЕ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ ЗЛАКО-ТРАВЯНЫХ КОРМОСМЕСЕЙ		
THE MAIN FACTORS OBTAINED BY THE DIMENSION REDUCTION METHOD, WHICH DETERMINES THE OPERATIONAL CONSUMPTION OF MECHANICAL ENERGY AND ENERGY SATURATION IN THE CULTIVATION OF CEREAL-GRASS FORAGE MIXTURES		
Технологические операции Technological operations	Окончательный вид формулы энергонасыщения и энтропии The final formula of the energy saturation and entropy	Основной фактор The main factor
Внесение удобрений под основную обработку почвы Application of fertilizers for basic tillage	$M \cdot v \cdot L \cdot \Theta^{-1}$	L – длина пути / path length v – скорость передвижения / movement speed
Рыхление почвы на глубину 10-12 см Loosening the soil to a depth of 10-12 cm	$\rho \cdot L^5 \cdot \Theta^{-2}$	ρ – плотность почвы soil density
Посев злаково-травяной кормосмеси Seeding cereal-grass forage mixture	$j \cdot L \cdot \Theta^{-1}$	j – количество движения (импульс) momentum
Обработка посевов от болезней и вредителей Treatment of crops against diseases and pests	$M \cdot v \cdot L \cdot \Theta^{-1}$	L – длина / path length v – скорость передвижения / movement speed
Энтропия механической энергии The entropy of mechanical energy	$N \cdot \Theta$	N – мощность power
Энергосодержание продукта Energy content of the product	$M \cdot v_p^2$	M – масса урожая / crop weight v_p^2 – скорость роста массы / mass growth rate



тур, а также тренды снижения энергосодержания силосованной массы в процессе ее хранения, где за 100% принято максимальное энергосодержание растительных материалов на момент уборки.

Описали тренды роста энергонасыщения в процентном выражении зависимостями общего вида для озимых злаковых кормосмесей и яровых культур.

Тренды снижения энергосодержания силосованной массы с учетом времени ее закладки на хранение, выраженные зависимостями общего вида, достигают минимума к моменту завершения кормового использования продукта.

3. Корма зимнего периода кормления имеют большую продолжительность срока окупаемости: для злако-травяных культур озимого сева – 12-19 мес., для кормовых культур ярового сева – 6-12 мес.

Подтвердили целесообразность выращивания поукосных и пожнивных посевов кормовых культур, использование которых увеличивает продолжительность кормления скота зелеными кормами, снижает потребность в кормах долговременного хранения (силос, сенаж, монокорм) и связанные с ними затраты.

4. Удельные затраты механической энергии на уборку, переработку и подготовку к хранению стебелчатых кормов существенно превышают затраты механической энергии на их возделывание. Так, за-

траты механической энергии на операциях отъема 1 т силоса из хранилища типовыми средствами (МТЗ-82 + ПГ-0,4) составляют 10,6 МДж, что на 23,3% выше удельных затрат, приходящихся на основную обработку почвы под названную массу – 8,6 МДж.

5. Методом преобразования размерностей установили формулы, анализ которых позволяет выделить основные факторы, определяющие расход энергии на выполнение технологической операции.

6. Предложили критерии численной оценки соотношений обменной энергии корма и затрат механической энергии на выполнение технологических операций: коэффициент эффективности затрат механической мощности на выращивание урожая, на переработку и хранение корма, коэффициент сохранности обменной энергии.

Определили расчетное содержание обменной энергии в злако-травяной кормосмеси, равное 44 850 МДж/га, или 1950 МДж/т, при удельных затратах механической энергии (мощности) на возделывание кормосмеси 370,6 МДж/га, или 16,1 МДж/т.

При расчете коэффициента эффективности затрат механической энергии выявили, что каждый МДж затрат механической энергии обеспечивает получение 121 МДж обменной энергии корма.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Улимбашев М.Б., Тамаев И.Ш., Кулинцев В.В. и др. Новый метод определения протеинового отношения рациона энергетической оценкой // *Актуальные вопросы ветеринарной биологии*. 2018. N4(40). С. 34-37.
2. Никитин А.Н., Пузик А.А., Демьянова Л.А., Прудников А.Д. Питательная ценность зеленой массы кукурузы и силоса кукурузного, заготовленного в фазах молочно-восковой и восковой спелости зерна на примере почвенно-климатических условий Смоленской области // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2018. N11-2(77). С. 33-37.
3. Коконов С.И., Зиновьев А.В. Оптимизация срока уборки кукурузы – основа получения высококачественного силоса // *Кормопроизводство*. 2018. N10. С. 41-44.
4. Волкова Е.А., Муратов А.А., Туаева Е.В. и др. Комплексная оценка эффективности производства и использования зерносенажа из зерновых злаковых культур в молочном животноводстве // *Дальневосточный аграрный вестник*. 2018. N3(47). С. 145-153.
5. Дуборезов И.В., Косолапов А.В., Дуборезов В.М. Урожайность и питательность вегетативной массы силосных культур // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2022. N3. С. 14-18.
6. Косолапова В.Г., Осипян Б.А., Мамаев А.А. Использование биологических препаратов при силосовании злаковых культур // *Кормопроизводство*. 2018. N6. С. 27-33
7. Цыкунова О.В., Кодочилова Н.А., Салова Л.А. Эффек-
8. Гаганов А.П. К оценке качества объемистых кормов // *Адаптивное кормопроизводство*. 2020. N2. С. 68-101.
9. Тищенко П.И. Качество силосов, заготовленных в различных силосных сооружениях // *Главный зоотехник*. 2018. N6. С. 30-37.
10. Кива А.А., Рабштына В.М., Сотников В.И. Биоэнергетическая оценка и снижение энергоемкости технологических процессов в животноводстве. М.: Агропромиздат. 1990. 176 с.
11. Четопникова Л.М. Биоэнергетическая оценка технологических процессов в сельскохозяйственном производстве // *Ползуновский альманах*. 2004. N4. С. 266-271.
12. Мишуrow Н.П. Биоэнергетическая оценка и основные направления снижения энергоемкости производства молока. М.: Росинформагротех. 2010. 152 с.
13. Керимов М.А., Валге А.М. Оптимизация и принятие решений в агроинженерии. М.: Колос-С. 2021. 460 с.
14. Федорова О.А., Текушев А.Х., Чаплыгин М.Е., Давыдова С.А. Технологии и технические средства для поверхностного улучшения кормовых угодий // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2022. N2(66). С. 404-414.
15. Текушев А.Х., Еремин П.А. Тенденции развития техни-

ческих средств для посева многолетних трав и поддержания продуктивного долголетия выгорающих кормовых угодий // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2021. N1. С. 70-79.

16. Марченко О.С., Текушев А.Х., Костомахин М.Н., Воронов А.Н. Приоритетные направления развития технических средств для заготовки высококачественных кормов // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2019. N1. С. 26-30.
17. Лобачевский Я.П., Мазитов Н.К., Сахапов Р.Л. и др. Эффективность инновационной технологии производства продукции растениеводства в условиях ВТО – при низкой себестоимости и высокой рентабельности на основе использования отечественной техники. В сборнике: Система технологий и машин для инновационного развития АПК России. Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции, посвящен-
- ной 145-летию со дня рождения основоположника земледельческой механики академика В.П. Горячкина. Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства. 2013. С. 50-54.
18. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Марченко О.С., Ценч Ю.С. Создание инновационной техники и ресурсосберегающих технологий производства кормов – основа развития животноводства // *Вестник МГАУ им. В.П. Горячкина*. 2017. N82. С. 23-28.
19. Дмитриев С.Ю., Дмитриев Ю.П., Ценч Ю.С. Комплекс машин АГРОМАШ для обработки залежных земель // *Вестник ВИЭСХ*. 2018; N2(31): С. 40-47.
20. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С., Бейлис В.М. Создание и развитие систем машин и технологий для комплексной механизации технологических процессов в растениеводстве // *История науки и техники*. 2019. N12. С. 46-55.

REFERENCES

1. Ulimbashev M.B., Tamaev I.Sh., Kulintsev V.V. et al. Novyy metod opredeleniya proteinovogo otnosheniya ratsiona energeticheskoy otsenki [Ration protein ratio new determining method by energy estimation]. *Aktual'nye voprosy veterinar'noy biologii*. 2018. N4(40). 34-37 (In Russian).
2. Nikitin A.N., Puzik A.A., Dem'yanova L.A., Prudnikov A.D. Pitatel'naya tsennost' zelenoy massy kukuruzy i silosa kukuruznogo, zagotovlennogo v fazakh molochno-voskovoy i voskovoy spelosti zerna na primere pochvenno-klimaticheskikh usloviy Smolenskooy oblasti [Nutritional value of green mass of corn and corn silage harvested in the phases of milky-wax and wax ripeness of grain on the example of soil and climatic conditions of the Smolensk region]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2018. N11-2(77). 33-37 (In Russian).
3. Kokonov S.I., Zinov'ev A.V. Optimizatsiya sroka uborki kukuruzy – osnova polucheniya vysokokachestvennogo silosa [Optimal time of maize harvest - basis for highquality silage]. *Kormoproizvodstvo*. 2018. N10. 41-44 (In Russian).
4. Volkova E.A., Muratov A.A., Tuaeve E.V. et al. Kompleksnaya otsenka effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya zernosenazha iz zernovykh zlakovykh kul'tur v molochnom zhitovnovodstve [Complex assessment of the efficiency of the production and use of the grain and haylage of cereal crops in dairy farming]. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik*. 2018. N3(47). 145-153 (In Russian).
5. Duborezov I.V., Kosolapov A.V., Duborezov V.M. Urozhaynost' i pitatel'nost' vegetativnoy massy silosnykh kul'tur [Yield and vegetative mass nutrition of silage crops]. *Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka*. 2022. N3. 14-18 (In Russian).
6. Kosolapova V.G., Osipyan B.A., Mamaev A.A. Ispol'zovanie biologicheskikh preparatov pri silosovanii zlakovykh kul'tur [Biological preparations in gramineous silage making]. *Kormoproizvodstvo*. 2018. N6. 27-33 (In Russian).
7. Tsykunova O.V., Kodochilova N.A., Salova L.A. Effektiv-
- nost' primeneniya khimicheskikh i biologicheskogo preparatov dlya konservirovaniya plyushchenogo zerna kukuruzy [Efficiency of the application of chemical and biological preparations for canning of flattened grain of barley in the conditions of Nizhny Novgorod region]. *Adaptivnoe kormoproizvodstvo*. 2019. N1. 41-48 (In Russian).
8. Gaganov A.P. K otsenke kachestva ob'emistykh kormov [To evaluation quality of bulky feed]. *Adaptivnoe kormoproizvodstvo*. 2020. N2. 68-101 (In Russian).
9. Tishenkov P.I. Kachestvo silosov, zagotovlennykh v razlichnykh silosnykh sooruzheniyakh [The quality of silos stored in various silos]. *Glavnyy zootekhnik*. 2018. N6. 30-37 (In Russian).
10. Kiva A.A., Rabshtyna V.M., Sotnikov V.I. Bioenergeticheskaya otsenka i snizhenie energoemkosti tekhnologicheskikh protsessov v zhitovnovodstve [Bioenergy assessment and energy intensity reduction of technological processes in animal husbandry]. Moscow: Agropromizdat. 1990. 176 (In Russian).
11. Chetoshnikova L.M. Bioenergeticheskaya otsenka tekhnologicheskikh protsessov v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [Bioenergy assessment of technological processes in agriculture]. *Polzunovskiy al'manakh*. 2004. N4. 266-271 (In Russian).
12. Mishurov N.P. Bioenergeticheskaya otsenka i osnovnye napravleniya snizheniya energoemkosti proizvodstva moloka [Bioenergy assessment and main directions for reducing the energy intensity in milk production]. Moscow: Rosinformagrotekh. 2010. 152 (In Russian).
13. Kerimov M.A., Valge A.M. Optimizatsiya i prinyatie resheniy v agroinzhenerii [Optimization and decision making in agricultural engineering]. Moscow: Kolos-S. 2021. 460 (In Russian).
14. Fedorova O.A., Tekushev A.H., Chaplygin M.E., Davydova S.A. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya poverkhnostnogo uluchsheniya kormovykh ugodiy [Technologies



