

ISSN 2073-7599

# Сельскохозяйственные машины и технологии

## AGRICULTURAL MACHINERY AND TECHNOLOGIES

Том 17 N2 2023

Vol. 17 N2 2023

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC-THEORETICAL JOURNAL



2 2023





# Сельскохозяйственные МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

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

Журнал включен  
в Российский индекс  
научного цитирования (РИНЦ)

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

Охраняется законом РФ № 5351-1  
«Об авторском праве и смежных правах»  
от 9 июля 1993 года. Контент 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](mailto:smit@vim.ru)

© ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2023

Выходит 4 раза в год  
(Свободная цена)

Дата выхода в свет 21.06.2023  
Формат 60x90/8. Объем 11,0 печ.л.  
Тираж 500 экз  
Отпечатано в типографии  
ФГБНУ ФНАЦ 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](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](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=369308)

**Алексей Семенович Дорохов**

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](https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=550644)

**Михаил Никитичевич Ерохин**

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация, [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=626708](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](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](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](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, Кашкадарьинская область, Республика Узбекистан

**Юлия Сергеевна Ценч**

доктор технических наук, доцент, заместитель директора по образовательной и редакционно-издательской деятельности Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация, [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=816741](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](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](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 / 5.6.6.

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

Full texts of articles are placed on the website of electronic library: [elibrary.ru](http://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](mailto: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 21.06.2023,

The format is 60 x 90/8. The volume is 11.0 print's sheets. The circulation is 500 copies.

Printed by FSBSI FSAC VIM.



## ИСТОРИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ

- Ценч Ю.С., Годлевская Е.В.**  
Математическое моделирование как инструмент проектирования сельскохозяйственных машин и агрегатов (применительно к истории развития научной школы Южного Урала) . . . . 4

## ТЕХНИКА ДЛЯ РАСТЕНИЕВОДСТВА

- Иванов А.Г., Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Дородов П.В., Хузыяхметов И.И., Хакимов И.Т.**  
Повышение эффективности грохотных картофелесортирующих машин путем совершенствования привода с модификацией алгоритма движения решет. . . . . 13

- Джибилов С.М., Гулуева Л.Р.**  
Технология и агрегат для восстановления экологического состояния горных лугов и пастбищ. . . . . 20

## ТЕХНИКА ДЛЯ ЖИВОТНОВОДСТВА

- Павкин Д.Ю., Юрочка С.С., Поликанова А.А., Довлатов И.М.**  
Определение упитанности молочных коров для оперативного мониторинга их физиологического состояния . . . . . 28

- Владимиров Ф.Е., Базаев С.О., Хакимов А.Р.**  
Сравнение внутрирубцовых систем мониторинга физиологического состояния крупного рогатого скота. . . . . 35

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

- Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Медведев Г.В.**  
Разработка экспериментального фитотрона и его применение в исследованиях по энергоэкологии светокультуры. . . . . 40

- Сизов И.В., Пак Л.Н., Белякова Е.С.**  
Оценка качества тресты при раздельной технологии уборки льна-долгунца . . . . . 49

- Ключников А.С., Лапин Е.Н.**  
Переоборудование топочного агрегата ТБМ-1,7 для расширения диапазона генерируемых температур. . . . . 55

- Пастухов А.Г., Тимашов Е.П.**  
Диагностирование опорных узлов трансмиссии на основе изучения термонагруженности . . . . . 61

## ТЕХНИКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ И ПОСЕВА

- Мяленко В.И.**  
Моделирование трибологических процессов абразивного износа почворезущих деталей . . . . 69

- Гусаров В.А., Юферов Л.Ю.**  
Генератор пара для гидротермообработки сельскохозяйственного оборудования. . . . . 76

- Шайхов М.М., Чулков А.С., Подзоров А.В., Текушев А.Х., Чаплыгина Т.В.**  
Разработка однорядной сеялки с диско-кассетным высевальным устройством для посева зерновых культур колосьями. . . . . 82

## HISTORY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

- Tsench Yu.S., Godlevskaya E.V.**  
Mathematical modeling as a aspect for designing agricultural machines and units (development history of Southern Urals scientific school) . . . . . 4

## MACHINERY FOR PLANT GROWING

- Ivanov A.G., Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Dorodov P.V., Khuzyakhmetov I.I., Khakimov I.T.**  
Improving the efficiency of screen type potato sorting machines by a modification of the sieve drive movement algorithm . . . . . 13

- Dzhibilov S.M., Gulueva L.R.**  
Restoring technology and a seeding unit for recovering mountain meadow and pasture ecosystems . . . . . 20

## EQUIPMENT FOR ANIMAL HUSBANDRY

- Pavkin D.Yu., Yurochka S.S., Polikanova A.A., Dovlatov I.M.**  
Determining body condition of dairy cows for early diagnosis of physiological diseases . . . . . 28

- Vladimirov F.E., Bazaev S.O., Khakimov A.R.**  
Comparison of in-rumen systems for monitoring the physiological state of cattle. . . . . 35

## INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

- Rakutko S.A., Rakutko E.N., Medvedev G.V.**  
Development of an experimental phytotron and its application in the research on the energy-ecological efficiency of indoor plant lighting . . . . . 40

- Sizov I.V., Pak L.N., Belyakova E.S.**  
Evaluation of straw flax preparation quality in the framework of separate flax harvesting technology . . 49

- Kliuchnikov A.S., Lapin E.N.**  
Redesigning TBM-1.7 combustion unit to expand the temperature range . . . . . 55

- Pastukhov A.G., Timashov E.P.**  
Diagnostics of transmission bearing units based on thermal load study . . . . . 61

## SOIL TILLAGE EQUIPMENT AND SOWING

- Myalenko V.I.**  
Modeling of tribological processes for abrasive wear of soil-cutting part . . . . . 69

- Gusarov V.A., Yuferev L.Yu.**  
Steam generator for hydrothermal treatment of agricultural equipment . . . . . 76

- Shaykhov M.M., Chulkov A.S., Podzorov A.V., Tekushev A.Kh., Chaplygina T.V.**  
Development of a single-row ear seeder equipped with a disk-cassette sowing device . . . . . 82

## Математическое моделирование как инструмент проектирования сельскохозяйственных машин и агрегатов (применительно к истории развития научной школы Южного Урала)

Юлия Сергеевна Ценч<sup>1</sup>,  
доктор технических наук,  
главный научный сотрудник,  
e-mail: vimasp@mail.ru;

Елена Владимировна Годлевская<sup>2</sup>,  
кандидат педагогических наук, доцент,  
e-mail: elengodl@ya.ru

<sup>1</sup>Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Челябинский государственный промышленно-гуманитарный техникум имени А.В. Яковлева, г. Челябинск, Российская Федерация

**Реферат.** Представлены результаты анализа диссертационных исследований научной школы Южного Урала, посвященных процессу проектирования почвообрабатывающих машин и агрегатов с применением методов математического моделирования. (*Цель исследования*) Установить закономерности проектирования почвообрабатывающих машин и агрегатов и на этой основе спрогнозировать перспективы их совершенствования с использованием методов математического моделирования. (*Материалы и методы*) Проанализировали вопросы, связанные с построением математических моделей по результатам полевых испытаний почвообрабатывающих машин в различных почвенно-климатических условиях, акцентировали внимание на принимаемых авторами оптимальных решений по конструированию, модернизации почвообрабатывающих машин и агрегатов. (*Результаты и обсуждение*) Показали, что процесс конструирования почвообрабатывающих машин проходил следующие этапы: эмпирическое конструирование, вычислительный эксперимент и применение системы автоматизированного проектирования. Отметили, что результатом развития инструментов научных исследований стало постепенное приближение получаемых математических моделей к реальным условиям работы почвообрабатывающих машин и агрегатов. Это позволило обеспечить заданный уровень показателей качества выполнения технологического процесса обработки почвы путем совершенствования и обоснования параметров почвообрабатывающих машин и разработать адаптивные технологии возделывания сельскохозяйственных культур применительно к почвенно-климатическим условиям различных регионов. (*Выводы*) Подтвердили, что дальнейшие исследования в области применения Системы автоматизированного проектирования машин для решения инженерных задач, касающихся повышения качества обработки почвы с заданными параметрами, почвообрабатывающими машинами и агрегатами направлены на создание конструкций вибрационных рабочих органов; использование силы сжатого воздуха и электромагнитных полей; создание почвообрабатывающих машин с высокой степенью автоматизации настройки на заданные условия работы; разработку систем дистанционного контроля за процессом работы рабочих органов почвообрабатывающих и посевных машин.

**Ключевые слова:** почвообрабатывающие машины, отвальная система земледелия, математическое моделирование, система автоматизированного проектирования машин.

■ **Для цитирования:** Ценч Ю.С., Годлевская Е.В. Математическое моделирование как инструмент проектирования сельскохозяйственных машин и агрегатов (применительно к истории развития научной школы Южного Урала) // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №2. С. 4-12. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-4-12. EDN PXFEJV.

## Mathematical Modeling as a Aspect for Designing Agricultural Machines and Units (Development History Of Southern Urals Scientific School)

Yuliya S. Tsench<sup>1</sup>,  
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,  
e-mail: vimasp@mail.ru;

Elena V. Godlevskaya<sup>2</sup>,  
Ph.D.(Ed.), associate professor,  
e-mail: elengodl@ya.ru

<sup>1</sup>Federal research center of agricultural engineering VIM, Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup>Chelyabinsk State Industrial and Humanitarian Technical School named after A.V. Yakovlev, Chelyabinsk, Russian Federation

**Abstract.** This research paper examines the findings presented in the doctoral and PhD theses from the Southern Urals scientific school specifically focusing on the design process of tillage machines and units through the application of mathematical modeling. (*Research purpose*) The objective of the study is to identify the patterns in designing tillage machines and units and, based on these patterns forecast their potential enhancements using mathematical modeling. (*Materials and methods*) The paper analyses the creation of mathematical models based on field tests of tillage machine under diverse soil and climatic conditions emphasizing the authors' optimal design and upgrade decisions (*Results and discussion*) The research reveals that the design process of soil-cultivating machines progressed through such stages as: empirical design, computational experimentation and the use of computer-aided design. The evolutionary development of research tools demonstrates a gradual convergence between the mathematical models and the actual working conditions of tillage machines and units. Consequently, this enables the improvement and substantiation of tillage machine parameters to meet specific quality criteria for the tillage process, as well as the development of adaptable crop cultivation technologies applicable to various regions' soil and climatic conditions. (*Conclusions*) The study concludes that to enhance the performance of tillage machines and units and achieve the desired quality parameters, further research should focus on machine computer-aided design, including the design of vibratory working bodies, utilization of compressed air and electromagnetic fields, creation of highly automated soil-cultivating machines capable of adjusting to specified working conditions, and development of remote control systems for managing tillage and sowing machine operations.

**Keywords:** tillage machines, moldboard tillage system, mathematical modeling, computer-aided design of machines.

**For citation:** Tsench Yu.S., Godlevskaya E.V. Matematicheskoe modelirovanie kak instrument proektirovaniya sel'skokhozyaystvennykh mashin i agregatov (primenitel'no k istorii razvitiya nauchnoy shkoly Yuzhnogo Urala) [Mathematical modeling as a aspect for designing agricultural machines and units (development history of Southern Urals scientific school)]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N2. 4-12 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-4-12. EDN PXFEJV.

В конце 19-го – начале 20-го века представители агроинженерной науки активно занималась конструированием и созданием почвообрабатывающих машин. Фундаментальной основой этих процессов стала разработанная Горячкиным В.П. и его последователями наука «Земледельческая механика», описывающая базовые положения теоретической механики и механики материалов (почв) через математические зависимости. Создание системы математических уравнений открыло возможность для комплексного анализа процесса обработки почв различными научными школами.

Такие ученые, как Горячкин В.П., Артоболевский И.И., Василенко П.М., Лурье А.Б., Виноградов В.И., Подскребко М.Д., Бледных В.В., Синеоков Г.Н., Гячев Л.В., Капов С.Н., доказали возможность обоснования параметров рабочих органов и почвообрабатывающих машин на основе математических моделей [1-3, 9].

Анализ и обобщение материалов научных публикаций [4-9] позволили систематизировать материал и представить его в виде схемы, описывающей динамику и результаты исследований научных школ в области расчётов, конструирования и создания орудий отвальной системы земледелия (рис. 1).

Выполненный анализ показал, что процесс конструирования почвообрабатывающих машин начинался с азов эмпирического конструирования и заканчивался автоматизированным вычислительным экспериментом. Целью нашего исследования является раскрытие вклада ученых научной школы Южно-Урала в достижения науки и техники агропромыш-

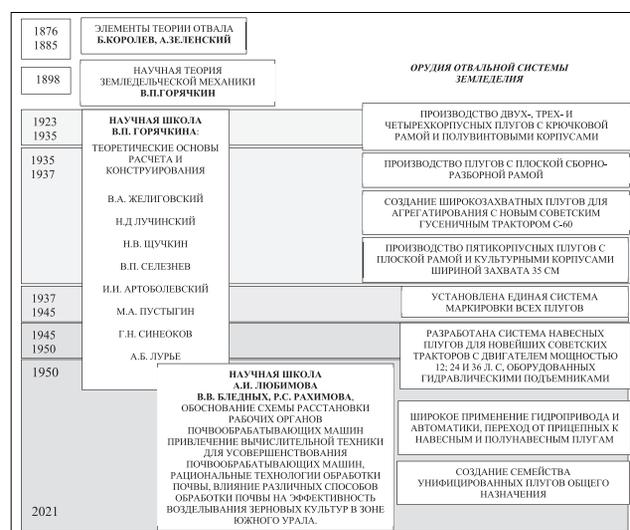


Рис. 1. Динамика и результаты исследований научных школ в области расчётов, конструирования и создания орудий отвальной системы земледелия

Fig. 1. Dynamics and results of the scientific schools' research regarding the calculations, design and development of implements for moldboard tillage system

ленного комплекса страны.

Создавая теорию конструирования плуга, Горячкин В.П. использовал следующие теоретические разработки.

**Геометрические.** Использование законов геометрического подобия (углов лемеха, цилиндрических, гипербоидальных и парабоидальных, конических и винтовых поверхностей отвалов).

**Технологические.** Использование законов техниче-

ского подобия: плуги одной и той же серии должны удовлетворять условиям равной прочности; при одинаковых скоростях для всякого рода деформаций напряжение обратно пропорционально квадрату линейных размеров. Передача давления клином внутрь пласта. Деформация пласта поверхностью отвала; деформация пласта при работе плуга подчиняется общим законам о деформациях.

**Агрономические.** Рассмотрение характеристик пахоты, учет физико-механических свойств почвы (удельного веса, влагоемкости, связности, сопротивления почвы на разрыв, прилипания и коэффициента трения почвы относительно материала орудия).

**Механические.** Статическое и динамическое равновесие плуга, вес плуга, влияние скорости резания на работу плуга.

Перечисленные закономерности и связи составили основу математической модели инженерной задачи проектирования рабочего органа почвообрабатывающих машин.

**Цель исследования** – представить вклад ученых научной школы Южного Урала в достижения науки и техники агропромышленного комплекса страны и при этом установить закономерности развития методов математического моделирования для совершенствования почвообрабатывающих машин и агрегатов и на их основе спрогнозировать дальнейшие перспективы научных исследований.

Основоположником научной школы Южного Урала, занимающейся вопросами конструирования рабочих органов почвообрабатывающих машин, был Любимов А.И., возглавлявший с 1968 года кафедру «Почвообрабатывающие и посевные машины» в ЧИМЭСХ. Учеными Бледных В.В., Рахимовым Р.С., Каповым С.Н., Гайфуллиным Г.З., Мударисовым С.Г., Свечниковым П.Г., Сергеевым Ю.А., Рахимовым И.Р. под руководством Любимова А.И. были разработаны конструкции новых почвообрабатывающих машин: двухрядных плугов-рыхлителей, плоскорезов-щелевателей, двухрядных чизелей, которые внедрялись в сельскохозяйственное производство. Использование в конструкторских разработках вычислительной техники, а в последствии и системы автоматизированного проектирования являлось характерной особенностью научной школы Любимова А.И.

**Материалы и методы.** Любимов А.И., используя в своих научных трудах анализ и синтез динамической системы «плуг – почва – механизм навески – трактор», решал научно-технические задачи по разработке технологических основ создания новых и совершенствования существующих пахотных агрегатов.

Исходя из логики научного исследования, автор на основе общих уравнений движения агрегата составил дифференциальные уравнения, включающие обобщенные координаты перемещений трактора и плуга

в горизонтальном и вертикальном направлениях, а также угловых перемещений в трех взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 2).

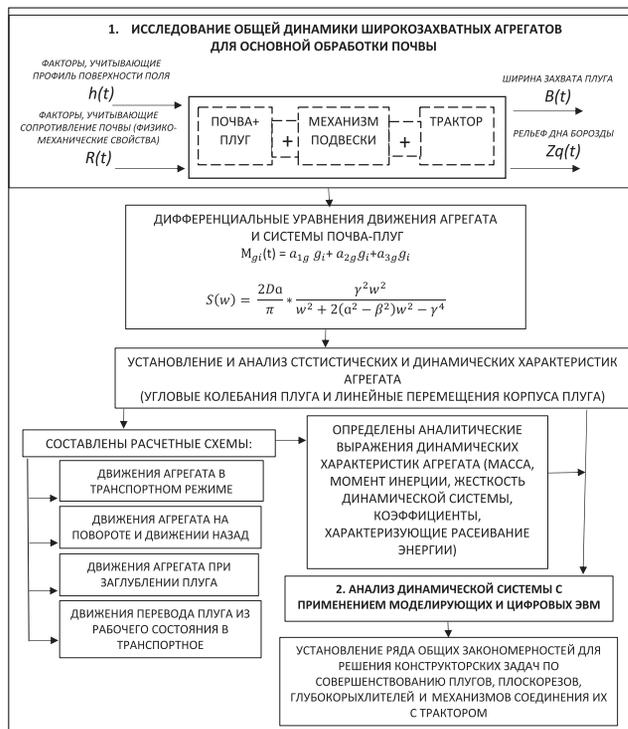


Рис. 2. Алгоритм методики исследования взаимодействия сложной динамической системы плуг – почва – механизм навески – трактор

Fig. 2. Algorithm of the methodology for studying the interaction of a complex dynamic plow - soil - plough hitch – tractor system

Далее была рассмотрена проектируемая система плуг – почва – механизм навески – трактор как двухмассовая система, соединенная механизмом навески (связью). Для исследования реакции агрегата (выраженной в ширине захвата плуга  $B(t)$  и рельефе дна борозды  $Zq(t)$ ) на внешние факторы (профиль поверхности поля  $h(t)$  и сопротивление почвы  $R(t)$ ) автором были использованы многочисленные статистические характеристики обобщенных координат объекта – оригинала (трактора К-700 и полунавесного плуга ПЛП-8-35). Полученные Любимовым А.И. многочисленные данные по полевым исследованиям показали, что частоты угловых и линейных колебаний трактора и плуга при пахоте совпадают с диапазонами частот, наблюдаемыми в спектре неровностей рельефа.

Это позволило уточнить расчётные схемы для решения таких задач, как: движение агрегата в транспортном режиме; движение агрегата на повороте и в реверсе; движение агрегата при заглублении плуга; движение агрегата при переводе плуга из рабочего в транспортное положение (рис. 2).

После этого были определены аналитические выражения динамических характеристик агрегата (массы, момента инерции, жесткости динамической си-

стемы, коэффициентов, характеризующих рассеивание энергии, и проведен анализ динамической системы с применением моделирующих и цифровых электронно-вычислительных машин. Полученные после обработки на ЭВМ закономерности явились исходными данными для решения задач совершенствования существующих конструкций плугов [10].

Используя данные проведенных исследований, Любимов А.И. так определил основные практические рекомендации: «При решении вопроса автоматизации необходимо, в первую очередь, совершенствовать конструкцию объекта регулирования, серьезно изменить параметры механизма навески и плуга, которые только после этого можно использовать как исполнительные механизмы автоматического регулирования. Автоматизированный пахотный агрегат необходимо рассматривать как систему многоконтурного раздельного регулирования. Отдельные контуры этой системы целесообразно исполнять по классу циклических автоматических систем с программным регулированием, другие контуры по классу следящих систем с замкнутым циклом» [10].

Научные труды Бледных В.В. посвящены разработке адекватных математических моделей технологических процессов для создания системы автоматизированного проектирования (САПР) рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Используя математические модели движения пласта почвы по плоскому рабочему органу в форме клина, Бледных В.В. вывел уравнение траектории движения, используя понятие угла резания почвы. Рассматривая вопросы формирования пласта и разрушения почвы рабочим органом, ученый выделил три последовательных процесса и представил их в виде моделей [11].

В основу исследуемой модели движения пласта почвы по плоскому рабочему органу в форме клина положена схема образования пласта (рис. 3), предложенная Гячевым Л.В. и описанная уравнением [12]:

$$\left. \begin{aligned} \tan \eta &= \cos \varepsilon \cdot \tan \gamma \\ \sin x &= \sin \gamma \cdot \sin \varepsilon \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $\eta$  – угол между траекторией движения почвы и лезвием клина  $AB$ ;

$x$  – угол резания почвы трехгранным клином;

$\gamma, \varepsilon$  – установочные углы трехгранного клина.

В основу математической модели формирования пласта заложен принцип наименьшего действия Мэппертюна-Лагранжа:

$$\delta S_0 = \delta \int_{t_0}^t 2\pi dt = 0, \quad (2)$$

где  $\delta$  – символ полной вариации;

$S$  – траектория движения почвы.

Модель разрушения почвы базируется на постулате: нагружение почвы нормальной силой происходит до ее разрушения. Это позволило составить ма-

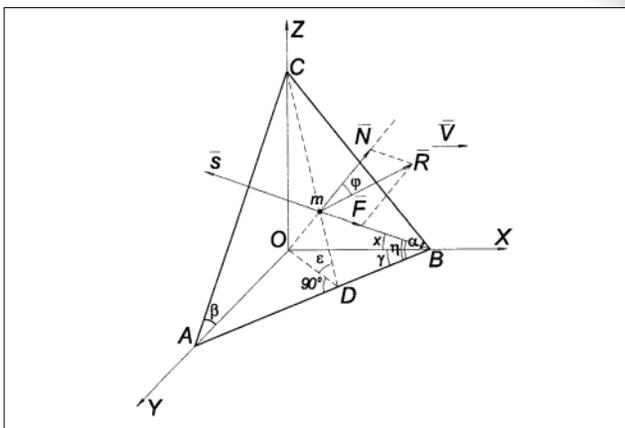


Рис. 3. Траектория движения почвы и силы, действующие на трехгранный клин при его движении в почве

Fig. 3. The trajectory of the soil movement and the forces acting on the triangular wedge during its movement in the soil

тематические модели, связывающие усилие на протаскивание рабочего органа ( $R_Y$ ) с его параметрами и физико-механическими свойствами почвы ( $N, \varphi$ ):

$$\left. \begin{aligned} \frac{R_y}{R_n} &= \frac{\sin(a + \varphi)}{\cos \varphi} \\ \frac{R_y}{R_n} &= \frac{\sin(x + \varphi)}{\cos \varphi} \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Используя последовательно приведенные модели процессов движения, формирования и разрушения пласта почвы, Бледных В.В. составил алгоритм определения тягового сопротивления рабочего органа и его составляющие по осям координат (рис. 4).

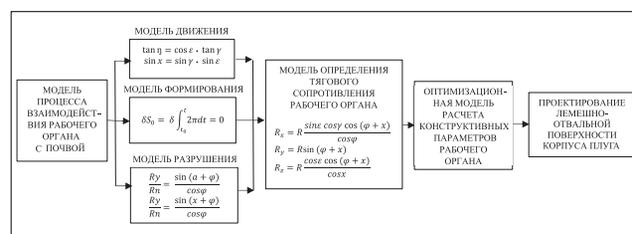


Рис. 4. Алгоритм математического моделирования технологических процессов, от которых зависит процесс совершенствования рабочих органов почвообрабатывающих машин

Fig. 4. Algorithm for mathematical modeling of technological processes affecting the process of upgrading tillage machine working bodies

На следующем этапе реализации алгоритма математического моделирования совершенствования рабочих органов почвообрабатывающих машин в качестве критерия оптимизации конструктивных параметров рабочего органа выступило его тяговое сопротивление. При этом при построении модели учитывались такие показатели технологического процесса, как засоренность поля сорной растительностью, физико-механические свойства поля (влажность почвы, коэффициент трения почвы о поверхность).

Отдельно представим алгоритм машинного проектирования лемешно-отвальной поверхности рабочего органа (рис. 5).

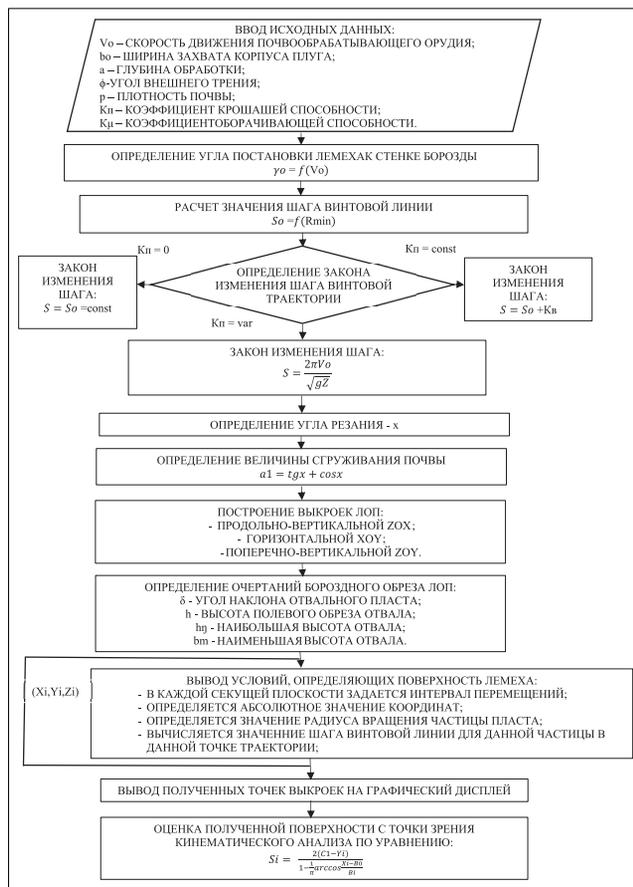


Рис. 5. Алгоритм машинного проектирования лемешно-отвальной поверхности рабочего органа

Fig. 5. Algorithm for the machine design of a working body share surface

Как видно, процесс математического моделирования выявляет зависимость геометрических параметров рабочих органов почвообрабатывающих машин с агротехническими показателями пахоты. Это дает возможность получить оптимальные энергетические показатели вспашки.

Сформулированное и обоснованное Бледных В.В. это новое направление позволило:

- осуществить изучение технологических процессов, проводить их оптимизацию и совершенствование конструкций рабочих органов почвообрабатывающих машин;
- управлять процессом крошения почв, задавая различные законы изменения траектории движения пласта по лемешно-отвальной поверхности;
- обосновать улучшение (на 15-18%) агротехнических показателей пахоты при использовании плугов для ромбической вспашки;
- показать, что к большинству задач по определению основных характеристик рабочих органов почво-

обрабатывающих агрегатов и параметров технологического процесса применимы известные принципы оптимизации систем [13].

Значительный вклад в создание общей модели технологического процесса внес Рахимов Р.С., исследуя рабочий процесс, заглубление, выглубление, транспортировку, поворот агрегата, он учел возмущающие факторы со стороны рельефа поля и твердости почвы в виде двумерных нестационарных случайных функций и определил показатели, характеризующие эффективность технологического процесса работы машин в виде равномерной глубины хода, тягового сопротивления и их вероятностных характеристик.

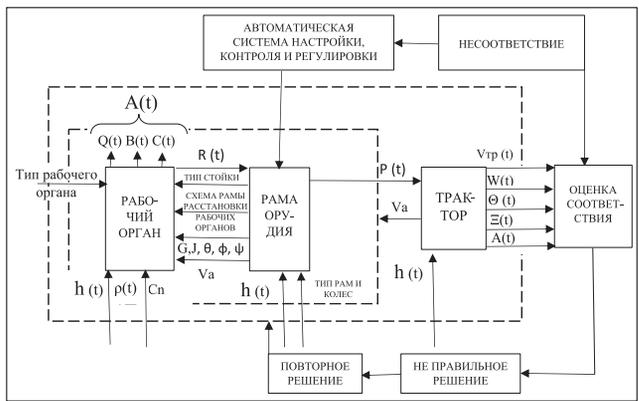


Рис. 6. Общая модель технологического процесса работы агрегата:  $R(t)$  – сопротивление почвы;  $P(t)$  – тяговое усилие;  $J$  – сила инерции;  $G$  – сила тяжести;  $\theta, \varphi, \psi$  – углы поворота системы;  $C_n$  – параметр, характеризующий состояние поля;  $Q(t)$  – глубина обработки;  $B(t)$  – ширина захвата

Fig. 6. General model of the unit technological process:  $R(t)$  – soil resistance;  $P(t)$  – traction force;  $J$  – inertial force;  $G$  – gravity;  $\theta, \varphi, \psi$  – system rotation angles;  $C_n$  is a parameter characterizing the state of the field;  $Q(t)$  – tilling depth;  $B(t)$  – capture width

Свернутую математическую запись общей модели технологического процесса работы агрегата Рахимов Р.С. представил в следующем виде:

$$\vec{F} \xrightarrow{\vec{A}(x)} \vec{Y}, \tag{4}$$

где  $\vec{Y}$  – вектор выходных параметров, к которым относятся показатели эффективности технологического процесса работы агрегата;  $A(t)$  – агротехнические показатели работы агрегата;  $W(t)$  – производительность агрегата;  $\Xi(t)$  – управляемость трактора;  $\Theta(t)$  – расход топлива;  $V_{mp}(t)$  – транспортная скорость агрегата;  $V_a$  – скорость агрегата;  $\vec{X}$  – вектор внутренних выходных параметров, характеризующих элементы почвообрабатывающей машины (схему рамы, координаты элементов машины, жесткость рамы, массу рамы и рабочих органов, параметры колес, типы шарниров);  $\vec{F}$  – вектор внешних входных параметров, описывающих условия работы машин:  $h(t)$  – факторы, учитывающие рельеф поля;  $\rho(t)$  – факторы, учитывающие сопротивление почвы;  $C(t)$  – крошение, сохранение стерни.

Разработанная обобщенная математическая модель (рис. 6) позволила ученому осуществить дальнейшие проектные процедуры, включающие в себя взаимодействие таких множеств, как матрица инцидентности, содержащая информацию о структуре взаимосвязей ориентированного графа конкретной конструктивной схемы широкозахватных почвообрабатывающих агрегатов с многосекционными орудиями; матрица угловой ориентации системы (трактора и почвообрабатывающего многосекционного орудия); уравнение движения агрегата для различных конструктивных схем на всех этапах технологического процесса; генерация на ЭВМ характеристик рельефа поля; генерация на ЭВМ свойств почвы (рис. 7).

Одной из поздних исследовательских работ в области проектирования почвообрабатывающих машин научной школы Южного Урала является диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук Рахимова И.Р.

Интерес представляет использование САПР как инструмента информационной поддержки для обоснования и принятия решений в процессе выбора адаптивных технических средств обработки почвы.

Данный вопрос, продиктованный временем, вытекает из условия получения максимальной прибыли с единицы посевной площади при минимальных затратах. На этот процесс большое влияние оказывают вид почвенно-климатической зоны, районированные



Рис. 7. Алгоритм создания системы автоматизированного проектирования широкозахватных почвообрабатывающих агрегатов с многосекционными орудиями

Fig. 7. Algorithm for developing a computer-aided design system for wide-cut tillage units with multi-section tools

технологии возделывания сельскохозяйственных культур, тракторный парк, почвообрабатывающие и посевные машины, которые обеспечат качество подготовки почвы с требуемыми свойствами для возделывания выбранной культуры в севообороте [14].

Рахимов И.Р., учитывая ранее проведенные исследования [15, 16] и используя накопленный научной школой опыт математического моделирования и агротехнические требования к созданию новых машин, провел расчеты и обосновал конструктивные параметры комплекса машин для тракторов класса тяги 1,4-5,0 [17].

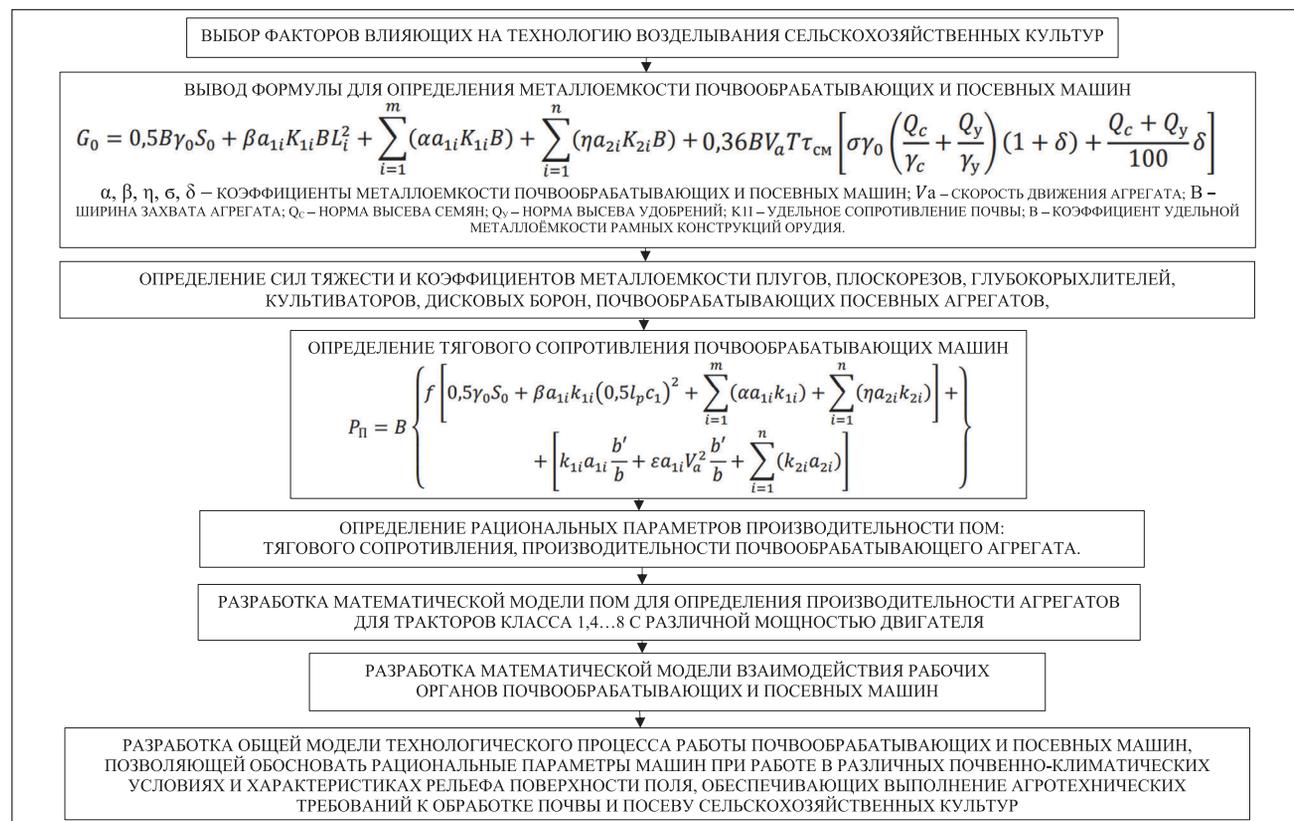


Рис. 8. Алгоритм научного обоснования и разработки адаптивных технологий и технических средств обработки почвы и посева  
Fig. 8. Algorithm for scientific substantiation and development of adaptive technologies and technical means of tillage and sowing

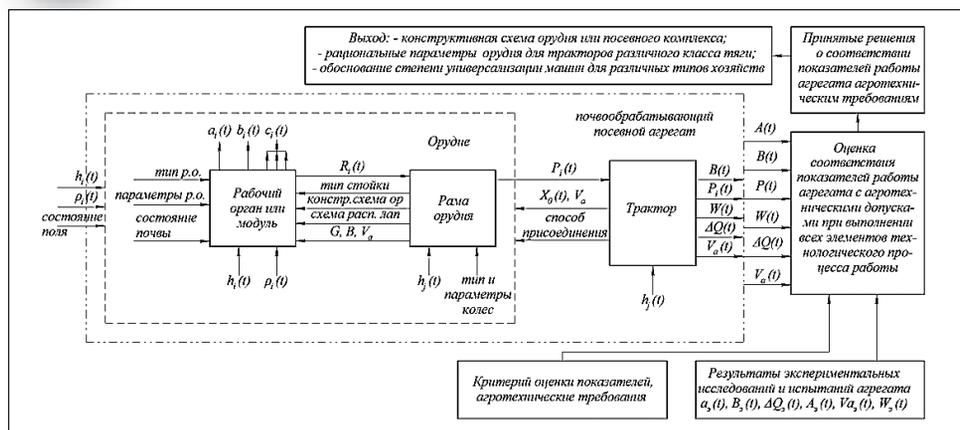


Рис. 9. Общая модель функционирования адаптивных почвообрабатывающих и посевных машин  
 Fig. 9. General model of adaptive tillage and sowing machine functioning

Разработанный алгоритм научного обоснования и разработки адаптивных технологий и технических средств обработки почвы и посева представлен на рисунке 8.

Рассматривая составленную общую модель технологического процесса работы почвообрабатывающего посевного агрегата (рис. 9), можно выделить следующую совокупность решенных в диссертации задач.

Опираясь на разработанные ранее методы создания рабочих органов для обработки почвы, ученый развил и усовершенствовал методику проектирования универсальных многофункциональных рабочих органов, выполняющих за один проход агрегата несколько технологических операций [18].

Используя разработанные ранее Любимовым А.И. и Рахимовым Р.С. методы автоматизированного проектирования почвообрабатывающих и посевных машин, был решен вопрос рационального выбора внутренних параметров, обеспечивающих необходимое преобразование внешних воздействий от рельефа поверхности поля, свойств почвы на показатели, отвечающие агротехническим требованиям обработки почвы [18-20].

По авторским материалам, касающимся разработки универсальной технологии возделывания сельскохозяйственных культур для сельхозпредприятий с различной площадью обрабатываемых земель, он раз-

работал конструктивные схемы и обосновал параметры универсальных, адаптивных к различным условиям работы рабочих органов почвообрабатывающих машин.

**Выводы.** Проведенный анализ показал, что процесс конструирования почвообрабатывающих машин включает следующие этапы: эмпирическое конструирование, вычислительный эксперимент, применение си-

стемы автоматизированного проектирования. Результатом научных исследований было постепенное приближение получаемых математических моделей к реальным условиям работы почвообрабатывающих машин и агрегатов. Это позволило обеспечить заданный уровень показателей качества выполнения технологического процесса обработки почвы путем совершенствования и обоснования параметров почвообрабатывающих машин и разработать адаптивные технологии возделывания сельскохозяйственных культур применительно к почвенно-климатическим условиям различных регионов.

Дальнейшие исследования в области применения САПР для решения инженерных задач, касающихся повышения качества обработки почвы, с заданными параметрами почвообрабатывающих машин и агрегатов направлены на:

- разработку конструкций вибрационных рабочих органов;
- использование силы сжатого воздуха и электромагнитных полей;
- создание почвообрабатывающих машин с высокой степенью автоматизации настройки на заданные условия работы;
- разработку систем дистанционного контроля за процессом работы почвообрабатывающих и посевных машин.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Виноградов В.И. Сопротивление рабочих органов лемешного плуга и методы снижения энергоемкости пахоты: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Челябинск: ЧГАУ. 1969. 697 с.
2. Капов С.Н., Рахимов И.Р. Модели почвы в земледельческой механике // Тезисы докладов на XI научно-технической конференции. Челябинск: ЧГАУ. 2001. С. 322-324.
3. Синеоков Г.Н. Проектирование почвообрабатывающих машин. М.: Машиностроение. 1965. 311 с.
4. Жалнин Э.В. Постулаты В.П. Горячкина и их дальнейшее развитие // *Агроинженерия*. 2008. N2. С. 15-21.
5. Ерохин М.Н. Роль наследия В.П. Горячкина в агроинженерном образовании XXI века // *Агроинженерия*. 2008. N1. С. 7-10.
6. Ректору Челябинского ГАУ академику Россельхозакадемии Василию Васильевичу Бледных 70 лет // *Достижения науки и техники АПК*. 2008. N7. С. 30-31.
7. Терсков Г.Д. К вопросу о построении отвалов американ-



- ских плугов // *Известия Томского политехнического университета*. 1934. N2. С. 79-92.
8. Экспериментальная теория резания лезвием // *Механизация и электрификация*. 1940. Вып. 4. С. 3-22.
  9. Лурье А.Б., Любимов А.И. Широкозахватные почвообрабатывающие машины. Л.: Машиностроение. 1981. 270 с.
  10. Любимов А.И. Динамика широкозахватных агрегатов основной обработки почвы: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Челябинск: ЧГАУ. 1973. 321 с.
  11. Бледных В.В. Основные закономерности силового взаимодействия трехгранного клина с почвой // *Достижения науки и техники АПК*. 2008. N8. С. 33-36.
  12. Гячев Л.В. Теория лемешно-отвальной поверхности // *Научные труды Азово-Черноморского института механизации сельского хозяйства*. 1961. Вып. 13. 317 с.
  13. Бледных В.В. Совершенствование рабочих органов почвообрабатывающих машин на основе математического моделирования технологических процессов: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Л.: 1989. 38 с.
  14. Влагодкумулирующие технологии, техника для обработки почв и использование минеральных удобрений в экстремальных условиях: Научное издание ФАНО России, ВИМ, ВНИМС. Научные руководители: Измайллов А.Ю., Соркин Н.Т. Рязань: ВНИМС. 2014. 245 с.
  15. Зыбалов В.С., Добровольский И.П., Рахимов Р.С., Хлызов Н.Т., Капкаев Ю.Ш. Рациональное использование земель сельскохозяйственного назначения Челябинской области: монография. Челябинск: ЧГАУ. 2016. 266 с.
  16. Зыбалов В.С., Добровольский И.П., Хлызов Н.Т., Рахимов И.Р., Бархатов В.И. Управление плодородием почв Челябинской области: Монография. Челябинск: ЧГАУ. 2018. 193 с.
  17. Рахимов Р.С., Рахимов И.Р., Ялалетдинов Д.А., Фетисов Е.О., Хамитов Я.Ю., Юмагузин Р.М., Рахимжанов А.Р., Анохин С.В. Разработка технологии и изготовление импортозамещающего комплекса машин для возделывания сельскохозяйственных культур // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2020. N1. С. 86-96.
  18. Рахимов И.Р. Совершенствование рабочих органов машин для основной обработки почвы на основе моделирования процесса взаимодействия клина с почвой: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Челябинск: ЧГАУ. 2006. 27 с.
  19. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 16. N4. С. 4-12.
  20. Ценч Ю.С. Становление и развитие научно-технического потенциала механизации сельского хозяйства России: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / ФНАЦ ВИМ. М.: 2021. 419 с.

## REFERENCES

1. Vinogradov V.I. Soprotivlenie rabochikh organov lemeshnogo pluga i metody snizheniya energoemkosti pakhoty: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [The resistance of the share plow working bodies and methods for reducing the plowing energy intensity: Dr.Sc. thesis]. Chelyabinsk: CHGAU. 1969. 697 (In Russian).
2. Kapov S.N., Rakhimov I.R. Modeli pochvy v zemledel'cheskoy mekhanike [Soil models in agricultural mechanics]. Tezisy dokladov na XI nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Chelyabinsk: CHGAU. 2001. 322-324 (In Russian).
3. Sineokov G.N. Proektirovanie pochvoobrabatyvayushchikh mashin [Designing tillage machines]. Mashinostroenie. 1965. 311 (In Russian).
4. Zhalnin E.V. Postulaty V.P. Goryachkina i ikh dal'neyshee razvitiye [V.P. Goryachkin's postulates and their further development]. *Agroinzheneriya*. 2008. N2. 15-21 (In Russian).
5. Erokhin M.N. Rol' naslediya V.P. Goryachkina v agroinzhenernom obrazovanii XXI veka [The role of V.P. Goryachkina in agroengineering education of the XXI century]. *Agroinzheneriya*. 2008. N1. 7-10 (In Russian).
6. Rektor Chelyabinskogo GAU akademiku Rossel'khozakademii Vasiliyu Vasil'evichu Blednykh 70 let [The 70th anniversary of Vasily V. Blednykh, Rector of the Chelyabinsk State Agrarian University, Academician of the Russian Agricultural Academy]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2008. N7. 30-31 (In Russian).
7. Terskov G.D. K voprosu o postroenii otvalov amerikanskikh plugov [The issue of constructing American plow dumps]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 1934. N2. 79-92 (In Russian).
8. Eksperimental'naya teoriya rezaniya lezviem [Experimental theory of blade cutting]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya*. 1940. Vol. 4. 3-22 (In Russian).
9. Lur'e A.B., Lyubimov A.I. Shirokozakhvatnye pochvoobrabatyvayushchie mashiny [Wide-cut tillage machines]. Leningrad: Mashinostroenie. 1981. 270 (In Russian).
10. Lyubimov A.I. Dinamika shirokozakhvatnykh agregatov osnovnoy obrabotki pochvy: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Dynamics of wide-cutting aggregates for basic tillage: Dr.Sc. thesis]. Chelyabinsk: CHGAU. 1973. 321 (In Russian).
11. Blednykh V.V. Osnovnye zakonomernosti silovogo vzaimodeystviya trekhgrannogo klina s pochvoy [The main regularities of the force interaction of a trihedral wedge with soil]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2008. N8. 33-36 (In Russian).
12. Gyachev L.V. Teoriya lemeshno-otval'noy poverkhnosti [Theory of share-dump surface]. *Nauchnye trudy Azovo-Chernomorskogo instituta mekhanizatsii sel'skogo khozyaystva*. 1961. Vol. 13. 317 (In Russian).

13. Blednykh V.V. Sovershenstvovanie rabochikh organov pochovoobrabatyvayushchikh mashin na osnove matematicheskogo modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov: Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Upgrading machine working bodies based on mathematical modeling of technological processes: Dr.Sc. thesis abstract]. Leningrad: 1989. 38 (In Russian).
14. Vlagoakkumuliruyushchie tekhnologii, tekhnika dlya obrabotki pochv i ispol'zovanie mineral'nykh udobreniy v ekstremal'nykh usloviyakh: Nauchnoe izdanie FANO Rossii, VIM, VNIMS [Moisture storage technologies, soil cultivation equipment and the use of mineral fertilizers in extreme conditions]. Scientific supervisors: Izmaylov A.Yu., Sorokin N.T. Ryazan': VNIMS. 2014. 245 (In Russian).
15. Zybalov V.S., Dobrovolskiy I.P., Rakhimov R.S., Khlyzov N.T., Kapkaev Yu.Sh. Ratsional'noe ispol'zovanie zemel' sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya Chelyabinskoy oblasti: monografiya [Efficient use of the agricultural land in the Chelyabinsk region: monograph]. Chelyabinsk: CHGAU. 2016. 266 (In Russian).
16. Zybalov V.S., Dobrovolskiy I.P., Khlyzov N.T., Rakhimov I.R., Barkhatov V.I. Upravlenie plodorodiem pochv Chelyabinskoy oblasti: Monografiya [Management of soil fertility in the Chelyabinsk region: Monograph]. Chelyabinsk: CHGAU. 2018. 193 (In Russian).
17. Rakhimov R.S., Rakhimov I.R., Yalaletdinov D.A., Fetisov E.O., Khamitov Ya.Yu., Yumaguzhin R.M., Rakhimzhanov A.R., Anokhin S.V. Razrabotka tekhnologii i izgotovlenie importozameshchayushchego kompleksa mashin dlya vozdelvaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Development of technology and manufacturing of an import-substituting complex of machines for cultivating crops]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*. 2020. N1. 86-96 (In Russian).
18. Rakhimov I.R. Sovershenstvovanie rabochikh organov mashin dlya osnovnoy obrabotki pochvy na osnove modelirovaniya protsessa vzaimodeystviya klina s pochvoy: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Upgrading the working bodies of main tillage machines based on modeling the interaction of the wedge with the soil: PhD thesis abstract]. Chelyabinsk: CHGAU. 2006. 27 (In Russian).
19. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S. Printsipy formirovaniya sistem mashin i tekhnologiy dlya kompleksnoy mekhanizatsii i avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov v rastenievodstve [Principles of forming machine and technology systems for integrated mechanization and automation of technological processes in crop production]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N4. 4-12 (In Russian).
20. Tsench Yu.S. Stanovlenie i razvitie nauchno-tekhnicheskogo potentsiala mekhanizatsii sel'skogo khozyaystva Rossii [Formation and development of scientific and technical potential of mechanization of agriculture in Russia]. *Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk*. FSAC VIM. Moscow: 2021. 419 (In Russian).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Заявленный вклад соавторов:

Ценч Ю.С. – общее руководство, постановка задач исследования;

Годлевская Е.В. – анализ предметной области и формирование выводов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

#### Coauthors' contribution:

Tsench Yu.S. – general guidance, formulation of research objectives; Godlevskaya E.V. – analysis of the subject area and the formation of conclusions.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию  
Статья принята к публикации

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

05.04.2023  
26.05.2023

## Повышение эффективности грохотных картофелесортирующих машин путем совершенствования привода с модификацией алгоритма движения решет

**Алексей Генрихович Иванов**<sup>1</sup>,  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой, e-mail: ivalgen@inbox.ru;  
**Михаил Никитьевич Ерохин**<sup>2</sup>,  
доктор технических наук, профессор,  
академик РАН, e-mail: n.erohin@rgau-msha.ru;  
**Сергей Павлович Казанцев**<sup>2</sup>,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой, e-mail: smdm@rgau-msha.ru;

**Павел Владимирович Дородов**<sup>1</sup>,  
доктор технических наук, доцент, профессор,  
e-mail: pvd80@mail.ru;  
**Ильхам Ильгизович Хузяхметов**<sup>1</sup>,  
аспирант, e-mail: ilham\_huzyahmetov@mail.ru;  
**Ильшат Тагирович Хакимов**<sup>1</sup>,  
аспирант, e-mail: ilshat.1996@yandex.ru

<sup>1</sup>Удмуртский государственный аграрный университет», г. Ижевск, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

Реферат. Рассмотрели перспективную и эффективную картофелесортировку грохотного типа, входящую в состав механизированного комплекса для послеуборочной обработки и хранения картофеля. Подчеркнули актуальность разработки эффективных методик проектирования и расчета сортирующего устройства, разделяющего клубни картофеля на фракции по размерам. (*Цель исследования*) Усовершенствовать привод калибрующей машины путем модификации закономерностей движения решет для повышения эффективности ее функционирования. (*Материалы и методы*) Задействовали методы критического анализа теории механизмов и машин с целью проектирования оптимальной конструкции привода сортировки картофеля грохотного типа. Предложили использовать двухкулисный механизм привода решет. Для сравнения закономерностей движения решет грохота применили коэффициент эффективности, рассчитав его для двух вариантов привода. (*Результаты и обсуждение*) Доказали, что коэффициент эффективности решет в грохоте с двухкулисным механизмом привода равен 0,30-1,65, а в случае устройства с кривошипным приводом – 0,27-1,35. (*Выводы*) Рекомендовали использовать более низкую скорость приводного вала – 13,12-14,76 радиана в секунду, тогда как у кривошипного механизма привода угловая скорость кривошипа составляет 20 радиан в секунду. Углы установки решет следует выбирать в интервале 6-8 градусов.

**Ключевые слова:** сортирование картофеля, фракции клубней, картофелесортировальный пункт, сортировальная машина грохотного типа, двухкулисный привод, эффективность.

■ **Для цитирования:** Иванов А.Г., Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Дородов П.В., Хузяхметов И.И., Хакимов И.Т. Повышение эффективности грохотных картофелесортирующих машин путем совершенствования привода с модификацией алгоритма движения решет // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №2. С. 13-19. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-13-19. EDN ULMZDJ.

## Improving the Efficiency of Screen Type Potato Sorting Machines by a Modification of the Sieve Drive Movement Algorithm

**Aleksey G. Ivanov**<sup>1</sup>,  
Ph.D.(Eng.), associate professor, head of department,  
e-mail ivalgen@inbox.ru;  
**Mikhail N. Erokhin**<sup>2</sup>,  
Dr.Sc.(Eng.), professor, member of the Russian Academy  
of Sciences, e-mail: n.erohin@rgau-msha.ru;  
**Sergey P. Kazantsev**<sup>2</sup>,  
Dr.Sc.(Eng.), professor; head of department,  
email: smdm@rgau-msha.ru;

**Pavel V. Dorodov**<sup>1</sup>,  
Dr.Sc.(Eng.), associate professor, professor,  
email: pvd80@mail.ru;  
**Ilkham I. Khuzyakhmetov**<sup>1</sup>,  
Ph.D. student (Eng.),  
e-mail: ilham\_huzyahmetov@mail.ru;  
**Ilshat T. Khakimov**<sup>1</sup>,  
Ph.D. student (Eng.), e-mail: ilshat.1996@yandex.ru

<sup>1</sup>Federal state budget education institution for higher education «Udmurt state agricultural university», Izhevsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The paper considers a promising and effective screen-type potato sorting, included in the mechanized complex for potato post-harvest processing and storage. The main technological equipment of potato sorting stations is a sorting device that separates potato tubers into size fractions. The paper emphasizes the relevance of developing effective methods for designing and calculating the parameters of this type sorting devices. (*Research purpose*) To upgrade the sizing machine drive by modifying the sieve movement patterns for improving its operation efficiency. (*Materials and methods*) The present research exploits the critical analysis methods of the theory of mechanisms and machines in order to design the optimal design of a sieve-type potato sorting drive. It is proposed to use a two-stage drive mechanism. To compare the movement patterns of the screen sieves, the efficiency coefficient has been calculated for two drive options. (*Results and discussion*) It is obtained that the sieve efficiency coefficient is 0.30-1.65 for a screen type sorting device with a two-stage drive mechanism, and equals 0.27-1.35 for a screen type sorting device with a crank drive mechanism. (*Conclusions*) It is recommended to use a lower drive shaft speed of – 13.12-14.76 radians per second, at the crank angular velocity of 20 radians per second in the crank drive mechanism. The sieve mounting angles are to be set within 6-8 degrees.

**Keywords:** potato sorting, tuber fractions, potato sorting station, screen type sorting machine, a two-stage drive mechanism, efficiency.

**For citation:** Ivanov A.G., Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Dorodov P.V., Khuzyakhmetov I.I., Khakimov I.T. Povyshenie effektivnosti grokhotnykh kartofelesortiruyushchikh mashin putem sovershenstvovaniya privoda s modifikatsiy algoritma dvizheniya reshet [Improving the efficiency of screen type potato sorting machines by a modification of the sieve drive movement algorithm]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N2. 13-19 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-13-19. EDN ULMZDJ.

**К**артофель широко распространен в России, его возделывают как продовольственную, кормовую, техническую культуру [1, 2]. Его можно долго хранить без глубокой консервации. Однако именно хранение остается слабым звеном при использовании клубнеплодов [3-5]. Закладка вороха картофеля сразу в хранилище прямо с поля приводит к потерям из-за высокой влажности, наличия большого количества почвенных примесей, некондиционных и больших клубней.

Важнейшее значение приобретает послеуборочная доработка вороха на картофелесортировальных пунктах, основу которых составляют сортирующие устройства [6-8]. В России и других странах широко применяют грохотные сортирующие устройства. Они отличаются хорошей производительностью, простой конструкции, удобством эксплуатации и низким удельным энергопотреблением [9-14]. Разработка эффективных методик проектирования и расчета таких машин с возможностью их внедрения в производство остается актуальной задачей [1, 2, 15-18]. Поэтому объектом нашего исследования стала перспективная и эффективная картофелесортировка грохотного типа, входящая в состав механизированного комплекса для послеуборочной обработки и хранения картофеля.

**ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ** – усовершенствовать привод калибрующей машины путем модификации закономерностей движения решет для повышения ее эффективности.

Задачи исследований:

- провести анализ работы грохотных калибрующих машин;
- доказать перспективность направления их развития в ходе совершенствования закономерностей движения решет грохотных калибрующих машин при использовании двухкулисного механизма привода;
- обосновать параметры движения решет с новым приводом и провести сравнение с кривошипным механизмом по предлагаемому авторами коэффициенту эффективности.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Использовали методы критического анализа теории механизмов и машин с целью проектирования оптимальной конструкции привода сортировки картофеля грохотного типа.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** В качестве исследуемого объекта рассмотрели привод сортировки картофеля грохотного типа (*рис. 1*).

Работа сортировки основана на принципе параллельного выделения фракций, в данном случае – трех. При помощи подающего транспортера общая масса картофеля поступает на верхнее решето с крупными отверстиями. Клубни с размерами менее ширины отверстия проваливаются на нижнее решето, где происходит выделение мелкой фракции. Оставшиеся на поверхности решет клубни в результате колебаний сходят в свои лотки.

В процессе работы грохотной установки ее рабочий орган выполняет две функции – калибрует и транспортирует материал, что предъявляет к механизму

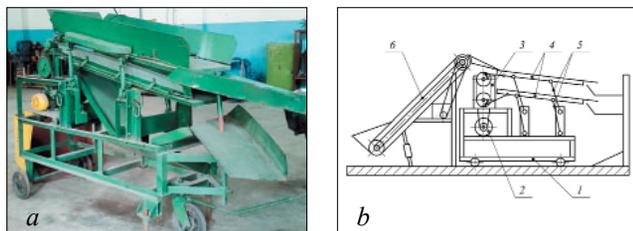


Рис. 1. Сортировальная машина грохотного типа: а – общий вид; б – схема: 1 – рама; 2 – асинхронный электродвигатель; 3 – привод с кривошипами; 4 – решета; 5 – поводки; 6 – подающий транспортер

Fig. 1. Screen potato sorter: a – general view; b – diagram: 1 – frame; 2 – asynchronous electric motor; 3 – drive with cranks; 4 – sieves; 5 – leashes; 6 – feeding conveyor

противоположные требования. Большая производительность будет обеспечена при быстром ходе клубней картофеля с решета, а высокая точность разделения на фракции – при достаточно длительном нахождении клубней на решетке.

Для привода решет с колебательным движением используют кривошипно-шатунные схемы – с регулируемой частотой вращения и переменным радиусом кривошипа. Однако такой механизм не может реализовать весь потенциал калибрующей машины. Повысить ее эффективность можно в случае более частой смены знака ускорения привода [19, 20]. Предлагается использовать муфту с двухкулисным механизмом привода, который может обеспечить модифици-

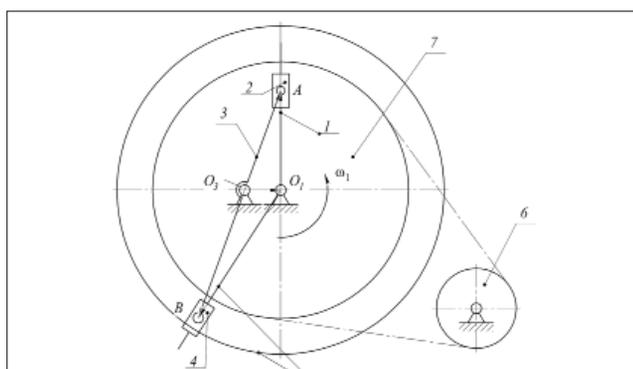


Рис. 2. Двухкулисный механизм привода кривошипов: 1 – входной кривошип, жестко связанный с ведомым шкивом; 2, 4 – камни; 3 – коромысло; 5 – кулиса, жестко связанная с кривошипом привода решет; 6 – шкив ведущий; 7 – шкив ведомый, связанный с входным кривошипом;  $O_1$  – ось кривошипа 1;  $O_3$  – ось коромысла 3; А – кинематическое соединение звеньев 1 и 2; В – кинематическое соединение звеньев 3 и 4;  $\omega_1$  – угловая скорость кривошипа 1

Fig. 2. Two-stage crank drive mechanism: 1 – input crank rigidly connected to the driven pulley; 2, 4 – stones; 3 – rocker arm; 5 – a backstage rigidly connected to the crank of the sieve drive; 6 – drive pulley; 7 – driven pulley connected to input crank  $O_1$ ,  $O_3$ , А, В – kinematic pairs (movable joints of links);  $O_1$  – crank axis 1;  $O_3$  – rocker arm axis 3; А – kinematic connection of links 1 and 2; В – kinematic connection of links 3 and 4;  $\omega_1$  – angular velocity of crank 1

рованные алгоритмы движения решет [15] (рис. 2).

По результатам кинематического анализа данного механизма определены примерные зависимости углов поворота от размеров звеньев [15, 19, 21-23] (рис. 3).

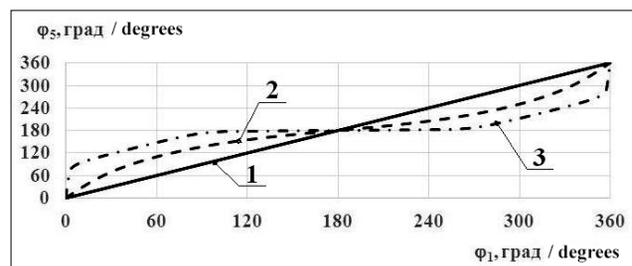


Рис. 3. Зависимость угла  $\varphi_5$  поворота кривошипа (выходного звена) от угла поворота  $\varphi_1$  входного кривошипа при смещении оси  $O_3$  относительно оси  $O_1$  (радиус  $O_3A = 0,03$  м): 1 – без смещения осей  $O_1$  и  $O_3$ ; 2 – со смещением оси  $O_3$  относительно оси  $O_1$  вправо на 0,014 м; 3 – со смещением оси  $O_3$  относительно оси  $O_1$  вправо на 0,029 м

Fig. 3. The dependence of the crank rotation angle –  $\varphi_5$  (output link) on the input crank rotation angle –  $\varphi_1$  when  $O_3$  axis is displaced against  $O_1$  axis ( $O_3A$  radius = 0.03 m): 1 – without a displacement of  $O_1$  and  $O_3$  axes; 2 – with a 0.014 m displacement of  $O_3$  axis against  $O_1$  axis to the right; 3 – with a 0.029 m displacement of  $O_3$  axis against  $O_1$  axis to the right

Углы поворота звеньев 3 и 5 рассчитывали в куочно-заданном виде, учитывая несколько вариантов:

$$\varphi_3 = \begin{cases} \arctg\left(\frac{O_1A \sin \varphi_1}{O_3O_1 + O_1A \cos \varphi_1}\right), & \text{при } \varphi_1 < \pi - \arccos \frac{O_3O_1}{O_1A}; \\ \frac{\pi}{2}, & \text{при } \varphi_1 = \pi - \arccos \frac{O_3O_1}{O_1A}; \\ \pi + \arctg\left(\frac{O_1A \sin \varphi_1}{O_3O_1 + O_1A \cos \varphi_1}\right), & \text{при } \pi - \arccos \frac{O_3O_1}{O_1A} < \varphi_1 < \pi + \arccos \frac{O_3O_1}{O_1A}; \\ \frac{3\pi}{2}, & \text{при } \varphi_1 = \pi + \arccos \frac{O_3O_1}{O_1A}; \\ 2\pi + \arctg\left(\frac{O_1A \sin \varphi_1}{O_3O_1 + O_1A \cos \varphi_1}\right), & \text{при } \pi + \arccos \frac{O_3O_1}{O_1A} < \varphi_1 \leq 2\pi. \end{cases} \quad (1)$$

$$\varphi_5 = \begin{cases} \pi + \arctg\left(\frac{O_3B \sin(\pi + \varphi_3)}{-O_1O_3 + O_3B \cos(\pi + \varphi_3)}\right), & \text{при } \varphi_3 < \pi - \arccos \frac{O_1O_3}{O_3B}; \\ \frac{3\pi}{2}, & \text{при } \varphi_3 = \pi - \arccos \frac{O_1O_3}{O_3B}; \\ 2\pi + \arctg\left(\frac{O_3B \sin(\pi + \varphi_3)}{-O_1O_3 + O_3B \cos(\pi + \varphi_3)}\right), & \text{при } \pi - \arccos \frac{O_1O_3}{O_3B} < \varphi_3 < \pi + \arccos \frac{O_1O_3}{O_3B}; \\ \frac{\pi}{2}, & \text{при } \varphi_3 = \pi + \arccos \frac{O_1O_3}{O_3B}; \\ 3\pi + \arctg\left(\frac{O_3B \sin(\pi + \varphi_3)}{-O_1O_3 + O_3B \cos(\pi + \varphi_3)}\right), & \text{при } \pi + \arccos \frac{O_1O_3}{O_3B} < \varphi_3 \leq 2\pi. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь все отрезки соответствуют размерам звеньев механизма (рис. 2). Первые и вторые производные углов (1) и (2) являются угловыми скоростями и угловыми ускорениями этих звеньев. Далее известными методами исследования кинематики кривошипных механизмов находили закономерности движения решет и клубней.

Влияние величины смещения осей  $O_3O_1$  на вращение кривошипа по отношению к вращению приводного вала очень существенно (рис. 3). Для оценки эффективности движения решет предложили использовать обобщенный коэффициент, который определяется по формуле:

$$K = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (V_i - \langle V \rangle)^2} \cdot \frac{L^2}{T^2} = \frac{n \cdot \langle V \rangle^2}{\sum_{i=1}^n (V_i - \langle V \rangle)^2} \quad (3)$$

где  $n$  – число фиксируемых моментов времени  $t_i$ ;

$V_i$  – скорость центра масс компонента (клубня), вычисленная в моменты времени  $t_i$ , м/с;

$\langle V \rangle$  – средняя за время схода скорость центра масс компонента, м/с;

$L$  – длина решета, м;

$T$  – среднее время схода компонентов с решета, с; причем:

$n / (\sum_{i=1}^n (V_i - \langle V \rangle)^2)$  – квадрат среднего отклонения скорости от среднего значения,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ .

Работа грохота представляет собой стохастический процесс, в котором клубни картофеля попадают на решето случайным образом. Начало их движения происходит в разные фазы поворота кривошипа. Заданная закономерность движения решета определяется средним значением  $\langle K \rangle$  всех коэффициентов эффективности, вычисленных при разных начальных условиях.

Для расчета радиус кривошипа принимается равным 32 мм, ход решета – 65 мм. Варьируемые величины – угловая скорость кулачка  $\omega$  и угол наклона решет  $\gamma$ .

Результаты физического моделирования движения клубня по решету грохота при двухкулидном механизме привода в сравнении с кривошипным представили в виде графиков ускорения решета  $a$ , скорости  $V$  и перемещения центра масс  $S$  (рис. 4).

Привод с двухкулисным механизмом обеспечивает более интенсивное перемещение модели клубня по сравнению с кривошипным приводом вследствие большего количества изменений знака ускорения решет, приходящихся на один оборот приводного вала.

В первом случае за 4 оборота приводного вала клубень, при нулевой начальной скорости центра масс, перемещается на 0,4 м, а во втором случае – только на 0,1 м. При этом в варианте кривошипного цикла максимумы изменения скорости центра масс клубня ухудшают процесс калибровки картофеля на отдельные фракции. Колебания ускорений решет близки к гармоническому (синусоидальному) закону.

В случае кривошипного механизма клубни интенсивно перемещаются как в сторону схода, так и назад. При таких колебаниях они не успевают сориентироваться в отверстиях решета, скорость транспортирования снижается.

Предлагаемый двухкулисный механизм обеспечивает более плавное изменение скорости, достаточное

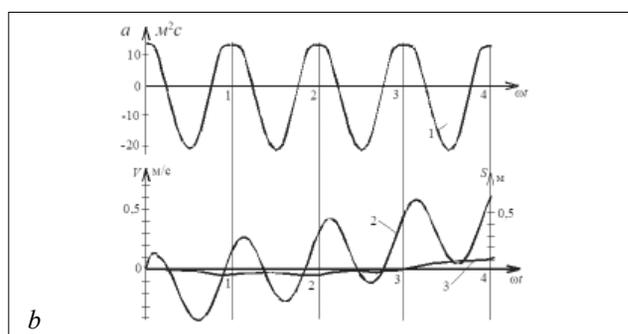
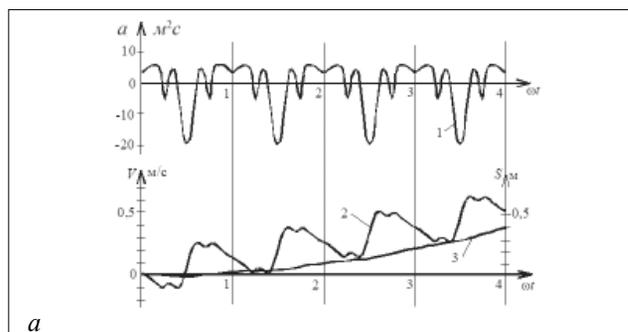


Рис. 4. Движение модели клубня: а – при двухкулидном механизме привода; б – при кривошипном механизме привода; 1 – ускорение решета; 2 – скорость клубня; 3 – перемещение центра масс

Fig. 4. Tuber model movement: a – with a two-stage drive mechanism; b – with a crank drive mechanism; 1 – sieve acceleration; 2 – tuber speed; 3 – a center-of-mass displacement

время для надежного ориентирования компонентов картофельной смеси в отверстиях решета и более закономерное смещение клубней в сторону схода. Плавное и направленное движение по поверхности решета повышает точность калибровки, ускоряет сход с решета, что повышает производительность машины.