- and technical means for simplified improvement of forage lands]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*. 2022. N2(66). 404-414 (In Russian).
15. Tekushev A.H., Eremin P.A. Tendentsii razvitiya tekhnicheskikh sredstv dlya poseva mnogoletnikh trav i podderzhaniya produktivnogo dolgoletiya vyrozhdayushchikhsya kormovykh ugodiy [Trends in the development of technical means for sowing perennial grasses and maintaining productive longevity of degenerate forage lands]. *Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2021. N1. 70-79 (In Russian).
 16. Marchenko O.S., Tekushev A.H., Kostomakhin M.N., Voronov A.N. Prioritetnye napravleniya razvitiya tekhnicheskikh sredstv dlya zagotovki vysokokachestvennykh kormov [Priority directions of developing technical means for harvesting high-quality feed]. *Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2019. N1. 26-30 (In Russian).
 17. Lobachevskiy Ya.P., Mazitov N.K., Sakhapov R.L., et al. Effektivnost' innovatsionnoy tekhnologii proizvodstva produktsii rastenievodstva v usloviyakh VTO – pri nizkoy sebestoimosti i vysokoy rentabel'nosti na osnove ispol'zovaniya otechestvennoy tekhniki [The effectiveness of innovative technology for the production of crop production in the WTO – at low cost and high profitability based on the use of domestic technology]. V sbornike: *Sistema tekhnologiy i mashin dlya innovatsionnogo razvitiya APK Rossii*. Sbornik nauchnykh dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 145-letiyu so dnya rozhdeniya osnovopolozhnika zemledeleycheskoy mekhaniki akademika V.P. Goryachkina. Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut mekhanizatsii sel'skogo khozyaystva. 2013. 50-54 (In Russian).
 18. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Marchenko O.S., Tsench Yu.S. Sozdanie innovatsionnoy tekhniki i resursosberegayushchikh tekhnologiy proizvodstva kormov – osnova razvitiya zhivotnovodstva [Creation of innovative equipment and resource-saving technologies of feed production-the basis of livestock development]. *Vestnik MGAU im. V.P. Goryachkina*. 2017. N82. 23-28 (In Russian).
 19. Dmitriev S.Yu., Dmitriev Yu.P., Tsench Yu.S. Kompleks mashin AGROMASH dlya obrabotki zaleznykh zemel' [Agromash machinery complex for processing of fallow land]. *Vestnik VIESH*. 2018. 2(31). 40-47 (In Russian).
 20. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S., Beylis V.M. Sozdanie i razvitie sistem mashin i tekhnologiy dlya kompleksnoy mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov v rastenievodstve [Creation and development of machine systems and technologies for complex mechanization of technological processes in crop production]. *Istoriya nauki i tekhniki*. 2019. N12. 46-55 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Керимов М.А. – научное руководство, формулирование основных направлений и разработка концептуальных положений исследования, доработка текста, формирование общих выводов;

Иванов Д.В. – литературный анализ, оценка технологий производства кормов с учетом природно-производственных условий, проведение экспериментальных исследований, обработка результатов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Kerimov M.A. – scientific guidance, formulating the main research concepts and development of the research conceptual provisions, finalization of the manuscript, formation of general conclusions;

Ivanov D.V. – literature review, evaluation of fodder production technologies with regard to natural-production conditions, experimental research, processing the research results.

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

23.01.2023
28.02.2023

Разработка вертикальной протирочной установки и определение ее основных параметров

Андрей Владимирович Богданов¹,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: avbogdanov@susu.ru;
Александр Владимирович Гриценко^{1,2},
доктор технических наук, профессор,
e-mail: alexgrits13@mail.ru;

Максим Владимирович Ческидов²,
кандидат технических наук,
старший преподаватель,
e-mail: mister.aspirant@yandex.ru;
Любовь Андреевна Штриккер²,
ассистент, e-mail: shtrikker93@mail.ru

¹Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Российская Федерация;

²Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

Реферат. Обосновали необходимость создания новых модернизированных видов перерабатывающих машин для плодов и овощей. Отметим важность универсальности такого оборудования, так как каждый отдельный вид плодов и овощей имеет свои физические особенности, характеризующиеся плотностью, вязкостью, влажностью, наличием волокон, косточек, зерен. (*Цель исследования*) Изучить протирочный процесс кабачков на разработанной установке вертикального типа. (*Материалы и методы*) Предложили улучшенную конструкцию протирочной машины: вертикальную установку с конусным шнеком внутри и ситовым барабаном. (*Результаты и обсуждение*) На основе проведенных расчетов определили толщину стенки корпуса, диаметр ячейки, параметры конуса и шнека, а также режимы работы машины. Установили высоту ситового барабана – 0,8 метра, диаметр – 0,4 метра, расстояние между вершиной конуса и барабаном – 0,15 метра. Изготовили конусный шнек с четырьмя рабочими витками. (*Выводы*) Обосновали минимальное число семян кабачка (100 штук) для последующего выбора диаметра ячеек барабана. Выявили критерии и ограничения для качественной протирки массы кабачков. Определили диаметр ячеек вертикальной протирочной установки, который составил от 0,0071 до 0,0093 метра.

Ключевые слова: переработка плодов и овощей, кабачки, протирочная машина, конусный шнек, ситовый барабан, вертикальная протирочная установка.

■ **Для цитирования:** Богданов А.В., Гриценко А.В., Ческидов М.В., Штриккер Л.А. Разработка вертикальной протирочной установки и определение ее основных параметров // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №1. С. 62-69. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-62-69. EDN DDDUAG.

Development of a Vertical Mashing Machine and Specifying its Main Parameters

Andrey V. Bogdanov¹,
Dr.Sc.(Eng.), professor, e-mail: avbogdanov@susu.ru;
Alexander V. Gritsenko^{1,2},
Dr.Sc.(Eng.), professor, e-mail: alexgrits13@mail.ru;

Maksim V. Cheskidov²,
Ph.D.(Eng.), senior lecturer,
e-mail: mister.aspirant@yandex.ru;
Lyubov A. Shtrikker²,
assistant, e-mail: shtrikker93@mail.ru

¹South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russian Federation;

²South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russian Federation

Abstract. The paper proves the necessity to create new modernized types of fruit and vegetable processing machines. The paper highlights the importance of such machinery versatility, since each individual type of fruit and vegetable has its own physical characteristics, such as solidity, viscosity, moisture content, fibers, seeds, and grains. (*Research purpose*) To study the zucchini mashing process performed by the developed vertical mashing unit. (*Materials and methods*) An improved mashing machine design is proposed: a vertical plant with a conical auger inside and a sieve drum. (*Results and discussion*) Based on the calculations, the following parameters are specified: the body wall thickness, the cell diameter, the cone and conical auger parameters, as well as the machine operating modes. The sieve drum height is set at 0.8 meters, the diameter is 0.4 meters, the distance between the cone top and the drum is 0.15 meters. A conical auger is made for four working turns. (*Conclusions*) The minimum number of

zucchini seeds (100 pieces) is specified for the subsequent selection of the drum cell diameter. The criteria and delimitations for high-quality zucchini mashing were identified. The diameter of the vertical masher cells was set within the range from 0.0071 to 0.0093 meters.

Keywords: fruit and vegetable processing, zucchini, mashing machine, conical auger, sieve drum, vertical mashing unit.

For citation: Bogdanov A.V., Gritsenko A.V., Cheskidov M.V., Shtrikker L.A. Razrabotka vertikal'noy protirochnoy ustanovki i opredelenie ee osnovnykh parametrov [Development of a vertical mashing machine and specifying its main parameters]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N1. 62-69 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-62-69. EDN DDDUAG.

Согласно данным Росстата, объемы выращивания плодовоовощной продукции возрастают с каждым годом. Валовые сборы кабачков увеличиваются, появляется задача их качественной переработки (рис. 1).

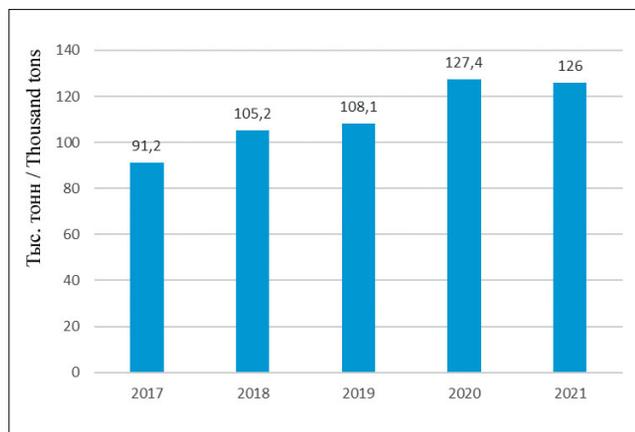


Рис. 1. Валовые сборы кабачков в 2017-2021 гг.
Fig. 1. Gross yield of zucchini in 2017-2021

В большинстве технологических линий по переработке плодов и овощей используют протирочные машины, обеспечивающие разделение на отходы (косточки, кожура, семечки, плодоножка и т.д.) и полуфабрикат, подлежащий дальнейшей обработке для создания конечного продукта [1]. Некоторые машины способны измельчить протираемый продукт до мелкодисперсной однородной консистенции. Их используют для производства детского питания и томатных паст. Протирочные машины применяют и для производства кабачковой и баклажанной икры [2, 3].

Выработаны рекомендации по технологическим и конструктивным настройкам и регулировкам протирочных машин [4]. Остается актуальной необходимость модернизации режимов протирки и усовершенствования конструктивных и технологических параметров, в том числе в целях экономии электроэнергии [5].

Цель исследования – разработка вертикальной протирочной установки и определение параметров шнека и ячеек барабана.

Материалы и методы. Сотрудники Южно-Уральского ГАУ разработали протирочную машину (рис. 2).

Собрали модель протирочной машины и обосновали конструктивные параметры (патент № 179697

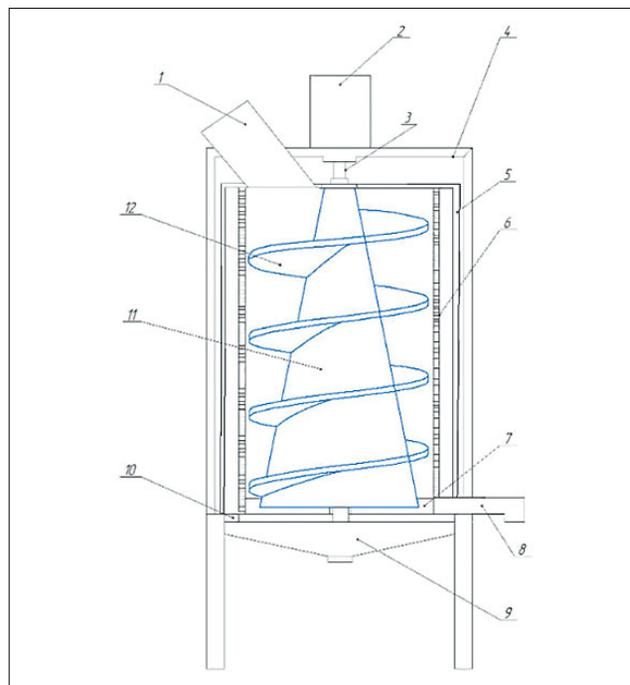


Рис. 2. Схема протирочной машины: 1 – загрузочный патрубок; 2 – электродвигатель; 3 – вал; 4 – корпус; 5 – корзина; 6 – ситовой барабан; 7 – ворошитель; 8 – разгрузочный лоток; 9 – сборочный бункер; 10 – отверстия для прохождения протертого сырья; 11 – конус (шнековый вытеснитель); 12 – лопасти

Fig. 2. Diagram of the mashing machine: 1 – loading pipe; 2 – electric motor; 3 – shaft; 4 – body; 5 – basket; 6 – sieve drum; 7 – agitator; 8 – unloading tray; 9 – collecting hopper; 10 – holes for the mashed raw materials; 11 – cone (screw displacer); 12 – blades

РФ) [6]. Высота конусного шнека основного рабочего органа должна соответствовать высоте ситового барабана – 0,8 м. Поскольку конусный шнек располагается во внутренней части ситового барабана, нижний диаметр шнека должен быть незначительно меньше диаметра ситового барабана. Учитывая, что диаметр ситового барабана равен 0,40 м, примем нижний диаметр $D = 0,39$ м (рис. 3).