Результаты расчетов коэффициента эффективности  $K$  по формуле (3) для рассматриваемых механиз-

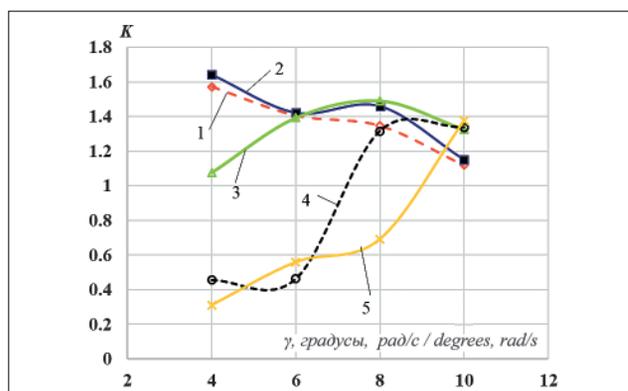


Рис. 5. Зависимость коэффициента эффективности  $K$  двухкулисного механизма привода от угла наклона решета  $\gamma$  рад/с: 1 – 13,12; 2 – 14,76; 3 – 16,40; 4 – 18,04; 5 – 19,68

Fig. 5. Dependence of the efficiency coefficient  $K$  of the two-stage drive mechanism on the sieve inclination angle  $\gamma$  rad/s: 1 – 13.12; 2 – 14.76; 3 – 16.40; 4 – 18.04; 5 – 19.68

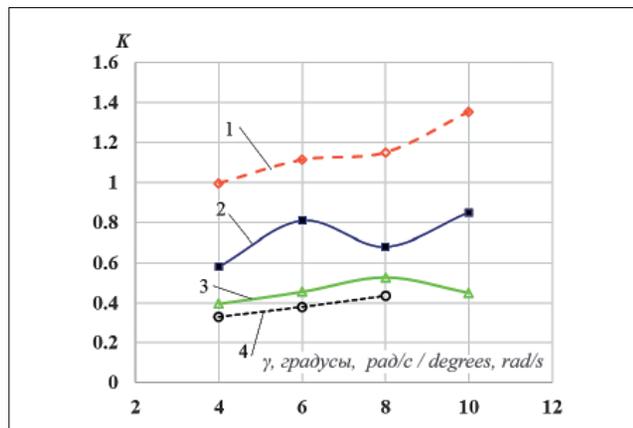


Рис. 6. Зависимость коэффициента эффективности  $K$  кривошипного механизма привода от угла наклона решета  $\gamma$  рад/с: 1 – 20,0; 2 – 22,5; 3 – 25,0; 4 – 27,5

Fig. 6. The dependence of the efficiency coefficient  $K$  of the crank drive mechanism on the sieve inclination angle  $\gamma$  rad/s: 1 – 20,0; 2 – 22,5; 3 – 25,0; 4 – 27,5

мов привода изобразили графически (рис. 5 и 6).

Угловая скорость кривошипа изменялась в пределах 0,8-1,2 рад/с, с учетом расчетной номинальной угловой скорости  $\omega_n$  при заданном ходе решета. Углы наклона решета  $\gamma$  имели интервал варьирования 4-10° [15, 20]. Эффективность предлагаемого привода грохота с двухкулисным механизмом выше ( $K = 0,3-1,65$ ) в сравнении с кривошипным ( $K = 0,27-1,35$ ). При этом номинальная угловая скорость  $\omega_n$  меньше на 34% (16,4

и 25,0 рад/с соответственно), что положительно сказывается на снижении уровня шума и вибраций машины.

Уменьшение угловой скорости приводного вала двухкулисного механизма до 13,12-14,76 рад/с снижает скорость клубней, улучшает условия для их разделения на фракции и, соответственно, повышает эффективность ( $K = 1,18-1,65$ ). Однако, если угол наклона решета превышает 8°, а угловая скорость приводного вала больше расчетной номинальной, то эффективность снижается ( $K < 1$ ). Такие режимы работы приводного механизма не рекомендуются к практическому применению.

**Выводы**

1. Перспективное направление совершенствования грохотных калибрующих машин – использование колебаний решет с несколькими переменами знака ускорений, приходящихся на один оборот приводного вала. Обеспечить такие алгоритмы может двухкулисный механизм привода решет.

2. Для предлагаемого варианта привода решет следует подбирать угловую скорость приводного вала, равную 13,12-14,76 рад/с, и устанавливать решета под углом 6-8°.

3. Расчеты показали, что применение в грохоте двухкулисного механизма в сравнении с существующим приводом решет повысит его эффективность на 11-22%, что необходимо проверить экспериментально на разработанной калибрующей машине.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

- Tikhomirov D., Izmailov A., Lobachevsky Y., Tikhomirov A. Energy consumption optimization in agriculture and development perspectives. *Research anthology on clean energy management and solutions*. 2021. 1505-1525.
- Izmaylov A.Y., Lobachevsky Y.P., Tikhomirov D.A., Tikhomirov A.V. The state, promising directions and strategies for the development of the energy base of agriculture. *Agricultural mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020. Vol. 51. N3. 24-35.
- Dorokhov A., Ponomarev A., Zernov V., et al. The results of laboratory studies of the device for evaluation of suitability of potato tubers for mechanized harvesting. *Applied sciences (Switzerland)*. 2022. Vol. 12. N4.
- Колчин Н.Н. Комплексы машин и оборудования для послеуборочной обработки картофеля и овощей. М.: Машиностроение. 1982. 268 с.
- Петров Г.Д., Бекетов П.В. Механизация возделывания и уборки овощей. М.: Колос. 1983. 287 с.
- Колчин Н.Н. Механизация работ в хранилищах картофеля и овощей. М.: Агропромиздат. 1985. 191 с.
- Останин Р.И., Костин А.В., Лебедев Л.Я. и др. Механизированный комплекс для послеуборочной обработки и хранения картофеля // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021. N2(66). С. 56-64.
- Salimzyanov M., Pervushin V., Shakirov R., Kalimullin M. Improvement of technology and machines for growing potatoes in agriculture. *Engineering for rural development*. 2020. 9. 1423-1430.
- Dorokhov A., Aksenov A., Sibirev A., et al. Results of laboratory studies of the automated sorting system for root and onion crops. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. N6. 1257.
- Лебедев Л.Я., Арсланов Ф.Р. Отделитель почвенных примесей для обработки картофеля // *Научное обеспечение инженерно-технической системы АПК: проблемы и перспективы: Материалы национальной науч.-практ. конф., 11-13 декабря 2019 г. Ижевск*. 2020. С. 197-202.
- Khamaletdinov R., Martynov V., Mudarisov S., et al. Substantiation of rational parameters of the root crops separator with a rotating inner separation surface. *Journal of Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 51. N1. 15-20.
- Колчин Н.Н., Петухов С.Н. Исследования процесса сортирования клубней картофеля // *Картофель и овощи*. 2018. N9. С. 22-25.
- Дорохов А.С., Мосяков М.А., Сазонов Н.В. Автоматизированная линия для послеуборочной обработки корнеплодов и картофеля // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N1. С. 22-26.
- Дорохов А.С., Мосяков М.А., Сазонов Н.В. Разработка

- автоматизированной линии послеуборочной обработки картофеля для хозяйств населения // *Агроинженерия*. 2020. N2(96). С. 16-22.
15. Иванов А.Г., Максимов П.Л., Максимов Л.М. и др. Применение методов механики к исследованию рабочих процессов калибрующих устройств для картофеля: монография. Ижевск: Цифра. 2021. 260 с.
  16. Ерохин М.Н., Максимов П.Л., Дородов П.В. Повышение конструкционной надежности копателя-сборщика картофеля // *Тракторы и сельхозмашины*. 2015. N2. С. 8-12.
  17. Казанцев С.П., Матвеев В.А., Мельников О.М. Проектирование приводов стационарных сельскохозяйственных машин. М.: Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2018. 140 с.
  18. Измайлов А.Ю., Колчин Н.Н., Лобачевский Я.П., Кынев Н.Г. Современные технологии и специальная техника для картофелеводства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. N2. С. 45-48.
  19. Васильченко М.Ю., Поробова О.Б., Сергеев А.А. Математическая модель движения клубня картофеля по решетку грохота // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2016. N3(48). С. 50-55.
  20. Боровиков Ю.А., Васильченко М.Ю., Иванов А.Г., Поробова О.Б. Использование коэффициента эффективности для оптимизации параметров шарнирно-стержневого механизма грохота // *Вестник Челябинского агроинженерного университета*. 2004. Т. 41. С. 43-49.
  21. Иванов А.Г., Шакиров Р.Р., Марков Д.А. и др. Кинематика транспортерного сортирующего устройства с переменной скоростью вращения рабочего органа // *Сельский механизатор*. 2022. N11. С. 18-22.
  22. 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.
  23. 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. Tikhomirov D., Izmailov A., Lobachevsky Y., Tikhomirov A. Energy consumption optimization in agriculture and development perspectives. *Research anthology on clean energy management and solutions*. 2021. 1505-1525 (In English).
2. Izmaylov A.Y., Lobachevsky Y.P., Tikhomirov D.A., Tikhomirov A.V. The state, promising directions and strategies for the development of the energy base of agriculture. *Agricultural mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020. Vol. 51. N3. 24-35 (In English).
3. Dorokhov A., Ponomarev A., Zernov V., et al. The results of laboratory studies of the device for evaluation of suitability of potato tubers for mechanized harvesting. *Applied sciences* (Switzerland). 2022. Vol. 12. N4 (In English).
4. Kolchin N.N. Kompleksy mashin i oborudovaniya dlya posleuborochnoy obrabotki kartofelya i ovoshchey [Machines complexes and equipment for post-harvest processing of potatoes and vegetables]. Moscow: Mashinostroenie. 1982. 268 (In Russian).
5. Petrov G.D., Beketov P.V. Mekhanizatsiya vozdeleyvaniya i uborki ovoshchey [Mechanization of vegetable cultivation and harvesting]. Moscow: Kolos. 1983. 287 (In Russian).
6. Kolchin N.N. Mekhanizatsiya rabot v khranilishchakh kartofelya i ovoshchey [Mechanization of work in the potato and vegetable storage]. Moscow: Agropromizdat, 1985. 191 (In Russian).
7. Ostanin R.I., Kostin A.V., Lebedev L.Ya., et al. Mekhanizirovanny kompleks dlya posleuborochnoy obrabotki i khraneniya kartofelya [Mechanized complex for postharvesting processing and storage of potatoes]. *Vestnik Izhevskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2021. N2(66). 56-64 (In Russian).
8. Salimzyanov M., Pervushin V., Shakirov R., Kalimullin M. Improvement of technology and machines for growing potatoes in agriculture. *Engineering for rural development*. 2020. 9. 1423-1430 (In English).
9. Dorokhov A., Aksenov A., Sibirev A., et al. Results of laboratory studies of the automated sorting system for root and onion crops. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. N6. 1257 (In English).
10. Lebedev L.Ya., Arslanov F.R. Otdelitel' pochvennykh primsey dlya obrabotki kartofelya [Potato soil separator]. *Nauchnoe obespechenie inzhenerno-tekhnicheskoy sistemy APK: problemy i perspektivy: Materialy natsional'noy nauch.-prakt. konf., 11-13 dekabrya 2019. Izhevsk*. 2020. 197-202 (In Russian).
11. Khamaletdinov R., Martynov V., Mudarisov S., et al. Substantiation of rational parameters of the root crops separator with a rotating inner separation surface. *Journal of Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 51. N1. 15-20 (In English).
12. Kolchin N.N., Petukhov S.N. Issledovaniya protsessa sortirovaniya klubney kartofelya [Researches of potato tubers sorting process]. *Kartofel' i ovoshchi*. 2018. N9. 22-25 (In Russian).
13. Dorokhov A.S., Mosyakov M.A., Sazonov N.V. Avtomatizirovannaya liniya dlya posleuborochnoy obrabotki korneplodov i kartofelya [Automated line for post-harvest processing of root crops and potatoes]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N1. 22-26 (In Russian).
14. Dorokhov A.S., Mosyakov M.A., Sazonov N.V. Razrabotka avtomatizirovannoy linii posleuborochnoy obrabotki kartofelya dlya khozyaystv naseleniya [Designing an automated line for post-harvest potato processing to be used in private farm smallholdings]. *Agroinzheneriya*. 2020. N2(96). 16-22 (In Russian).
15. Ivanov A.G., Maksimov P.L., Maksimov L.M., et al. Prime-nenie metodov mekhaniki k issledovaniyu rabochikh protsessov kalibruyushchikh ustroystv dlya kartofelya: mono-

- grafiya [Applying the mechanics methods to the study of the working processes of potatoes calibration devices: monograph]. Izhevsk: Tsifra. 2021. 260 (In Russian).
16. Erokhin M.N., Maksimov P.L., Dorodov P.V. Povyshenie konstruktsionnoy nadezhnosti kopatelya-sborshchika kartofelya [Improving the structural reliability of a potato harvester]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2015. N2. 8-12 (In Russian).
  17. Kazantsev S.P., Matveev V.A., Mel'nikov O.M. Proektirovanie privodov statsionarnykh sel'skokhozyaystvennykh mashin [Designing drives for stationary agricultural machinery]. Moscow: Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva. 2018. 140 (In Russian).
  18. Izmaylov A.Yu., Kolchin N.N., Lobachevskiy Ya.P., Kynev N.G. Sovremennye tekhnologii i spetsial'naya tekhnika dlya kartofelevodstva [Modern technologies and special equipment for potato production]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2015. N2. 45-48 (In Russian).
  19. Vasil'chenko M.Yu., Porobova O.B., Sergeev A.A. Matematicheskaya model' dvizheniya klubnya kartofelya po reshetu grokhota [Mathematical model of potato tubers moving through the potato-sorter rotating sieve]. *Vestnik Izhevskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2016. N3(48). 50-55 (In Russian).
  20. Borovikov Yu.A., Vasil'chenko M.Yu., Ivanov A.G., Porobova O.B. Ispol'zovanie koeffitsienta effektivnosti dlya optimizatsii parametrov sharnirno-sterzhnevoogo mekhanizma grokhota [Using the efficiency coefficient to optimize the parameters of the hinged-rod mechanism of the screen]. *Vestnik Chelyabinskogo agroinzhenernoogo universiteta*. 2004. Vol. 41. 43-49 (In Russian).
  21. Ivanov A.G., Shakirov R.R., Markov D.A., et al. Kinematika transportnogo sortiruyushchego ustroystva s peremennoy skorost'yu vrashcheniya rabocheogo organa [Kinematics of a conveyor sorting device with a variable speed of rotation of the working body]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2022. N11. 18-22 (In Russian).
  22. 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).
  23. 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:

Иванов А.Г. – постановка задачи, определение методологии исследования, разработка теоретических предпосылок;  
 Ерохин М.Н. – научное руководство, подготовка статьи, доработка решения, формирование общих выводов;  
 Казанцев С.П. – сбор и анализ материалов по теме исследования, формирование общих выводов, критический анализ и доработка решения;  
 Дородов П.В. – анализ научных источников по теме исследования, формирование и доработка текста;  
 Хузяхметов И.И. – кинематический анализ, проведение расчетов и подготовка графического материала;  
 Хакимов И.Т. – литературный анализ и подготовка начального варианта статьи.  
*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

#### Coauthors' contribution:

Ivanov A.G. – problem statement, specifying research methodology, developing theoretical prerequisites;  
 Erokhin M.N. – scientific guidance, preparation of the manuscript, revision of the solution, formation of general conclusions;  
 Kazantsev S.P. – collection and analysis of the material on the research topic, formation of general conclusions, critical analysis and revision of the solution;  
 Dorodov P.V. – literature review on the research topic, proofreading and revision of the manuscript;  
 Khuziyakhmetov I.I. – kinematic analysis, calculations and preparing the graphic material;  
 Khakimov I.T. – literature review and 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

03.04.2023  
 25.05.2023

## Технология и агрегат для восстановления экологического состояния горных лугов и пастбищ

**Сергей Майрамович Джибилов,**  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
e-mail: s.dzhibilovs@mail.ru;

**Людмила Романовна Гулуева,**  
научный сотрудник,  
e-mail: luda\_gulueva@mail.ru

Северо-Кавказский научно-исследовательский институт горного и предгорного сельского хозяйства Владикавказского научного центра Российской академии наук, с. Михайловское, Республика Северная Осетия – Алания, Российская Федерация

**Реферат.** Показали, что постоянное использование горных лугов и пастбищ приводит к деградации почвы и истощению травостоя. Отметим, что подсев семян трав на изреженный травостой в горах повышает урожайность и питательную ценность лугов и пастбищ. Выявили отсутствие малогабаритных маневренных агрегатов, способных подсевать семена трав на изреженный травостой в горах. (*Цель исследования*) Разработать и изготовить лабораторный образец блок-модуля на базе мини-трактора *Feng Shou 180* для поверхностного подсева семян трав, обеспечивающего ускоренное повышение урожайности многолетних трав и устойчивость почв к водной и ветровой эрозии (*Материалы и методы*) Обосновали технологию и создали лабораторный образец блок-модуля для высева семян бобовых и злаковых трав. Испытания данного агрегата и технологии проводили в горной зоне Республики Северная Осетия – Алания на высоте 1540 метров над уровнем моря. Травы подсевали на изреженном участке северного склона крутизной 13-16 градусов в местности «Сугсадтанраг». Провели техническую экспертизу агрегата согласно агротехническим требованиям и техническому заданию. Поверхностное внесение семян трав осуществляли согласно нормам. (*Результаты и обсуждение*) Изготовили лабораторный образец блок-модуля на базе мини-трактора *Feng Shou 180* для поверхностного подсева семян трав. Установили, что лабораторный образец агрегата соответствует агротехническим требованиям и техническому заданию. (*Выводы*) Выявили, что уже на второй год после применения агрегата урожай травостоя увеличился на 90-170 процентов, изменился ботанический состав, что повлияло на качество корма. Обосновали целесообразность применения разработанного блок-модуля на горных лугах и пастбищах с уклоном до 16 градусов.

**Ключевые слова:** блок-модуль для высева семян трав, горные склоны, мини-трактор, травосмеси, многолетние травы, луга, пастбища.

■ **Для цитирования:** Джибилов С.М., Гулуева Л.Р. Технология и агрегат для восстановления экологического состояния горных лугов и пастбищ // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №2. С. 20-27. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-20-27. EDN KQMGLX.

## Restoring Technology and a Seeding Unit for Recovering Mountain Meadow and Pasture Ecosystems

**Sergey M. Dzhibilov,**  
Ph.D.(Eng.), senior researcher,  
e-mail: dzhibilovs@mail.ru;

**Lyudmila R. Gulueva,**  
researcher,  
e-mail: luda\_gulueva@mail.ru

North Caucasian Research Institute of Mountain and Piedmont Agriculture – the Affiliate of Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, North Ossetia-Alania, Russian Federation

**Abstract.** The paper shows that the constant use of mountain meadows and pastures leads to soil degradation and herbage depletion. It is noted that grass overseeding on the sparse mountain grass meadows and pastures helps to increase their yield and nutritional value. It is revealed that there is a lack of small-sized maneuverable machines capable of grass overseeding in the sparse mountain areas. (*Research purpose*) To develop and manufacture a laboratory model of a block module aggregated with the *Feng Shou 180* mini-tractor for surface grass overseeding, to ensure an accelerated increase in the perennial grass yield and soil resistance to water and wind erosion. (*Materials and methods*) The restoring technology was substantiated and a laboratory block



module was developed for sowing legumes and cereals. The seeding unit and technology were tested in the mountainous zone of the Republic of North Ossetia-Alania at a 1540-meter altitude above sea level. Grasses were overseeded on a sparse section of a 13-16-degree steep northern slope in the area of Sugsadnanrag. The technical examination of the unit was carried out in accordance with the agrotechnical requirements and terms of reference. The surface application of grass seeds was performed according to the norms. (*Results and discussion*) A laboratory block module aggregated with the Feng Shou 180 mini-tractor for surface grass overseeding was produced. It is established that the laboratory model of the unit complies with the agrotechnical requirements and terms of reference. (*Conclusions*) It is found that within the second year of using the unit, there was a 90-170 percent increase in the herbage yield and a certain improvement in the botanical composition, which positively affected the feed quality. The use of the developed block-module is proved to be reasonable and helpful in mountain meadows and pastures having 16-degree steep slopes.

**Keywords:** block-module for grass sowing, mountain slopes, mini-tractor, grass mixture, perennial grasses, meadows, pastures.

**For citation:** Dzhobilov S.M., Gulueva L.R. Tekhnologiya i agregat dlya vosstanovleniya ekologicheskogo sostoyaniya gornyx lugov i pastbishch [Restoring technology and a seeding unit for recovering mountain meadow and pasture ecosystems] *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N2. 20-27 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-20-27. EDN KQMGLX.

Состояние горных экосистем Северного Кавказа не соответствует потенциальным возможностям этой территории, богатой естественными биологическими ресурсами, способными обеспечить развитие сельскохозяйственного производства зоны [1].

Кормовые угодья, несмотря на специфические особенности (крутые склоны, сильная каменистость, малая мощность гумусового горизонта, кислотность почвенного раствора и др.), а также на климатические условия (резкая смена температуры воздуха как в течение года, так и суток, неустойчивый водно-воздушный режим), остаются надежным источником производства высокопитательных и дешевых кормов для круглогодичного содержания животных в горах. Площадь сенокосов и пастбищ горной зоны РСО – Ала́ния составляет 121,8 тыс. га. Однако отсутствие регулярного ухода и бессистемное использование природных кормовых угодий обуславливают низкую урожайность (45 ц/га сухой массы) и вызывают деградацию травостоев. Это не только сдерживает развитие животноводства, но и разрушает всю экосистему, нанося непоправимый ущерб экологическому состоянию горных ландшафтов.

Лу́га и пастбища, близлежащие к поселениям горцев, легкодоступные для бродячего скота, перегружаются, подвергаясь физической деградации, выбиванию дернины, распылению почвы. На отдельных участках смыв почвы достигает 500-900 м<sup>3</sup>/га при доступных нормах 2-3 м<sup>3</sup>/га в год. Почвы горных территорий Северного Кавказа, составляющие около 300 тыс. км<sup>2</sup>, истощаются, ежегодно теряя в среднем до 80 тыс. т азота, 18-20 тыс. т фосфора и около 70 тыс. т калия. Эти негативные процессы наблюдаются в нижних частях склонов, особенно на южных и юго-восточных экспозициях лугостепных и субальпийских поясов. Здесь в результате перегрузки скотом копытами животных выбивается дернина. При ее отсутствии почва вымывается из образовавшихся тро-

пинок с дождевой каплей. При чрезмерной нагрузке пастбища тропинки смыкаются и начинается поверхностный сток, который часто завершается разрушением почвы до плотной горной породы, после чего эти участки надолго исключаются из сельскохозяйственного использования [2, 3].

Единственный природный фактор, который противостоит разрушительному воздействию прогрессирующего деградационного процесса – это растительность, важная часть горной экосистемы, принимающая на себя все стрессовые природно-климатические и антропогенные воздействия. Но без поддержки человека горная экосистема постепенно разрушается, что ведет к глобальной катастрофе [4].

Для предотвращения подобной проблемы необходимо обеспечить проведение мероприятий, способствующих формированию высокопродуктивного травостоя и позволяющих целенаправленно решать задачи по стабилизации экологической структуры горных агроэкосистем.

Одно из эффективных мероприятий – подсев семян многолетних трав на сильно выбитых пастбищах, где летом и зимой концентрируется основное поголовье скота. Ни щелевание, ни внесение удобрений здесь не дают удовлетворительных результатов по восстановлению нормального травостоя, предотвращающего поверхностный сток и смыв почвы. В горных условиях подсев трав сопряжен со специфическими условиями ландшафта: мелкоконтурностью, склоновостью рельефа, что затрудняет применение специализированной серийной техники. В большинстве случаев подсев трав в дернину природных лугов без предварительной ее обработки оказывается малоэффективным, так как незаделанные семена не дают всходов или же всходы гибнут, не выдерживая конкуренции с естественными травами в борьбе за питательную среду.

Благоприятные условия для приживания семян достигаются подсевом семян на оголенные участки

и последующим их прикатыванием. Поэтому, необходимо постоянно проводить поверхностное улучшение лугов и пастбищ.

По результатам проведенных исследований мы составили классификацию условий, требующих подсева трав на горных лугах и пастбищах:

- травостой из плохо поедаемых или ядовитых растений;
- после сбора камней, на оголившуюся почву;
- после удаления кочек или кустарников;
- после удаления сорных растений;
- выродившиеся и изреженные травостой;
- по участкам выбоин от прохода скота или техники;
- после деградации травостоя под воздействием природных факторов (кислотный дождь, сель, смыл водным потоком, ветровая эрозия, оседание облака вредных выбросов предприятий, нанос грунта и т.д.);
- мощный травостой из малоценных трав, после интенсивного стравливания овцами.

Из классификации видно, что необходимость подсева семян трав может быть техногенного и природного происхождения.

Известно, что организация бобово-злаковых пастбищ на склоновых землях позволяет оптимизировать луговое и полевое кормопроизводство, решить проблему кормового белка, оздоровить стадо, снизить себестоимость молока, остановить деградацию эрозивно опасных земель и улучшить среду обитания населения горной зоны.

Способы окультуривания почв основаны на подборе смеси бобовых и злаковых многолетних трав и их посеве поперек склона. Практика ведения лугопастбищного хозяйства – как в горах, так и на равнине – показывает, что смешанные посевы многолетних трав (травосмеси) продуктивнее чистых посевов тех же сортов трав. Для посева трав на равнине используют габаритные зернотравяные сеялки СЗ-3,6А; СЗТ-3,6А; СЗПП-4 и другие, которые невозможно использовать на мелкоконтурных участках горной зоны. Сеялок для подсева травосмесей на склоновые (до 15°) луга и пастбища горной зоны до настоящего времени нет, и подсев там проводят как правило вручную.

При создании конструкции опытного образца подобного агрегата необходимо учитывать, что сеялка должна обеспечивать подсев семян злаковых трав с бобовыми. Кроме того, состав подбираемых травосмесей должен соответствовать почвенно-климатическим условиям. Поэтому актуальной задачей остается разработка малогабаритных маневренных машин, способных поверхностно вносить различные травосмеси на горные луга и пастбища (*патент на изобретение RU 2415538 C1, 2011*) [5, 6].

**Цель исследований** – разработать и изготовить лабораторный образец блок-модуля на базе мини-трактора *Feng Shou 180* для поверхностного подсева се-

мян трав, обеспечивающий снижение деградационных процессов склоновых участков, ускоренное повышение урожайности, качества и количества многолетних трав, а также устойчивость почв к водной и ветровой эрозии.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Объектом исследования стали патентная и научная литература, эскизный проект агрегата. Создали лабораторный образец блок-модуля для поверхностного внесения травосмесей на деградированные горные луга и пастбища. Его конструкция адаптирована к горному агроландшафту с деградированными почвами с уклоном обрабатываемых участков до 16° [7,8].

Задачи исследований:

- разработать лабораторный образец блок-модуля;
- испытать его на деградированных склоновых (до 16° уклона) сенокосных участках;
- дать оценку подсеянному сенокосу (фенологические, продукционные, энергетические свойства);
- определить эффективность подсеваемых травосмесей.

Испытания опытного образца проводили на горном стационаре СКНИИГПСХ РСО – Алания. Деградированный сенокос расположен на высоте 1650 м над уровнем моря, склон 13-16°, юго-восточной экспозиции. Участок с изреженным разнотравно-злаковым травостоем (45% проективного покрытия почвы). Перед посевом внесены минимальные дозы удобрения  $N_{60}P_{45}K_{20}$  (фон).

*Варианты опыта:*

1. Контроль (без удобрений);
2. Фон + клевер красный 5 кг/га + тимофеевка луговая 3 кг/га;
3. Фон + клевер красный 10 кг/га + тимофеевка луговая 6 кг/га;
4. Фон + клевер красный 15 кг/га + тимофеевка луговая 8 кг/га.

Делянки расположены рандомизированно, поперек склона, в 4-кратной повторности: площадь каждой делянки 72 м<sup>2</sup>; количество делянок – 16; общая площадь опытного поля с межделяночными дорожками и защитными полосами – 1712,5 м<sup>2</sup>.

Опыт заложен по методике проведения полевых опытов на сенокосах и пастбищах ВНИИ кормов им. В.Р. Вильямса (1971 г.). [9].

Соблюдены следующие агротехнические требования:

- высота стерни перед подсевом трав не более 5-7 см;
- оптимальные сроки подсева трав с одновременным внесением жидких удобрений осенью с 01.09 по 30.09; летом с 15.08 по 30.08; весной с 1.03 по 30.04 при достаточной влажности почвы (60-80%) в соответствии с технологической картой по обработке лугов и пастбищ, в любое удобное для хозяйства время, если нет опасности смыва их талыми водами и ливневыми осадками;

- участки с очень плотной дерниной плохо поедаемой растительности необходимо перед подсевом разрыхлить дисковыми боронами БДН-1,3 в 2-3 следа;

- устройство для обеспечения нормы высева семян должно регулироваться с помощью передаточного механизма или конструкции высевающего аппарата (катушек).

Для выполнения поставленной цели разработаны конструкция и технологическая схема работы лабораторного образца блок-модуля, техническое задание, технические условия на изготовление, агротехнические требования к опытному образцу блок-модуля для поверхностного внесения семян трав, эскизный проект на лабораторный образец блок-модуля [10, 11]. Скомпонованы узлы и детали машины, изготовлен лабораторный образец машины. Проведены наладочные и регулировочные работы, стендовые и полевые испытания (рис. 1).

Техническая экспертиза опытного образца для подсева травосмесей, включала техническое описание, инструкцию по эксплуатации согласно техническому заданию и агротехническим требованиям. Проведена оценка монтажепригодности и функциональных показателей агрегата.

Производительность агрегата определялась за 1 ч работы:

$$W_{\text{час}} = 0,1B_p \cdot V_p \cdot k,$$

где  $B_p$  – ширина захвата, м;

$V_p$  – рабочая скорость, 6 км/ч;

$k$  – коэффициент использования чистого рабочего времени – 0,8, то есть

$$W_{\text{час}} = 0,1 \cdot 2,4 \cdot 6 \cdot 0,8 = 1,152 \text{ га/ч.}$$

Сезонная производительность агрегата  $W_{\text{сез}}$  определяется по формуле:

$$W_{\text{сез}} = W_{\text{час}} \cdot k_{\text{см}} \cdot t_{\text{см}} D_p,$$

где  $k_{\text{см}}$  – коэффициент сменности,  $k_{\text{см}} = 1,1$ ;

$D_p$  – число рабочих дней агрегата за сезон, принимаем 50 дней (в два периода: весной, осенью);

$t_{\text{см}}$  – продолжительность смены,  $t_{\text{см}} = 7$  ч;

$$W_{\text{сез}} = 1,152 \cdot 1,1 \cdot 7 \cdot 50 = 443,5 \text{ га.}$$

Качество работы опытного образца сеялки определяли после прохода на выделенных делянках длиной 10 м и шириной 2,4 м в 10-кратной повторности.

При изучении распределения семян по площади участка семена высевали на липкую ленту с последующим измерением интервалов между семенами. Высев семян на ленту проводили при установившемся режиме всех движущихся частей [11, 12].

При создании опытного образца сеялки использованы разработки группы механизации СКНИИГПСХ ВНИЦ РАН (патенты РФ № 144420 и № 153083, 2014 г.).

Для улучшения маневренности и уменьшения га-

баритов сеялку предлагается навешивать на мини-трактор *Feng Shou 180*. На раме сеялки установлены два ящика для семян, поскольку норма высева у различных видов трав разная и требует персональной настройки с помощью сменных звездочек (рис. 1). Агрегат должен обеспечивать работу на участках при влажности почвы 60-80% и твердости до 3,5 МПа.

Основные конструктивные технико-эксплуатационные показатели:

- ширина захвата одного маятникового высевающего аппарата – 40 см;

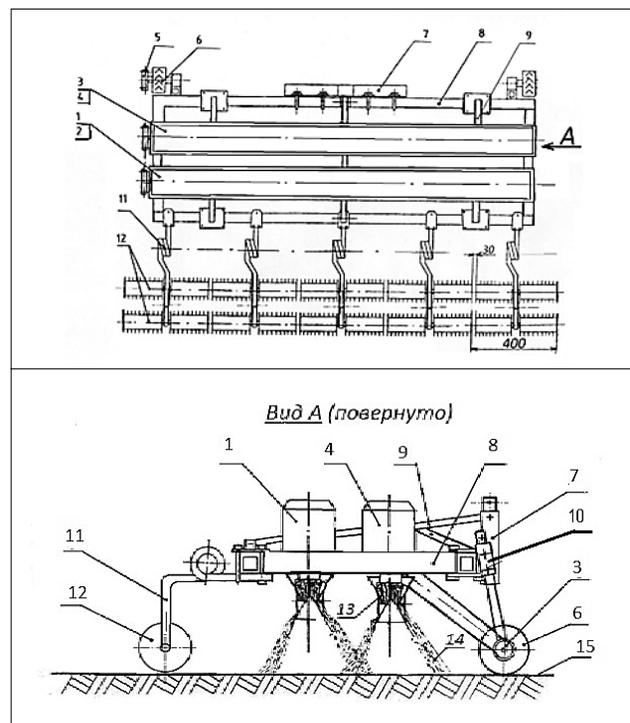


Рис. 1. Конструктивная схема опытного образца сеялки для подсева травосмесей на склоновые участки горных лугов и пастбищ: 1 – ящик для семян злаковых трав; 2 – привод высевающего аппарата семян злаковых трав; 3 – привод высевающего аппарата семян бобовых трав; 4 – ящик для семян бобовых трав; 5 – ведущая звездочка; 6 – опорно-приводное колесо; 7 – сцепка треугольная; 8 – рама сеялки; 9 – кронштейн крепления; 10 – телескопическая стойка крепления колес к раме сеялки; 11 – стойка пружинистая; 12 – секция прикапывающих катков; 13 – разбрасыватель семян трав конусного типа; 14 – факел разбрасываемых семян трав; 15 – поверхность почвы

Fig. 1. Construction diagram of a seeder pilot model for overseeding grass mixture on the slopes of mountain meadows and pastures: 1 – a box for cereal grass seeds; 2 – a drive of the sowing machine for cereal grass seeds; 3 – a drive of the sowing machine for legume seeds; 4 – a box for legume seeds; 5 – a drive sprocket; 6 – a support-drive wheel; 7 – a triangular hitch; 8 – the seeder frame; 9 – a mounting bracket; 10 – a telescopic stand for fastening the wheels to the seeder frame; 11 – a springy stand; 12 – a roller section of; 13 – a cone-type grass seed spreader; 14 – a grass seed spray pattern; 15 – soil surface

- ширина захвата агрегата – 1,8-2,4 м;
- метод подсева семян трав – разбросной;
- количество высевующих аппаратов – 2;
- производительность – 1,152 га/ч;
- скорость движения агрегата – 6 км/ч;
- норма высева семян 3-40 кг/га;
- крутизна склона – до 16°.