Размер верхнего диаметра конусного шнека должен обеспечивать соединение с электродвигателем и свободное поступление плодовоовощного сырья в загрузочный патрубок. Поэтому $d = 0,1$ м. Тогда расстояние между верхней частью конуса и ситовым бара-

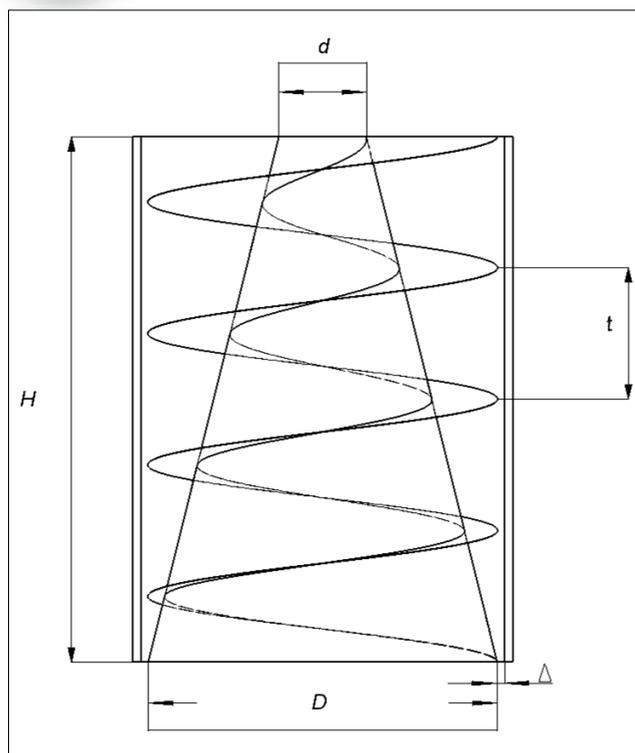


Рис. 3. Схематичное изображение конусного шнека и ситового барабана: H – высота конусного шнека; D – нижний диаметр конуса; d – верхний диаметр конуса; t – шаг винтовой части шнека

Fig. 3. Schematic diagram of the conical auger and sieve drum: H – the conical auger height; D – the cone lower diameter; d – the cone upper diameter; t – pitch of the screw part of the auger

баном будет равно 0,15 м, что обеспечивает загрузку сырья без затруднений.

Надежная работа протирочной машины напрямую зависит от толщины корпуса, шнека и его витков. Рассмотрим корпус протирочной машины как обечайку, диаметр которой должен быть на 0,12 м больше диаметра ситового барабана. Расстояние между ситовым барабаном и корпусом протирочной машины, равное 0,06 м, обеспечит свободный сход протертого сырья. Толщина стенки корпуса протирочной машины рассчитывается по формуле, взятой из ГОСТ 34233.2-2017 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность»:

$$S_p = \frac{p_k \cdot D_k}{2[\sigma_T] \cdot \varphi_p - p_k} \quad (1)$$

где S_p – толщина стенки корпуса протирочной машины, м;
 p_k – давление, создаваемое шнеком, МПа;
 D_k – диаметр корпуса протирочной машины, м ($D_k = 0,52$);

σ_T – допускаемое напряжение, МПа;
 φ_p – коэффициент прочности продольного сварного шва ($\varphi_p = 1$).

Как правило, для расчета протирочных агрегатов внутреннее максимальное давление рекомендуется

принимать 1 МПа [7]. Тогда, согласно формуле (1), толщина стенки корпуса будет равна:

$$S_p = \frac{1 \cdot 0,52}{2 \cdot 184 \cdot 1 - 0,52} = 0,0014 \text{ м.}$$

Если учесть прибавки в размере 0,0005 м на коррозию, эрозию и отклонение толщины, которое образуется при процессе изготовления обечайки, то толщина стенки машины будет составлять 0,00192 м [8, 9]. Среди всего многообразия металлопроката наиболее близким значением толщины листа для изготовления ситового барабана станет лист толщиной 0,002 м. Учитывая, что в процессе протирания в рабочей зоне создается внутреннее давление, которое воздействует на основные детали конструкции, толщину стенки можно принять равной 0,002 м.

Один из важных элементов конструкции протирочной машины – конусный шнек. Для его создания необходимо рассчитать основные конструктивные параметры. Для этого построили графическое изображение продольного сечения конуса (рис. 4).

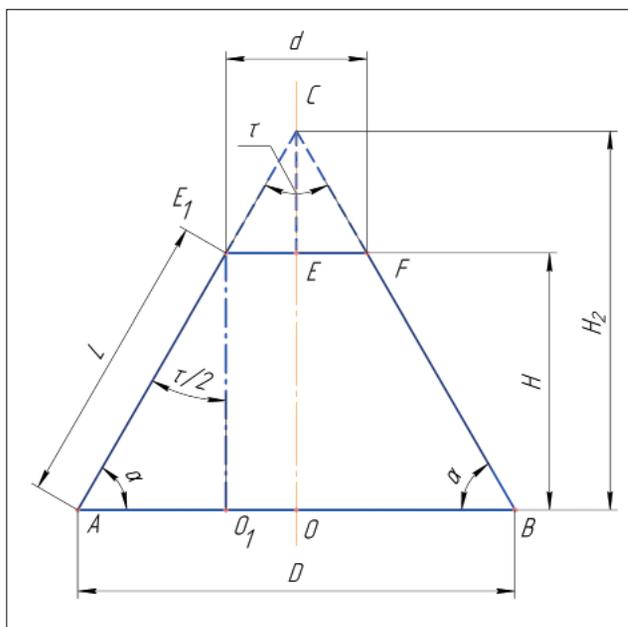


Рис. 4. Продольное сечение конуса (описание в тексте)

Fig. 4. The cone longitudinal section

Заданные параметры усеченного конуса:

- высота конуса (конусного шнека) $H = 0,8$ м;
- нижний диаметр $D = 0,39$ м;
- верхний диаметр $d = 0,1$ м.

В поперечном сечении конуса образуется равнобедренный треугольник ABC с высотой $OC = H_2$, углами α при основании AB и углом τ при вершине C . В поперечном сечении усеченного конуса имеется равнобедренная трапеция $ABFE_1$ с высотой $OE = O_1E_1$ и верхним основанием $FE_1 = d$.

Для расчета угла α рассмотрим прямоугольный треугольник AO_1E_1 с высотой O_1E_1 :

$$\tan(\alpha) = \frac{O_1E_1}{AO_1} = \frac{2 \cdot O_1E_1}{AB - E_1F} = \frac{2 \cdot H}{d - D} \quad (2)$$

Отсюда следует:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{2 \cdot H}{D - d}\right) \quad (3)$$

Подставляя известные значения в формулу (3), получим:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{2 \cdot 0,8}{0,39 - 0,1}\right), \alpha = 79,69^\circ.$$

Для нахождения угла τ воспользуемся соотношением (рис. 4):

$$\tan\left(\frac{\tau}{2}\right) = \frac{O_1E_1}{AO_1} = \frac{AO_1}{O_1E_1} = \frac{D - d}{2 \cdot H} \quad (4)$$

Тогда:

$$\tau = 2 \cdot \arctan\left(\frac{D - d}{2 \cdot H}\right) \quad (5)$$

После подстановки в уравнение (5) численных значений получим величину угла τ при вершине С:

$$\tau = 2 \cdot \arctan\left(\frac{0,39 - 0,1}{2 \cdot 0,8}\right) = 20,4^\circ.$$

Для определения длины стороны конусного шнека L рассмотрим прямоугольные треугольники AOC и AO_1E_1 с высотами OC и O_1E . Так как $\angle CAO = \angle E_1AO_1$, то:

$$\tan(\alpha) = \frac{OC}{AO} = \frac{E_1O_1}{AO_1} \quad (6)$$

Отсюда:

$$H_2 = OC = \frac{E_1O_1 \cdot AO}{AO_1} = \frac{H \cdot D}{D - d} \quad (7)$$

Из полученного равенства (7) найдем высоту конуса H_2 :

$$H_2 = \frac{0,8 \cdot 0,39}{0,39 - 0,1} = 1,076 \text{ м.}$$

Боковую сторону AE_1 , равную L , вычислим из треугольника AO_1E_1 :

$$\sin(\alpha) = \frac{E_1O_1}{AE_1} \quad (8)$$

Отсюда:

$$L = AE_1 = \frac{E_1O_1}{\sin(\alpha)} = \frac{H}{\sin(\alpha)} \quad (9)$$



Рис. 5. Конус

Fig. 5. Cone

Тогда, численное значение длины стороны конусного шнека L будет равно:

$$L = \frac{0,8}{\sin(79,69)} = 816 \text{ мм.}$$

На основе полученных численных значений сообразили конус (рис. 5).

Для дальнейшего конструирования конусного шнека необходимо знать шаг витков. Шаг винтовой части шнека рекомендуется выбирать в зависимости от диаметра шнека [9-11]. Несмотря на то, что в протирочной машине используется конусный шнек, его витки имеют диаметр, равный нижнему диаметру шнека. Поэтому для определения шага винтовой части шнека можно воспользоваться известной зависимостью:

$$t = (0,7 \dots 0,8) \cdot D, \quad (10)$$

где t – шаг винтовой части шнека, м;

D – нижний диаметр конусного шнека протирочной машины, м.

Так как $D = 0,39$ м, то численное значение шага, рассчитанное по формуле (10), составит 0,27-0,31 м. Для опытного образца принят шаг винтовой части шнека 0,27 м.

На всех стадиях проектирования протирочной машины осуществляли прочностные расчеты отдельных элементов, сочетаний их групп и машины в целом. Особое внимание уделяли проектированию ситового барабана, для которого, с целью исключения демпфирования и деформаций, принята степень перфорации не более 20% [12, 13]. Установлено, что при такой перфорации обеспечивается наибольшая площадь отверстий барабана, а следовательно, и наибольшая производительность протирочного процесса. Кроме того, определена минимальная толщина стенки ситового барабана с учетом запаса прочности – 0,002 м. В конструкции шнека толщина его витков и стенки также равны 0,002 м.

Расстояние между ситовым барабаном и корпусом протирочной машины составляет 0,06 м, что достаточно для беспрепятственного прохождения протертой массы в отгрузной латок.

В экспериментальной части исследования использовали кабачки сортов Грибовский и Цукеша. Семечки кабачков измеряли штангенциркулем ЧИЗ ШЦ-1 26322. Для контроля плотности мякоти из общей массы кабачка вырезали дольки кубической формы с вариацией 0,4-3,0 г. Измерения проводили в 3-5-кратной повторности. При реализации одного эксперимента одновременно загружали 10 кг подготовленных долек кабачка.

Частота вращения ротора протирочной машины варьировала в пределах 250-300 мин⁻¹ с шагом 50 мин⁻¹. В расчетах и пробном эксперименте с целью проверки прочности ситового барабана и оценки производительности машины частоту вращения ротора по-

вышли до 800 мин^{-1} , используя при ее измерении лазерный тахометр DT- 2234C+.

Кроме того, в расчетах и экспериментальной работе учитывали плотность, среднюю плотность мякоти, объем куба мякоти.

Обоснование и выбор параметров отдельных долек кабачка позволил установить коэффициент заполнения барабана сырьем, коэффициент проскальзывания продукта, удельное сопротивление продукта при продавливании через отверстия сита (32 кПа), скорость продавливания массы кабачка через отверстия ситового барабана.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. С учетом полученных значений шага винтовой линии на конус были наварены витки (рис. 6).



Рис. 6. Конусный шнек

Fig. 6. Conical auger



Рис. 7. Опытный образец протирочной машины

Fig. 7. A mashing machine prototype

На основании заданных параметров, расчетов и полученных численных значений спроектировали и собрали опытный образец протирочной машины для проведения экспериментальных исследований (рис. 7).

Перед тем как проводить серию экспериментов, нужно было определиться с основными параметрами перетираемого продукта с целью получения качественного результата. Так как протертая масса не должна содержать семечек кабачка, то был выбран размер их ширины. Этот параметр обеспечивает минимальное прохождение семечек через отверстия ситового барабана протирочной машины, что отражается на качестве выходного продукта [14]. При замере семечек результаты ранжировали по группам (интервалам). Число рабочих интервалов равно:

$$m = 1 + 3.322 \cdot \lg(n), \quad (11)$$

где n – число замеров семян.

Поскольку предварительно было отобрано около 100 семян, то с учетом (11) получим:

$$m = 1 + 3.322 \cdot \lg(100) = 7,64.$$

Округлим значение до целого в сторону минимума и примем семь интервалов (рис. 8).

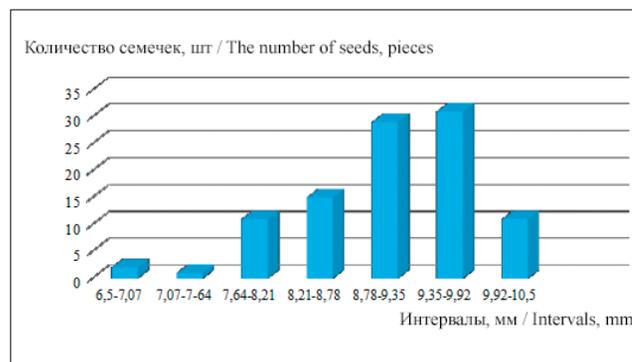


Рис. 8. Распределение семечек по ширине

Fig. 8. Bar chart of intervals for zucchini seeds

При выборе размера ячеек установки ориентировались на пятый и шестой интервалы.

Зависимость может быть аппроксимирована уравнением:

$$K_{ш} = -5,8498 \cdot b_c^3 + 144,95 \cdot b_c^2 - 1176,4 \cdot b_c + 3138,8, \quad (12)$$

где $K_{ш}$ – количество семян, шт.;

b_c – ширина семян, м.

Чтобы определить значения минимума и максимума, вычислим производную из уравнения (12) и приравняем ее к нулю:

$$(-5,8498 \cdot b_c^3 + 144,95 \cdot b_c^2 - 1176,4 \cdot b_c + 3138,8)' = 0. \quad (13)$$

С учетом решения уравнения (13) имеем:

$$-17,6 \cdot b_c^2 + 289,9 \cdot b_c - 1176,4 = 0. \quad (14)$$

Корень явного минимума $b_{c1} = 0,0071 \text{ м}$, корень яв-

ного максимума $b_{c2} = 0,0093$ м. Так как большая часть зерен укладывается в значение максимума, то выбираем соответствующий ему диаметр отверстия ситового барабана.

При прохождении семян через отверстия возможно их застревание в ячейках, что будет снижать производительность протирочного процесса [15-17].

Важно обеспечить такой диаметр ячейки, чтобы производительность была максимальной [18-19].

С учетом этого представим систему ограничений при выборе диаметра ячеек протирочного барабана установки:

$$\left[\begin{array}{l} 0,0065 \leq d \leq 0,0093 \\ \text{если } d \rightarrow 0,0065, \text{ то } \begin{cases} \Pi \rightarrow \min \\ K \rightarrow \min \end{cases} \\ \text{если } d \rightarrow 0,0093, \text{ то } \begin{cases} \Pi \rightarrow \max \\ K \rightarrow \max \end{cases} \end{array} \right. \quad (15)$$

Из представленной системы видно, что диаметр ячейки может колебаться в пределах от 0,0065 до 0,0093 м. Но важно обеспечить качество процесса протирки, которое косвенно связано с производительностью.

С одной стороны, если ячейка равна 0,0065 м, то будет обеспечена минимальная производительность при минимальном проходе семян через ячейки. С другой стороны, при диаметре ячейки 0,0093 м производительность будет максимальной, но на выходе пройдет максимальное количество семян. В последующей экспериментальной работе необходимо подобрать диаметр ячейки для обеспечения лучшего качества протирки кабачков.

Выводы. Обосновали и рассчитали основные рабочие элементы протирочной установки: конусный шнек, ситовый барабан, рабочие расстояния. Высота конусного шнека составила 0,8 м, число витков – 4, шаг винтовой части шнека – 0,27 м. Толщина витков и стенки шнека – 0,002 м. Установлен диаметр ситового барабана, равный 0,4 м. Для обеспечения свободной загрузки кабачков расстояние между верхней частью конуса и ситовым барабаном принято 0,15 м. Толщина стенки машины – 0,002 м. Изготовили экспериментальную версию повышенной производительности вследствие использования большей поверхности ситового барабана и вертикального расположения рабочих элементов конструкции. Степень перфорации ситового барабана не превышает 20%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Houska M., da Silva F.V.M. High pressure processing of fruit and vegetable products. 2017. 194.
- Милячакова А.В. Мазунина Н.И., Косонов С. И. Консервирование продукции растениеводства: учебное пособие // Ижевск: Ижевская ГСХА, 2021. 88 с.
- Tokar A., Matenchuk L., Kharchenko Z., et al. Development of recipes of canned smoothies made from zucchini and fruits. *Eureka: Life Sciences*. 2018. N4. 56-62.
- Гуртовой Н.В. Моделирование разделения плодовоощного сырья в протирочной машине // *Известия вузов. Пищевая технология*. 1999. N1. С. 52-55.
- Парамонова В.А., Кудрявцев В.Н. Исследование протирочного оборудования, его анализ и оценка эффективности // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*. 2015. N4. С.43-53.
- Нагоев М.М., Шогенов Б.В. Разработка, изготовление и исследование протирочной машины // *Наука и бизнес: пути развития*. 2022. N2(128). С. 51-54.
- Zakirnichnaya M.M., Rubtsov A.V., Dementev V.A., et al. Stress-strain state assessment capacitive apparatus taking into account impact piping for connectors. *Journal of Physics*. 2021. N2094. 42033.
- Ряднов А.И., Федорова О.А., Шарипов Р.В., Мамахай А.К., Семченко А.В. Конструктивные особенности устройств для оценки усилия резания корнеклубнеплодов при их измельчении // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2022. Т. 69. N1(46). С. 38-43.
- Ряднов А.И., Федорова О.А., Мамахай А.К. Выбор частных показателей комплексной оценки эффективности использования измельчителя корнеклубнеплодов // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2021. Т. 68. N4(45). С.45-50.
- Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С., Бейлис В.М. Создание и развитие систем машин и технологий для комплексной механизации технологических процессов в растениеводстве // *История науки и техники*. 2019. N12. С. 46-55.
- Загоруйко М.В., Васильчиков В.В., Мамахай А.К. Имитационное моделирование параметров шнека экструдера // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N4. С.71-77.
- Абидуев Ал.А., Абидуев А.А., Раднаев Д.Н., Дугаров Ц.Б. Обоснование параметров цилиндрического ячеистого сепаратора // *Вестник ВСГУТУ*. 2022. N1(84). С. 37-41.
- Запелалов М.В., Сергеев Н.С., Редреев Г.В., Коваленко Н.В. Выделение длинных примесей из зернового материала на плоских решетках // *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2022. N1(45). С. 121-128.
- Куручкин А.А., Воронина П.К., Шабурова Г.В., Фролов Д.И. Экструдаты из растительного сырья с повышенным содержанием липидов и пищевых волокон // *Техника и технология пищевых производств*. 2016. N3 (42). С. 104-111.
- Чаплыгин М.Е., Жалнин Э.В. Определение качества работы зерноуборочных комбайнов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N4. С. 71-76.

16. Ahmed J. Minimal processing and novel technologies applied to vegetables. Handbook of Vegetables and Vegetable Processing: Second Edition. Vol. 1-2. 2018. 317-339.
17. Булатов С.Ю., Нечаев В.Н., Низовцев С.Л. и др. Оценка рабочих параметров стержневого измельчителя при измельчении влажного зерна // *Вестник НГИЭИ*. 2022. N10(137). С. 48-58.
18. Zhang J., Liu L., Liu H., Shi A., Hu H., Wang Q. Research advances on food extrusion equipment, technology and its mechanism. Nongye Gongcheng Xuebao. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 33. 275-283.
19. Ганенко С.В., Штриккер Л.А. Исследование и обоснование геометрических размеров ситового барабана протирочной машины при производстве сока из кабачков // *АПК России*. 2017. Т. 24. N1. С. 57-62.

REFERENCES

1. Houska M., da Silva F.V.M. High pressure processing of fruit and vegetable products. 2017. 194 (In English).
2. Mil'chakova A.V. Mazunina N.I., Kokonov S.I. Konservirovanie produktov rastenievodstva: uchebnoe posobie [Canning crop products: a training manual]. Izhevsk: Izhevskaya GSKHA, 2021. 88 (In Russian).
3. Tokar A., Matenchuk L., Kharchenko Z., et al. Development of recipes of canned smoothies made from zucchini and fruits. Eureka: *Life Sciences*. 2018. N4. 56-62 (In English).
4. Gurtovoy N.V. Modelirovanie razdeleniya plodoovoshchnogo syr'ya v protirochnoy mashine [Simulation of separating fruit and vegetable raw materials in a triturator]. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya*. 1999. N1. 52-55 (In Russian).
5. Paramonova V.A., Kudryavtsev V.N. Issledovanie protirochnogo oborudovaniya, ego analiz i otsenka effektivnosti [Research on the triturator, its examination and efficiency assessment]. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya «Progressy i apparaty pishchevykh proizvodstv»*. 2015. N4. 43-53 (In Russian).
6. Nagoev M.M., Shogenov B.V. Razrabotka, izgotovlenie i issledovanie protirochnoy mashiny [Development, manufacture and research of a cleaning machine] *Nauka i biznes: puti razvitiya*. 2022. N2(128). 51-54 (In Russian).
7. Zakirnichnaya M.M., Rubtsov A.V., Dementev V.A., et al. Stress-strain state assessment capacitive apparatus taking into account impact piping for connectors. *Journal of Physics*. 2021. N2094. 42033 (In English).
8. Ryadnov A.I., Fedorova O.A., Sharipov R.V., Mamakhay A.K., Semchenko A.V. Konstruktivnye osobennosti ustroystv dlya otsenki usiliya rezaniya korneklubneplodov pri ikh izmel'chenii [Design features of devices for assessing the cutting force of root crops during crushing]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2022. Vol. 69. N1(46). 38-43 (In Russian).
9. Ryadnov A.I., Fedorova O.A., Mamakhay A.K. Vybor chastnykh pokazateley kompleksnoy otsenki effektivnosti ispol'zovaniya izmel'chatelya korneklubneplodov [Special indicators of integrated efficiency assessment of using the root crops cutter]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2021. Vol. 68. N4(45). 45-50 (In Russian).
10. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S., Beylis V.M. Sozdanie i razvitie sistem mashin i tekhnologiy dlya kompleksnoy mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov v rastenievodstve [Creation and development of systems for machines and technologies for the complex mechanization of technological processes in crop production]. *Istoriya nauki i tekhniki*. 2019. N12. 46-55 (In Russian).
11. Zagoruyko M.V., Vasil'chikov V.V., Mamakhay A.K. Imitatsionnoe modelirovanie parametrov shneka ekstrudera [Simulation of the extruder screw parameters]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N4. 71-77 (In Russian).
12. Abiduev A.I., Abiduev A.A., Radnaev D.N., Dugarov Ts.B. Obosnovanie parametrov tsilindricheskogo yacheistogo separatora [A rationale for cell size choice for trieur cylinder]. *Vestnik VSGUTU*. 2022. N1(84). 37-41 (In Russian).
13. Zapevalov M.V., Sergeev N.S., Redreev G.V., Kovalenko N.V. Vydelenie dlinnykh primesey iz zernovogo materiala na ploskikh reshetakh [Isolation of long impurities from grain material on flat sieves]. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022. N1(45). 121-128 (In Russian).
14. Kurochkin A.A., Voronina P.K., Shaburova G.V., Frolov D.I. Ekstrudaty iz rastitel'nogo syr'ya s povyshennym soderzhaniam lipidov i pishchevykh volokon [Extrudates from vegetable raw materials with a high lipid and fiber content]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv*. 2016. N3(42). 104-111 (In Russian).
15. Chaplygin M.E., Zhalnin E.V. Opredelenie kachestva raboty zernouborochnykh kombaynov [Determining the performance quality of combine harvesters operating]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N4. 71-76 (In Russian).
16. Ahmed J. Minimal processing and novel technologies applied to vegetables. Handbook of Vegetables and Vegetable Processing: Second Edition. Vol. 1-2. 2018. 317-339 (In English).
17. Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Nizovtsev S.L., et al. Otsenka rabochikh parametrov sterzhnevoego izmel'chatelya pri izmel'chenii vlazhnogo zerna [Evaluation of the operating parameters of the rod shredder during the grinding of wet grain]. *Vestnik NGIEI*. 2022. N10(137). 48-58 (In Russian).
18. Zhang J., Liu L., Liu H., Shi A., Hu H., Wang Q. Research advances on food extrusion equipment, technology and its mechanism. Nongye Gongcheng Xuebao. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 33. 275-283 (In English).
19. Ganenko S.V., Shtrikker L.A. Issledovanie i obosnovanie geometricheskikh razmerov sitovogo barabana protirochnoy mashiny pri proizvodstve soka iz kabachkov [Research on and rationale for the geometric dimensions of the rubbing machine sieve drum in the production of zucchini juice]. *APK Rossii*. 2017. Vol. 24. N1. 57-62 (In Russian).

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Богданов А.В. – научное руководство, формулирование основных целей и задач экспериментальных исследований, обоснование актуальности исследования, постановка проблемы, доработка текста;

Гриценко А.В. – доработка текста и литературный анализ, редактирование и оформление материалов, итоговая переработка статьи;

Ческидов М.В. – поиск и анализ статистических данных, построение графиков, участие в проведении эксперимента, формирование общих выводов;

Штриккер Л.А. – подготовка, проведение и обработка результатов экспериментальных исследований, подготовка начального варианта статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Bogdanov A.V. – scientific guidance, formulation of the experimental research goals and objectives, formulation of the research concept and substantiation of the study relevance, problem statement, the manuscript revision;

Gritsenko A.V. – manuscript finalization and literature review, material processing, proofreading;

Cheskidov M.V. – search and analysis of statistical data, plotting, conducting the experiment, drawing overall conclusions;

Shtrikker L.A. – processing the experimental study results, preparing the manuscript draft.