Для привода звездочек оборудована цепная передача от опорно-приводного колеса. При постановке агрегата на стоянку он опирается на четыре колеса.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** По представленной технологии разработана конструктивная схема и изготовлен лабораторный образец сеялки для подсева травосмесей на горные (склоновые) деградированные луга и пастбища с уклоном до 16° на базе китайского мини-трактора *Feng Shou 180* (возможен вариант агрегатирования на тракторах подобного класса (рис. 2) [13, 14].



Рис. 2. Опытный образец сеялки для подсева травосмесей в агрегате с мини-трактором *Feng Shou 180*: а – вид справа; б – вид сзади

Fig. 2. A pilot model of a seeder for overseeding grass mixture in aggregate with *Feng Shou 180* mini-tractor: а – right side view; б – rear view

Лабораторный образец блок-модуля для подсева семян трав испытывали на изреженном участке северного склона крутизной 13-16° в местности «Сугсадтанрага» опорного пункта (с. Даргавс) СКНИИ-ГПСХ. Агрегат начинает движение поперек склона сверху вниз челночным способом [15, 16].

Подсев семян трав выполняется следующим образом (рис. 3). Под каждую высевающую катушку высевующего аппарата установлены разбросные конусы с пробками-заслонками. Они открывают и закрывают семяпровод через исполнительный механизм, который активируется через усилитель сигнала. Сигнал генерируется в фотоэлементе при отражении света от твердой и гладкой поверхности почвы, оголенной от травостоя [17]. При наличии травостоя фотосигнал (свет) в нем рассеивается и обратного отражения света в фотоэлемент не происходит, сигнал не формируется.

Предварительную механическую обработку почвы не проводили. Заранее были внесены минеральные удобрения в стартовой дозе ( $N_{60}P_{45}K_{20}$ ). Высевали клевер красный и тимopheевку луговую в различных

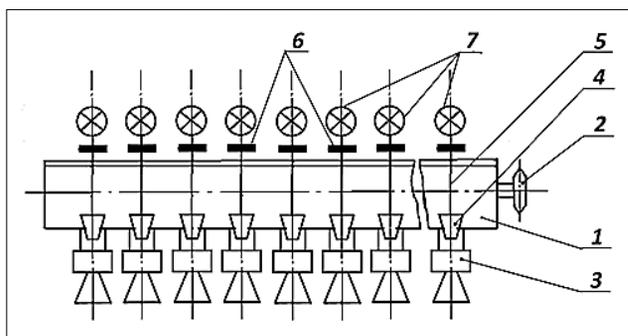


Рис. 3. Схема автоматического адресного подсева семян трав к горной сеялке: 1 – травяной высевующий аппарат; 2 – звездочка привода катушек высевующего аппарата; 3 – высевающая трубка с разбросным конусом; 4 – пробка-заслонка выключения секции высевующего аппарата; 5 – передаточный механизм от усилителя сигнала к заслонке; 6 – усилитель сигнала от фотоэлементов; 7 – фотоэлемент, считывающий состояние травяного покрова лугопастбищного участка

Fig. 3. Diagram of automatic grass seeder to aggregate with a mountain seeder for targeted overseeding: 1 – grass seeder; 2 – drive sprocket of the seeder; 3 – sowing tube with a conical feeder; 4 – flap valve for turning off the seeder section; 5 – transmission mechanism from the signal amplifier to the flap valve; 6 – signal amplifier from photocells; 7 – photocell monitoring the grassland area state

нормах, что значительно изменило биоразнообразие лугопастбищного фитоценоза (таблица).

Всходы на участках с внесением удобрений появились раньше: клевера красного – на 8-10 дней, тимopheевки луговой на 12 дней. Учитывая ускоренный рост подсеянных трав и их развитие (количество побегов по мере повышения норм высева увеличилось с 870 до 2120; 2140 и 3010 шт./м<sup>2</sup> соответственно вариантам опыта), растущее на этих участках разнотравье подверглось угнетению и снизилось, соответственно, с 63,3% до 31,7; 21,2 и 14,6%.

По мере увеличения в травостое бобового компонента с 4,3% (преобладание клевера белого и астрала) до 26,6; 32,5 и 37,7% концентрация клевера лугового значительно возросла, что повлияло не только на прирост надземной массы, но и на урожай подземной, который увеличился по сравнению с контролем, соответственно, в 2,8; 3,8 и 4,6 раза. При содержании 0,48 корм. ед. в 1 кг сена, его питательность в вариантах с удобрением составила 2170; 2890 и 3500 корм. ед./га.

Бобовый компонент способствовал повышению питательной ценности и накоплению энергии корма. Так, сбор переваримого протеина с 54 кг/га на контроле вырос, соответственно вариантам опыта, до 237; 358 и 455 кг/га, а концентрация его на 1 корм. ед. повысилась с 68 г до 109; 124 и 130 г. При этом показатели валовой энергии в 1 кг сухого корма возросли с 16,1 до 17,7 МДж в опытных вариантах, что позволило увеличить ее содержание с 28,9 ГДж/га до 138,1 ГДж/га.



Таблица

Table

**ВЛИЯНИЕ ПОДСЕЯННОЙ ТРАВОСМЕСИ НА ПОКАЗАТЕЛИ ТРАВСТОЯ (В СРЕДНЕМ ЗА 3 ГОДА)  
INFLUENCE OF THE OVERSEEDED GRASS MIXTURE ON THE HERBAGE INDICATORS (3 YEAR AVERAGE)**

Варианты опыта Experiment options	Линейный рост, см Linear growth, cm	Количество побегов, шт./м <sup>2</sup> Number of shoots, pcs/m <sup>2</sup>	Ботанический состав, % Botanical composition, %				Урожай, т/га Yield, t/ha				Переваримого протеина на 1 корм.ед., г Digestible protein per 1 feed unit, g	Валовая энергия, ГДж/га Gross energy, GJ/ha	Обменная энергия, ГДж/га Exchange energy, GJ/ha
			злаки cereals		бобовые legumes		разнотравье mixture grass	сухое вещество dry matter	кормовых единиц feed units	переваримого протеина digestible protein			
			всего total	тимOFFЕВКА timofeevka	всего total	клевер clove							
1	42,7	870	32,4	–	4,3	–	63,3	1,7	0,79	0,054	68	28,9	15,1
2	79,1	2120	41,7	15,1	26,6	19,6	31,7	4,8	2,17	0,237	109	82,6	46,1
3	87,3	2470	46,3	18,7	32,5	28,3	21,2	6,4	2,89	0,358	124	113,3	64,0
4	96,4	3010	47,7	20,4	37,7	31,1	14,6	7,8	3,50	0,455	130	138,1	80,34

Соответственно этому возросла и обменная энергия. Бобовый компонент не только обеспечил фенологические изменения травостоя, но и способствовал поддержанию злаков. Их доля постепенно возрастала обеспечив оптимальное соотношение с бобовыми травами: от 7,9 : 1 до 1 : 2; 1 : 1,4 и 1 : 1,3. Это соответствует показателям высококачественного сена, которое при скармливании животным в зимний период может обеспечить их высокую продуктивность без использования комбикормов, что особенно актуально для горной зоны.

Если оценить эффективность подсева трав при получении продукции, то с учетом стоимости горного сена – 5,2 тыс. руб./т прибыль на третий год исследования составила по вариантам опыта 16,1 тыс.; 24,4 тыс. и 31,7 тыс. руб. В первый год проведения эксперимента данные показатели были ниже наполовину из-за затрат на семена, удобрения и проведение технических приемов.

Следовательно, подсев трав на мелкоконтурных склоновых участках с помощью агрегата горной модификации позволяет восстановить деградированные

сенокосы и пастбища горной зоны, повысить продуктивность, питательность и энергонасыщенность получаемого с них корма, что способствует круглогодичному содержанию животных в горах при использовании высококачественных кормов [18, 19].

Нормы высева можно применять в соответствии с состоянием (выбитостью) участка лугопастбища, его проективным покрытием и качеством травостоя.

**Выводы.** Впервые на базе мини-трактора *Feng Shou 180* создан лабораторный образец блок-модуля для поверхностного подсева семян трав с последующим их прикатыванием на участках в горной и предгорной зон. Лабораторный образец агрегата соответствует агротехническим требованиям и техническому заданию (что было этапом разработки 2019-2022 гг.). Подсев семян трав обеспечивает снижение деградационных процессов склоновых участков, ускоренное повышение урожайности, качества и количества многолетних трав, улучшает устойчивость почв к водной и ветровой эрозии.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Зотов А.А., Хисматулин М.М. Улучшение и использование природных сенокосов и пастбищ среднего Поволжья. Казань: Зур Казан. 2015. 266 с.
2. Zhang Z., Yu K., Siddique K.H.M., Nan Z. Phenology and sowing time affect water use in four warm-season annual grasses under a semi-arid environment. *Agricultural and forest meteorology*. 2019. Vol. 269-270. N16. 257-269.
3. Кутузова А.А., Трофимова Л.С., Проворная Е.Е. Методика оценки потоков энергии в луговых агроэкосистемах. М.: Угрешская типография. 2015. 32 с.
4. Мамиев Д.М. Перспективы развития биологического земледелия в РСО – Алания // *Научная жизнь*. 2019. Т. 14. N9(97). С. 1396-1402.
5. Джибилов С.М., Гулуева Л.Р. Способ поверхностного улучшения горных лугов и пастбищ // *Известия Горского государственного аграрного университета*. 2013. Т. 50. N1. С. 171-174
6. Дмитриев С.Ю., Дмитриев Ю.П., Ценч Ю.С. Комплекс машин АГРОМАШ для обработки залежных земель // *Вестник ВИЭСХ*. 2018; N2(31): С. 40-47.
7. Кутузова А.А., Тебердиев Д.М., Родионова А.В., Жезмер Н.В., Проворная Е.Е., Запывалов С.А. Экономическая эффективность усовершенствованных технологий создания и использования сеяных сенокосов // *Кормопроиз-*

- водство. 2020. N3. С. 3-8.
8. Солдатова И.Э., Солдатов Э.Д. Создание высокопродуктивных сенокосов и пастбищ в горной зоне Северного Кавказа // *Известия Горского государственного аграрного университета*. 2017. Т. 54. N3. С. 9-14.
  9. Савченко И.В. Ресурсосберегающее экологически чистое растениеводство для получения продукции высокого качества // *Вестник Российской академии наук*. 2019. Т. 89. N5. С. 527-531.
  10. Джибилов С.М., Гулуева Л.Р., Бестаев С.Г. Рыхлитель междурядий – окучник маточных кустов в плодопитомнике // *Известия Горского государственного аграрного университета*. 2014. Т. 51. N4. С. 201-207.
  11. Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Экология азотфиксации. Саратов: Амрит. 2019. 252 с.
  12. Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х., Старовойтов С.И., Ценч Ю.С., Шогенов А.Х. Трехсекционный почвообрабатывающий агрегат с универсальными сменными рабочими органами // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2019. Т. 14. N3(54). С. 92-95.
  13. Kyul E.V., Apazhev A.K., Kudzaev A.B., Borisova N.A. Influence of anthropogenic activity on transformation of landscapes by natural hazards. *Indian Journal of Ecology*. 2017. N44( 2). 239-243.
  14. Кудзаев А.Б., Уртаев Т.А., Цгоев А.Э., Коробейник И.А. Адаптивный энергосберегающий культиватор // *Сельский механизатор*. 2019. N2. С. 8-9.
  15. Kudzaev A.B., Urtaev T.A., Tsgoev A.E., Korobeynik I.A., Tsgoev D.V. Adaptive energy-saving cultivator equipped with the simultaneous adjuster of sections for working stony soils. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2017. N8(11). 714-720.
  16. 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.
  17. Kudzaev A.B., Urtaev T.A., Tsgoev A.E., Korobeynik I.A., Tsgoev D.V. Study of elastic composite rods for creating fuses of tilters. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2017. N8(11). 658-666.
  18. Джибилов С.М., Солдатов Э.Д., Гулуева Л.Р., Солдатова И.Э. Способ решения проблемы деградации горных пастбищ Центрального Кавказа // *Аграрный вестник Урала*. 2020. N6(197). С. 10-16.
  19. Миронова А.В. Обработка задернелых и деградированных почв // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N2(35). С. 57-62

## REFERENCES

1. Zotov A.A., Khismatulin M.M. Uluchshenie i ispol'zovanie prirodnykh senokosov i pastbishch srednego Povolzh'ya [Improvement and use of natural hayfields and pastures of the middle Volga region.]. Kazan': Zur Kazan. 2015. 266 (In Russian).
2. Zhang Z., Yu K., Siddique K.H.M., Nan Z. Phenology and sowing time affect water use in four warm-season annual grasses under a semi-arid environment. *Agricultural and forest meteorology*. 2019. Vol. 269-270. N16. 257-269 (In English).
3. Kutuzova A.A., Trofimova L.S., Provornaya E.E. Metodika otsenki potokov energii v lugovykh agroekosistemakh [Methodology for assessing energy flows in meadow agroecosystems]. Moscow: Ugreshskaya tipografiya. 2015. 32 (In Russian).
4. Mamiev D.M. Perspektivy razvitiya biologicheskogo zemledeliya v RSO – Alaniya [Prospects for the development of biological agriculture in North Ossetia-Alania]. *Nauchnaya zhizn'*. 2019. Vol. 14. N9(97). 1396-1402 (In Russian).
5. Dzhibilov S.M., Gulueva L.R. Sposob poverkhnostnogo uluchsheniya gornykh lugov i pastbishch [Method for surface improvement of mountain meadows and pastures]. *Izvestiya Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2013. Vol. 50. N1. 171-174 (In Russian).
6. 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).
7. Kutuzova A.A., Teberdiev D.M., Rodionova A.V., Zhezhmer N.V., Provornaya E.E., Zapivalov S.A. Ekonomicheskaya effektivnost' usovershenstvovannykh tekhnologiy sozdaniya i ispol'zovaniya seyanykh senokosov [Economic effectiveness of improved cultivation techniques for man-made hayfields]. *Kormoproizvodstvo*. 2020. N3. 3-8 (In Russian).
8. Soldatova I.E., Soldatov E.D. Sozdanie vysokoproduktivnykh senokosov i pastbishch v gornoy zone Severnogo Kavkaza [Development of high-productive hay meadows and pastures in the mountain zone of the North Caucasus]. *Izvestiya Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017. Vol. 54. N3. 9-14 (In Russian).
9. Savchenko I.V. Resursosberegayushchee ekologicheskii chistoe rastenievodstvo dlya polucheniya produktsii vysokogo kachestva [Ecology safety crop production for obtaining high-quality products]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*. 2019. Vol. 89. N5. 527-531 (In Russian).
10. Dzhibilov S.M., Gulueva L.R., Bestaev S.G. Rykhlytel' mezh-duryadiy – okuchnik matochnykh kustov v plodopitomnike [Ripper of row spacing – hiller of parent bushes in the nursery]. *Izvestiya Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2014. Vol. 51. N4. 201-207 (In Russian).
11. Zavalin A.A., Sokolov O.A., Shmyreva N.Ya. Ekologiya azot-fiksatsii [Ecology of nitrogen fixation]. Saratov: Amrit. 2019. 252 (In Russian).
12. Ahalaya B.Kh., Shogenov Yu.Kh., Starovoytov S.I., Tsench Yu.S., Shogenov A.Kh. Trekhseksionnyy pochvoobrabatyvayushchiy agregat s universal'nymi smennymi rabochimi organami [Three-section tillage unit with universal replaceable working bodies]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo*



- agrarnogo universiteta*. 2019. Vol. 14. N3(54). 92-95 (In Russian).
13. Kyul E.V., Apazhev A.K., Kudzaev A.B., Borisova N.A. Influence of anthropogenic activity on transformation of landscapes by natural hazards. *Indian Journal of Ecology*. 2017. N44( 2). 239-243 (In English).
  14. Kudzaev A.B., Urtaev T.A., Tsgoev A.E., Korobeynik I.A. Adaptivnyy energosberegayushchiy kul'tivator [Adaptive energy-saving cultivator for stony soils cultivating]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2019. N2. 8-9 (In Russian).
  15. Kudzaev A.B., Urtaev T.A., Tsgoev A.E., Korobeynik I.A., Tsgoev D.V. Adaptive energy-saving cultivator equipped with the simultaneous adjuster of sections for working stony soils. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2017. N8(11). 714-720 (In English).
  16. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S., Beylis V.M. Sozdanie i razvitiye 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).
  17. Kudzaev A.B., Urtaev T.A., Tsgoev A.E., Korobeynik I.A., Tsgoev D.V. Study of elastic composite rods for creating fus-es of tilters. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2017. N8(11). 658-666 (In English).
  18. Dzhibilov S.M., Soldatov E.D., Gulueva L.R., Soldatova I.E. Sposob resheniya problemy degradatsii gornyykh pastbishch Tsentral'nogo Kavkaza [The way to solve the problem of degradation of mountain pastures of the Central Caucasus]. *Agrarnyy vestnik Urala*. 2020. N6(197). 10-16 (In Russian).
  19. Mironova A.V. Obrabotka zadernelyh i degradirovannyh pochv [Processing of turfed and degraded soils]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N2(35). 57-62 (In Russian).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Заявленный вклад соавторов:

Дзhibilov С.М. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, разработка теоретических предпосылок, формирование общих выводов;  
 Гулуева Л.Р. – написание и доработка текста, литературный анализ, разработка эскизов, обработка результатов исследований, визуализация.  
 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

#### Coauthors' contribution:

Dzhibilov S.M. – scientific guidance, formulation of the research concept, developing the theoretical premises, drawing general conclusions;  
 Gulueva L.R. - preparing and finalizing the manuscript, literature review, development of the diagrams, research results processing, 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

23.01.2023  
 20.02.2023

## Определение упитанности молочных коров для оперативного мониторинга их физиологического состояния

**Дмитрий Юрьевич Павкин**,  
кандидат технических наук,  
заведующий лабораторией,  
e-mail: dimqaqa@mail.ru;  
**Сергей Сергеевич Юрочка**,  
кандидат технических наук,  
младший научный сотрудник,  
e-mail: yurochkasr@gmail.com;

**Александра Александровна Поликанова**,  
магистрант, специалист,  
e-mail: al.polikanova@mail.ru;  
**Игорь Мамедяревич Довлатов**,  
кандидат технических наук,  
научный сотрудник,  
e-mail: dovlatovim@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Отметили наличие проблемы в животноводстве с автоматизированной диагностикой физиологического состояния молочных коров, в том числе заболевания кетозом. Решили выявить возможность ежедневной диагностики физиологического состояния животных автоматическим бесконтактным способом. (*Цель исследования*) Разработать алгоритм комплексной оперативной диагностики физиологического состояния молочных коров по их живой массе и упитанности. (*Материалы и методы*) Натурные данные собирали в 2021-2022 годах на фермах хозяйств «Григорьевское» (Ярославская область), «Истринская сыроварня» и «Совхоз имени Ленина» (Московская область). Использовали коммерческую 3D ToF-камеру (*Time-of-flight*) O3D303, способную рассчитывать и выводить пространство точек (*Point Cloud*) в виде многомерного массива. В программе использовали 144 снимка, 136 из них прошли этап фильтрации, в 6 снимках не обнаружены области интересов, так как изображения имели высокую шумовую нагрузку, не был виден крестец. Исследовали 62 коровы. (*Результаты и обсуждение*) Доказали репрезентативность выборки и результатов: коэффициент корреляции Пирсона равен 0,849, что показывает сильную линейную зависимость между упитанностью и живой массой. Определили, что у 24 процентов коров балл упитанности был меньше нижней границы нормы. Составили алгоритм, помогающий ветеринарам в определение животных, которым нужен дополнительный осмотр. (*Выводы*) Выявили, что разработанный алгоритм помогает оперативно определять нарушения физиологического состояния молочных коров и в автоматическом режиме диагностировать заболевания на ранней стадии, без дополнительных трудозатрат и расходов на проведение анализов.

**Ключевые слова:** молочное животноводство, бонитировка молочного скота, живая масса, бесконтактная оценка упитанности, физиологическое состояние животных, ранняя диагностика заболеваний.

■ **Для цитирования:** Павкин Д.Ю., Юрочка С.С., Поликанова А.А., Довлатов И.М. Определение упитанности молочных коров для оперативного мониторинга их физиологического состояния // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №2. С. 28-34. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-28-34. EDN IBJEGS.

## Determining Body Condition of Dairy Cows for Early Diagnosis of Physiological Diseases

**Dmitriy Yu. Pavkin**,  
Ph.D.(Eng.), head of laboratory,  
e-mail: dimqaqa@mail.ru;  
**Sergey S. Yurochka**,  
Ph.D.(Eng.), junior research engineer,  
e-mail: yurochkasr@gmail.com;

**Aleksandra A. Polikanova**,  
MSc(Eng.), student, specialist,  
e-mail: al.polikanova@mail.ru;  
**Igor M. Dovlatov**,  
Ph.D.(Eng.), research engineer,  
e-mail: dovlatovim@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The paper points out the problem with automated diagnostics of body condition in dairy cattle, including ketosis. The conducted research is aimed at determining the possibility for non-contact automated diagnostics of the cattle physiological state on a daily basis. (*Research purpose*) To develop an algorithm for complex operational diagnostics of the physiological state of



dairy cows by their live weight and body condition. (Materials and methods) Field data were collected in 2021-2022 on the FSUE Grigoryevskoye (Yaroslavl Region), Istra Cheese Factory and Lenin Dairy State Farm (Moscow Region). A commercial 3D ToF (Time-of-Flight) camera O3D303 was used. The 3D camera is capable of calculating and displaying the Point Cloud space as a multidimensional array. The program received 144 images, 136 images passed the filtering stage, 6 images did not detect the areas of interest, because of the high level of image noise, and the sacrum was not detected. 62 cows were subject to research. (*Results and discussion*) The sample and the dependence are proved to be representative as the Pearson correlation coefficient equals  $R=0.849$ , which shows a strong linear relationship between the body condition score and live weight. It was determined that in 24 percent of cases the body condition score is less than the least normal one. An algorithm was developed to help veterinarians to detect the animals that need additional examination. (*Conclusions*) It was found that the developed algorithm helps to quickly detect ketosis in dairy cows and automatically diagnose physiological diseases at an early stage, without additional labor and monetary costs.

**Keywords:** dairy farming, grades of dairy cattle, bonitification, live weight, non-contact assessment of cattle body condition, physiological state of animals, early diagnosis of diseases.

■ **For citation:** Pavkin D.Yu., Yurochka S.S., Polikanova A.A., Dovlatov I.M. Opredelenie upitannosti molochnykh korov dlya operativnogo monitoringa ikh fiziologicheskogo sostoyaniya [Determining body condition of dairy cows for early diagnosis of physiological diseases]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N2. 28-34 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-28-34. EDN IBJEGS.

**В** молочном животноводстве на высокопродуктивных фермах упитанность коров характеризуется средним баллом и ниже, что объясняется не только ошибкой в составлении рациона, но и наследственностью самих животных. Масса тела – умеренно наследуемый признак. Значительная генетически обусловленная зависимость живой массы и ее прироста от физиологического состояния организма позволяет использовать этот признак при оперативном выявлении заболеваний [1-4].

Вследствие высокой нагрузки на высокопродуктивное животное с удоем от 10 тыс. кг молока в год распространены физиологические заболевания, в том числе и кетоз – болезнь, связанная с нарушением нормального обмена веществ [5-6]. Риск развития кетоза у крупного рогатого скота как правило увеличивается за неделю до и после отела [7-8]. Основной причиной возникновения кетоза считается избыточный вес до отела.

С развитием технологий ученые мирового сообщества предлагают различные решения проблемы раннего диагностирования заболеваний у молочных коров, например, взвешивание при помощи весовой панели. Недостаток этого способа – необходимость персонального анализа всех собранных данных, так как отклонения могут обуславливаться генетической наследственностью, а не проявлением каких-либо заболеваний [9]. Еще одно решение – лабораторный способ определения кетоза. У коров брали пробы крови и мочи отправляли их в лабораторию для анализа на содержание кетоновых тел. Среди недостатков – высокая стоимость исследований и продолжительное определение результатов [10].

Ученые из Польши разработали алгоритмы машинного обучения, направленные на вычисление риска развития субклинического кетоза у дойных ко-

ров. В ходе эксперимента выявлена модель логистической регрессии. Таким способом оценивали молоко по признакам: соотношение жира и белка, концентрация ацетона и  $\beta$ -гидроксibuтирата в молоке, содержание лактозы [11]. Однако эта модель не отличается точностью, ее анализ полученных данных нуждается в доработке. Известен также эксперимент, в ходе которого установлено, что малоподвижные коровы с большей вероятностью подвержены или уже болеют кетозом [12].

Для выявления предпосылок к развитию многих заболеваний применяют камеру *Delaval BCS*, оценивающую упитанность коровы [13-14]. Из недостатков можно отметить отсутствие программного алгоритма, который мог бы полностью автоматически вычислять предрасположенность к определенным болезням.

Производство нуждается в технологиях и разработках, позволяющих проводить ежедневную диагностику физиологического состояния молочных коров для оперативного выявления заболеваний с целью сокращения затрат на лечение. Наше исследование направлено на решение этой задачи автоматическим бесконтактным способом, основанным на оптических технологиях. Оптический модуль может быть установлен на входе или выходе в автоматические доильные залы, может быть доукомплектован роботизированным доильным роботом, установленным в сортировочных станках.

**Цель исследования** – разработать алгоритм оперативной диагностики физиологического состояния молочных коров по живой массе и упитанности животных.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Сбор натурных данных проводили в 2021-2022 гг. на фермах хозяйств «Григорьевское» Ярославской области (упитанность живот-

ных 1-3 балла), а также «Истринская сыроварня» и «Совхоз имени Ленина» – Московской (упитанность 2,5-5,0 балла). Все коровы относились к голштинизированной черно-пестрой породе. Использовали доработанный интеллектуальный алгоритм взвешивания коров с помощью бонитировочной весовой платформы [15-16].

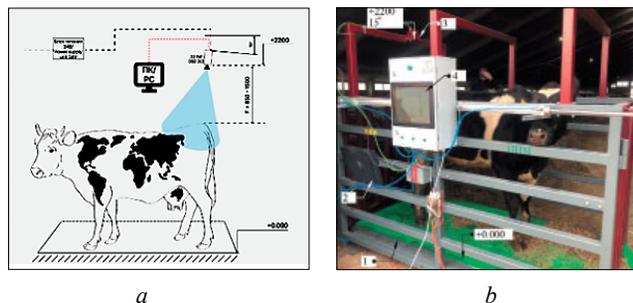


Рис. 1. Сбор натурных данных: а – схема установки оптического модуля; б – место сбора данных; F – фокусное расстояние, на которое настроена камера; 1 – весовая платформа на 4 тензометрических датчиках; 2 – антенна бесконтактной идентификации; 3 – модуль определения упитанности; 4 – программное обеспечение

Fig. 1. Field data collection: a – the diagram of the optical module installation; b – the place of data collection; F – the focal length that the camera is set at; 1 – a weighing platform on 4 strain gauges; 2 – contactless identification antenna; 3 – body condition scoring module; 4 – software for body condition scoring.

Задействовали коммерческую 3D ToF-камеру O3D303, которая способна рассчитывать и выводить пространство точек (Point Cloud) в виде многомерного массива  $I \times J \times K$ , где I и J – разрешение камеры, например,  $352 \times 264$ ; K – координаты XYZ. Формат вывода данных – «.dat», скорость записи видеоизображений – 5 кадров в секунду (рис. 1). Это позволило получить по 4 снимка каждой коровы в исходном изображении.

Трехмерные снимки с 3D ToF-камеры, установленной под углом  $15^\circ$  по отношению к корове, необходимо представить в перпендикулярном виде для уменьшения количества возможных возникающих ошибок. Для этого проводится нормализация угла, где R – матрица пикселей трехмерной карты, причем каждый пиксел содержит координаты по XYZ:

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ \sin(\alpha)\sin(\beta) & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha)\cos(\beta) \\ -\cos(\alpha)\sin(\beta) & \sin(\alpha) & \cos(\alpha)\cos(\beta) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Для нормализации изображения по осям XYZ с помощью матрицы, ее необходимо «перевернуть» с помощью выражения:

$$XYZ_{ROT} = XYZ \cdot R. \quad (2)$$

Тогда полученные координаты искомого объекта равны:

$$XYZ = XYZ_{ROT} \cdot R^{-1}. \quad (3)$$

Трехмерные данные, выходящие из подготовленной матрицы трехмерных карт, поступают в дальнейшую обработку по поиску точек интересов на спине и крестце коровы (рис. 2).

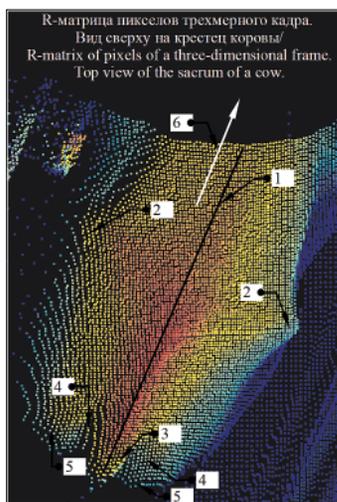


Рис. 2. Крестец коровы в виде трехмерной матрицы пикселей: 1 – определение линии позвоночника для построения регрессии; 2 – область интересов – маклоки; 3-5 – область интереса – корень хвоста; 6 – направление движения коровы

Fig. 2. A cow's sacrum rendered as a 3D matrix of pixels: 1 – determining the spine line to build a regression; 2 – area of interest – hump bones; 3, 4 – area of interest – tailhead ligament; 5 – area of interest – tailhead ligament; 6 – the cow movement direction

Так как камеру устанавливали сверху над животным и к анализу данных была представлена поверхность крестца коровы, наибольший интерес представляют те точки, которые находятся возле контура и описывают периметр. Область точек, закрашенная желтым цветом, представляет собой вектор данных:  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ ;  $y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$  (рис. 2).

Разработанный алгоритм основан на методе наименьших квадратов. Зависимость двух переменных в аналитическом виде представляет собой квадратное уравнение вида  $y(x) = ax^2 + bx + c$ , где неизвестные параметры a, b и c определяются из системы уравнений:

$$\begin{cases} a\sum x_i^4 + b\sum x_i^3 + c\sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i, \\ a\sum x_i^3 + b\sum x_i^2 + c\sum x_i = \sum x_i y_i, \\ a\sum x_i^2 + b\sum x_i + cn = \sum y_i, \end{cases} \quad (4)$$

где  $x_i, y_i$  – координаты рассматриваемых точек вдоль осей абсцисс и ординат, m;

n – количество рассматриваемых точек в облаке интереса, шт.

Решение системы уравнений (4) позволит определить искомые параметры функции регрессии, которая в рассматриваемом случае изображена черной линией (рис. 2). Исходя из вышесказанного и из свойств квадратичных функций координата вершины функ-

ции регрессии равна:

$$(x|m, y_m) = \left( \frac{-b}{2a} \left[ a \left( \frac{-b}{2a} \right)^2 + b \left( \frac{-b}{2a} \right) + c \right] \right). \quad (5)$$

Угол наклона касательной  $\alpha$  к рассматриваемой функции определяет закругленность рассматриваемого участка периметра коровы и рассчитывается по следующей формуле:

$$y'(x) = 0 \rightarrow tg(\alpha) = k = y'(x_0), \quad (6)$$

$$\alpha = arctg(y'(x_0)),$$

где  $x_0$  – корень производной функции регрессии;  
 $\alpha$  – угол наклона касательной к функции регрессии.

Сбор данных проводили с помощью программного обеспечения [17]. Оно позволяет оценивать упитанность животного, высоту в холке, живую массу, глубину туловища, распознавать идентификационный номер, содержит зоотехнические данные, включая дату отела (рис. 3).

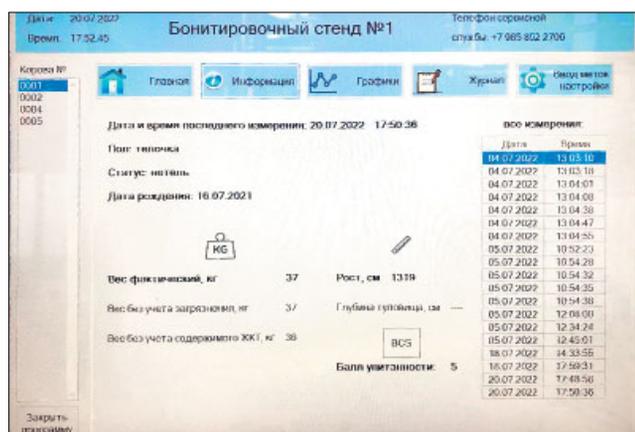


Рис. 3. Программное обеспечение для сбора бонитировочных данных

Fig. 3. Grading data collection software

В программу поступили 144 снимка, из них 136 прошли этап фильтрации. В 6 снимках не выявлены области интересов, так как изображения имели высокую шумовую нагрузку, а также не был обнаружен крестец. Всего были исследованы 62 коровы на 5-6-ом месяце лактации. Выборка коров 5-6-го месяца лактации обосновывается недостаточным количеством проведенных ранее исследований на этапе поздней лактации, заинтересованностью хозяйства, а также для увеличения объема знаний в области диагностики заболеваний. Каждому животному алгоритм присваивал балл упитанности, который сравнивался с экспертной оценкой. Эксперты подбирались по месту сбора данных – среди сотрудников ферм, имеющих соответствующую квалификацию.