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

12.12.2022

01.03.2023

Моделирование влияния проточного устройства анализа качества молока на поток в доильной установке

Дмитрий Юрьевич Павкин¹,
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией,
e-mail: dimqaqa@mail.ru;
Артем Рустамович Хакимов¹,
аспирант, младший научный сотрудник,
e-mail: arty.hv@gmail.com;

Алексей Владимирович Шкирин²,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: avshkirin@mephi.ru;
Сергей Сергеевич Юрочка¹,
младший научный сотрудник,
e-mail: yurochkaSR@gmail.com;
Дмитрий Николаевич Игнатенко²,
аспирант, и.о. младшего научного сотрудника,
e-mail: dmitriyek13104@yandex.ru

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

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Реферат. Показали, что для развития молочных ферм необходимы технологии быстрого и неразрушающего анализа качества молока. Отметим, что оптические методы не влияют на молочную продукцию. Подчеркнули, что модернизация доильных установок проточным устройством экспресс-анализа качества молока позволит обеспечить ферму необходимой технологией. (*Цель исследования*) Изучить влияние проточного устройства экспресс-анализа качества молока на поток молоковоздушной смеси, протекающей в молочном шланге. (*Материалы и методы*) Использовали имитационное моделирование в программе *SolidWorks*. Разработанное устройство, как и имитационную модель, выполнили в цилиндрической геометрии для совместимости с молочными шлангами диаметром 14 миллиметров. При измерении учитывали угловое распределение света, рассеянного молоком, которое протекает внутри оптически прозрачной цилиндрической стеклянной трубки. На протекание потока молоковоздушной смеси влияло только изменение внутреннего диаметра молочных трубок. (*Результаты и обсуждение*) Отметим, что имитационная модель продемонстрировала увеличение скорости потока молоковоздушной смеси в областях перехода потока между молочным шлангом и штуцером (на меньший внутренний диаметр), а также между штуцером и измерительной камерой устройства (на больший внутренний диаметр). Зеркальный результат зафиксировали при выходе потока из измерительной камеры в штуцер и переходе из штуцера в молочный шланг. (*Выводы*) Выявили, что наличие устройства повышает среднюю скорость потока, равную 0,3-0,7 метра в секунду, на 14 процентов. Определили, что из-за неполного заполнения молочного шланга при доении разница скоростей потока молоковоздушной смеси до и после устройства не оказывает негативного влияния на работу доильной установки. Доказали, что возможна модернизация доильной установки проточным устройством экспресс анализа качества молока. **Ключевые слова:** молочная ферма, цифровизация, имитационное моделирование, анализ качества молока, проточный анализатор.

■ **Для цитирования:** Павкин Д.Ю., Хакимов А.Р., Шкирин А.В., Юрочка С.С., Игнатенко Д.Н. Моделирование влияния проточного устройства анализа качества молока на поток в доильной установке // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №1. С. 70-75. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-70-75. EDN QOUWDX.

Simulating the Influence of a Flow-Through Device for Milk Quality Analysis on The Flow Rate in the Milking Machine

Dmitriy Yu. Pavkin¹,
Ph.D.(Eng.), head of laboratory,
e-mail: dimqaqa@mail.ru;
Artem R. Khakimov¹,
Ph.D. student (Eng.), junior researcher,
e-mail: arty.hv@gmail.com;

Aleksey V. Shkirin²,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: avshkirin@mephi.ru;
Sergey S. Yurochka¹,
junior researcher, e-mail: yurochkaSR@gmail.com;
Dmitriy N. Ignatenko²,
Ph.D. student (Eng.), acting junior researcher,
e-mail: dmitriyek13104@yandex.ru



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

²Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Abstract. The development of dairy farming proves to require technologies for rapid and non-destructive analysis of milk quality. It is noted that optical methods do not negatively affect dairy products. It is noted that farms may get the desired technology by upgrading milking machines with a flow-through device for milk quality express analysis. (*Research purpose*) To study the effect of upgrading the milking machine with a flow-through device for milk quality express analysis on the flow of the milk-air mixture in the milk hose. (*Materials and methods*) For this purpose the SolidWorks simulation modeling was used. Both the developed device and the simulation model are made in cylindrical geometry to ensure their compatibility with the milk hoses of 14 millimeters in diameter. The measurement took into account the angular distribution of light scattered by milk flowing inside an optically transparent cylindrical glass tube. The flow of the milk-air mixture was affected only by a change in the inner diameter of the milk tubes. (*Results and discussion*) It is noted that the simulation model demonstrates an increase in the flow rate of the milk-air mixture in the areas of flow transition between the milk hose and the fitting (to a smaller internal diameter), as well as between the fitting and the measuring chamber of the device (to a larger internal diameter). The mirror result is recorded at the flow outlet from the measuring chamber to the nozzle and the transition from the nozzle to the milk hose. (*Conclusions*) It is found that the use of the device results in a 14 percent increase in the average flow rate of 0.3-0.7 meters per second. It is determined that due to the incomplete filling of the milk hose during milking, the difference in the flow rates of the milk-air mixture before and when applying the device does not have any adverse impact on the milking machine operation. The feasibility of upgrading the milking machine with a flow-through device for milk quality express analysis is proved.

Keywords: dairy farm, digitalization, simulation modeling, milk quality analysis, a flow-through device.

■ For citation: Pavkin D.Yu., Khakimov A.R., Shkirin A.V., Yurochka S.S., Ignatenko D.N. Modelirovanie vliyaniya protochnogo ustroystva analiza kachestva moloka na potok v doil'noy ustanovke [Simulating the influence of a flow-through device for milk quality analysis on the flow rate in the milking machine]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N1. 70-75 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-70-75. EDN QOUWDX.

Для контроля качества продукции молочные фермы все чаще используют высокотехнологичные системы экспресс-анализа, которые постепенно заменяют классические дорогостоящие и трудоемкие инвазивные химические методы [1].

Получение информации о количественном содержании компонентов молока (жира, белков, лактозы, соматических клеток, прогестерона, аминокислот и др.) лежит в основе оценки качества молока, а также диагностики баланса питания и клинического состояния коров [2, 3]. В частности, содержание жира считается основным критерием, определяющим рыночную стоимость молока. Контроль состава молока и длительности доения в режиме реального времени особенно важен для оперативного реагирования на отклонения параметров физиологического состояния животных и своевременной корректировки рационов при снижении удоев [4]. Чтобы избежать значительного падения давления в молочном шланге, применяют специальные анализаторы [5, 6]. Перспективны оптические методы бесконтактной и неразрушающей диагностики, с высокой чувствительностью и скоростью [7-10].

Однако на производстве все еще отправляют пробы молока в специализированные лаборатории. Серьезным недостатком такой практики остается значительная задержка информации о компонентном составе молока, составляющая от нескольких часов до нескольких суток.

Молоко, заполняющее трубку диаметром 10-15 мм, служит многократно рассеивающей средой, так как его оптическая толщина, оцененная по данным о коэффициентах рассеяния и поглощения молока в видимом диапазоне, превышает 10 [11-13]. Фактическое заполнение молочной трубки молоком во время доения никогда не бывает полным, достигая в большинстве случаев не более 2/3 ее объема. Проточное устройство экспресс-анализа качества молока создается с учетом того, что поток молока в доильной установке не равномерный, а представляет собой чередование молочных и воздушных пробок [14].

Возможность модернизации доильных установок устройством для измерения отдельных параметров молока повысит технологическую оснащенность и эффективность управления молочными фермами. Чтобы провести модернизацию доильной установки проточным устройством экспресс-анализа качества молока, достаточно гибкого молочного шланга внутренним диаметром 14 мм, расположенного вертикально. Тип доильной установки и количество мест в ней не имеют значения, поскольку можно установить столько устройств, сколько мест в этой установке.

Негативным фактором для работы модифицированной доильной установки может стать сильное вибрационное воздействие, влияющее на точность работы анализатора качества молока, однако вероятность таких условий незначительна.

Для нашего исследования была смоделирована

распространенная доильная система «Елочка», использующая вакуумную линию в 47 ± 1 кПа.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ – изучение влияния проточного устройства экспресс-анализа качества молока на поток молоковоздушной смеси, протекающей в молочном шланге доильной установки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Устройство выполнено в цилиндрической геометрии для совместимости с молочными шлангами диаметром 14 мм. Его действие основано на измерении углового распределения света, рассеянного молоком, протекающим внутри оптически прозрачной цилиндрической стеклянной трубки. Лазерный диод работает на видимой длине волны, совместно с аксиальной фотодиодной матрицей. Работа устройства не зависит от типа доильной установки и требует только наличия молочного шланга диаметром 14 мм и возможности установки устройства в вертикальном положении (рис. 1).

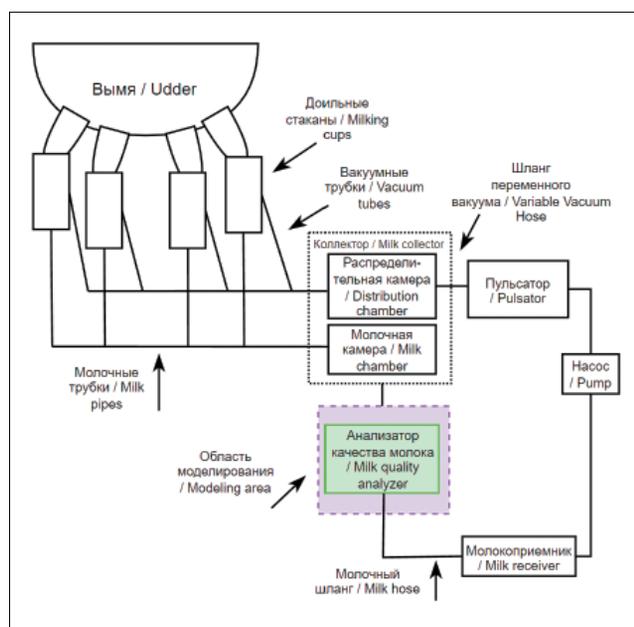


Рис. 1. Расположение области моделирования

Fig. 2. The simulation area

Для исследования создана трехмерная имитационная модель устройства экспресс-анализа качества молока в программе *SolidWorks*. У созданной модели заданы физические параметры молочного шланга, штуцеров и измерительной камеры устройства, а также показатели молоковоздушной смеси, протекающей в молочном шланге. Молочный шланг имеет внутренний диаметр 14 мм и длину 200 мм, штуцеры – 10 и 43 мм, измерительная камера – 13 и 21 мм соответственно.

Поток молоковоздушной смеси задан турбулентным, с ежесекундным объемом $0,0001 \text{ м}^3/\text{с}$ (соответствует 6 л/мин). Известно, что скорость движения газа в потоке выше, чем скорость жидкости [15]. Математический расчет плотности молоковоздушной сме-

си $\rho_{см}$ определяется из выражения истинной плотности смеси [15]:

$$\rho_{см} = \rho_{в}\varphi + \rho_{м}(1 - \varphi), \quad (1)$$

где φ – коэффициент истинного газосодержания потока;

$\rho_{см}$ – истинная плотность молоковоздушной смеси, $\text{г}/\text{см}^3$;

$\rho_{в}$ – плотность воздуха, $\text{г}/\text{см}^3$;

$\rho_{м}$ – плотность молока, $\text{г}/\text{см}^3$.

Поток молоковоздушной смеси смоделирован с неполным и неравномерным заполнением молочного шланга, что соответствует реальной ситуации в доильной установке.

Движение молоковоздушной смеси по молочному шлангу описывается системой дифференциальных уравнений [15]:

$$T_{м}SQ_{м} + Q_{м} = k_{м}\Delta p;$$

$$T_{в}SQ_{в} + Q_{в} = k_{в}\Delta p, \quad (2)$$

где $T_{м}$, $T_{в}$ – постоянные времени, с;

$Q_{м}$ и $Q_{в}$ – объемный расход молока и воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$;

Δp – разность давлений, под действием которой происходит транспортировка молока и воздуха, кПа; $k_{м}$, $k_{в}$ – коэффициенты усиления.

Оптическое устройство не инвазивное, для измерений не требуется физического контакта с потоком молока. Влияние на скорость потока в молочном шланге возможно только в том случае, если различаются внутренние диаметры молочного шланга, штуцеров и измерительной камеры.

Моделирование применимо для любых других оптических измерительных устройств тех же физических размеров. Для доильных установок с отличающимися данными в созданной модели необходимо изменять задаваемые параметры источника молоковоздушной смеси: объемный расход молока и воздуха, разность давлений, под действием которой происходит транспортировка молока и воздуха, и диаметр молочного шланга.

Основная задача моделирования – выяснить, различается ли скорость потока молоковоздушной смеси в молочном шланге до и после проточного устройства экспресс-анализа качества молока.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. В процессе моделирования мы создавали максимально близкий к реальному поток молоковоздушной смеси с неполным заполнением молочного шланга (рис. 2). Исследованная имитационная модель продемонстрировала увеличение скорости потока молоковоздушной смеси при переходе между молочным шлангом и штуцером (на меньший внутренний диаметр), а также между штуцером и измерительной камерой устройства (на больший внутренний диаметр). Зеркальный результат – при выходе потока из измерительной камеры в штуцер и переходе из штуцера в молочный шланг.

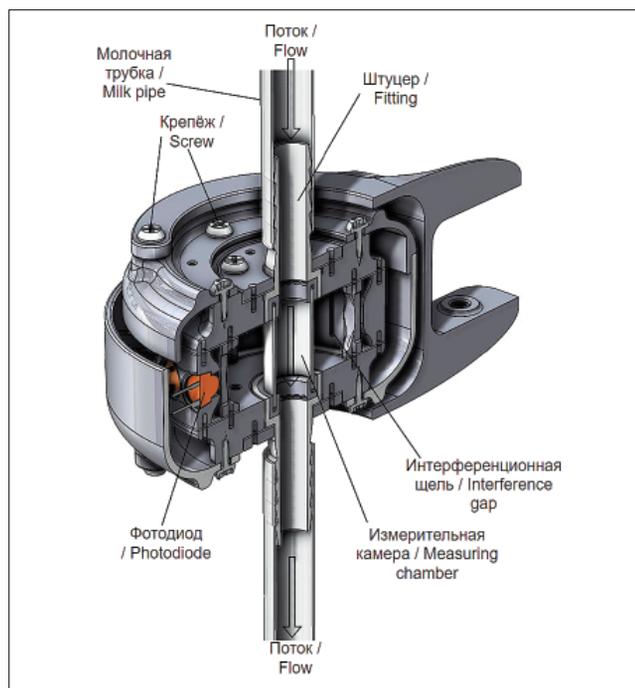


Рис. 2. Модель устройства экспресс анализа качества молока
Fig. 2. Model of the device for milk quality express analysis

Для удобства рассмотрения процесс протекания молоковоздушной смеси разделен на четыре фазы (рис. 3).

Фаза I соответствует началу заполнения молочного шланга и такту сосания доильных стаканов. В этот момент средняя доля молока в молоковоздушной смеси < 5%.

В фазе II повышается доля молока в молочном шланге и, соответственно, в штуцерах и измерительной камере. При этом в зоне перехода между молочным шлангом и штуцером этот показатель составляет < 95%, а в измерительной камере < 40%.

Фаза III демонстрирует максимальное заполнение молоковоздушной смесью: шланга – на 15-40%, об-

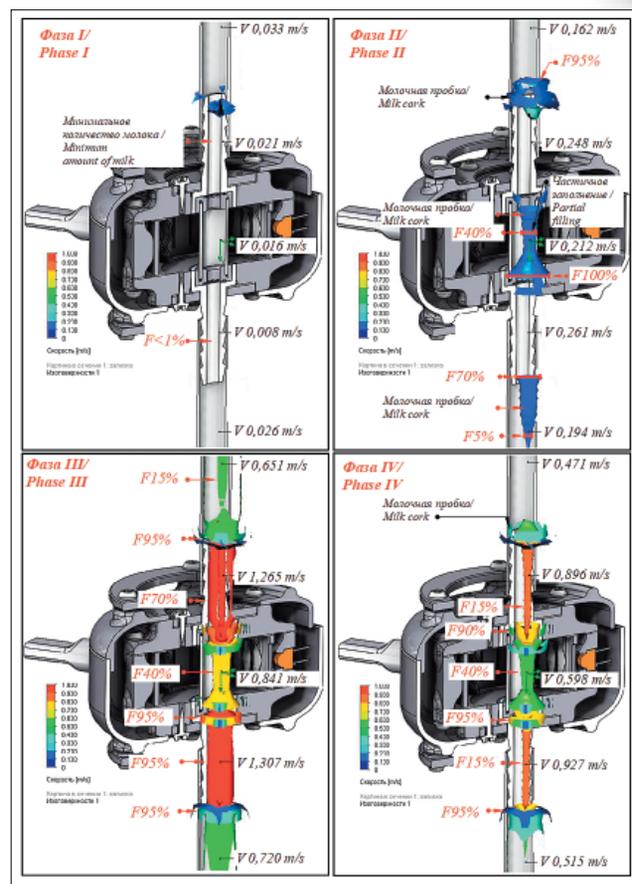


Рис. 3. Скорость потока при различном заполнении молоковоздушной смеси

Fig. 3. Flow rate at different filling of the hose with the milk-air mixture

ласти соединения молочного шланга и штуцера – до 95%, самого штуцера – на 70%. Измерительная камера устройства заполняется на 40%, область соединения между измерительной камерой и штуцером стороны выхода – до 95%.

Фаза IV показывает момент снижения заполнения

Таблица		Влияние устройства на скорость потока / INFLUENCE OF THE DEVICE ON THE FLOW RATE			Table
№ итерации iteration	Скорость потока, м/с / Flow rate, m/s		Разница скоростей потока / Flow rate difference		
	до устройства before using the device	после устройства when using the device	м/с / m/s	%	
1	0,033	0,026	-0,007	-27	
2	0,048	0,045	-0,003	-7	
3	0,162	0,194	0,032	20	
4	0,258	0,341	0,083	32	
5	0,283	0,374	0,091	32	
6	0,302	0,343	0,041	14	
7	0,354	0,415	0,061	17	
8	0,471	0,515	0,044	9	
9	0,503	0,619	0,116	23	
10	0,596	0,659	0,063	11	
11	0,651	0,720	0,069	11	

молоковоздушной смеси: штуцеров – до 15%, измерительной камеры – до 30-40%. Близкое к полному заполнение сохраняется в областях перехода между штуцерами и молочным шлангом и между штуцерами и измерительной камерой.

Как мы выяснили выше, измеримое влияние проточного устройства экспресс-анализа качества молока на поток молоковоздушной смеси проявляется в разнице скоростей потока ΔV (таблица).

Числовое определение влияния можно представить выражением:

$$\Delta V = V_n - V_d, \quad (3)$$

где V_n – скорость потока после устройства, м/с;

V_d – скорость потока до устройства, м/с.

Как видно из таблицы, при повышении скорости потока молоковоздушной смеси разница скоростей до и после устройства снижается. При скоростях потока выше 0,3 м/с разница скоростей в среднем равна 14%. Наличие устройства повышает скорость потока потому, что внутренние диаметры штуцеров и изме-

рительной камеры меньше, чем у молочного шланга. Однако, поскольку заполнение молочного шланга остается неполным, поток протекающей в молочном шланге молоковоздушной смеси не нарушен.

Выводы. Создана имитационная модель для исследования влияния проточного устройства экспресс-анализа качества молока на скорость потока молоковоздушной смеси. В модели реализованы типовой молочный шланг доильной установки (с внутренним диаметром 14 мм), штуцеры (10 мм), измерительная камера (13 мм), а также источник-генератор молоковоздушной смеси.

Выявлено изменение скорости потока молоковоздушной смеси. Если она выше 0,3 м/с, то после устройства этот показатель возрастает на 14%. Поскольку молочный шланг заполнен не полностью, изменение скорости не нарушает движения потока молоковоздушной смеси, то есть не влияет на работу доильной установки. Поэтому модернизация доильной установки проточным устройством экспресс-анализа качества молока возможна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Burmistrov D.E., Pavkin D.Y., Khakimov A.R., Ignatenko D.N., Nikitin E.A., Lednev V.N., Lobachevsky Y.P., Gudkov S.V., Zvyagin A.V. Application of Optical Quality Control Technologies in the Dairy Industry: An Overview. *Photonics*. 2021. N8. 551.
- Mengüç M., Manickavasagam S. Characterization of size and structure of agglomerates and inhomogeneous particles via polarized light. *International journal of engineering science*. 1998. Vol. 36. N12-14. 1569-1593.
- Kolokolova L., Kimura H., Ziegler K., Mann I. Light-scattering properties of random-oriented aggregates: Do they represent the properties of an ensemble of aggregates? *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2006. Vol. 100. N1-3. 199-206.
- Павкин Д.Ю., Хакимов А.Р., Владимиров Ф.Е., Юрочка С.С. Влияние субклинического и клинического мастита на процесс молокоотдачи коров ярославской породы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N3. С. 62-66.
- He C., He H., Chang J., Chen B., Ma H., Booth M.J. Polarization optics for biomedical and clinical applications: a review. *Light: Science & Applications*. 2021. 10. N1. 1-20.
- Ghosh N., Vitkin A. I. Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook. *Journal of biomedical optics*. 2011. Vol. 16. N11. 110801.
- Li P., Peng M., Yin X., Ma Z., Dong G., Zhang Q., Qiu J. Temperature dependent red luminescence from a distorted Mn⁴⁺ site in CaAl₄O₇: Mn⁴⁺. *Optics Express*. 2013. Vol. 21. N16. 18943-18948.
- Ramella-Roman J.C., Saytashev I., Piccini M. A review of polarization-based imaging technologies for clinical and pre-clinical applications. *Journal of Optics*. 2020. Vol. 22. N12. 123001.
- He H., Liao R., Zeng N., Li P., Chen Z., Liu X., Ma H. Mueller matrix polarimeter – an emerging new tool for characterizing the microstructural feature of complex biological specimen. *Journal of Lightwave Technology*. 2019. 37. N11. 2534-2548.
- Tuchin V. V. Polarized light interaction with tissues. *Journal of biomedical optics*. 2016. 21. N7. 071114.
- Liu T., Sun T., He H., Liu S., Dong Y., Wu J., Ma H. Comparative study of the imaging contrasts of Mueller matrix derived parameters between transmission and backscattering polarimetry. *Biomedical Optics Express*. 2018. N9. 4413-4428.
- Jiao S., Yu W., Stoica G., Wang L. V. Multiple-channel Mueller-matrix optical coherence tomography in biological tissue. *IEEE*. 2002. 11.
- Chue-Sang J., Bai Y., Stoff S., Straton D., Ramaswamy S. D., Ramella-Roman J. C. Use of combined polarization-sensitive optical coherence tomography and Mueller matrix imaging for the polarimetric characterization of excised biological tissue. *Journal of Biomedical Optics*. 2016. 21. N7. 071109.
- Kirsanov V.V., Shkirin A.V., Pavkin D.Y., Ignatenko D.N., Danielyan, G.L., Khakimov A.R., Bunkin, N.F. Laser Fluorescence and Extinction Methods for Measuring the Flow and Composition of Milk in a Milking Machine. *Photonics*. 2021. N8. 390.
- Мамаев В.А. Движение газожидкостных смесей в трубах. М.: Недра. 1978. 240 с.

REFERENCES

1. Burmistrov D.E., Pavkin D.Y., Khakimov A.R., Ignatenko D.N., Nikitin E.A., Lednev V.N., Lobachevsky Y.P., Gudkov S.V., Zvyagin A.V. Application of Optical Quality Control Technologies in the Dairy Industry: An Overview. *Photonics*. 2021. N8. 551 (In English).
2. Mengüç M., Manickavasagam S. Characterization of size and structure of agglomerates and inhomogeneous particles via polarized light. *International journal of engineering science*. 1998. Vol. 36. N12-14. 1569-1593 (In English).
3. Kolokolova L., Kimura H., Ziegler K., Mann I. Light-scattering properties of random-oriented aggregates: Do they represent the properties of an ensemble of aggregates? *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2006. Vol. 100. N1-3. 199-206 (In English).
4. Pavkin D.Yu., Khakimov A.R., Vladimirov F.E., Yurochka S.S. Vliyanie subklinicheskogo i klinicheskogo mastita na protsess molokootdachi korov yaroslavskoy porody [Research into the influence of clinical and subclinical mastitis on the milk flow rate of the Yaroslavl breed cows]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N3. 62-66 (In Russian).
5. He C., He H., Chang J., Chen B., Ma H., Booth M.J. Polarisation optics for biomedical and clinical applications: a review. *Light: Science & Applications*. 2021. 10. N1. 1-20 (In English).
6. Ghosh N., Vitkin A. I. Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook. *Journal of biomedical optics*. 2011. Vol. 16. N11. 110801 (In English).
7. Li P., Peng M., Yin X., Ma Z., Dong G., Zhang Q., Qiu J. Temperature dependent red luminescence from a distorted Mn⁴⁺ site in CaAl₄O₇: Mn⁴⁺. *Optics Express*. 2013. Vol. 21. N16. 18943-18948 (In English).
8. Ramella-Roman J.C., Saytashev I., Piccini M. A review of polarization-based imaging technologies for clinical and pre-clinical applications. *Journal of Optics*. 2020. Vol. 22. N12. 123001 (In English).
9. He H., Liao R., Zeng N., Li P., Chen Z., Liu X., Ma H. Mueller matrix polarimeter – an emerging new tool for characterizing the microstructural feature of complex biological specimen. *Journal of Lightwave Technology*. 2019. 37. N11. 2534-2548 (In English).
10. Tuchin V.V. Polarized light interaction with tissues. *Journal of biomedical optics*. 2016. 21. N7. 071114 (In English).
11. Liu T., Sun T., He H., Liu S., Dong Y., Wu J., Ma H. Comparative study of the imaging contrasts of Mueller matrix derived parameters between transmission and backscattering polarimetry. *Biomedical Optics Express*. 2018. N9. 4413-4428 (In English).
12. Jiao S., Yu W., Stoica G., Wang L. V. Multiple-channel Mueller-matrix optical coherence tomography in biological tissue. *IEEE*. 2002. 11 (In Russian).
13. Chue-Sang J., Bai Y., Stoff S., Straton D., Ramaswamy S. D., Ramella-Roman J. C. Use of combined polarization-sensitive optical coherence tomography and Mueller matrix imaging for the polarimetric characterization of excised biological tissue. *Journal of Biomedical Optics*. 2016. 21. N7. 071109 (In English).
14. Kirsanov V.V., Shkirin A.V., Pavkin D.Y., Ignatenko D.N., Danielyan, G.L., Khakimov A.R., Bunkin, N.F. Laser Fluorescence and Extinction Methods for Measuring the Flow and Composition of Milk in a Milking Machine. *Photonics*. 2021. N8. 390 (In English).
15. Mamaev V.A. Dvizhenie gazozhidkostnykh smesey v trubakh [The movement of gas-liquid mixtures in pipes]. Moscow: Nedra. 1978. 240 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Павкин Д.Ю. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования;