Данные о живой массе на фермах «Григорьевского» и «Истринской сыроварни» получили косвенным методом Клювер-Штрауха – с помощью проме-

ров. Его недостаток – погрешность до 10%. Дополнительно минусовали 1% на навал (налипшую грязь) и скидку 3% на содержимое желудочно-шишечного тракта [18]. При взвешивании животных на весовой системе расчет живой массы с учетом скидки происходил автоматически.

Доказательство репрезентативности выборки животных, взаимосвязь между баллом упитанности и живой массой животных подтверждены в ходе использования программного пакета Excel и вычисления коэффициента корреляции Пирсона.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** По результатам обработки натуральных данных составили диаграмму, отображающую зависимость между упитанностью (по 5-балльной шкале) и живой массой (рис. 4).

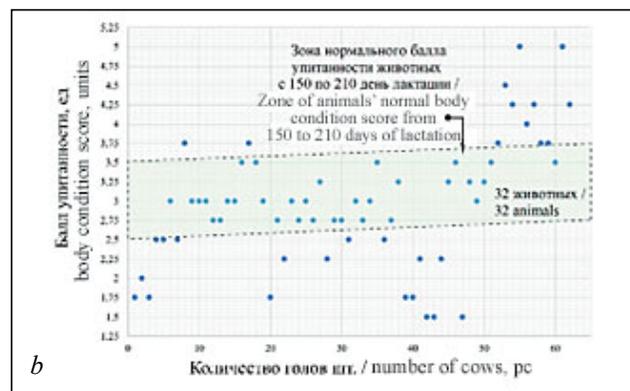
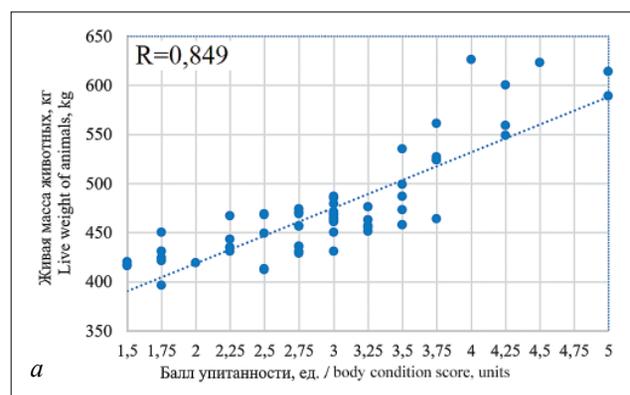


Рис. 4. Живая масса и упитанность: а – корреляционная зависимость; б – распределение животных по баллу упитанности (150-210 дней лактации)

Fig. 4. Live weight and body condition score: а – correlation dependence; б – grouping animals according to the body condition score (150-210 days of lactation)

Коэффициент корреляции между этими признаками равен  $R = 0,849$ . Это соответствует сильной линейной зависимости [17]. Из 62 голов 32 находятся в нормальном здоровом физиологическом состоянии.

На фермах основное количество животных имело нормальный балл упитанности на момент 150-210-го дня лактации, что достигалось корректным содержанием, хорошо подобранным рационом и ветеринар-

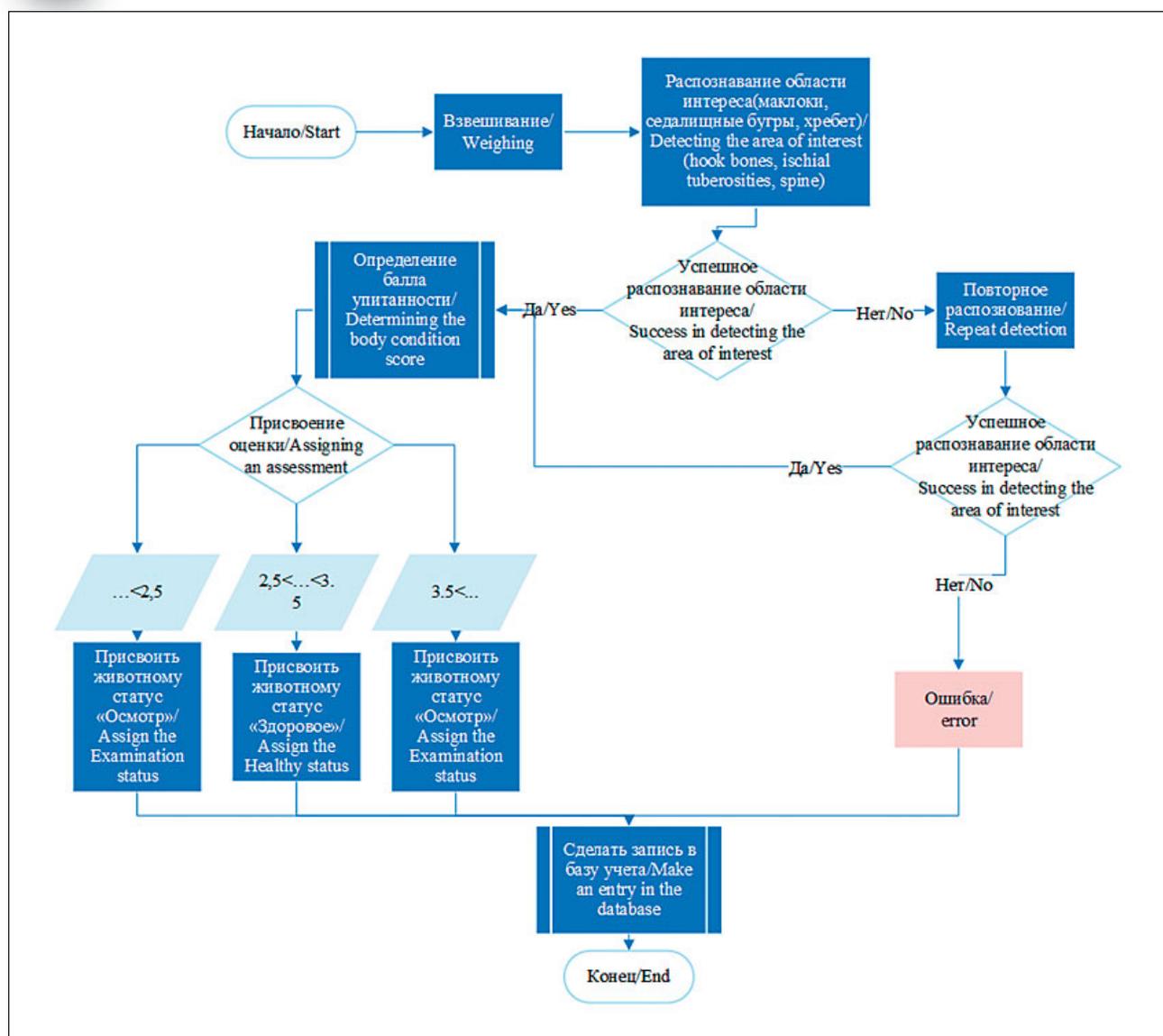


Рис. 5. Алгоритм оперативного определения физиологического состояния молочных коров по их упитанности  
 Fig. 5. Algorithm for early diagnosis of dairy cows' physiological state by determining their body condition

ным обслуживанием. У 24% коров балл упитанности меньше нижней границы нормы. Вопрос требует дальнейшего изучения, которое будет проведено в ближайшее время.

Алгоритм оперативного определения физиологического состояния коров работает на основании принципа присвоения животному двух статусов, которые говорят либо о его соответствии нормам упитанности (балл упитанности должен находиться в промежутке от 2,5 до 3,5) – статус «Здоровое», либо об отклонении от нормы (балл упитанности менее 2,5 или выше 3,5) – статус «Осмотр» (рис. 5).

При этом после каждого взвешивания данные записываются в базу учета. Ветеринар при плановом визите может получить всю необходимую информацию для осмотра того или иного животного.

Важность этого алгоритма заключается в систематизации полученных данных и их передаче специ-

алистам для дальнейшего изучения.

**Выводы.** Установили положительную корреляцию между упитанностью и живой массой молочных коров ( $R=0,849$ ).

Разработали алгоритм оперативного определения физиологического состояния, помогающий ветеринарам в выявлении животных, которым нужен дополнительный осмотр.

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



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Delić B., Belić B., Cincović M.R., Djokovic R., Lakić I. Metabolic adaptation in first week after calving and early prediction of ketosis type I and II in dairy cows. *Large Animal Review*. 2020. N26. 51-55.
2. Hubner A., Canisso I.F., Peixoto P.M., et al. Characterization of metabolic profile, health, milk production, and reproductive outcomes of dairy cows diagnosed with concurrent hyperketonemia and hypoglycemia. *Journal of Dairy Science*. 2022. Vol. 105. N11. 9054-9069
3. Puppel K., Kuczyńska B. Metabolic profiles of cow's blood; a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2016. N96. 4321-4328.
4. Wang Y., Huo P., Sun Y., Zhang Y. Effects of Body Condition Score Changes During Peripartum on the Postpartum Health and Production Performance of Primiparous Dairy Cows. *Animals*. 2019. N9. 1159.
5. Пустовая А.О., Секерин И.Ю., Кутевалов А.А. и др. Кетоз у коров // *Вестник научно-технического творчества молодежи Кубанского ГАУ*. 2016. Т. 4. N1. С. 198-200.
6. Эленшлегер А., Требухов А., Казакова О. Особенности кетогенеза у больных субклиническим кетозом коров до и после отела // *Ветеринария сельскохозяйственных животных*. 2016. N6. С. 27-30.
7. Deniz A., Aksoy K., Metin M. Transition period and subclinical ketosis in dairy cattle: association with milk production, metabolic and reproductive disorders and economic aspects. *Medycyna Weterynaryjna*. 2020. N76(09). 495-502.
8. Faruk M.S., Park B., Ha S., et al. Comparative study on different field tests of ketosis using blood, milk, and urine in dairy cattle. *Veterinarni medicina*. 2020. N65. 199-206.
9. Frigo E., Dechow C.D., Pedron O., Cassell B.G. The genetic relationship of body weight and early-lactation health disorders in two experimental herds. *Journal of Dairy Science*. 2010. N93(3). 1184-1192.
10. Staničkov N., Cincović M., Djoković R., et al. Ketosis in Dairy Cows during Early Lactation – Detection in Pooled Blood Serum Samples. *Acta Scientiae Veterinariae*. 2022. N50. 1866. 1-8.
11. Satola A., Bauer E.A. Predicting Subclinical Ketosis in Dairy Cows Using Machine Learning Techniques. *Animals*. 2021. N11. 2131.
12. Najm N.-A., Zimmermann L., Dietrich O., Rieger A., Martin R., Zerbe H. Associations between motion activity, ketosis risk and estrus behavior in dairy cattle. *Preventive Veterinary Medicine*. 2019. 104857.
13. Albornoz R.I., Giri K., Hannah M.C., Wales W.J. An Improved Approach to Automated Measurement of Body Condition Score in Dairy Cows Using a Three-Dimensional Camera System. *Animals*. 2022. N12. 72.
14. Li S., Wei X., Song J., Zhang C., Zhang Y., Sun Y. Evaluation of Statistical Process Control Techniques in Monitoring Weekly Body Condition Scores as an Early Warning System for Predicting Subclinical Ketosis in Dry Cows. *Animals*. 2021. N11. 3224.
15. Павкин Д.Ю., Юрочка С.С., Хакимов А.Р., Довлатов И.М. Разработка интеллектуального алгоритма взвешивания дойных коров // *Агротехника и энергообеспечение*. 2022. N3(36). С. 44-51.
16. Павкин Д.Ю., Юрочка С.С., Хакимов А.Р., Довлатов И.М. Разработка интеллектуальной весовой платформы для проведения бонитировочных работ // *Агротехника и энергообеспечение*. 2022. N3(36). С. 52-58.
17. Павкин Д.Ю., Юрочка С.С., Шилин Д.В., Рузин С.С. Бесконтактная оценка упитанности молочных коров с использованием ToF-технологии // *Агроинженерия*. 2021. N2(102). С. 39-44.
18. Яремчук В.П. Некоторые вопросы сдачи-приемки живого скота // *Мясные технологии*. 2010. N2(86). С. 34-38.
19. Романов И.О., Стрельцов А.С. Функционально математическое определение показателей надежности и установление зависимости комплексного показателя от единичных на стадиях изготовления и восстановления деталей, определяющих безотказность машины // *Надежность*. 2018. Т. 18. N2. 10-16.

## REFERENCES

1. Delić B., Belić B., Cincović M.R., Djokovic R., Lakić I. Metabolic adaptation in first week after calving and early prediction of ketosis type I and II in dairy cows. *Large Animal Review*. 2020. N26. 51-55 (In English).
2. Hubner A., Canisso I.F., Peixoto P.M., et al. Characterization of metabolic profile, health, milk production, and reproductive outcomes of dairy cows diagnosed with concurrent hyperketonemia and hypoglycemia. *Journal of Dairy Science*. 2022. Vol. 105. N11. 9054-9069 (In English).
3. Puppel K., Kuczyńska B. Metabolic profiles of cow's blood; a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2016. N96. 4321-4328 (In English).
4. Wang Y., Huo P., Sun Y., Zhang Y. Effects of Body Condition Score Changes During Peripartum on the Postpartum Health and Production Performance of Primiparous Dairy Cows. *Animals*. 2019. N9. 1159 (In English).
5. Pustovaya A.O., Sekerin I.Yu., Kutsevalov A.A., et al. Kетоз у коров [Ketosis in cows]. *Vestnik nauchno-tehnicheskogo tvorchestva molodezhi Kubanskogo GAU*. 2016. Vol. 4. N1. 198-200 (In Russian).
6. Elenschleger A., Trebukhov A., Kazakova O. Osobennosti kетогенеза u bol'nykh subklinicheskim kетозом коров do i после отела [The features of ketogenesis in cows with subclinical ketosis before and after calving]. *Veterinariya sel'skokhozyaystvennykh zhivotnykh*. 2016. N6. 27-30 (In Russian).
7. Deniz A., Aksoy K., Metin M. Transition period and subclinical ketosis in dairy cattle: association with milk production, metabolic and reproductive disorders and economic as-

- pects. *Medycyna Weterynaryjna*. 2020. N76(09). 495-502 (In English).
8. Faruk M.S., Park B., Ha S., et al. Comparative study on different field tests of ketosis using blood, milk, and urine in dairy cattle. *Veterinární medicína*. 2020. N65. 199-206 (In English).
  9. Frigo E., Dechow C.D., Pedron O., Cassell B.G. The genetic relationship of body weight and early-lactation health disorders in two experimental herds. *Journal of Dairy Science*. 2010. N93(3). 1184-1192 (In English).
  10. Staničkov N., Cincović M., Djoković R., et al. Ketosis in Dairy Cows during Early Lactation – Detection in Pooled Blood Serum Samples. *Acta Scientiae Veterinariae*. 2022. N50. 1866. 1-8 (In English).
  11. Satoła A., Bauer E.A. Predicting Subclinical Ketosis in Dairy Cows Using Machine Learning Techniques. *Animals*. 2021. N11. 2131 (In English).
  12. Najm N.-A., Zimmermann L., Dietrich O., Rieger A., Martin R., Zerbe H. Associations between motion activity, ketosis risk and estrus behavior in dairy cattle. *Preventive Veterinary Medicine*. 2019. 104857 (In English).
  13. Albornoz R.I., Giri K., Hannah M.C., Wales W.J. An Improved Approach to Automated Measurement of Body Condition Score in Dairy Cows Using a Three-Dimensional Camera System. *Animals*. 2022. N12. 72 (In English).
  14. Li S., Wei X., Song J., Zhang C., Zhang Y., Sun Y. Evaluation of Statistical Process Control Techniques in Monitoring Weekly Body Condition Scores as an Early Warning System for Predicting Subclinical Ketosis in Dry Cows. *Animals*. 2021. N11. 3224 (In English).
  15. Pavkin D.Yu., Yurochka S.S., Khakimov A.R., Dovlatov I.M. Razrabotka intellektual'nogo algoritma vzveshivaniya doynnykh korov [Development of an intelligent algorithm for weighing dairy cows]. *Agrotehnika i energoobespechenie*. 2022. N3(36). 44-51 (In Russian).
  16. Pavkin D.Yu., Yurochka S.S., Khakimov A.R., Dovlatov I.M. Razrabotka intellektual'noy vesovoy platformy dlya provedeniya bonitirovochnykh rabot [Development of an intelligent weighing platform for appraisal work]. *Agrotehnika i energoobespechenie*. 2022. N3(36). 52-58 (In Russian).
  17. Pavkin D.Yu., Yurochka S.S., Shilin D.V., Ruzin S.S. Beskontaktnaya otsenka upitannosti molochnykh korov s ispol'zovaniem ToF-tehnologii [Non-contact body condition score of dairy cows based on TOF-technology]. *Agroinzheneriya*. 2021. N2(102). 39-44 (In Russian).
  18. Yaremchuk V.P. Nekotorye voprosy sdachi-priemki zhivogo skota [Some issues of live cattle delivery and acceptance]. *Myasnye tekhnologii*. 2010. N2(86). 34-38 (In Russian).
  19. Romanov I.O., Strel'tsov A.S. Funktsional'no matematicheskoe opredelenie pokazateley nadezhnosti i ustanovlenie zavisimosti kompleksnogo pokazatelya ot edinchnykh na stadiyakh izgotovleniya i vosstanovleniya detaley, opredelyayushchikh bezotkaznost' mashiny [Functional mathematical definition of dependability indicators and establishment of the dependency between the integrated indicator and the unique indicators at the stage of manufacture and recovery of components that define the reliability of a machine]. *Nadezhnost'*. 2018. Vol. 18. N2. 10-16 (In Russian).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Заявленный вклад соавторов:

Павкин Д.Ю. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования;  
 Юрочка С.С. – литературный анализ, обработка результатов исследования, формирование текста и общих выводов;  
 Поликанова А.А. – обработка результатов исследования, доработка текста и общих выводов, верстка и формирование работы;  
 Довлатов И.М. – проведение исследования работы СНС, доработка текста, визуализация, формирование массива данных.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Coauthors' contribution:

Pavkin D.Yu. – scientific guidance, formulation of the research main concepts;  
 Yurochka S.S. – literature review, research results processing, text formation and formulating general conclusions;  
 Polikanova A.A. – research results processing, finalizing the text and general conclusions, paper layout and formation;  
 Dovlatov I.M. – analysis of the System of National Accounts (SNA), text finalizing and visualization, data array formation.  
*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

15.11.2022  
 27.01.2023

## Сравнение внутрирубцовых систем мониторинга физиологического состояния крупного рогатого скота

**Федор Евгеньевич Владимиров**,  
научный сотрудник,  
e-mail: fvladimirov21@gmail.com;

**Савр Олегович Базаев**,  
кандидат сельскохозяйственных наук,  
научный сотрудник, e-mail: sbazaeff@yandex.ru;

**Артем Рустамович Хакимов**,  
младший научный сотрудник,  
e-mail: arty.hv@gmail.com

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Отметим, что для раннего выявления подострого ацидоза рубца может использоваться метод, основанный на постоянном контроле за уровнем кислотности рубцового содержимого с помощью беспроводных датчиков *pH*. Основными требованиями к таким устройствам являются надежная работа и точность измерения. (*Цель исследования*) Определить функциональность и точность датчиков *eBolus* (США) и *BoviSan* (Россия, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) в течение заявленного срока службы 150 дней. (*Материалы и методы*) Трём дойным коровам с фистулой рубца на 154 дня вводили по два болюса от каждого производителя. В первый день измерений болюсы после активации и калибровки выдерживали последовательно в буферных растворах с *pH* 4 и *pH* 7 при регулируемой температуре (39 градусов Цельсия) не менее 2 часов. Через каждые 14 дней болюсы извлекались из рубца и повторно тестировались в буферных растворах. (*Результаты и обсуждение*) Средний срок службы *eBolus* составил 82 дня (от 28 до 126 дней). В сравнении с ними болюсы *BoviSan* регистрировали *pH* в течение всего заявленного срока службы. Доверительный интервал 95% средней разницы *pH* для болюсов *eBolus* (от -0,02 до 0,19) не показал систематической ошибки. У *BoviSan* доверительный интервал средней разницы предполагает систематическое отрицательное смещение *pH* (от -0,33 до -0,25). (*Выводы*) Для реального использования болюсы *eBolus* должны работать более надежно, а болюсы *BoviSan* должны обеспечивать более высокую точность измерения.

**Ключевые слова:** коровы, содержимое рубца, датчик *pH*, болюсы, *eBolus*, *BoviSan*.

**■ Для цитирования:** Владимиров Ф.Е., Базаев С.О., Хакимов А.Р. Сравнение внутрирубцовых систем мониторинга физиологического состояния крупного рогатого скота // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N2 . С. 35-39. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-35-39. EDN PAYILH.

## Comparison of In-Rumen Systems for Monitoring the Physiological State of Cattle

**Fedor E. Vladimirov**,  
researcher, e-mail: fvladimirov21@gmail.com;

**Savr O. Bazaev**,  
Ph.D.(Eng.), researcher, e-mail: sbazaeff@yandex.ru;

**Artem R. Khakimov**,  
junior researcher, e-mail: arty.hv@gmail.com

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** This paper explores a method for the early detection of subacute rumen acidosis through continuous monitoring of rumen content acidity using wireless *pH* sensors. The study emphasizes the importance of reliable device operation and measurement accuracy as primary requirements for such devices. (*Research purpose*) This study aims to evaluate the functionality and accuracy of the *eBolus* (USA) and *BoviSan* (Russia, FSBSI FSAC VIM) sensors throughout their declared service life of 150 days. (*Materials and methods*) Three dairy cows with a rumen fistula were administered two boluses from each manufacturer during a period of 154 days. In order to ensure accurate measurements, the boluses were activated and calibrated prior to use. On the first day of data collection, the activated and calibrated boluses were sequentially immersed in buffer solutions with a *pH* of 4 and *pH* of 7. The buffer solutions were maintained at a controlled temperature of 39 degrees Celsius for a minimum of 2 hours. At 14-day intervals, the boluses were extracted from the rumen and subjected to retesting in buffer solutions. (*Results and discussion*) For *BoviSan*, the confidence interval for the mean difference suggests a systematic negative *pH* bias (-0.33 to -0.25). The average lifespan of the *eBolus* was determined to be 82 days, with a range of 28 to 126 days. In contrast, *BoviSan* boluses consistently recorded *pH* levels throughout their announced lifespan. Statistical analysis of the data revealed a 95% confidence interval for the mean *pH*

difference of the eBolus boluses ( $-0.02$  to  $0.19$ ), indicating no significant bias. Conversely, the confidence interval for the mean difference in pH for BoviSan suggested a consistent negative bias ( $-0.33$  to  $-0.25$ ). (*Conclusions*) In practical applications, it is essential to ensure enhanced reliability of eBolus boluses, while prioritizing higher measurement accuracy with BoviSan boluses.

**Keywords:** cows, rumen contents, pH sensor, boluses, eBolus, BoviSan.

**For citation:** Vladimirov F.E., Bazaev S.O., Khakimov A.R. Svravnenie vnutrirubtsovykh sistem monitoringa fiziologicheskogo sostoyaniya krupnogo rogatogo skota [Comparison of in-rumen systems for monitoring the physiological state of cattle]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N2. 35-39 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-35-39. EDN PAYILH.

Применение богатых злаками кормовых рационов с высоким содержанием углеводов может привести к ухудшению состояния желудочно-кишечного тракта коров и развитию подострого ацидоза рубца (ПАР) [1, 2]. Закисление содержимого рубца происходит в результате сдвига реакции среды в область низких значений показателя pH. Ацидоз может вызвать даже легкоусвояемый плевел. Как показали измерения pH рубца, ацидоз возникает преимущественно на выпасе молочного стада [3, 4]. В результате нарушается усвояемость питательных веществ, изменяется нормофлора желудочно-кишечного тракта, снижаются его абсорбционные и барьерные функции [1]. ПАР может спровоцировать развитие других патологий, в том числе влияющих на репродуктивные функции животного [5, 6]. Поскольку признаки ПАР малозаметны и часто проявляются не сразу после провоцирующего события, его диагностика затруднена [7]. Для подтверждения ацидоза помимо клинического осмотра животных требуется проанализировать данные в программе управления стадом и проверить качество корма. На pH рубца также оказывает влияние время суток и время года [8].

Диагноз, основанный только на показателе pH содержимого рубца, неточен [4]. Тем не менее, непрерывный мониторинг кислотности может способствовать обнаружению ПАР и позволит на ранних стадиях выявлять ацидоз у животных из группы риска и своевременно адаптировать кормовой рацион и/или систему управления кормлением [9].

Беспроводные датчики pH могут служить полезным инструментом для выявления ПАР при условии их надежной работы и точности измерений за определенный период. Для проверки заявленных производителем характеристик датчиков pH в течение декларируемого срока службы 150 дней проведены испытания на базе фермы ООО «Бородулинское» (Свердловская область).

**Цель исследования** – оценить и сравнить качество работы беспроводных датчиков pH содержимого рубца eBolus (США) и BoviSan (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Россия).

**Материалы и методы.** Экспериментальные процедуры были одобрены Этическим советом ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. Для оценки использовались по шесть новых болусов eBolus и BoviSan. Были выбраны три

фистулированные коровы голштинской породы 3-й и 4-й лактации со средней живой массой  $718 \pm 29,9$  кг. В среднем коровы производили  $27,2 \pm 4,2$  кг молока в сутки. В рубцовом отделе желудка коров в течение 154 дней с февраля по июль 2022 года были установлены по два болуса eBolus и BoviSan. Животные содержались в помещении без привязи, в начале исследования они получали кормовую смесь, состоящую из травяного силоса, кукурузного силоса и сена, а с мая коров частично выводили на пастбища. Кормовой рацион дополнялся концентратами для покрытия расчетной потребности лактирующих коров в питательных веществах.

В первый день исследования болусы после активации и калибровки в соответствии с инструкциями производителей помещали в буферный раствор с контролируемой температурой и pH 4 не менее чем на 2 часа. Эту процедуру повторяли с буферным раствором pH 7. Затем болусы устанавливали в удерживающее устройство, прикрепленное шнуром к пробке фистулы, и вводили животным в рубец. Перед каждым выдерживанием в буферных растворах болусы тщательно промывали деминерализованной водой. Проверку болусов в буферных растворах pH 4 и 7 повторяли через 14 дней. До и после контрольного тестирования буферность растворов определяли pH-метром HI98128 (Hanna Instruments Inc., Smithfield, США, погрешность 0,01), выдерживая их в водяной бане. Средняя температура буферных растворов, измеренная с помощью болусов BoviSan, составила  $(39 \pm 1,2)$  °C. Во время контрольных измерений особое внимание уделялось хранению в жидкости извлеченных из рубца болусов при 39°C во избежание их высыхания.

Для статистического анализа разницы pH между измерениями болусов и буферными растворами использовалось программное обеспечение R Project [10]. Графики Бланда-Альтмана, критерий согласия Пирсона и 95% доверительный интервал (ДИ) среднего значения были построены на основе исследования Джавариной [11]. С целью более глубокой оценки данных BoviSan применялась линейная смешанная модель (R-пакет «lmerTest») [12]. Фиксированными факторами линейной смешанной модели были буферный раствор (pH 4 и 7) и даты испытаний. Всего проведено 11 испытаний, поскольку после 150 дней опыта измерение pH болусов BoviSan автоматически прекра-



шалось. Индивидуальные болюсы использовались как случайный фактор линейной смешанной модели.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Схема эксперимента была выбрана таким образом, чтобы болюсы находились в рубце в течение установленного срока службы и сравнительные измерения *pH* проводились с периодичностью один раз в две недели в стандартных условиях. Один из производителей испытуемых болюсов поставил под сомнение данный подход, но в исследованиях Шнейдера и др. (2010) при такой же схеме и значительно меньшей продолжительности измерения коэффициент корреляции между *pH* буферных растворов и показаниями датчика составил 0,998 [13]. Отметим, что в последующие годы устройства могли быть усовершенствованы, но тем не менее технические характеристики все равно необходимо подтверждать, особенно с учетом проблем при измерении *pH* без регулярной повторной калибровки датчиков.

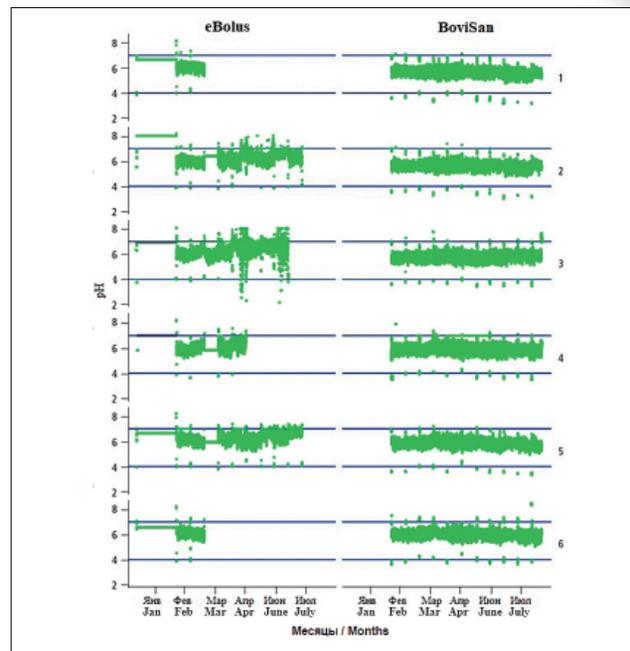
Средний срок службы шести болюсов *eBolus* за период эксперимента составил 82 дня, хотя два болюса проработали только 24 дня. Датчики *eBolus* были установлены в рубец в уже запущенном с середины января состоянии, а должны были оставаться в спящем режиме при температуре ниже 32°C и храниться при комнатной температуре до активации 22 февраля. Как видно из *рисунка 1*, они записывали данные раньше предусмотренного срока. Предположительно это происходило из-за ложных показаний температуры, которая все время до активации превышала 32°C.

Показания *eBolus* оператор считывал вручную специальным устройством. Всего отсутствовало 48% возможных измерений. В исследовании Меншинга и др. (2020) эти датчики работали более надежно, чем в нашем эксперименте. Тем не менее, у трех из 13 болюсов *eBolus* наблюдались значительные отклонения измерений *pH* примерно через 80 дней, и 14% (109 из 786 дней) среднесуточных значений были классифицированы как отклонение [14].

Напротив, все болюсы *BoviSan* регистрировали *pH* ровно 150 дней после начала эксперимента. Данные считывались автоматически через стационарную базовую станцию, установленную рядом с доильным залом.

Для буферных растворов различие между средними значениями *pH* эталонных измерений и показаниями *eBolus* или *BoviSan* составило соответственно 0,09 (±0,48) или -0,29 (±0,22). При этом доверительный интервал 95% средней разницы *pH* у *eBolus* (от -0,02 до 0,19) не указывал на систематическую ошибку. В случае датчиков *BoviSan* доверительный интервал средней разницы *pH* (от -0,33 до -0,25) предполагает систематическую отрицательную погрешность.

На *рисунке 2* изображены графики Бланда-Альтмана при испытаниях *eBolus* и *BoviSan* в буферных растворах. Существенные отклонения измерений датчиков *eBolus* привели к огромному диапазону совпадений, который был больше при тестировании буфер-



*Рис. 1.* Измерения *pH* с болюсами *eBolus* и *BoviSan*. Синие линии соответствуют заявленным значениям *pH* буферных растворов, используемых во время искусственного понижения кислотности, цифры в правой части рисунка обозначают номера болюсов

*Fig. 1.* *pH* measurements with *eBolus* and *BoviSan* boluses. Blue lines correspond to the declared *pH* values of the buffers used during provocations, and the numbers on the right of the figure correspond to bolus numbers

ным раствором *pH* 4, чем с *pH* 7. Диапазон совпадения болюсов *BoviSan* оказался меньше, но доверительный интервал средних различий указывает на систематическую недооценку значений *pH*.

В последующих исследованиях использовались только датчики *BoviSan*, поскольку слишком много измерений *eBolus* отсутствовали. На *рисунке 3* показаны среднее значение и стандартное отклонение различий между измерениями *pH* болюсов *BoviSan* и эталонным методом измерения *pH* буферных растворов в дни проведения тестов.

Точность измерения, указанная производителем (*BoviSan*, 2021), соблюдалась не для каждого болюса в течение всего периода испытаний. При тестировании буферным раствором *pH* 7, что ближе к оптимальному диапазону кислотности содержимого рубца, отклонения кажутся меньшими, чем при *pH* 4. Тем не менее, производитель указывает диапазон измерения *pH* от 3 до 9. Время нахождения болюса в буферном растворе негативно повлияло на точность, приведя к значительным различиям *pH* между эталонным методом и данными *BoviSan*, что демонстрирует важность калибровки каждого устройства перед введением болюса в рубец. Напротив, Шнейдер и др. обнаружили чрезвычайно высокий коэффициент корреляции ( $r = 0,998$ ) между *pH* буферных растворов и показаниями датчи-

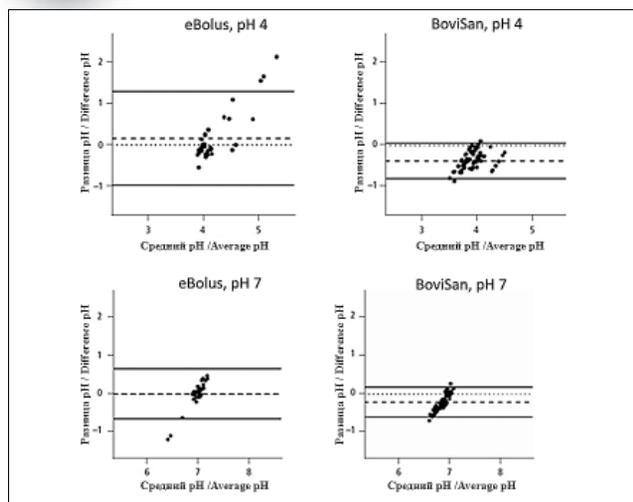


Рис. 2. Графики Бланда-Альтмана для болюсов eBolus и BoviSan при pH буферного раствора 4 и 7. Сплошные линии – нижний и верхний пределы совпадения, пунктирные линии – среднее значение различий pH

Fig. 2. Bland-Altman plots comparing ebolus and bovisan boluses with buffer pH4 and pH7. The solid lines indicate the lower and upper limits of agreement, and the dotted lines show the average value of the pH differences

ков до и после нахождения в рубце фистулированных животных [13]. В отличие от нашего исследования, болюсы калибровались после каждого использования и при необходимости обслуживались специалистом.

**Выводы.** Определено, что болюсы BoviSan более надежные, чем eBolus, у которых при испытаниях прерывалась связь. Точность измерения датчиков eBolus также выше, чем BoviSan. Для использования исследованных болюсов на животноводческих предприятиях их функциональность, качество показаний и измерений,

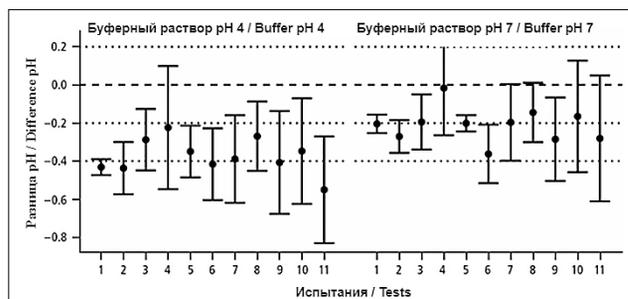


Рис. 3. Среднее значение и стандартное отклонение разницы между измерениями pH болюсов BoviSan (n=6) и эталонным методом измерения pH буферных растворов во время тестов. На оси x: 1 – контроль (1-й день опыта); 2 – провокация (искусственное снижение кислотности на 15-й день); ...; 11 – провокация на 141-й день. Пунктирными линиями отмечена точность измерения, указанная производителем:  $\pm 0,2$  до 90 дней и  $\pm 0,4$  от 90 до 150 дней

Fig. 3. Mean and standard deviation of pH differences between BoviSan boluses (n=6) and the reference method for buffer solution measurements during two-week tests. On x-axis: 1 – control on the 1st day; 2 – challenge on 15th day; ...; 11 – challenge on the 141st day. Dotted lines represent manufacturer-specified measurement accuracy:  $\pm 0.2$  up to 90 days and  $\pm 0.4$  from 90 to 150 days

надежность работы необходимо повысить, усовершенствовать алгоритмы работы устройств, использовать усиленную антенну для лучшей передачи сигнала, а также дополнить конструкцию защитным кожухом, который будет не только защищать внутренние элементы, но и направлять радиоволны в нужном направлении (усиливать сигнал). Болюсы должны не только работать надежнее и дольше 150 дней, заявленных производителями, но и стать доступнее по цене, чтобы их широкое применение на фермах было целесообразным.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Plaizier J.C., Danesh M.M., Derakhshani H., Golder H., Khafipour E., Kleen J.L., Lean I., Looor J., Penner G., Zebeli Q. Review: Enhancing gastrointestinal health in dairy cows. *Animal*. 2012. Vol. 12(2). 399-418.
2. Владимиров Ф.Е., Базаев С.О., Павкин Д.Ю., Юрочка С.С. Разработка методов и средств зоотехнического контроля в скотоводстве для управления физиологическим состоянием стада // *Главный зоотехник*. 2023. N1(234). С. 32-46.
3. Sato S., Ikeda A., Tsuchiya Y., Ikuta K., Murayama I., Kanehira M., Okada K., Mizuguchi H. Diagnosis of subacute ruminal acidosis (SARA) by continuous reticular pH measurements in cows. *Veterinary Research Communications*. 2012. Vol. 36. 201-205.
4. Enemark J.M.D. The monitoring, prevention and treatment of subacute ruminal acidosis (SARA): A review. *Veterinary Journal*. 2008. Vol. 176. 32-43.
5. O'Grady L., Doherty M.L., Mulligan F.J. Subacute ruminal acidosis (SARA) in grazing Irish dairy cows. *Veterinary Journal*. 2008. Vol. 176. 44-49.
6. Дорохов А.С., Кирсанов В.В., Владимиров Ф.Е. Температура и уровень pH рубца КРС как показатели вероятности репродуктивного успеха // *Вестник НГИЭИ*. 2019. № 6(97). С. 117-126.
7. Falk M., Münger A., Dohme-Meier F. Technical note: A comparison of reticular and ruminal pH monitored continuously with 2 measurement systems at different weeks in early lactation. *Journal of Dairy Science*. 2016. Vol. 99. 1951-1955.
8. Владимиров Ф.Е., Базаев С.О. Влияние времени суток и сезона года на температуру и pH содержимого рубца у крупного рогатого скота // *Главный зоотехник*. 2022. N12(233). С. 28-38.
9. Sato S., Kimura A., Anan T., Yamagishi N., Okada K., Mizuguchi H., Ito K. A radio transmission pH measurement system for continuous evaluation of fluid pH in the rumen of cows. *Veterinary Research Communications*. 2012. Vol. 36. 85-89.
10. R Core Team. (2021 April 13). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.



11. Giavarina D. Understanding Bland Altman analysis. *Biochemia Medica*. 2015. Vol. 25(2). 141-151.
12. Kuznetsova A., Brockhoff P.B., Christensen R.H.B. lmerTest package: tests in linear mixed effects models. *Journal of Statistical Software*. 2017. Vol. 82(13). 1-26.
13. Schneider K., Gasteiner J., Guggenberger T., Urdl M., Steiner S., Neidl A., Linhart N., Baumgartner W. Comparative

- measurements on ruminal pH-value in cattle. *Berliner und Münchnertierärztliche Wochenschrift*. 2010. Vol. 123. 406-412.
14. Mensching A., Bünemann K., Meyer U., von Soosten D., Hummel J., Schmitt A.O., Sharifi A.R., Dänike A. Modeling reticular and ventral ruminal pH of lactating dairy cows using ingestion and rumination behavior. *Journal of Dairy Science*. 2020. Vol. 103(8). 7260-7275.

## REFERENCES

1. Plaizier J.C., Danesh M.M., Derakhshani H., Golder H., Khafipour E., Kleen J.L., Lean I., Looor J., Penner G., Zebeli Q. Review: Enhancing gastrointestinal health in dairy cows. *Animal*. 2012. Vol. 12(2). 399-418 (In English).
2. Vladimirov F.E., Bazaev S.O., Pavkin D.Yu., Yurochka S.S. Razrabotka metodov i sredstv zootekhnicheskogo kontrolya v skotovodstve dlya upravleniya fiziologicheskim sostoyaniem stada [Development of methods and means of livestock control in cattle breeding to manage the physiological state of the herd]. *Glavnyy zootekhnik*. 2023. N1(234). 32-46 (In Russian).
3. Sato S., Ikeda A., Tsuchiya Y., Ikuta K., Murayama I., Kanehira M., Okada K., Mizuguchi H. Diagnosis of subacute ruminal acidosis (SARA) by continuous reticular pH measurements in cows. *Veterinary Research Communications*. 2012. Vol. 36. 201-205 (In English).
4. Enemark J.M.D. The monitoring, prevention and treatment of subacute ruminal acidosis (SARA): A review. *Veterinary Journal*. 2008. Vol. 176. 32-43 (In English).
5. O'Grady L., Doherty M.L., Mulligan F.J. Subacute ruminal acidosis (SARA) in grazing Irish dairy cows. *Veterinary Journal*. 2008. Vol. 176. 44-49 (In English).
6. Dorokhov A.S., Kirsanov V.V., Vladimirov F.E. Temperatura i uroven' pH rubtsa KRS kak pokazateli veroyatnosti reproduktivnogo uspekha [Temperature and pH level of cattle as the indicators of probability of reproductive success]. *Vestnik NGIEI*. 2019. N6(97). 117-126 (In Russian).
7. Falk M., Münger A., Dohme-Meier F. Technical note: A comparison of reticular and ruminal pH monitored continuously with 2 measurement systems at different weeks in early lactation. *Journal of Dairy Science*. 2016. Vol. 99. 1951-1955 (In English).
8. Vladimirov F.E., Bazaev S.O. Vliyaniye vremeni sutok i sezona goda na temperaturu i pH soderzhimogo rubtsa u krupnogo rogatogo skota [Influence of the time of day and season of the year on temperature and pH of rumen in cattle]. *Glavnyy zootekhnik*. 2022. N12(233). 28-38 (In Russian).
9. Sato S., Kimura A., Anan T., Yamagishi N., Okada K., Mizuguchi H., Ito K. A radio transmission pH measurement system for continuous evaluation of fluid pH in the rumen of cows. *Veterinary Research Communications*. 2012. Vol. 36. 85-89 (In English).
10. R Core Team. (2021 April 13). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria (In English).
11. Giavarina D. Understanding Bland Altman analysis. *Biochemia Medica*. 2015. Vol. 25(2). 141-151 (In English).
12. Kuznetsova A., Brockhoff P.B., Christensen R.H.B. lmer Test package: tests in linear mixed effects models. *Journal of Statistical Software*. 2017. Vol. 82(13). 1-26 (In English).
13. Schneider K., Gasteiner J., Guggenberger T., Urdl M., Steiner S., Neidl A., Linhart N., Baumgartner W. Comparative measurements on ruminal pH-value in cattle. *Berliner und Münchnertierärztliche Wochenschrift*. 2010. Vol. 123. 406-412 (In English).
14. Mensching A., Bünemann K., Meyer U., von Soosten D., Hummel J., Schmitt A.O., Sharifi A.R., Dänike A. Modeling reticular and ventral ruminal pH of lactating dairy cows using ingestion and rumination behavior. *Journal of Dairy Science*. 2020. Vol. 103(8). 7260-7275 (In English).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Заявленный вклад соавторов:

Владимиров Ф.Е. – формулирование основных направлений исследования, проведение экспериментального исследования, формирование текста;

Базаев С.О. – литературный анализ, проведение экспериментального исследования, обработка результатов исследования;

Хакимов А.Р. – литературный анализ, обработка результатов исследования, формирование текста.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

03.04.2023

24.05.2023

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

## Coauthors' contribution:

Vladimirov F.E. – formulating the main research directions, conducting an experimental study, working on the paper manuscript;

Bazaev S.O. – literature review, conducting an experimental study, processing the research findings;

Khakimov A.R. – literature review, processing the research findings, working on the paper manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

## Разработка экспериментального фитотрона и его применение в исследованиях по энергоэкологии светокультуры

**Сергей Анатольевич Ракутько<sup>1</sup>**,  
доктор технических наук,  
главный научный сотрудник,  
e-mail: sergej1964@yandex.ru;

**Елена Николаевна Ракутько<sup>1</sup>**,  
научный сотрудник, e-mail: elena.rakutko@mail.ru;  
**Медведев Геннадий Валерьевич<sup>2</sup>**,  
доктор технических наук, e-mail: genatswaly@mail.ru

<sup>1</sup>Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Реферат.** Отметим междисциплинарность светокультуры как области знания, необходимость привлечения различных разделов технических наук в практических приемах выращивания растений в искусственных условиях. Показали, что на современном этапе целесообразно говорить об энергоэкологии светокультуры как комплексном научном направлении, основанном на учете потоков субстанции, формирующих энергетические и экологические показатели искусственной агроэкосистемы. (*Цель исследования*) Разработать экспериментальный лабораторный фитотрон, предназначенный для исследований по энергоэкологии светокультуры, провести его биологическое тестирование. (*Материалы и методы*) С позиции логико-семантического подхода обосновали суть термина «энергоэкологичность» как конъюнкции его составляющих – энергоэффективности и экологичности. Изложили теоретические основы энергоэкологического подхода в светокультуре, определяющие особенности проведения экспериментальных исследований. Сформулировали требования, предъявляемые к техническим средствам проведения экспериментов. Описали устройство фитотрона и принципы его работы. Биологическое тестирование проводили на растениях томата (*Lycopersicon Esculentum Mill.*) сорта Благовест  $F_1$  в рассадной фазе развития. Определяли отклик растений на изменение факторов световой среды: фотопериода (нормальный и удлиненный), спектра (с добавкой синего и контрольный) и уровня облученности (низкий, средний и высокий). (*Результаты и обсуждение*) В варьируемых условиях световой среды энергоэкологичность изменялась в диапазоне от 0,075 грамма на моль (при контрольном спектре, удлиненном фотопериоде и высокой облученности) до 0,138 грамма на моль (при спектре с добавкой синего, нормальном фотопериоде и средней облученности). (*Выводы*) Разработали экспериментальный лабораторный фитотрон для изучения энергоэкологии светокультуры. Реализовали возможность управлять облучением в зависимости массы растений. Установка обеспечивает удобный доступ к растениям, компактна, эргономична и обладает повышенной функциональностью.

**Ключевые слова:** светокультура, энергоэффективность, экологичность, энергоэкологичность, спектр, облученность, фотопериод, фитотрон.

■ **Для цитирования:** Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Медведев Г.В. Разработка экспериментального фитотрона и его применение в исследованиях по энергоэкологии светокультуры // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №2. С. 40-48. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-40-48. EDN EOJDHP.

## Development of an Experimental Phytotron and its Application in the Research on the Energy-ecological Efficiency of Indoor Plant Lighting

**Sergey A. Rakutko<sup>1</sup>**,  
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,  
e-mail: sergej1964@yandex.ru;

**Elena N. Rakutko<sup>1</sup>**,  
researcher, e-mail: elena.rakutko@mail.ru;  
**Gennadiy V. Medvedev<sup>2</sup>**,  
Dr.Sc.(Eng.), e-mail: genatswaly@mail.ru

<sup>1</sup>Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Saint Petersburg, Russian Federation;

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State Agrarian University (SPbSAU), Saint Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The study of indoor plant lighting is noted to be an interdisciplinary research area. Thus, there is a need to integrate various technical sciences and practical methods in growing plants under artificial conditions. Nowadays, it is reasonable to

treat energy-ecological efficiency of indoor plant lighting as a complex scientific direction that takes into account substance flow forming the energy and environmental indicators of an artificial agroecosystem. (*Research purpose*) To develop an experimental laboratory phytotron intended for research on the energy-ecology efficiency of indoor plant lighting, and to conduct its biological testing. (*Materials and methods*) From the standpoint of the logical-semantic approach, the term "energy-ecological efficiency" was interpreted as a conjunction of its components - energy efficiency and environmental compatibility. The paper outlines the theoretical fundamentals of the energy-ecological efficiency approach to indoor plant lighting, which determine the experimental research features. The requirements for the techniques of conducting experiments are formulated. The phytotron design and its operation principles are described. Biological testing was carried out on Blagovest F1 tomato plants (*Lycopersicon Esculentum* Mill.) in the seedling phase of plant development. The plant response to changes in the lighting factors was determined: photoperiod (normal and extended), spectrum (a blue-enhanced spectrum and a control one), and irradiance level (low, medium, and high). (*Results and discussion*) Under the varied lighting conditions, energy-ecology efficiency varied from 0.075 grams per mole (with the control spectrum, an extended photoperiod and high irradiance) to 0.138 grams per mole (with the blue-enhanced spectrum, a normal photoperiod and medium irradiance). (*Conclusions*) An experimental laboratory phytotron was developed to study the energy-ecology efficiency of indoor plant lighting. The ability to control irradiance was achieved depending on the mass of plants. The phytotron unit provides easy access to plants, it is compact, ergonomic and has improved functional capacity

**Keywords:** indoor plant lighting, energy efficiency, environmental compatibility, energy-ecology efficiency, spectrum, irradiance, photoperiod, phytotron.

■ **For citation:** Rakutko S.A., Rakutko E.N., Medvedev G.V. Razrabotka eksperimental'nogo fitotrona i ego primeneniye v issledovaniyakh po energoekologii svetokul'tury [Development of an experimental phytotron and its application in the research on the energy-ecological efficiency of indoor plant lighting]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 17. N2. 40-48 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-40-48. EDN EOJDHP.

Энергия оптического излучения – важный фактор в светокультуре. Ее основные параметры – спектральный состав излучения, интенсивность (создаваемая облученность) и продолжительность облучения в течение суток (фотопериод) – оказывают большое влияние на функциональное состояние растений. Технологии светокультуры соответствует определенная область научных знаний, синтезирующая отдельные направления естественных, биологических и технических наук, чтобы найти отклик растений на изменения факторов внешней среды. Влияние оптического излучения с различными параметрами на физиологию и рост растений изучено достаточно хорошо [1]. Интенсивность формирования биомассы определяет потенциально пригодная для фотосинтеза часть энергии оптического излучения (эксергия излучения) [2].

В светокультуре даже малое воздействие излучением в физиологически активных спектральных диапазонах влияет на рост и развитие растений и позволяет добиться энергоэффективности. Такое фотонное управление дает возможность использовать тонкие квантовые эффекты взаимодействия оптического излучения с биообъектами [3]. Благодаря системному подходу с учетом современных методов биофотоники можно управлять светокультурой на ее отдельных иерархических уровнях, повышая экологичность выращиваемой продукции. Комплексный подход к оптимизации светокультуры с точки зрения повышения как энергоэффективности, так и экологичности отражает суть энергоэкологии светокультуры как научного междисциплинарного направления [4, 5]. Яркий

пример – оценка эффективности использования топлива с единых термодинамических позиций [6]. Коэффициент энергоэкологичности, учитывающий экономическую и экологическую целесообразность, используется при выборе источников энергоснабжения [7].

Эксперименты по применению оптического излучения при выращивании растений имеют давнюю историю. В работе Бэйли (1891 г.) упомянуто применение дуговых электрических ламп при выращивании растений в теплице [8]. Научно-исследовательские работы по светокультуре немыслимы без стабильности факторов окружающей среды при варьировании других параметров: светового режима (фотопериод, спектр излучения, его интенсивность), микроклимата (полив, подкормки, температура и т.д.). Многофакторные эксперименты необходимы для оптимизации светокультуры и выработки конкретных рекомендаций к режимам выращивания в производственных условиях.

Процессы, происходящие в растениях, запускаются фоторецепторами по сигналам об окружающей среде, адаптируя морфологию и физиологию органов растений к меняющимся внешним условиям [9]. Поэтому условия окружающей среды напрямую влияют на производство биомассы, углеродный метаболизм, эффективность фотосинтеза [10]. В контролируемых производственных условиях (теплицы, сити-фермы) дополнительное облучение – необходимое условие рентабельного производства [11].

Воспроизводимость результатов экспериментов по светокультуре можно обеспечить только при фикс-

сации условий выращивания растений [12].

Для формирования технологий выращивания растений применяют климатические камеры различных типов, в том числе и фитотроны [13, 14]. Тем не менее остается актуальной разработка новых технологий и современных установок [15].

**ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ** – разработка и тестирование экспериментального лабораторного фитотрона, предназначенного для изучения энергоэкологии светокультуры.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Энергоэкологический подход в рассмотрении взаимодействия растения с окружающей средой искусственной агроэкосистемы заключается прежде всего в изучении закономерностей целенаправленно формируемых потоков субстанций (вещества и энергии) в целях оптимизации светокультуры по заданным критериям [16]. Его суть может быть раскрыта с привлечением аппарата логико-семантического моделирования. При этом объект описывают в терминах и определениях соответствующей предметной области знания. Анализ таких моделей осуществляется средствами логики предикатов [17].

В соответствии с законами образования понятий в естественном языке, термин «энергоэкологичность» как интегральный показатель включает в себя два предиката ( $p_1, p_2$ ), имеющие смысловой вес одного порядка – «энергоэффективность» и «экологичность». Согласно символическому методу логической алгебры, исходные предикаты в математическом выражении должны объединяться конъюнкцией, или логическим умножением. Эта операция выполняет функцию союза «и» в естественном языке и имеет смысл «и  $p_1$ , и  $p_2$ », что логически соответствует реальности: процесс называют энергоэкологичным, если он и энергоэффективен, и экологичен. В вычислительных процедурах численное значение показателя энергоэкологичности (пока без учета размерности величин) будет определяться как произведение численных значений показателей энергоэффективности и экологичности.

$$\text{ЭЭ} = \text{Эн} \cdot \text{Эк}, \quad (1)$$

где ЭЭ – энергоэкологичность;

Эн – энергоэффективность;

Эк – экологичность.

Рассмотрим методы определения составляющих введенного интегрального показателя. При энергоэкологическом подходе моделью светокультуры будет процесс образования органического вещества (фотосинтез) под действием потока энергии излучения при прочих заданных параметрах окружающей среды. Входной величиной станет энергия оптического излучения, характеризуемая дозой  $H$ , полезным выходом – масса продуктов фотосинтеза  $M_{\text{вых}}$ . В качестве показателя энергоэффективности в рамках данной модели примем величину, обратную дозе излу-

чения, затрачиваемой на синтез единицы сухого вещества растения,  $\text{г} \cdot \text{моль}^{-1}$ :

$$\text{Эн} = \frac{M_{\text{вых}}}{H}, \quad (2)$$

где  $M_{\text{вых}}$  – масса синтезированного сухого вещества, г;  
 $H$  – доза излучения,  $\text{моль} \cdot \text{м}^{-2}$ .

Повышение энергоэффективности означает увеличение выхода продуктов фотосинтеза (числитель) при меньших затратах энергии на облучение (знаменатель) в результате снижения энергетических и материальных потерь.

Если рассматривать линейную модель динамики изменения площади листьев растения, поглощающих поток оптического излучения и накопления сухого вещества, то выражение для энергоэффективности можно представить в виде:

$$\text{Эн} = \frac{M_{\text{л}} \cdot v_{\text{л}} / 100}{3600 \cdot E \cdot T \cdot \Phi\Pi \cdot S_0}, \quad (3)$$

где  $M_{\text{л}}$  – сырая масса листьев, г;

$v_{\text{л}}$  – содержание сухого вещества в листьях, %;

$E$  – фотонная облученность,  $\text{мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ;

$T$  – время выращивания растений, сут.;

$\Phi\Pi$  – фотопериод, ч;

$S_0$  – площадь листьев кроны,  $\text{м}^2$ .

Для компактности перепишем формулу (3) с учетом группировки отдельных показателей.

Энергия, генерируемая источниками излучения в сутки (*day light integral*),  $\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ :

$$DLI = 3600 \cdot E \cdot \Phi\Pi. \quad (4)$$

Энергия, генерируемая источниками излучения за время выращивания (доза),  $\text{моль} \cdot \text{м}^{-2}$ :

$$H = DLI \cdot T. \quad (5)$$

Удельная площадь листьев (*specific leaf area*),  $\text{м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ :

$$SLA = \frac{S_0}{M_{\text{л}} \cdot v_{\text{л}}} \cdot 100. \quad (6)$$

Удельную площадь листьев  $SLA$  широко используют в исследованиях экологической направленности [18].

Получаем компактное выражение энергоэффективности:

$$\text{Эн} = \frac{1}{H \cdot SLA}. \quad (7)$$

Численная оценка экологичности представляет собой более сложную методическую задачу. К определению термина «экологичность» в литературе практикуются различные подходы [19]. В рамках данного исследования предлагается в качестве параметра экологичности принять показатель, связанный с биометрией выращиваемого растения, характеризующей гармоничность его развития, степень раскрытия генетического потенциала. Из ряда различных показателей физиологии растения, на наш взгляд, для этих целей можно воспользоваться соотношением массы

(по сухому веществу) подземной и надземной частей (*root mass fraction, RMF*), отн. ед.:

$$RMF = \frac{m_k}{m_k + m_c + m_l}, \quad (8)$$

где  $m_k, m_c, m_l$  – соответственно, масса корней, стебля и листьев растения, г.

Этот показатель отражает особенности индивидуального развития растений в процессе роста. Увеличение доли наземной части показывает, что она имеет более высокий приоритет для накопления фотосинтезирующих веществ. Возрастание доли подземной части означает, что растение больше поглощает питательных веществ из почвы. Таким образом, *RMF* отражает влияние на растение факторов окружающей среды. Его величина для каждого вида и сорта как правило генетически предопределена. Любые отклонения от этого значения свидетельствуют об изменении состояния растения.

Запишем выражение для экологичности, отн. ед.:

$$\mathcal{E}_k = 1 - |RMF - RMF_0|, \quad (9)$$

где  $RMF_0$  – генетически предопределенное оптимальное значение показателя.

Структура формулы учитывает, что любые отклонения *RMF* от оптимального значения  $RMF_0$  снижают показатель экологичности относительно максимального единичного значения.

Итоговое выражение для энергоэкологичности, г·моль<sup>-1</sup>:

$$\mathcal{E}\mathcal{E} = \frac{1 - |RMF - RMF_0|}{H \cdot SLA}. \quad (10)$$

Рассмотрим графическую иллюстрацию предложенной модели (рис. 1).

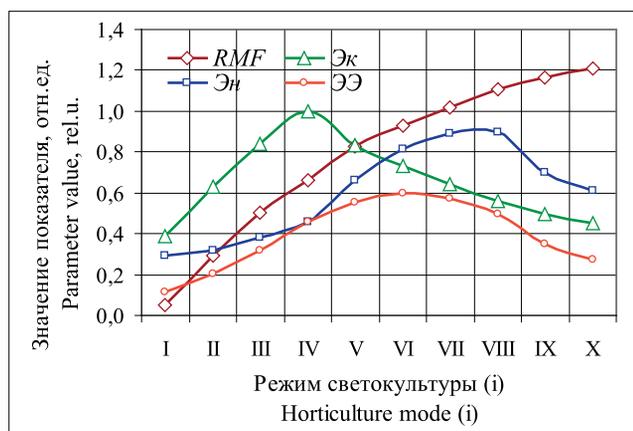


Рис. 1. Модель энергоэкологичности светокультуры: *RMF* – соотношением массы по сухому веществу подземной и надземной частей растения; *Эн* – энергоэффективность; *Эк* – экологичность; *ЭЭ* – энергоэкологичность

Fig. 1. Model of horticulture energoecology: 1. Model for energy-ecological efficiency of indoor plant lighting: *RMF* – the ratio of the mass of dry matter of the plant underground and aboveground parts; *Эн* – energy efficiency; *Эк* – ecological compatibility; *ЭЭ* – energy-ecological efficiency

Допустим, в светокультуре поддерживают различные режимы, отличающиеся параметрами световой среды, и горизонтальная координата соответствует номеру каждого режима (рис. 1). Режимы представлены в таком порядке, что соотношение подземной и надземной частей растения  $RMF(i)$  монотонно увеличивается. Физиологические процессы, протекающие в растении при различных режимах выращивания, формируют различные сочетания площади, массы листьев и содержания в них сухого вещества, что определяет ход кривой  $\mathcal{E}_k(i)$ . Практика показывает, что эта кривая имеет экстремальный характер, то есть при некоторых сочетаниях значений параметров световой среды наблюдается максимум энергоэффективности.

Один из режимов (в рассматриваемом примере это IV) может быть принят за оптимальный по некоторым соображениям, вплоть до учета качественных показателей растений. Тогда кривая  $\mathcal{E}_k(i)$ , симбатно следуя за кривой  $RMF(i)$  вплоть до номера этого режима, далее приобретает падающий характер, формируя максимум показателя экологичности. Такие закономерности определяют экстремальный характер кривой  $\mathcal{E}\mathcal{E}(i)$ , что ставит задачу оптимизации режимов светокультуры по критерию максимизации ее энергоэкологичности.

С учетом изложенных теоретических положений, сформулированы следующие требования к созданию лабораторного фитотрона, учитывающие особенности проведения экспериментальных исследований по энергоэкологии светокультуры:

- возможность регулирования уровня основных параметров световой среды: спектра излучения, облученности, фотопериода;
- наличие достаточного числа отсеков с возможностью задания различных режимов выращивания растений;
- возможность поддержания параметров микроклимата на протяжении всего времени выращивания растений с учетом их суточного изменения;
- возможность измерения в динамике массы растения и площади листовой поверхности;
- конструкция фитотрона должна допускать удобный доступ к растениям для их извлечения при периодических измерениях биометрических параметров.

Кроме того, предпочтителен дизайн установки, обеспечивающий, помимо функциональности, простоту изготовления и наладки, компактность, эргономичность, удобство при проведении экспериментов.

Для выполнения сформулированных требований предложено техническое решение, обладающее изобретательским уровнем (Пакутько С.А., Пакутько Е.Н., Мишанов А.П., Маркова А.Е. Фитотрон. Патент на полезную модель 210111, 29.03.2022. Заявка № 2022100085 от 10.01.2022).

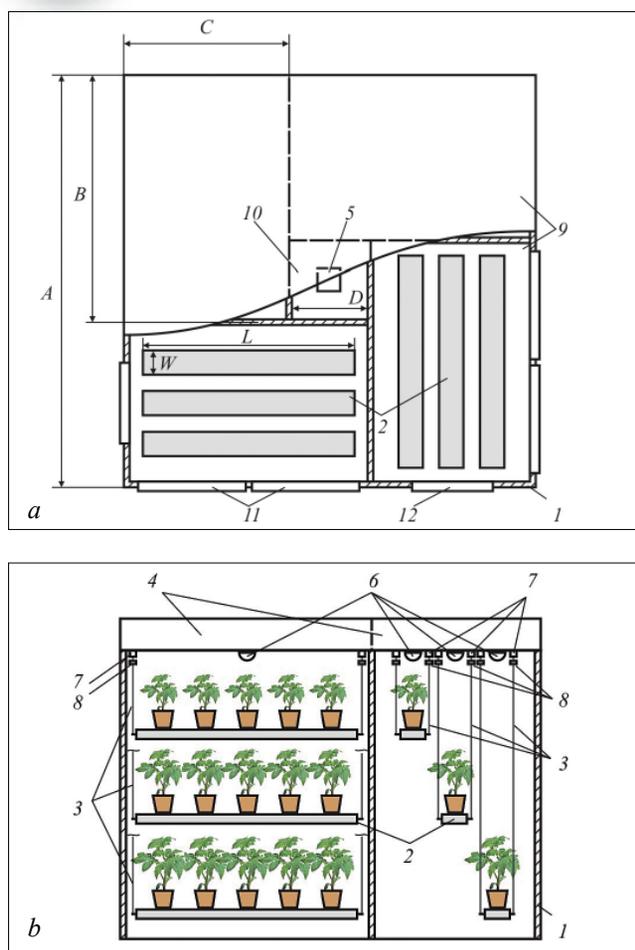


Рис. 2. Устройство фитотрона: а – вид сверху; б – вид сбоку: 1 – каркас; 2 – лотки; 3 – тросы; 4 – светильники; 5 – устройство регулирования параметров микроклимата; 6 – датчики расстояния; 7 – регуляторы высоты подвеса лотков; 8 – тензометрические датчики массы растений; 9 – экспериментальные отсеки; 10 – технологический отсек; 11 – дверцы; 12 – смотровое окно

Fig. 2. Phytotron design: a – top view; b – side view: 1 – frame, 2 – trays, 3 – cables, 4 – lamps, 5 – device for regulating microclimate parameters, 6 – distance sensors, 7 – height regulators for hanging trays, 8 – strain gauges for plant mass, 9 – experimental compartments, 10 – technological compartment, 11 – doors, 12 – viewing window

Фитотрон содержит общий силовой каркас, выполненный из металлического профиля, который служит основой для монтирования всех его элементов (рис. 2). В плане фитотрон имеет форму квадрата со стороной  $A$ . Его внутреннее пространство разделено светонепроницаемыми перегородками на четыре прямоугольных экспериментальных отсека. Одна из меньших сторон каждого отсека (длиной  $C$ ) состыкована с большей стороной соседнего отсека (длиной  $B$ ), а другая меньшая сторона вместе с большей стороной соседнего отсека выходят наружу и образуют внешнюю поверхность фитотрона. С внутренней стороны перегородки экспериментальных отсеков покрыты белым диффузно отражающим материалом. Экспе-

риментально найдено соотношение сторон, обеспечивающее эргономичность и оптимальную функциональность устройства:  $B/C = 1,4-1,6$ . В плане технологический отсек имеет форму квадрата с длиной стороны  $D = B - C$ .

Управление оборудованием осуществляется от программируемого устройства на основе микропроцессора *Arduino*.

Лотки в каждом экспериментальном отсеке служат для размещения растений. Экспериментально найдено, что длина лотка должна соответствовать условию:  $L < 0,8B$ . В этом случае удовлетворяется требование обеспечения достаточной равномерности облученности по всей поверхности каждого лотка ( $E_{\max}/E_{\text{ср}} \leq 1,2$  отн. ед.). Ширина лотка должна соответствовать условию  $W < 0,2C$ , чтобы исключить затенение растений кронами вышележащих ярусов. Светильники 4 закреплены в верхней части каркаса и закрыты диффузно пропускающей пластиной.

Изготовленный нами макетный образец фитотрона имел размеры:  $A = 2,5$  м,  $B = 1,5$  м,  $C = 1,0$  м,  $D = 0,5$  м, размеры лотков –  $L = 1,0$  м,  $W = 0,15$  м.



Рис. 3. Фрагмент подвесной системы лотков с выращиваемыми растениями томата

Fig. 3. Fragment of a suspension tray system with cultivated tomato plants

Площадь фитотрона в плане составляет  $6,25 \text{ м}^2$ , суммарная площадь экспериментальных отсеков  $6,0 \text{ м}^2$  (коэффициент полезного использования площади 96%). В эксперименте на каждом лотке изначально размещали по шесть растений в контейнерах с торфом (рис. 3).

Фитооблучатели имеют алюминиевые профили со светодиодами разного цвета. Для плавного регулирования потока от 10% до максимального значения использовали диммеры *MU 320H105AQ CP*.

Для наглядного представления спектрального состава в общем потоке  $\Phi_{AP}$  вычисляли доли потока в отдельных спектральных поддиапазонах, %: синем  $B$ , зеленом  $G$ , красном  $R$  и дальнекрасном  $FR$  (рис. 4).

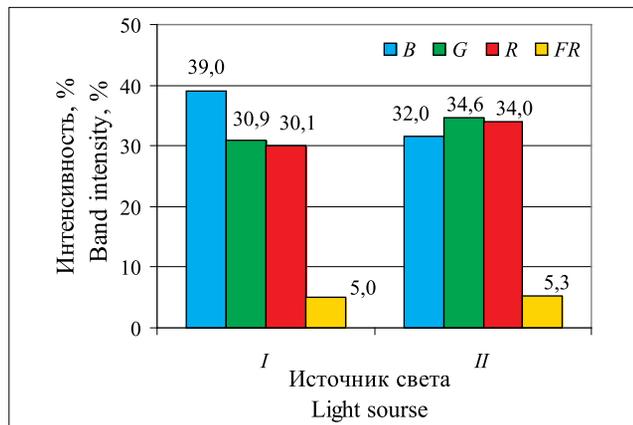


Рис. 4. Спектры источников света: B – синий; G – зеленый; R – красный; FR – дальнекрасный

Fig. 4. Spectra of light sources: B – blue; G – green; R – red; FR – far red

Для облучателя с дополнительными светодиодами B:G:R:FR = 39,0:30,9:30,1:5,0 (далее SpI), для контрольных условий B:G:R:FR = 32,0:34,6:34,0:5,3 (далее SpII).