Хакимов А.Р. – литературный анализ, разработка имитационной модели, обработка результатов исследования, формирование текста и визуализация;

Шкирин А.В. – научное руководство, разработка имитационной модели;

Игнатенко Д.Н. – разработка имитационной модели, визуализация;

Юрочка С.С. – разработка имитационной модели, обработка результатов исследования.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Pavkin D.Yu. – scientific supervision, formulation of the main research concept;

Khakimov A.R. – literature review, development of a simulation model, processing of the research results, text formation and visualization;

Shkirin A.V. – scientific supervision, development of a simulation model;

Ignatenko D.N. – development of a simulation model, visualization;

Yurochka S.S. – development of a simulation model, processing of the research results, visualization;

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

13.02.2023

06.03.2023

Повышение эффективности сушки семян в реверсивной зерносушилке

Михаил Геннадьевич Загоруйко¹,
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник,
e-mail: zagorujko.misha2013@yandex.ru;

Сергей Анатольевич Павлов¹,
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник, e-mail: sapavlov777@mail.ru;

Игорь Андреевич Башмаков²,
кандидат технических наук,
старший преподаватель,
e-mail: bashmakov@rgau-msha.ru

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

²Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

Реферат. Проанализировали, что реверсивная сушка широко используется в деревообрабатывающей промышленности, при сушке початков кукурузы, но для сушки семян трав и зерновых почти не применяется, что можно объяснить малоизученностью этого принципа. Отметим, что работу реверсивной сушилки характеризуют длительность односторонней продувки и допустимая температура агента сушки. Выявили, что повышение температуры агента сушки актуально для сушилок, предназначенных для обработки мелкосеменных культур, так как они работают на пониженных значениях температуры по сравнению с оборудованием для зерновых. (*Цель исследования*) Определить эффективность реверсивной зерносушилки, заключающуюся в снижении удельных затрат и повышении производительности, а также длительности односторонней продувки и допустимой температуры агента сушки. (*Материалы и методы*) Определили основные параметры, характеризующие работу реверсивной зерносушилки: длительность и допустимую температуру нагрева зерна при реверсивной сушке, а также показатели режима односторонней продувки и допустимую температуру агента сушки. Выявили, что интенсификация процесса реверсивной сушки достигается повышенной температурой агента сушки по сравнению с сушкой при односторонней продувке вследствие более высокой допустимой температуры нагрева семян. (*Результаты и обсуждение*) В ходе хозяйственной проверки установили увеличение производительности и снижение удельных затрат теплоты при неравномерности сушки семян ниже нормативной. Подчеркнули, что повышение предельно допустимой температуры зерна примерно на 2 градуса Цельсия соответствует росту температуры агента сушки на 4-6 градусов и производительности сушилки на 10-12 процентов. (*Выводы*) Доказали эффективность реверсивной сушилки в сравнении с традиционной, заключающуюся в повышении производительности на 13 процентов и снижении удельных затрат теплоты на 10 процентов, при неравномерности сушки семян ниже нормативной. Установили, что длительность односторонней продувки в реверсивной зерносушилке составила 0,3 часа. Определили, что предельная температура агента сушки при реверсе рассчитывается исходя из допустимой температуры семян, которая должна быть на 2-3 градуса выше предельно допустимой по сравнению с традиционной сушкой. По результатам исследования она составила 57 градусов Цельсия для семян райграса.

Ключевые слова: интенсивная сушка семян, реверсивная зерносушилка, предельно допустимая температура сушки семян, агент сушки, качество семян, мелкосеменные культуры.

■ **Для цитирования:** Загоруйко М.Г., Павлов С.А., Башмаков И.А. Повышение эффективности сушки семян в реверсивной зерносушилке // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №1. С. 76-80. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-76-80. EDN VQIIQU.

Improving the Efficiency of Seed Drying in a Reversible Grain Dryer

Mikhail G. Zagoruyko¹,
Ph.D.(Eng.), associate professor, senior researcher,
e-mail: zagorujko.misha2013@yandex.ru;

Sergey A. Pavlov¹,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: sapavlov777@mail.ru;

Igor A. Bashmakov²,
Ph.D.(Eng.), senior lecturer,
e-mail: bashmakov@rgau-msha.ru

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

²Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Abstract. Reverse drying is acknowledged to be widely used in the woodworking industry, and in corn cob drying, but it is hardly used for drying grass and cereal seeds. It can be explained by insufficient research into the matter. It is noted that the reversible dryer operation is characterized by the duration of one-direction blowing and the permissible temperature of the drying agent. It has been found that a temperature increase in the drying agent is crucial for dryers designed for processing small-seed crops, since they operate at lower temperatures compared to those designed for cereals. (*Research purpose*) To determine the effectiveness of a reversible grain dryer that lies in reduced unit costs and increased productivity, as well as the duration of blowing in one direction and the drying agent allowable temperature. (*Materials and methods*) The main parameters characterizing the operation of a reverse grain dryer have been determined as follows: the duration and permissible temperature of grain heating, the indicators of the one-direction blowing mode and the permissible temperature of the drying agent. It has been found that the intensification of the reverse drying process can be achieved by an increase in the drying agent temperature compared to drying in the one-direction blowing mode, possible due to a higher permissible temperature of seed heating. (*Results and discussion*) The economic testing of a reversible dryer proved its efficiency in terms of an increase in productivity, a decrease in the specific heat consumption as well as the seed drying non-uniformity below the norm. It is emphasized that an increase in the maximum permissible grain temperature by about 2 degrees Celsius corresponds to a 4-6-degree rise in the drying agent temperature and a 10-12 percent increase in the dryer productivity. (*Conclusions*) A reverse dryer is proved to be more efficient compared to a traditional one that lies in a 13-percent increase in productivity and a 10-percent decrease in the specific heat consumption, as well as the seed drying non-uniformity below the norm. It has been found that the duration of one-direction blowing mode in a reversible grain dryer was 0.3 hours. It has been determined that compared to the traditional drying, the maximum temperature of the drying agent in the reverse-mode drying is calculated based on the seed permissible temperature, that is to be 2-3 degrees higher than the maximum permissible one. According to the findings, it is 57 degrees Celsius for ryegrass seeds.

Keywords: intensive seed drying, reversible grain dryer, maximum allowable temperature of seed drying, drying agent, seed quality, small seed crops.

■ For citation: Zagoruyko M.G., Pavlov S.A., Bashmakov I.A. Povyshenie effektivnosti sushki semyan v reversivnoy zernosushilke [Improving the efficiency of seed drying in a reversible grain dryer]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N1. 76-80 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-76-80. EDN VQIIQU.

Реверсивная сушка позволяет обеспечить качественную подготовку семян и повысить энергоэффективность процесса. Ее широко применяют в деревообрабатывающей промышленности, при сушке початков кукурузы [1, 2]. Однако для сушки семян зерновых и трав эту технологию почти не используют, что можно объяснить ее малоизученностью [3-5].

Основные параметры, характеризующие работу реверсивной сушилки: длительность односторонней продувки и допустимая температура агента сушки. Повышение температуры агента сушки актуально для сушилок, предназначенных для обработки мелкосеменных культур, так как в этом случае необходимо выдержать пониженную температуру по сравнению с зерновыми [6].

Цель исследования – определить эффективность реверсивной зерносушилки, заключающуюся в снижении удельных затрат и повышении производительности, а также длительности односторонней продувки и допустимой температуры агента сушки.

Материалы и методы. Сушка мелких семян при односторонней продувке характеризуется повышенной неравномерностью по влажности, так как материал высушивается послойно. Но если ограничить

длительность односторонней продувки τ_p величиной допустимого влагосъема ΔW_i , который соответствует величине неравномерности сушки $\delta/2$ (согласно исходным требованиям для рядовых семян, $\delta \leq \pm 1,5\%$, элитных – $\delta \leq \pm 1\%$), то в конце процесса будет выдержана заданная величина δ [7, 8].

Длительность односторонней продувки слоя семян τ_p при реверсе агента сушки определяли по формуле [8]:

$$\tau_p = \frac{\Delta U_i r H}{2 \alpha f (t - \theta_{cp}) h_i \eta}, \quad (1)$$

где τ_p – длительность односторонней продувки, ч;
 ΔU_i – влагосъем при односторонней продувке, кг вл./кг сух. мат.;

r – удельная теплота испарения влаги, кДж/кг;

H, h_i – высота слоя и высота элементарного слоя, м;

$h_i = 2...3d_s$, где d_s – эквивалентный диаметр зерновки, м;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·°С;

f – удельная поверхность семян, м²/кг;

t, θ_{cp} – температура агента сушки и средняя семян, °С;

η – доля теплоты, пошедшая на испарение влаги.

Общая длительность реверсивной сушки составит:

$$\tau_c = \tau_p n, \quad (2)$$

где τ_c – длительность сушки, ч;

τ_p – длительность односторонней продувки, ч;

n – число односторонних продувок.

Интенсификация процесса реверсивной сушки, в частности, достигается повышенной температурой агента сушки по сравнению с сушкой при односторонней продувке. Это явление объясняется более высокой допустимой температурой нагрева семян [9-12].

Допустимая температура нагрева зерна при реверсивной сушке составит:

$$\theta_d = \theta_{\text{пд}} + \Delta\theta, \quad (3)$$

где θ_d – допустимая температура нагрева зерна, °С;

$\theta_{\text{пд}}$ – предельно допустимая температура нагрева зерна, °С;

$\Delta\theta$ – приращение температуры при реверсивном режиме сушки.

Величина $\theta_{\text{пд}}$ зависит в том числе от длительности сушки, которая учитывается в известной формуле С.Д. Птицина:

$$\theta_{\text{пд}} = 2350 / [0,37(100 - W_n) + W_n] + 20 - 10 \log \tau, \quad (4)$$

где W_n – начальная влажность материала, %;

τ – время сушки, мин.

Поскольку зерно подвергается воздействию только половину времени сушки плюс длительность односторонней продувки, можно записать [13-15]:

$$\Delta\theta = 10 \left[\log \tau_c - \log \left(\frac{\tau_c}{2} + \tau_p \right) \right], \quad (5)$$

Предельная температура агента сушки, °С, определена из уравнения:

$$t_n = \kappa \cdot \theta_d, \quad (6)$$

где κ – безразмерный коэффициент для колонковых сушилок, $\kappa = 1,25-1,30$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Работу сушилки изучили на семенах райграсса. Продолжительность односторонней продувки τ_p при сушке семян определяли при исходной влажности 14-24% с допустимой неравномерностью высушенных семян $\delta = \pm 1,5\%$, а также при $\alpha = 23 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$; $f = 2,2 \text{ м}^2/\text{кг}$; $t = 55 \text{ °С}$; $\theta_{\text{ср}} = 31 \text{ °С}$; $r = 2700 \text{ кДж/кг}$; $H = 0,25 \text{ м}$; $h_i = 0,005 \text{ м}$; $\eta = 0,85$; $U_i = 0,02 \text{ кг вл./кг сух. мат.}$. После подстановки этих величин в (1) получили $\tau_p = 0,36 \text{ ч}$.