Фитотрон использовали для исследования влияния параметров светового режима на энергоэкологичность выращивания растения томата сорта Благовест F<sub>1</sub> в течение 39 суток после всходов. Уровень облученности и спектральный состав контролировали с помощью спектроколориметра ТКА ВД/04, фотопериод задавали таймером. Температура воздуха составляла 21,0±1,0°C, влажность – 65-70%, скорость движения воздуха – 0,2-0,3 м·с<sup>-1</sup>. Оптические свойства листьев определяли денситометром ДП-1М, содержание хлорофилла – прибором ССМ-200.

План исследований заключался в определении биометрических параметров рассады при различном сочетании параметров:

Показатели / Indicators		Спектр / Spectrum	ФП, ч / PP, h	Облученность, мкмоль·с <sup>-1</sup> ·м <sup>-2</sup> Irradiance, μmol·s <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup>		
				100	170	240
Суточный интеграл радиации, моль·м <sup>-2</sup> ·сут <sup>-1</sup> Day light integral DLI, mol·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup>	I, II		16	5,76	9,79	<b>13,82</b>
			22	7,92	<b>13,46</b>	19,01
Доза H, моль·м <sup>-2</sup> Doze H, mol·m <sup>-2</sup>	I, II		16	224,64	381,89	<b>539,14</b>
			22	308,88	<b>525,10</b>	741,31
Площадь листьев S <sub>0</sub> , см <sup>2</sup> Leaf area S <sub>0</sub> , cm <sup>2</sup>	I		16	926	1018	<b>993</b>
			22	121	<b>184</b>	199
	II		16	981	1123	<b>1029</b>
			22	164	<b>221</b>	229
Доля подземной части, отн. ед. Root mass fraction RMF, rel.u.	I		16	0,135	0,156	<b>0,234</b>
			22	0,082	<b>0,053</b>	0,074
	II		16	0,112	0,139	<b>0,147</b>
			22	0,119	<b>0,081</b>	0,063
Удельная площадь листьев, м <sup>2</sup> ·г <sup>-1</sup> Specific leaf area SLA, m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	I		16	0,033	0,019	<b>0,016</b>
			22	0,027	<b>0,018</b>	0,013
	II		16	0,034	0,020	<b>0,016</b>
			22	0,031	<b>0,021</b>	0,017
Энергоэффективность Э <sub>н</sub> , г·моль <sup>-1</sup> Energy efficiency Э <sub>н</sub> , g·mol <sup>-1</sup>	I		16	0,136	0,140	<b>0,113</b>
			22	0,119	<b>0,108</b>	0,103
	II		16	0,130	0,130	<b>0,119</b>
			22	0,104	<b>0,091</b>	0,081
Экологичность Э <sub>к</sub> , отн. ед. Ecological compatibility Э <sub>к</sub> , rel.u.	I		16	0,996	0,983	<b>0,905</b>
			22	0,943	<b>0,914</b>	0,935
	II		16	0,973	1,000	<b>0,992</b>
			22	0,980	<b>0,942</b>	0,924
Энергоэкологичность ЭЭ, г·моль <sup>-1</sup> Energy-ecological efficiency ЭЭ, g·mol <sup>-1</sup>	I		16	0,136	0,138	<b>0,103</b>
			22	0,112	<b>0,099</b>	0,096
	II		16	0,126	0,130	<b>0,118</b>
			22	0,102	<b>0,086</b>	0,075

- двух фотопериодов (нормального – 16 ч и удлиненного – 22 ч);
- двух спектров: *SpI* – с добавкой синего и *SpII* – контроль;
- трех уровней облученности: 100; 170 и 240  $\text{мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ .

Всего 12 вариантов за один цикл выращивания.

Каждое растение, выращенное при различном сочетании факторов радиационной среды (фотопериода *ФП*, спектра *SP* и уровня облученности *E*) разделяли на листья, стебель и корень, который тщательно отмывали от субстрата. Для определения показателя *RMF* весовым способом находили сырую массу частей растения. Высушиванием навесок определяли содержание сухого вещества [20].

Результаты эксперимента обрабатывали с применением методов математической статистики ( $p < 0,05$ ) в пакетах программ *Excel 2003* и *Statistica 6.0*. Значимость различий определяли процедурой дисперсионного анализа.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Показатели светокультуры томата зависят от спектра, фотопериода, облученности и их сочетания (таблица).

Суточный интеграл радиации *DLI* не зависит от типа спектра и возрастает с увеличением облученности и фотопериода. Это входные величины модели энергоэкологичности, количественно характеризующие энергетическое воздействие на растения.

Площадь листовой поверхности была меньше под источниками с дополнительным синим излучением. Она расширялась с увеличением облученности и уменьшалась при удлинении фотопериода.

Доля корней *RMF* при обоих видах спектра и фотопериода 16 ч равномерно растет при повышении облученности. Этот показатель минимален при удлиненном фотопериода, наличии дополнительного синего и среднем уровне облученности. В качестве оптимального значения приняли  $RMF_0 = 0,139$  отн. ед. Это соответствует режиму, при котором площадь листовой поверхности максимальна  $S_0 = 1123 \text{ см}^2$ .

В эксперименте величина удельной площади листьев *SLA* падает при увеличении облученности для обоих типов спектра и величины фотопериода.

Энергоэффективность светокультуры снижается при повышении уровня облученности при обоих типах спектра и фотопериода. Однако при спектре *SpI* она немного больше.

Экологичность во всех вариантах достаточно высока, приближаясь к единице. Она достигает максимума при условии: *SpII*, *ФП* = 16 ч,  $E = 170 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ . Минимальное значение отмечено при сочетании: *SpI*, *ФП* = 16 ч,  $E = 240 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ .

Энергоэкологичность изменяется в диапазоне от минимального значения  $\mathcal{E}\mathcal{E}_{\min} = 0,075 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$  (*SpII*, *ФП* = 22 ч,  $E = 240 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ ) до максимального  $\mathcal{E}\mathcal{E}_{\max} = 0,138 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$  (*SpI*, *ФП* = 16 ч,  $E = 170 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ ) (рис. 5).

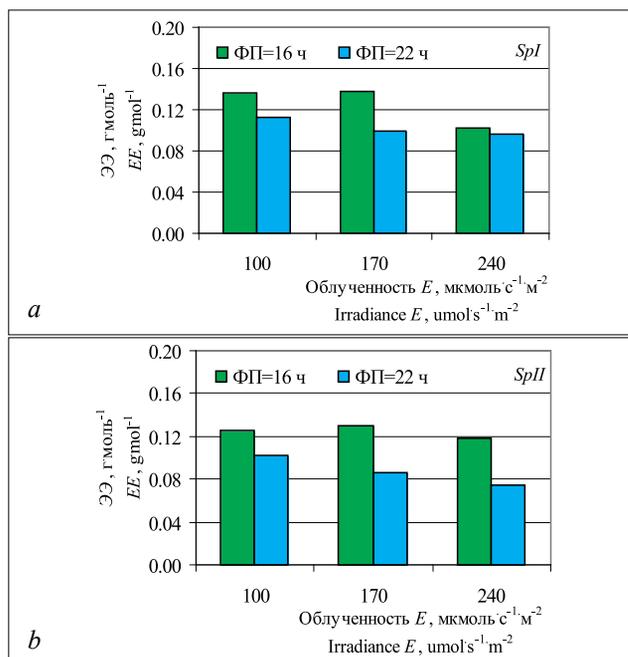


Рис. 5. Энергоэкологичность светокультуры в зависимости от уровня облученности при различном спектре и фотопериоде: а – *SpI*; б – *SpII*

Fig. 5. Energy-ecological efficiency of indoor plant lighting depending on the level of irradiance at different spectrum and photoperiods: a – *SpI*; b – *SpII*

В светокультуре важно выявить факт соблюдения закона взаимозаменяемости (Бунзена – Роско), в соответствии с которым эффект, оцененный по некоторому показателю, пропорционален дозе излучения, вне зависимости от соотношения ее составляющих (облученности *E* и фотопериода *ФП*) [21]. В эксперименте при  $E = 240 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$  и *ФП* = 22 ч обеспеченная доза составляет  $H = 525,10 \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2}$ , что практически совпадает (отклонение  $\Delta = 2,7\%$ ) с дозой при  $E = 170 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$  и *ФП* = 16 ч ( $H = 539,14 \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2}$ ). В таблице эти и другие попарно сравниваемые показатели выделены жирным шрифтом.

Эксперимент показал, что закон взаимозаменяемости соблюдается (в пределах  $\Delta = 10\%$ ) по всем показателям таблицы при спектре *SpI*. При спектре *SpII* отклонения от закона в пределах  $\Delta = 25-37\%$  соответствуют показателям: удельная площадь листьев *SLA*, энергоэффективность  $\mathcal{E}\eta$  и энергоэкологичность  $\mathcal{E}\mathcal{E}$ . Значительное несоответствие (в разы) наблюдается по показателям: площадь листьев  $S_0$  и массовая доля подземной части *RMF*.

**Выводы.** Путем логико-семантического анализа обосновано базовое понятие энергоэкологического подхода – энергоэкологичность светокультуры как композиция показателей ее энергоэффективности и экологичности, определяемых через непосредственно экспериментально измеряемые параметры. Разработанный экспериментальный лабораторный фитотрон позволяет проводить опыты по энергоэкологии свето-

культуры, варьируя параметрами создаваемой внутренней среды. Светотехническое оборудование обеспечивает суточный интеграл радиации от 5,76 до 19,01

моль·м<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup>. Стало возможным выращивание растений в условиях изменения показателя энергоэкологичности светокультуры от 0,075 до 0,138 г·моль<sup>-1</sup>.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Meiramkulova K., Tanybayeva Z., Kydyrbekova A., Turbekova A., Aytkhozhin S., Zhantasov S., Taukenov A. The efficiency of led irradiation for cultivating high-quality tomato seedlings. *Sustainability*. 2021. N13. 9426.
- Гришин А.П., Гришин А.А., Гришин В.А. Результаты исследований влияния биоэнергетических факторов на повышение урожайности в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N2. С. 19-25.
- Кульчин Ю.Н., Булгаков В.П., Гольцова Д.О., Субботин Е.П. Оптогенетика растений – светорегуляция генетического и эпигенетического механизмов управления онтогенезом // *Вестник ДВО РАН*. 2020. N1. с.5-25.
- Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Моделирование и численный анализ энергоэкологичности светокультуры // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N3. С. 11-17.
- Белозеров Д.А., Денисова Н.Н., Закирова А.Н. и др. Энергоэкология как основа устойчивого развития России: опыт, методология и перспективы. Монография. Дубна: Государственный университет «Дубна». 2017. 202 с.
- Сорока Б.С. Использование топлива и загрязнение окружающей среды // Часть 1. Энергоэкология использования топлива и нормирование вредных выбросов. Энергетика. *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2007. N2. С. 39-52.
- Субботин И.А. Энергоэкологическая оценка использования различных генерирующих источников в сельском хозяйстве // *Инженерные технологии и системы*. 2019. Т. 29. N3. С. 366-382.
- Janick J. The origins of horticultural technology and science. *Acta Hort.* 2007. 759. 41-60.
- Paik I., Huq E. Plant photoreceptors: Multi-functional sensory proteins and their signaling networks. *Seminars in Cell and Developmental Biology*. 2019. 92. 114-121.
- Yang D., Seaton D.D., Kraemer J, Halliday K.J. 2016. Photoreceptor effects on plant biomass, resource allocation, and metabolic state. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2016. 113. 7667-7672.
- Gómez C., Currey C. J., Dickson R. W., Kim H.-J., Hernández R., Sabeh N. C., Raudales R. E., Brumfield R. G., Lau-ry-Shaw A., Wilke A.K., Lopez R.G., Burnett S.E. 2019. Controlled Environment Food Production for Urban Agriculture. *HortScience*. 2019. 54. 1448-1458.
- Кулешова Т.Э., Блащенко М.Н., Кулешов Д.О., Галль Н.Р. Разработка лабораторного фитотрона с возможностью варьирования спектра излучения и длительности суточной экспозиции и его биологическое тестирование // *Научное приборостроение*. 2016. Т. 26. N3. С. 35-43.
- Семенова Н.А., Гришин А.А., Дорохов А.А. Аналитический обзор климатических камер для выращивания овощных культур // *Вестник НГИЭИ*. 2020. N1(104). С. 5-15.
- Измайлов А.Ю., Гришин А.А., Гришин А.П. Аэропонный модуль для фитотронов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2013. N5. С. 20-22.
- 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.
- Ракутько С.А. Концептуальные основы энергоэкологии светокультуры // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N6. С. 38-44.
- Wang Y., Wei Yu, Seligman J. Quantifier-free epistemic term-modal logic with assignment operator. *Annals of Pure and Applied Logic*. 2022. 173(3). 103071.
- Anderson C.G., Bond-Lamberty B., Stegen J.C. Active layer depth and soil properties impact specific leaf area variation and ecosystem productivity in a boreal forest. *PLoS ONE*. 2020. 15(12). e0232506.
- Ракутько Е.Н., Васькин А.В., Мишанов А.П., Маркова А.Е. Модели, методы и средства контроля энергоэкологичности в светокультуре: аналитический обзор // *АгроЭкоИнженерия*. 2021. N1(106). С. 25-50.
- Pandey R., Paul V., Das M., Meena M., Meena R.C. 2017. Plant growth analysis. Physiological techniques analyze the impact climate change on crop plants. Indian Agricultural Research Institute (IARI): New Delhi, India. 103.
- Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Экспериментальная проверка закона взаимозаместимости в светокультуре салата // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2018. N1(26). С.22-27.

### REFERENCES

- Meiramkulova K., Tanybayeva Z., Kydyrbekova A., Turbekova A., Aytkhozhin S., Zhantasov S., Taukenov A. The efficiency of led irradiation for cultivating high-quality tomato seedlings. *Sustainability*. 2021. N13. 9426 (In English).
- Grishin A.P., Grishin A.A., Grishin V.A. Rezul'taty issledovaniy vliyaniya bioenergeticheskikh faktorov na povyshe-nie urozhaynosti v rastenievodstve [Research results of bioenergetics factors influence on crop production yields increase]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. N2. 19-25 (In Russian).
- Kul'chin Yu.N., Bulgakov V.P., Goltsova D.O., Subbotin E.P. Optogenetika rasteniy – svetoregulyatsiya geneticheskogo i epigenicheskogo mekhanizmov upravleniya ontogene-zom [Plant optogenetics – photoregulation of genetic and epigenetic mechanisms of ontogenesis control]. *Vestnik DVO RAN*. 2020. N1. 5-25 (In Russian).
- Rakut'ko S.A., Rakut'ko E.N. Modelirovanie i chislenny analiz energoekologichnosti svetokul'tury [Simulation and

- numerical analysis of energy-and-ecological compatibility of indoor plant lighting]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N3. 11-17 (In Russian).
5. Belozеров D.A., Denisova N.N., Zakirova A.N., et al. Energoekologiya kak osnova ustoychivogo razvitiya Rossii: opyt, metodologiya i perspektivy: Monografiya [Energy ecology as a basis for Russia's sustainable development: background, methodology and prospects: Monograph]. Dubna: Gosudarstvennyy universitet «Dubna». 2017. 202 (In Russian).
  6. Soroka B.S. Ispol'zovanie topliva i zagryaznenie okruzhayushchey sredy Chast' I. Energoekologiya ispol'zovaniya topliva i normirovanie vrednykh vybrosov. Energetika [Fuel use and environmental pollution. Part I. Energy ecology of fuel use and regulation of harmful emissions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obedineniy SNG*. 2007. N2. 39-52 (In Russian).
  7. Subbotin I.A. Energoekologicheskaya otsenka ispol'zovaniya razlichnykh generiruyushchikh istochnikov v sel'skom khozyaystve [Energy and environment assessment of agricultural application of power generating sources]. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy*. 2019. Vol. 29. N3. 366-382 (In Russian).
  8. Janick J. The origins of horticultural technology and science. *Acta Horti*. 2007. 759. 41-60 (In English).
  9. Paik I., Huq E. Plant photoreceptors: Multi-functional sensory proteins and their signaling networks. *Seminars in Cell and Developmental Biology*. 2019. 92. 114-121 (In English).
  10. Yang D., Seaton D.D., Krahmer J., Halliday K.J. 2016. Photoreceptor effects on plant biomass, resource allocation, and metabolic state. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2016. 113. 7667-7672 (In English).
  11. Gómez C., Currey C.J., Dickson R.W., Kim H.-J., Hernández R., Sabeh N.C., Raudales R.E., Brumfield R.G., Laury-Shaw A., Wilke A.K., Lopez R.G., Burnett S.E. 2019. Controlled Environment Food Production for Urban Agriculture. *HortScience*. 2019. 54. 1448-1458 (In English).
  12. Kuleshova T.E., Blashenkov M.N., Kuleshov D.O., Gall' N.R. Razrabotka laboratornogo fitotrona s vozmozhnost'yu var'irovaniya spektra izlucheniya i dlitel'nosti sutochnoy ekspozitsii i ego biologicheskoe testirovanie [Development and biological testing of the laboratory phytotron with possibility of varying the emission spectra and the daily exposure]. *Nauchnoe priborostroenie*. 2016. Vol. 26. N3. 35-43 (In Russian).
  13. Semenova N.A., Grishin A.A., Dorokhov A.A. Analiticheskiy obzor klimaticheskikh kamer dlya vyrashchivaniya ovoshchnykh kul'tur [Analytical review of climatic chambers for vegetable crops growing]. *Vestnik NGIEI*. 2020. N1(104). 5-15 (In Russian).
  14. Izmaylov A.Yu., Grishin A.A., Grishin A.P. Aeroponnyy modul' dlya fitotronov [Aeroponic module for phytotrons]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2013. N5. 20-22 (In Russian).
  15. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S., Beylis V.M. Sozдание i razvitiye 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).
  16. Rakut'ko S.A. Kontseptual'nye osnovy energoekologii svetokul'tury [Conceptual framework of energy-and-ecology of indoor plant lighting]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. N6. 38-44 (In Russian).
  17. Wang Y., Wei Yu, Seligman J. Quantifier-free epistemic term-modal logic with assignment operator. *Annals of Pure and Applied Logic*. 2022. 173(3). 103071 (In English).
  18. Anderson C.G., Bond-Lamberty B., Stegen J.C. Active layer depth and soil properties impact specific leaf area variation and ecosystem productivity in a boreal forest. *PLoS ONE*. 2020. 15(12). e0232506 (In English).
  19. Rakut'ko E.N., Vas'kin A.V., Mishanov A.P., Markova A.E. Modeli, metody i sredstva kontrolya energoekologichnosti v svetokul'ture: analiticheskiy obzor [Models, methods and tools for energy and ecological control in greenhouse horticulture: review]. *AgroEkoInzheneriya*. 2021. N1(106). 25-50 (In Russian).
  20. Pandey R., Paul V., Das M., Meena M., Meena R.C. 2017. Plant growth analysis. Physiological techniques analyze the impact climate change on crop plants. Indian Agricultural Research Institute (IARI): New Delhi, India. 103 (In English).
  21. Rakut'ko S.A., Rakut'ko E.N. Eksperimental'naya proverka zakona vzaimozamestivosti v svetokul'ture salata [The verification of reciprocity law in lettuce growing]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2018. N1(26). 22-27 (In Russian).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Заявленный вклад соавторов:

Ракутько С.А. – научное руководство, первичная подготовка статьи;  
 Ракутько Е.Н. – анализ научных источников, обработка результатов измерений, окончательный текст статьи;  
 Медведев Г.В. – статистический анализ, обсуждение.  
 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Coauthors' contribution:

Rakutko S.A. – academic supervision, draft manuscript;  
 Rakutko E.N. – literature review, result processing and calculating, finalizing the manuscript;  
 Medvedev G.V. – statistical analysis, discussion.  
 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  
 10.02.2023

## Оценка качества тресты при отдельной технологии уборки льна-долгунца

**Иван Валентинович Сизов,**

кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: ivan.sizov.1976@mail.ru;

**Лариса Николаевна Пак,**

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,  
e-mail: pak\_lar@bk.ru;

**Елена Сергеевна Белякова,**

кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: ebelacova@tvgscha.ru

Тверская государственная сельскохозяйственная академия, г. Тверь, Российская Федерация

**Реферат.** Рассмотрели технологические аспекты и приемы приготовления льняной тресты при отдельном способе уборки льна-долгунца. Данная технология позволяет продлить созревание семян на корню. Показали, что за время вылежки льносоломки в виде лент неочесанных стеблей семена в коробочках подсыхают и дозревают естественным образом. Это позволяет снизить расход топливных ресурсов в сравнении с традиционной схемой, получить качественное волокно и пригодные для посева семена. (*Цель исследования*) Оценить качество льносырья на этапе приготовления тресты. (*Материалы и методы*) Изучили процессы и технические средства при уборке льна-долгунца в соответствии с нормативной документацией на этапах выдергивания, вылежки, оборачивания, подбора и очесывания стеблей. (*Результаты и обсуждение*) Определены показатели биологической урожайности тресты и семян в процессе приготовления льнотресты. При различной норме высевки семян урожайность тресты достигала 23,1-24,8 центнера на 1 гектар и сроке вылежки 14 дней, а также 20,8-22,2 центнера на 1 гектар на 21-й день. Согласно исследованиям средняя урожайность при различных условиях уборки составляет 20-30 центнеров с 1 гектара. Урожайность льносемян от 2,9 до 4,1 центнера с 1 гектара при разных сроках вылежки можно считать вполне допустимой. Растянность ленты после оборачивания возрастала по сравнению с исходной при скорости комбайна 5,3 и 7,8 километра в 1 час, не превышая допустимого значения. При скорости 9,6 километра в 1 час агротехнические требования нарушались. (*Выводы*) Отдельная уборка льна эффективна при вылежке льносырья в течение трех недель. При оборачивании неочесанных лент рабочая скорость не должна превышать 9 километров в 1 час.

**Ключевые слова:** лен-долгунец, отдельная уборка, приготовление тресты, неочесанные стебли, урожайность тресты, растянность лент.

■ **Для цитирования:** Сизов И.В., Пак Л.Н., Белякова Е.С. Оценка качества тресты при отдельной технологии уборки льна-долгунца // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №2. С. 49-54. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-49-54. EDN OCBUCT.

## Evaluation of Straw Flax Preparation Quality in the Framework of Separate Flax Harvesting Technology

**Ivan V. Sizov,**

Ph.D.(Eng.), associate professor,  
e-mail: ivan.sizov.1976@mail.ru;

**Larisa N. Pak,**

Ph.D.(Eng.), associate professor,  
e-mail: pak\_lar@bk.ru;

**Elena S. Belyakova,**

Ph.D.(Eng.), associate professor,  
e-mail: ebelacova@tvgscha.ru

Tver State Agricultural Academy, Tver, Russian Federation

**Abstract.** The paper explores the technological aspects and methods involved in the preparation of flax straw within the framework of separate fiber flax harvesting technology. This particular technology allows for the prolonged maturation of seeds in the field. The study demonstrates that during the process of seasoning flax straw in the form of unprocessed stem ribbons, the seeds within the capsules undergo natural drying and ripening. This approach enables a reduction in fuel consumption compared to the

traditional scheme while obtaining high-quality fiber and seeds suitable for sowing. (*Research purpose*) The objective of this study is to assess the quality of raw flax during the stage of straw flax preparation. (*Materials and methods*) The study investigates the processes and technical units involved in fiber flax harvesting, adhering to regulatory guidelines during the stages of stem pulling, seasoning, turning, picking, and processing are thoroughly examined. (*Results and discussion*) The research results have revealed the indicators for biological productivity of straw and seeds during the process of straw flax preparation. Under different seeding rates, the yield of straw flax ranges from 23.1 to 24.8 centners per hectare during a 14-day seasoning period and from 20.8 to 22.2 centners per hectare on the 21st day. These findings demonstrate that the average yield under various harvesting conditions is 20-30 centners per hectare. The flaxseed yield, ranging from 2.9 to 4.1 centners per hectare at different maturation periods, can be considered satisfactory. Furthermore, it was observed that the elongation of the flax ribbon increases after turning, compared to its initial state, when the combine speed is 5.3 and 7.8 kilometers per hour, remaining within the acceptable limits. However, at a speed of 9.6 kilometers per hour, there was a violation of agrotechnical requirements. (*Conclusions*) The separate harvesting of flax has proven to be effective during a three-week period of raw flax seasoning. It is important to note that when turning unprocessed flax ribbons, the working speed should not exceed 9 kilometers per hour.

**Keywords:** fiber flax, separate harvesting, preparation of flax straw, unprocessed stems, straw yield, elongation of ribbons.

■ **For citation:** Sizov I.V., Pak L.N., Belyakova E.S. Otsenka kachestva tresty pri razdel'noy tekhnologii uborki l'nodolguntsa [Evaluation of straw flax preparation quality in the framework of separate flax harvesting technology]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N2. 49-54 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-49-54. EDN OCBUCT.

Производство продукции льноводства для многих хозяйств становится нерентабельным из-за роста затрат на топливо. Ситуация ухудшается также из-за низкого качества посевного материала, что приводит к сокращению объемов льняного волокна. Для решения проблемы начало уборки льнокомбайнами смещается на более поздние сроки [1]. Такая мера позволяет продлить вызревание семян на корню, однако может отразиться на состоянии льнотресты как сырья для переработки на волокно.

Другим способом повышения кондиционных свойств семян для высева можно считать уборку льна по раздельной схеме [2]. В этом случае уборку начинают на 10-12 дней раньше, чем при комбайновой технологии, и после тербления семенные коробочки отчесывают не сразу, а оставляют на некоторое время на стеблях, расстиленных в виде лент. Таким образом коробочки подсыхают и семена дозревают естественным образом. При данной технологии расход топлива непосредственно на уборку льна комбайном снижается на 150-160 кг/га, повышается качество волокна и пригодность к посеву семян [3, 4].

Через 2-3 недели после вылежки льносоломы для получения тресты коробочки отделяют в поле, если позволяет погода, подборщиками-очесывателями, либо на стационарных площадках. Для транспортировки ленты льнотресты закатываются в рулоны.

Сроки вылежки в поле во многом зависят не только от погодных условий, но и использования определенных технологических приемов, в частности оборачивания ленты стеблей на 180°. Это особенно эффективно при урожайности льносоломы 4 т/га. Качество льносырья повышается на 0,5-1 сортономер и более [5], значительно ускоряется процесс приготовления тресты, выравниваются цвет и влажность.

Техническим средством для оборачивания ленты льна служит подборщик-оборачиватель [6-8]. Принцип работы большинства таких агрегатов основан на подборе ленты, ее перемещении в канале, образованном прижимными прутками, с постепенным разворотом ремнем на 180° и расстиле ленты сзади машины. Основными рабочими органами служат подбирающий барабан 1, прижимные прутки 2, перекрестный ремень 3 и шкив 4, который в некоторых конструкциях является ведущим (рис. 1).

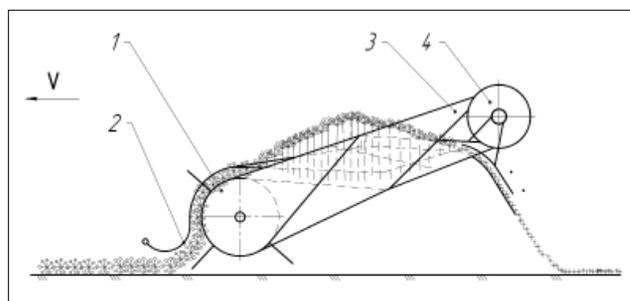


Рис. 1. Технологический процесс оборачивания ленты льна: 1 – подбирающий барабан; 2 – прижимные прутки; 3 – перекрестный ремень; 4 – шкив

Fig. 1. Technological process of flax ribbon turning: 1 – pick-up drum; 2 – clamping bars; 3 – cross belt; 4 – pulley

Главная особенность приготовления тресты при раздельной уборке льна заключается в правильной организации операций с неочесанными лентами. Период вылежки льносырья зависит от погоды и может занять несколько недель. Если очес не был произведен в полевых условиях, то стебли находятся на льнице до начала их подбора для прессования. Коробочки разрушаются, и потери семян неизбежны как при длительной вылежке, так и при транспортировке льна.

В льноводческих хозяйствах машины для подбора и очеса льна из лент практически отсутствуют, кроме того, их применение не всегда возможно из-за погоды. Следовательно, важно сократить период вылежки льносырья за счет таких операций, как оборачивание ленты. При этом работа с лентами должна выполняться качественно, чтобы предотвратить излишние потери семенного материала.

**Цель исследования** – оценить качество льносырья на этапе приготовления тресты при раздельной схеме уборки льна.

**Материалы и методы.** Исследовались процессы полевой выдержки и техническое средство для оборачивания лент льна. Условия испытаний и агротехнические показатели при полевых опытах определялись согласно ГОСТ 20915-2011 «Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний» и СТО АИСТ 8.9-2004 «Машины для уборки льна. Методы оценки функциональных показателей».

Испытания проходили в агротехнопарке Тверской ГСХА с использованием льноуборочного комбайна ЛК-4А с отключенным очесывающим аппаратом (рис. 2).



Рис. 2. Уборка льнокомбайном ЛК-4А; справа неочесанные ленты льна

Fig. 2. Harvesting with LK-4A flax combine; on the right – unprocessed flax ribbons

Во время вылежки неочесанные ленты неоднократно оборачивались (рис. 3). Определялся ряд показателей качества процесса и характеристик льносырья.



Рис. 3. Оборачивание льна; справа лента после оборачивания

Fig. 3. Flax ribbon turning; on the right – flax ribbons after turning

Качество работы оборачивающего агрегата оце-

нивалось по растянутости ленты льна и биологической урожайности семян в коробочках неочесанных стеблей до и после оборачивания. Характер растянутости лент влияет на размеры рулонов, формируемых при завершении вылежки для транспортировки на перерабатывающие предприятия. Растянутость зависит от смещения стеблей в ленте относительно друг друга и определяется как отношение средней ширины ленты к горстевой длине стеблей массой около 200 г, выравненных по комлям. Ширина ленты и длина стеблей измеряются на выбранных участках лент. Допустимая величина показателя растянутости ленты составляет 1,2.

Второй показатель – биологическая урожайность льносемян до и после оборачивания отражает потерю коробочек при подъеме, оборачивании и расстиле неочесанных лент.

**Результаты и обсуждение.** Получены данные о биологической урожайности тресты и семян на этапах вылежки и проведения работ по оборачиванию лент. Пробы (снопы) отбирались на разных стадиях вылежки льносоломы в тресту (в 7-й, 14-й и 21-й дни) на нескольких опытных участках с различной нормой высева семян (80, 85 и 90 кг/га). Как пример в *таблице 1* представлены результаты измерений на 21-й день.

Обобщенные результаты исследований урожайности тресты и льносемян за весь период опытов сведены в *таблицу 2*.

Биологическая урожайность тресты снижалась по мере увеличения срока вылежки стеблей. При разной норме высева данный показатель достигал 23,1-24,8 ц/га при вылежке в течение 14 дней и 20,8-22,2 ц/га на 21-й день. Согласно исследованиям качества льнопродукции, средняя урожайность при различных условиях уборки составляет 20-25 ц/га [9]. Учитывая, что для полноценной вылежки льносырья необходимы как минимум три недели, считаем 21 день наиболее приемлемым сроком вылежки.

При изучении раздельной технологии уборки льна установлено, что при урожайности льносемян 2,5-3 ц/га эта отрасль растениеводства может быть полностью обеспечена посевным материалом [10-13]. Таким образом, при различных сроках вылежки полученные значения урожайности льносемян от 2,9 до 3,7 ц/га (на 21-й день при норме высева соответственно 80 и 90 кг/га) можно считать вполне допустимыми. Однако затягивание процесса вылежки в полевых условиях может привести к нежелательному снижению урожайности и качества как льнотресты, так и семян по причине перележки стеблей и потери льносемян в коробочках.

Результаты экспериментальных исследований растянутости и биологической урожайности льносемян в коробочках до и после оборачивания неочесанных стеблей лент при разной скорости движения оборачивающего агрегата приведены в *таблицах 3 и 4*.

Растянутость лент льна определялась по различ-

Учетный сноп Sheaf sample	Характеристика слоя стеблей на 1 метр ленты, шт. Characteristics of the stem layer per 1 meter of straw ribbon, pcs	Биологическая урожайность, кг/га Biological yield, kg/ha	
		треста / flax straw	семена / seeds
1	1630	1967	378
2	1410	2282	427
3	1080	2863	483
4	1060	1120	276
5	930	1085	227
6	1380	2415	388
7	1190	2520	371
8	1020	2618	399
9	1380	2926	336
10	1540	2415	462
Среднее / Average	1630	2221	375

Срок вылежки льняной тресты в лентах The time of flax straw seasoning in ribbons	Норма высева льна, кг/га / Flax seeding rate, kg/ha					
	80		85		90	
	биологическая урожайность, ц/га / biological yield, kg/ha					
	треста flax straw	семена seeds	треста flax straw	семена seeds	треста flax straw	семена seeds
7 дней/ days	24,6	4,1	27,8	4,4	29,7	4,9
14 дней/ days	23,1	3,4	23,6	3,8	24,8	4,1
21 день/ days	20,8	2,9	21,5	3,3	22,2	3,7

Средняя скорость агрегата, км/ч Average speed of the unit, km/h	Биологическая урожайность льнотресты, ц/га / Flax straw's biological yield, c/ha					
	24,6		27,8		29,7	
	до оборачивания before turning	после оборачивания after turning	до оборачивания before turning	после оборачивания after turning	до оборачивания before turning	после оборачивания after turning
	5,3	1,06	1,13	1,09	1,11	1,04
7,8	1,08	1,16	1,10	1,15	1,09	1,17
9,6	1,11	1,23	1,13	1,28	1,09	1,32

Средняя скорость агрегата, км/ч Average speed of the unit, km/h	Биологическая урожайность семян в коробочках неочесанных стеблей, ц/га Biological seed yield of unprocessed stem capsules, kg/ha					
	норма высева льна, кг/га / flax seeding rate, kg/ha					
	80		85		90	
	до оборачивания before turning	после оборачивания after turning	до оборачивания before turning	после оборачивания after turning	до оборачивания before turning	после оборачивания after turning
5,3	4,14	4,10	4,39	4,33	4,90	4,87
7,8	4,17	4,13	4,41	4,35	4,91	4,83
9,6	4,12	4,02	4,37	4,31	4,97	4,81

ной биологической урожайности льнотресты с нескольких участков при различной норме высева. Второй фактор, влияющий на растянутость лент, – средняя скорость движения оборачивателя. При скорости 5,3 и 7,8 км/ч растянутость ленты после оборачивания несколько возросла по сравнению с исходной (табл. 3). Однако этот показатель не превысил допустимое значение, равное 1,2. Агротехнические требования нарушались при более высокой скорости – 9,6 км/ч. Обеспечить требуемую производительность оборачивателя – 1 га за 1 час основного времени работы возможно при скорости от 8 до 9 км/ч. В этом случае качество проведения операции будет допустимым.