При $U_n = 0,315 \text{ кг вл./кг сух. мат.}$; $U_k = 0,163 \text{ кг вл./кг сух. мат.}$; $\theta_{\text{пд}} = 42 \text{ °С}$; $n = 8$; длительность сушки $\tau_c \approx 3 \text{ ч}$, а допустимое приращение температуры зерна $\Delta\theta = 2,2 \text{ °С}$; $\theta_d = 42 + 2,2 \approx 44 \text{ °С}$, при предельной температуре агента сушки $t_n = 1,3\theta_d = 57 \text{ °С}$.

Повышение $\theta_{\text{пд}}$ на $\sim 2 \text{ °С}$ соответствует росту температуры агента сушки на $\sim 4-6 \text{ °С}$ и производительности сушилки на 10-12%.

Хозяйственную проверку способа сушки с реверсом теплоносителя проводили на модернизированной колонковой сушилке СЗТМ-5 (рисунок).

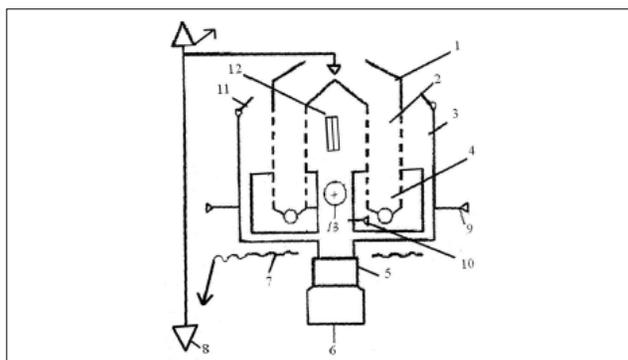


Рис. 1. Технологическая схема сушилки СЗТМ-5: 1 – бункер; 2 – сушильная камера; 3 – воздушная камера; 4 – охлаждающая камера; 5 – вентилятор; 6 – топка; 7 – транспортер; 8 – норрия; 9-12 – электрозадвижки; 13 – вентилятор охлаждающей камеры

Fig. 1. SZTM-5 dryer process scheme: 1 – hopper; 2 – drying chamber; 3 – air chamber; 4 – cooling chamber; 5 – fan; 6 – furnace; 7 – conveyor; 8 – norria; 9, 10, 11, 12 – electric gate valves; 13 – fan of the cooling chamber

Норрией загружают влажный материал в бункер, заполняют сушильную и охлаждающую камеры. Включают топку и в течение 10-15 мин прогревают семена. Затем циклично высушивают семена, то есть циркулируют материал через корпус сушилки и норрию. При этом подогретый в топке воздух вентилятором нагнетают в центральный коллектор, откуда он поступает в слой семян и удаляется из сушилки в атмосферу через воздушные камеры.

Реверсирование агента сушки осуществляли переключением электрозадвижек. Подогретый воздух поочередно направляли с обеих сторон слоя материала в сушилке.

Методика исследований предусматривала сушку семян райграсса с реверсом агента сушки и без него (таблица). Без реверса температуру агента сушки поддерживали 50 °С , с реверсом – 56 °С , скорость подачи теплоагента составила $0,35 \text{ м/с}$.

При хозяйственной проверке влагосъем для односторонней продувки при реверсивной сушке семян равен $\Delta U_i \leq 0,018 \text{ кг вл./кг сух. мат.}$, что соответствовало нормативной неравномерности высушенных семян.

Допустимую температуру семян поддерживали равной сумме предельно допустимого показателя и приращения $\Delta\theta = 2 \text{ °С}$.

Выводы. В результате хозяйственной проверки реверсивной сушилки на семенах райграсса подтвердили ее эффективность: производительность повысилась на 13%, удельные затраты теплоты сократились на 10% в сравнении с сушкой без реверса, при неравномерности сушки семян ниже нормативной. Длительность односторонней продувки в реверсивной зерносушилке по результатам исследований составила 0,3 ч. Предельная температура агента сушки при реверсе рассчитывается исходя из допустимой

Таблица			Table		
ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ СЗТМ-5 / KEY PERFORMANCE INDICATORS OF SZTM-5					
Показатели / Indicators	Значение / Values				
	с реверсом / reverse drying	без реверса / one-direction drying			
Производительность, т/ч / productivity, t/h: влажный материал / wet material сухой материал / dry material плановая / planned	4,2	3,7			
	3,5	–			
	3,8	4,1			
Длительность сушки, ч / drying time, h: расчетная / estimated фактическая / actual	3,5	–			
	3,8	4,3			
Длительность односторонней продувки, ч One-sided blowing duration, h	0,3	–			
Влажность семян, % / seed moisture, % исходная / initial moisture конечная / final moisture	22	22			
	12,8	13			
Удельный расход тепла на сушку, МДж/кг Specific heat consumption for drying, MJ/kg	9,6	10,6			
Неравномерность сушки (предельное отклонение от среднего), ±% Drying non-uniformity (marginal deviation from the mean), ±%	+0,6	+2			
	–0,5	–1,5			
Всхожесть семян, % / seed germination, %: до сушки / before drying после сушки / after drying	80	72			
	82	75			
Снижение длительности сушки, % / Decrease in drying time, %	12	–			
Снижение удельных затрат топлива, % Reduction of specific fuel costs, %	10	–			

температуры семян, которая должна быть на 2-3°C выше предельно допустимой по сравнению с тради-

ционной сушкой. По результатам исследования она составила 57°C для семян райграсса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Серговский П.С. Режимы и проведение камерной сушки пилломатериалов. М.: Лесная промышленность. 1976. 135 с.
- Теленгатор М.А., Уколов В.С., Цецинский В.М. Обработка семян зерновых культур. М.: Колос. 1972. 270 с.
- Шаршунов В.А., Рукшан Л.В. Сушка и хранение зерна. Минск: Мисанта. 2010. 588 с.
- Дорохов А.С. Эффективность оценки качества сельскохозяйственной техники и запасных частей // *Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина»*. 2015. N1(65). С. 31-35.
- Drincha V.M., Tsench Yu.S. Fundamentals and prospects for the technologies development for post-harvest grain processing and seed preparation. *Agricultural machinery and technologies*. 2020. Vol. 14. N4. 17-25.
- Загоруйко М.Г., Бельшикина М.Е., Марин Р.А., Башмаков И.А. Обоснование математических моделей переменного теплоподвода при сушке зерна // *Аграрный научный журнал*. 2021. N11. С. 87-92.
- Агеев П.С., Сутягин С.А., Курдюмов В.И., Павлушин А.А. Особенности реализации температурного режима в установке контактного типа при сушке мелкосеменных культур // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021. N2 (54). С. 6-12.
- Zhang, J., Zhao, Z. Heat and mass transfer characteristics and model of rapeseed (*Bassica rapus*) fluidized-bed drying with constant drying rate. *Nongye Gongcheng Xuebao. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2017. N33(13). 287-295.
- Лобачевский Я.П., Пехальский И.А., Павлов С.А. Расчет изотермической сушки зерна // *Сельский механизатор*. 2019. N8. С. 22-23.
- Хусаинов Р.Н. Интенсификация технологического процесса кондуктивной сушки дисперсных материалов // *Вестник технологического университета*. 2017. N8. С. 124-125.
- Хабибов Ф.Ю., Джураев Х.Ф., Абдурахманов О.Р. Интенсификация процесса сушки сельхозпродуктов комбинированным методом подвода энергии // *Пищевая промышленность*. 2013. N7. С. 24-25.
- Wang P., Li D., Wang L.-J., Adhikari B. Effect of High Temperature Intermittent Drying on Rice Seed Viability and Vigor. *International Journal of Food Engineering*. 2017. N13(10). 20160433.
- Павлов С.А., Фролова Т.Ф. Исследования сушки зерна в автоматизированном зерносушильном агрегате // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N4. С. 29-34.
- Павлов С.А., Левина Н.С., Лукин И.Д. Исследование сушки селекционных семян в плотном слое // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N1. С. 22-26.
- Zhifeng X., Fan Z., Lei X., Jianhong W., Nanxing W. Numerical Simulation on Superheated Steam Fluidized Bed Drying at Different Operating Pressures. *International Journal of Food Engineering*. 2017. N13(10). 20170093.

REFERENCES

1. Sergovskiy P.S. Rezhimy i provedenie kamernoy sushki pilomaterialov [Modes and performing lumber drying in chamber]. Moscow: Lesnaya promyshlennost'. 1976. 135 (In Russian).
2. Telengator M.A., Ukolov V.S., Tsetsinovskiy V.M. Obrabotka semyan zernovykh kul'tur [Grain seed processing]. Moscow: Kolos. 1972. 270 (In Russian).
3. Sharshunov V.A., Rukshan L.V. Sushka i khranenie zerna [Grain drying and storage]. Minsk: Misanta. 2010. 588 (In Russian).
4. Dorokhov A.S. Effektivnost' otsenki kachestva sel'skokhozyaystvennoy tekhniki i zapasnykh chastey [The effectiveness of assessing the quality of agricultural machinery and spare parts]. *Vestnik FGBOU VPO «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina»*. 2015. N1(65). 31-35 (In Russian).
5. Drincha V.M., Tsench Yu.S. Fundamentals and prospects for the technologies development for post-harvest grain processing and seed preparation. *Agricultural machinery and technologies*. 2020. Vol. 14. N4. 17-25 (In English).
6. Zagoruyko M.G., Belyshkina M.E., Marin R.A., Bashmakov I.A. Obosnovanie matematicheskikh modeley peremennogo teplopodvoda pri sushke zerna [Justification of mathematical models of variable heat supply during grain drying]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal*. 2021. N11. 87-92 (In Russian).
7. Ageev P.S., Sutyagin S.A., Kurdyumov V.I., Pavlushin A.A. Osobennosti realizatsii temperaturnogo rezhima v ustanovke kontaktnogo tipa pri sushke melkosemennykh kul'tur [Features of temperature regime in a contact type unit when drying small seed crops]. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2021. N2(54). 6-12 (In Russian).
8. Zhang J., Zhao Z. Heat and mass transfer characteristics and model of rapeseed (*Bassica rapus*) fluidized-bed drying with constant drying rate. *Nongye Gongcheng Xuebao. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2017. N33(13). 287-295 (In English).
9. Lobachevskiy Ya.P., Pekhal'skiy I.A., Pavlov S.A. Raschet izotermicheskoy sushki zerna [Calculation of isothermal drying of grain]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2019. N8. 22-23 (In Russian).
10. Khusainov R.N. Intensifikatsiya tekhnologicheskogo protsessa konduktivnoy sushki dispersnykh materialov [Intensification of the technological process for dispersed material conductive drying]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2017. N8. 124-125 (In Russian).
11. Khabibov F.Yu., Dzhuraev H.F., Abdurakhmanov O.R. Intensifikatsiya protsessa sushki sel'khozproduktov kombinirovannym metodom podvoda energii [Intensifying the process of drying agricultural products by the combined method of energy supply] *Pishchevaya promyshlennost'*. 2013. N7. 24-25 (In Russian).
12. Wang P., Li D., Wang L.-J., Adhikari B. Effect of High Temperature Intermittent Drying on Rice Seed Viability and Vigor. *International Journal of Food Engineering*. 2017. N13(10). 20160433 (In English).
13. Pavlov S.A., Frolova T.F. Issledovaniya sushki zerna v avtomatizirovannom zernosushil'nom agregate [Study of grain drying in the automated grain drying unit]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. N4. 29-34 (In Russian).
14. Pavlov S.A., Levina N.S., Lukin I.D. Issledovanie sushki selektsionnykh semyan v plotnom sloe [Research of selection seeds drying in dense layer]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. N1. 22-26 (In Russian).
15. Zhifeng X., Fan Z., Lei X., Jianhong W., Nanxing W. Numerical Simulation on Superheated Steam Fluidized Bed Drying at Different Operating Pressures. *International Journal of Food Engineering*. 2017. N13(10). 20170093 (In English).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Загоруйко М.Г. – участие в обсуждении материалов статьи, анализ и дополнение текста; Павлов С.А. – научное руководство, подготовка начального варианта статьи;

Павлов С.А. – научное руководство, подготовка начального варианта статьи;

Башмаков И.А. – компьютерные работы, обработка результатов исследований, доработка текста, формулирование общих выводов и литературный анализ.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Zagoruyko M.G. – paper material discussions, manuscript proofreading and corrections;

Pavlov S.A. – scientific guidance, preparing the initial version of the manuscript;

Bashmakov I.A. – computer work, research results processing, manuscript revision, formulating general conclusions, 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

15.12.2022

06.02.2023