Анализ таблицы 4 показал, что в процессе оборачивания биологическая урожайность семян в коробках изменялась незначительно, то есть потери ко-

робочек были минимальные. Максимальные потери – 2-3 % льносемян наблюдались при скорости оборачивателя 9,6 км/ч.

### Выводы

1. Раздельная технология уборки льна без очесывания льнокомбайном коробочек с семенами сразу после теребления льна позволяет снизить расход топлива на 150-160 кг/га, получить высококачественное волокно на уровне 13-14 номера, а также пригодные к посеву семена.

2. Для достижения приемлемых значений биологической урожайности тресты и семян, соответственно 25 ц/га и 3 ц/га, период вылежки льносырья не должен превышать 21 день.

3. Рациональная рабочая скорость движения оборачивателя неочесанных лент льна находится в пределах от 8 до 9 км/ч.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Uschapovsky I. The russian flax sector: bottlenecks and solutions. *Journal of Natural Fibers*. 2009. Vol. 6. N1. 108-113.
2. Ростовцев Р.А., Черников В.Г., Ушаповский И.В., Попов Р.А. Основные проблемы научного обеспечения льноводства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N3. С. 45-52.
3. Быстрова Е.М., Разин С.Н., Турыгин А.Б. Обзор работ по исследованиям способов уборки льна-долгунца // *Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе. Сборник статей 70-й международной научно-практической конференции*. В 3-х томах. Том 2. Караваяво: Костромская ГСХА, 2019. С. 55-61.
4. Демидов В.П., Головатюк В.А., Щукин С.Г. Механизация льноводства: учебное пособие. Новосибирск: НГАУ, 2012. 320 с.
5. Сизов, И.В., Елисеев Ю.В. Перспективные машины для приготовления льняной тресты // *Инновационные технологии в АПК региона: достижения, проблемы, перспективы развития. Сборник научных трудов по материалам Национальной научно-практической конференции*. Тверь: Тверская ГСХА, 2021. С. 279-282.
6. Сизов, И.В. Перспективные машины для приготовления льняной тресты // *Агротехника и энергообеспечение*. 2017. N3(16). С. 13-20.
7. Сизов, И.В. Особенности конструкции перспективного оборачивателя лент льна. Развитие научно-инновационного потенциала аграрного производства: проблемы, тенденции, пути решения. *Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции*. Тверь: Тверская ГСХА, 2022. С. 329-331.
8. Сизов, И.В. Романенко В.Ю. Пути усовершенствования конструкции оборачивателя лент льна. Инновационные разработки производства и переработки лубяных культур. *Сборник материалов Международной научно-практической конференции*. Тверь: Тверской государственный университет, 2016. С. 199-203.
9. Мансапова А.И. Урожайность и качество льна-долгунца в зависимости от погоды, сроков посева и уборки // *Земледелие*. 2016. N8. С. 29-31.
10. Перспективы развития раздельной уборки льна. Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства; 2018. [обновлено 30 апреля 2018; процитировано 18 апреля 2023]. Доступно: <https://belagromech.by/news/perspektivy-razvitiya-razdelnoj-uborki-lna/?ysclid=lgdju6n190899442571>.
11. 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.
12. 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.
13. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Инновационная система машинно-технологического обеспечения предприятий агропромышленного комплекса. Ч. 1. Инновационная система машинно-технологического обеспечения сельскохозяйственных предприятий на длительную перспективу. М.: 2019. 228 с.

### REFERENCES

1. Uschapovsky I. The Russian flax sector: bottlenecks and solutions. *Journal of Natural Fibers*. 2009. Vol. 6. N1. 108-113 (In English).
2. Rostovtsev R.A., Chernikov V.G., Ushchapovskiy I.V., Popov R.A. Osnovnye 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).
3. Bystrova E.M., Razin S.N., Turygin A.B. Obzor rabot po issledovaniyam sposobov uborki l'na-dolguntsa [Overview of research on the methods of cleaning flax]. *Aktual'nye problemy nauki v agropromyshlennom komplekse. Sbornik statey 70-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Vol. 2. Karavaevo: Kostromskaya GSKHA, 2019. 55-61 (In Russian).
  4. Demidov V.P., Golovatyuk V.A., Shchukin S.G. Mekhanizatsiya l'novodstva: uchebnoe posobie [Mechanization of flax growing: textbook]. Novosibirsk: NGAU, 2012. 320 (In Russian).
  5. Sizov, I.V., Eliseev Yu.V. Perspektivnye mashiny dlya prigotovleniya l'nyanoy tresty [Promising machines for preparing flaxseed]. *Innovatsionnye tekhnologii v APK regiona: dostizheniya, problemy, perspektivy razvitiya. Sbornik nauchnykh trudov po materialam Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Tver': Tverskaya GSKHA, 2021. 279-282 (In Russian).
  6. Sizov, I.V. Perspektivnye mashiny dlya prigotovleniya l'nyanoy tresty [Promising machines for preparing flaxseed]. *Agrotekhnika i energoobespechenie*. 2017. N3(16). 13-20 (In Russian).
  7. Sizov I.V. Osobennosti konstruktсии perspektivnogo oborachivatela lent l'na [Design features of a promising flax ribbon turner]. *Razvitie nauchno-innovatsionnogo potentsiala agrarnogo proizvodstva: problemy, tendentsii, puti resheniya. Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Tver': Tverskaya GSKHA, 2022. 329-331 (In Russian).
  8. Sizov, I.V. Romanenko V.Yu. Puti usovershenstvovaniya konstruktсии oborachivatela lent l'na [Ways to improve the design of the flax ribbon turner]. *Innovatsionnye razrabotki proizvodstva i pererabotki lubyanykh kul'tur. Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Tver': Tverskoy gosudarstvennyy universitet, 2016. 199-203 (In Russian).
  9. Mansapova A.I. Urozhaynost' i kachestvo l'na-dolguntsa v zavisimosti ot pogody, srokov poseva i uborki [Productivity and quality of fiber flax depending on the weather, sowing and harvesting dates]. *Zemledelie*. 2016. N8. 29-31 (In Russian).
  10. Perspektivy razvitiya razdel'noy uborki l'na [Prospects for the development of separate flax harvesting.]. *Nauchno-prakticheskiy tsentr Natsional'noy akademii nauk Belarusi po mekhanizatsii sel'skogo khozyaystva*; 2018. (In Russian). [obnovleno 30 aprelya 2018; protsitirovano 18 aprelya 2023]. Dostupno [accessed at]: <https://belagromech.by/news/perspektivy-razvitiya-razdelnoj-uborki-lna/?ysclid=lgd-ju6nl90899442571>.
  11. 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).
  12. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S., Beylis V.M. Sozдание i razvitie sistem mashin i tekhnologiy dlya kompleksnoy mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov v rasteniyevodstve [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).
  13. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Beylis V.M., Tsench Yu.S. Innovatsionnaya sistema mashinno-tekhnologicheskogo obespecheniya predpriyatiy agropromyshlennogo kompleksa [Innovative system of machine and technological support of agro-industrial enterprises]. Part. 1. *Innovatsionnaya sistema mashinno-tekhnologicheskogo obespecheniya sel'skokhozyaystvennykh predpriyatiy na dlitel'nyuyu perspektivu*. Moscow: 2019. 228 (In Russian).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Заявленный вклад соавторов:

Сизов И.В. – научное руководство, формулирование направления исследований, разработка методики исследований, литературный анализ и визуализация;

Пак Л.Н. – разработка методики исследований;

Белякова Е.С. – анализ существующих технологий.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Coauthors' contribution:

Sizov I.V. – scientific supervision, formulation of research direction, development of research methodology, literature analysis, and visualization;

Pak L.N. – development of research methodology;

Belyakova E.S. – analysis of existing technologies.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

03.04.2023

24.05.2023

## Переоборудование топочного агрегата ТБМ-1,7 для расширения диапазона генерируемых температур

Артём Сергеевич Ключников<sup>1</sup>,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: artik8487@mail.ru;

Егор Николаевич Лапин<sup>2</sup>,  
магистрант, e-mail: lapin.koresh@mail.ru

<sup>1</sup>Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Ярославская государственная сельскохозяйственная академия», г. Ярославль, Российская Федерация

**Реферат.** Показали, что переход на новый низкотемпературный способ конвективной сушки зерна сокращает затраты. Подтвердили, что его внедрение потребовало расширения диапазона генерируемых температур топочным агрегатом ТБМ-1,7, которым оборудована шахтная сушилка СЗШ-16А. Отметили, что форсунка топочного агрегата в заводском исполнении стабильно работает только при расходе топлива 40-100 килограммов в час, при этом температура подогрева воздуха составляет 50-130 градусов Цельсия. (*Цель исследования*) Определить оптимальные параметры жиклеров для стабильной работы форсунки топочного агрегата ТБМ-1,7 на жидком топливе в расширенном температурном диапазоне подогрева воздуха 15-130 градусов Цельсия. (*Материалы и методы*) На форсунке горелки топочного агрегата ТБМ-1,7 исследовали конструкции четырех типов стальных жиклеров, которые различались количеством отверстий, их длиной, диаметром, наличием или отсутствием резьбы. Всего в эксперименте изучили работу 160 жиклеров. (*Результаты и обсуждение*) Выявили, что стабильная работа форсунки обеспечена только жиклерами с резьбовыми отверстиями, оптимальная длина которых составляет 4 миллиметра. Температуру подогрева воздуха в диапазоне 15-25 градусов Цельсия обеспечил тип жиклера с четырьмя отверстиями М3, а 25-40 градусов – тип жиклера с тремя отверстиями М4. (*Выводы*) Определили, что при использовании жиклеров с гладкими отверстиями, вне зависимости от их типов, горение топлива не происходит. Установили, что сокращение расхода топлива на процесс сушки после перехода на новый низкотемпературный конвективный способ позволило в опытном хозяйстве в уборочную компанию 2022 г. сэкономить 300 тысяч рублей. **Ключевые слова:** горение жидкого топлива, жиклер, технология сушки зерна, снижение расхода топлива, сушка семян, переоборудование топочного агрегата.

**■ Для цитирования:** Ключников А.С., Лапин Е.Н. Переоборудование топочного агрегата ТБМ-1,7 для расширения диапазона генерируемых температур // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №2. С. 55-60. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-55-60. EDN GZRFTO.

## Redesigning TBM-1.7 Combustion Unit to Expand the Temperature Range

Artem S. Kliuchnikov<sup>1</sup>,  
Ph.D.(Eng.), associate professor,  
e-mail: artik8487@mail.ru;

Egor N. Lapin<sup>2</sup>,  
master's student,  
e-mail: lapin.koresh@mail.ru

<sup>1</sup>Yaroslavl State Technical University (YSTU), Yaroslavl, Russian Federation;

<sup>2</sup>Yaroslavl State Agricultural Academy, Yaroslavl, Russian Federation

**Abstract.** It is shown that the transition to a new low-temperature method of convective drying leads to a reduction in grain drying costs. The implementation of this method is confirmed to require expanded temperatures generated by the TBM-1.7 furnace unit that the SZSh-16A shaft dryer is equipped with. It is noted that a plant-manufactured burner nozzle works smoothly only when the fuel consumption is 40-100 kilograms per hour, and the air heating temperatures are 50-130 degrees Celsius. (*Research purpose*) To determine the jet optimal parameters for smooth operation of the nozzle in the TBM-1.7 combustion unit working on the liquid fuel at the extended air heating temperatures of 15-130 degrees Celsius. (*Materials and methods*) The designs of four types of jets were studied on the burner nozzle of the TBM-1.7 combustion unit. In total, the operation of 160 jets was examined. The jets were made of steel. They differed in the number of holes, their length, diameter, the availability of threads. (*Results and discussion*) It is determined that the nozzle smooth operation is provided only by jets with threaded holes, whose optimal length is 4 millimeters. The air heating temperature of 15-25 degrees Celsius is provided by M3 four-hole jet, and the temperature of 25-40

degrees Celsius is provided by M4 three-hole jet. (*Conclusions*) It is found that jets with smooth holes, regardless of their types, do not provide fuel combustion. It is found that the transition to a new low-temperature convective method led to a reduction in fuel consumption during the drying process, which, in turn, made it possible to save 300 thousand rubles during the harvesting period on the experimental farm in 2022.

**Keywords:** liquid fuel combustion, jet, grain drying technology, reduction in fuel consumption, seed drying, redesign of the combustion unit.

**For citation:** Kliuchnikov A.S., Lapin E.N. Pereoborudovanie topochного агрегата ТБМ-1,7 dlya rasshireniya diapazona generiruemykh temperatur [Redesigning TBM-1.7 combustion unit to expand the temperature range]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N2. 55-60 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-55-60. EDN GZRFTO.

Сушка продукции растениеводства – основная операция послеуборочной обработки семенного вороха [1-3]. В себестоимости готовой семенной продукции на долю послеуборочной обработки приходится около 50% всех затрат, большая часть из которых приходится на сушку [4, 5]. Известно, что зерновка естественным образом претерпевает физические и структурные изменения в процессе сушки [6, 7]. Посевные, продовольственные и фуражные показатели качества готового продукта напрямую зависят от технологии сушки [8-10]. Сельхозтоваропроизводители заинтересованы в снижении стоимости сушки и улучшении качества основной части урожая.

Ранее мы разработали новый способ энергоэффективной низкотемпературной конвективной сушки [11]. Он способствует более качественному послеуборочному дозреванию семенного продукта при сокращении затрат денежных средств и энергии, что в конечном итоге обеспечивает получение более дешевого и высококачественного посевного материала.

Для основного урожая любой культуры одноразовая технология сушки разделена на три этапа. На первом этапе происходит пошаговое наращивание температуры сушильного агента от температуры окружающего воздуха до оптимально допустимого значения, без нарушения биохимических показателей. На втором этапе выдерживают оптимальную температуру как материала, так и сушильного агента. На третьем этапе происходит снижение температуры сушильного агента до уровня окружающего воздуха, с таким же шагом, как и в начале сушки. На этом этапе для испарения влаги задействовано также тепло, запасенное материалом ранее. В середине сушки, которую определяют по влажности материала, проводят реверсирование сушильного агента для получения одинаковой конечной влажности компонентов высушенного материала [11].

Для реализации нового способа конвективной сушки необходимо обеспечить на первом этапе ступенчатый подогрев сушильного агента в топочном агрегате, с обоснованным нами темпом – 0,5 °C/мин. При этом конечная максимальная температура не должна превышать 50°C. Такие температурные режимы обе-

спечивают топочные агрегаты с линейными модуляционными горелками на природном газе [12]. Однако пункты послеуборочной обработки многих хозяйств не газифицированы [4]. Поэтому топочные агрегаты сушилок работают на жидком топливе, а регулировки расхода топлива у них не могут поддерживать новый низкотемпературный режим сушки.

Так, у топочного агрегата ТБМ-1,7 устойчивая работа форсунки возможна только при расходе топлива 40-100 кг/ч и температуре сушильного агента 50-130°C. При подаче топлива менее 40 кг/ч нет стабильного формирования топливовоздушной смеси и происходит срыв пламени. Поэтому для внедрения нового способа сушки необходимо расширить диапазон регулирования подачи топлива в камеру сгорания ТБМ-1,7.

Один из эффективных путей снижения скорости истечения топлива и формирования топливовоздушной смеси с заданными характеристиками – применение жиклеров [13, 14].

**Цель исследования** – определить оптимальные параметры жиклеров для стабильной работы форсунки топочного агрегата ТБМ-1,7 на жидком топливе в расширенном температурном диапазоне подогрева воздуха 15-130°C.

**Материалы и методы.** В топочном агрегате ТБМ-1,7 применена форсунка низкого давления с воздушным распылением топлива [15]. В заводском варианте температуру сушильного агента регулируют заслонкой подачи воздуха от вентилятора в диффузор или изменением его положения в осевом направлении относительно обреза трубки форсунки (*рис. 1*). Для завихрения и распыления топлива на конце трубки нарезают резьбу М10.

В заводском серийном варианте при расходе топлива менее 40 кг/ч начинается его порционное поршневое движение в трубке форсунки из-за слабого разрежения в диффузоре. Горение топлива прекращается, так как во время запуска топочного агрегата топливовоздушная смесь поджигается от электрозапальной свечи, а затем горение топливовоздушной смеси самоподдерживается при отключенной свече.

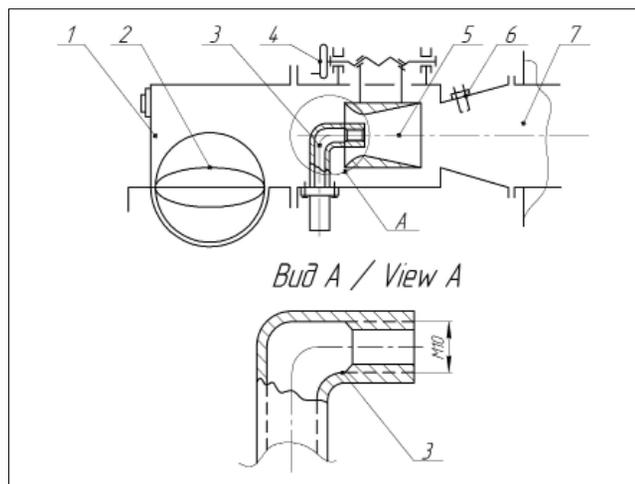


Рис. 1. Схема горелки топочного агрегата ТБМ-1,7: 1 – вентилятор; 2 – заслонка; 3 – трубка форсунки; 4 – маховичок регулировки положения диффузора; 5 – диффузор; 6 – запальная свеча; 7 – топочный агрегат

Fig. 1. Diagram for the burner of TBM-1.7 combustion unit: 1 – fan; 2 – damper; 3 – nozzle tube; 4 – handwheel for adjusting the position of the diffuser; 5 – diffuser; 6 – glow plug; 7 – furnace block

Для любого уровня расхода топлива в работающей форсунке поддерживается оптимальное соотношение между массовым расходом топлива и воздуха, полученное из уравнения Бернулли:

$$\frac{B}{G_2} = \frac{d^2}{D^2} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\tau} \cdot (1 + \epsilon_B)}{\rho_B \cdot (1 + \epsilon_{\tau})}} \quad (1)$$

где  $B$  – массовый расход топлива, кг;  
 $G_2$  – массовый расход воздуха, кг;  
 $d, D$  – диаметры отверстия в форсунке и узкой части диффузора, мм;  
 $\rho_{\tau}, \rho_B$  – плотности топлива и воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\epsilon_{\tau}, \epsilon_B$  – коэффициенты сопротивления воздушного и топливного каналов.

Из выражения (1) следует, что, уменьшая диаметр отверстия в форсунке, можно сократить подачу топлива. Необходимый пониженный расход топлива найдем из уравнения теплового баланса топочного агрегата, согласно которому тепло, необходимое для образования сушильного агента, дает сгорающее в топочном агрегате топливо. С учетом коэффициента полезного действия ТБМ-1,7 имеем:

$$C_{\tau} \cdot G_{\tau} \cdot \Delta t_{\tau} = B \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}} \cdot \eta_{\tau} \quad (2)$$

где  $C_{\tau}$  – теплоемкость сушильного агента, Дж/(кг·К);  
 $G_{\tau}$  – массовый расход сушильного агента, кг;  
 $\Delta t_{\tau}$  – температура подогрева воздуха для образования сушильного агента, °С;  
 $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$  – низшая теплота сгорания топлива, Дж/кг;  
 $\eta_{\tau}$  – коэффициент полезного действия.

С допустимой погрешностью величину температуры подогрева воздуха для образования сушильного агента рассчитывают по выражению:

$$\Delta t_{\tau} = \frac{C_3 \cdot m_3 \cdot (t_{\text{пз}} - t_{\text{нз}})}{G_{\tau} \cdot C_{\text{рт}} \cdot \eta} \quad (3)$$

где  $\Delta t_{\tau}$  – температура подогрева воздуха, °С;  
 $C_3$  – массовая теплоемкость зерна, Дж/(кг·К);  
 $m_3$  – масса сушимого зерна, кг;  
 $t_{\text{пз}}$  – предельно допустимая температура нагрева зерна, °С;  
 $t_{\text{нз}}$  – начальная температура зерна, °С;  
 $C_{\text{рт}}$  – изобарная теплоемкость сушильного агента, Дж/(кг·К);  
 $\eta$  – коэффициент полезного действия.

Согласно выражению (2), расход сжигаемого топлива пропорционален температуре подогрева воздуха. Из этого же уравнения выявили, что, например, величину температуры подогрева воздуха  $\Delta t_{\tau} = 20^{\circ}\text{C}$  обеспечивает расход топлива  $B = 20$  кг/ч. Затем по выражению (1) определили диаметр отверстия в форсунке и его площадь, которая составила 39,25 мм<sup>2</sup>.

Качественное сжигание малых расходов топлива обеспечено сменными жиклерами, которые ввинчивают внутрь трубки форсунки (рис. 1). На форсунке горелки топочного агрегата ТБМ-1,7 мы исследовали конструкции четырех типов жиклеров: с одним, двумя, тремя и четырьмя отверстиями. (рис. 2).

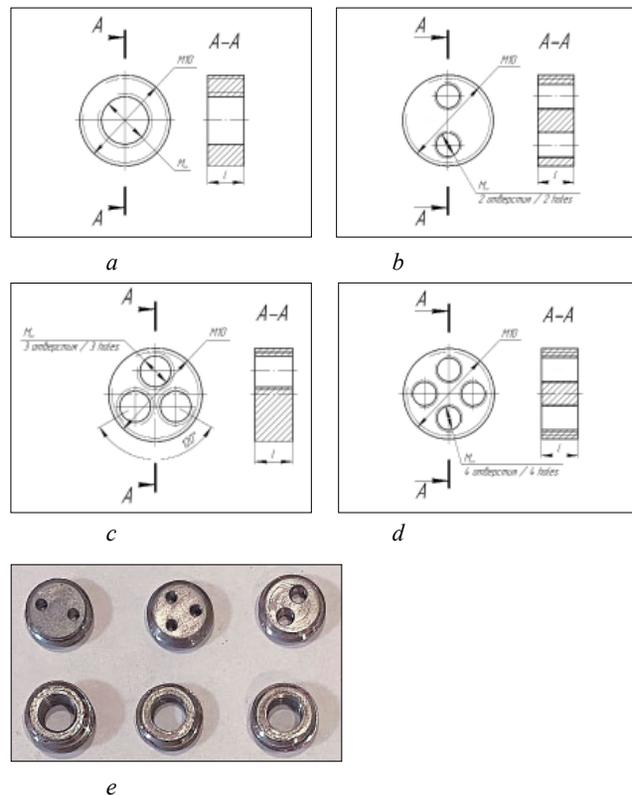


Рис. 2. Схемы жиклеров с разным количеством отверстий: а – с одним; б – с двумя; в – с тремя; д – с четырьмя; е – общий вид работоспособных жиклеров

Fig. 2. A variety of jets: a – a one-hole jet; b – a two-hole jet; c – a three-hole jet; d – a four-hole jet; e – a photograph of operable jets

Все жиклеры изготовлены из стали Ст3. Для каждого типа исследованы две разновидности: с гладкими отверстиями и с метрической резьбой в них. Всего в эксперименте изучена работа 160 жиклеров. Для каждого типа и разновидности определяли оптимальную длину ( $l$ ) в диапазоне 3-12 мм с шагом 1 мм.

Все жиклеры с наружной резьбой М10 ввинчивали в трубку форсунки, установленной в горелку (рис. 3). Заполненную зерном пшеницы сушилку СЗШ-16А и топочный агрегат ТБМ-1,7 включали в работу и дожидались автоматического розжига горелки. Массовый расход дизельного топлива измеряли цилиндром, установленным в разрыве топливопровода. Температуру окружающего воздуха и подогретого сушильного агента регистрировали ртутными термометрами ТП-4Г ГОСТ 2045-71 с ценой деления 0,5°C. Расход сушильного агента вычисляли косвенным методом в соответствии с ГОСТ Р 55262-2012 (СТО АИСТ 10.2-2010) при помощи прибора *Testo 435* с зондом с обогреваемой нитью *Flow*.

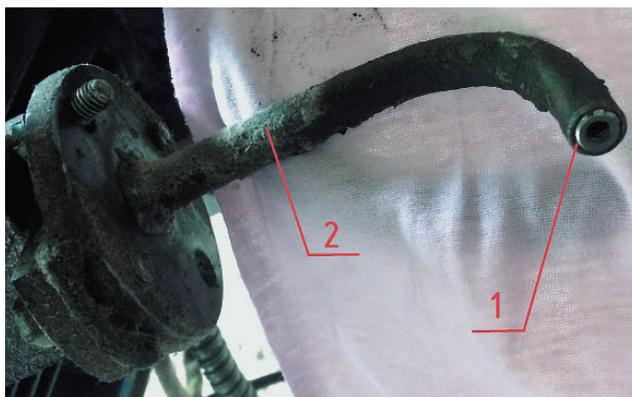


Рис. 3. Форсунка с установленным жиклером: 1 – жиклер; 2 – трубка форсунки

Fig. 3. A nozzle with an installed jet: 1 – jet; 2 – nozzle tube.

Исследование проведено на зерносушильном оборудовании ООО «Племзавод «Родина» Ярославского района Ярославской области в условиях уборочной компании 2022 г. Средняя температура воздуха 19°C, количество осадков 30 мм, средняя влажность поступающего на сушку вороха пшеницы – 15%. Общий объем поступившего на обработку зернового вороха пшеницы составил 2500 т.

**Результаты и обсуждение.** По результатам испытания установлено, что все четыре типа жиклеров при всех значениях длины ( $l$ ) с гладкими отверстиями оказались неработоспособными. После их установки в форсунку отсутствовало распыление топлива, поэтому его воспламенения не происходило. Хорошее распыление топлива и устойчивое горение обеспечивали и не все жиклеры с нарезанной метрической резьбой. Выявлено, что оптимальная длина работоспособного жиклера  $l = 4$  мм. Если  $l < 4$  мм, то нет распыления топлива до оптимального вида тумана. Оно

поступает в камеру сгорания в виде крупных капель, и горения не происходит. В случае  $l > 4$  мм жиклеры выводят топливо в виде струи, что делает невозможным образование способной воспламениться топливоздушной смеси. Жиклер с тремя отверстиями с резьбой М4 и суммарной полезной площадью  $S_2 = 35$  мм<sup>2</sup> уменьшил расход топлива с 40 до 25 кг/ч, диапазон температуры подогрева воздуха  $\Delta t_r = 25-40^\circ\text{C}$ . Для снижения расхода топлива с 25 до 15 кг/ч, что соответствовало диапазону температуры подогрева воздуха  $\Delta t_r = 15-25^\circ\text{C}$ , применяли жиклер с четырьмя отверстиями М3, у которых  $S_3 = 24$  мм<sup>2</sup>.

На замену одного жиклера на другой уходило 3-5 мин. В это время сушилка продолжала работать, так как сушильный агент поступал в нее, нагреваясь в топочном агрегате от запасенного тепла.

Внедрение новой технологии позволило хозяйству сэкономить 2,5 кг топлива на сушке, дезинфекции и дезинсекции каждой тонны поступившего с поля и очищенного зернового вороха. Общая экономия составила 300 тыс. руб. По результатам лабораторной проверки, всхожесть высушенного и отсортированного семенного материала составила 98%.

#### Выводы

1. Использование предложенных сменных жиклеров для форсунки обеспечило стабильную работу жидкотопливного топочного агрегата ТБМ-1,7 в расширенном температурном диапазоне подогрева сушильного агента от 15 до 130°C.

2. Оптимальная длина жиклера составила 4 мм.

3. Жиклеры с гладкими отверстиями непригодны. Работоспособна часть жиклеров, в отверстиях которых нарезана метрическая резьба.

4. Жиклер с четырьмя отверстиями М3 уменьшил расход топлива с 25 до 15 кг/ч при температуре подогрева воздуха от 15 до 25°C, а с тремя отверстиями М4 – с 40 до 25 кг/ч при температуре подогрева воздуха от 25 до 40°C.

*Авторы выражают благодарность генеральному директору ООО «Племзавод «Родина» Лапину Н.В. за предоставление пространства для исследования и финансовую поддержку.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Calín-Sánchez Á., et al. Comparison of traditional and novel drying techniques and its effect on quality of fruits, vegetables and aromatic herbs. *Foods*. 2020. Vol. 9. N9. 1261.
- An K., et al. Comparison of pulsed vacuum and ultrasound osmotic dehydration on drying of Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe): Drying characteristics, antioxidant capacity, and volatile profiles. *Food science & nutrition*. 2019. Vol. 7. N8. 2537-2545.
- Bradford K.J., et al. The dry chain: Reducing postharvest losses and improving food safety in humid climates. *Food Industry Wastes*. 2020. 375-389.
- Волхонов М.С., Зимин И.Б., Драчев Д.Н., Зиновьев А.В. Состояние газификации топочных отделений зерносушилок сельскохозяйственного назначения и перспективы совершенствования // *Известия Великолукской ГСХА*. 2020. N3. С. 40-47
- Селиверстов М.В. К вопросу сушки зерновых материалов и используемого сушильного оборудования // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2018. N11-2. С. 109-112
- Azmir J., Hou Q., Yu A. CFD-DEM simulation of drying of food grains with particle shrinkage. *Powder Technology*. 2019. Vol. 343. 792-802.
- Федоренко И.Я., Землянухина Т.Н., Шилов С.В., Орлова Н.А. Обоснование параметров сушки растительного сырья по критериям качества конечного продукта // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2020. N10(192). С. 105-111.
- Казаков Е.Д., Карпенко Г.П. Биохимия зерна и хлебопродуктов. СПб.: ГИОРД. 2005. 512 с.
- Савиных П.А., Сычугов Ю.В., Казаков В.А. Разработка и внедрение технологий и машин для получения семян трав и зерна // *АгроЭкоИнженерия*. 2020. N3(104). С. 65-75.
- Santos N.C., et al. Study on drying of black rice (*Oryza sativa* L.) grains: physical-chemical and bioactive quality. *Journal of Agricultural Science* (Toronto). 2019. Vol. 11. N9. С. 203-212.
- Ключников А.С. Передовые приемы по механизации производства семян в условиях Ярославской области: Монография. Ярославль: Канцлер. 2022. 90 с.
- Драбкина Е.В., Зуев А.Н. Принцип работы модулированной горелки. Технические и естественные науки. *Сборник избранных статей по материалам Международной научной конференции*. 2020. С. 58-61.
- Абдалиев У.К., Асанов Р.Э., Сатыбалдыев А.Б. Разработка высокоэффективной горелки «Универсал» для композиционных топлив // *Известия Ошского технологического университета*. 2021. N1. С. 101-105
- Васильев А.Ю., Строкин В.Н., Шилова Т.В. Об особенностях керосино-водородной камеры сгорания гибридного газотурбинного двигателя // *Авиационные двигатели*. 2022. N3(16). С. 43-50
- Тихончик С.С., Пучко Н.И. Низконапорная форсунка с аэродинамическим распылом топлива // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. 2020. Т. 65. N3. С. 357-364.

## REFERENCES

- Calín-Sánchez Á., et al. Comparison of traditional and novel drying techniques and its effect on quality of fruits, vegetables and aromatic herbs. *Foods*. 2020. Vol. 9. N9. 1261 (In English).
- An K., et al. Comparison of pulsed vacuum and ultrasound osmotic dehydration on drying of Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe): Drying characteristics, antioxidant capacity, and volatile profiles. *Food science & nutrition*. 2019. Vol. 7. N8. 2537-2545 (In English).
- Bradford K.J., et al. The dry chain: Reducing postharvest losses and improving food safety in humid climates. *Food Industry Wastes*. 2020. 375-389 (In English).
- Volkhonov M.S., Zimin I.B., Drachev D.N., Zinov'ev A.V. Sostoyanie gazifikatsii topochnykh otdeleniy zernosushilok sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya i perspektivy sovershenstvovaniya [Gasification of furnace compartments of agricultural grain dryers and improvement prospects]. *Izvestiya Velikolukskoy GSKHA*. 2020. N3. 40-47 (In Russian).
- Seliverstov M.V. K voprosu sushki zernovykh materialov i ispol'zuemogo sushil'nogo oborudovaniya [To the question of drying grain materials and used drying equipment]. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2018. N11-2. 109-112 (In Russian).
- Azmir J., Hou Q., Yu A. CFD-DEM simulation of drying of food grains with particle shrinkage. *Powder Technology*. 2019. Vol. 343. 792-802 (In English).
- Fedorenko I.Ya., Zemlyanukhina T.N., Shilov S.V., Orlova N.A. Obosnovanie parametrov sushki rastitel'nogo syr'ya po kriteriyam kachestva konechnogo produkta [Substantiation of drying parameters of plant raw materials according to the quality criteria of the end product]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020. N10(192). 105-111 (In Russian).
- Kazakov E.D., Karpenko G.P. Biokhimiya zerna i khleboproduktov [Biochemistry of grain and bakery products]. Saint Petersburg: GIORД. 2005. 512.
- Savinykh P.A., Sychugov Yu.V., Kazakov V.A. Razrabotka i vnedrenie tekhnologiy i mashin dlya polucheniya semyan trav i zerna [Development and implementation of technologies and machines for the production of grass seeds and grain]. *AgroEkoInzheneriya*. 2020. N3(104). 65-75 (In Russian).
- Santos N.C., et al. Study on drying of black rice (*Oryza sativa* L.) grains: physical-chemical and bioactive quality. *Journal of Agricultural Science*. Toronto. 2019. Vol. 11. N9. 203-212 (In English).
- Kliuchnikov A.S. Peredovye priemy po mekhanizatsii proizvodstva semyan v usloviyakh Yaroslavskoy oblasti: Monografiya [Advanced techniques for the mechanization of seed

- production in the Yaroslavl region: Monograph]. Yaroslavl: Kantsler. 2022. 90 (In Russian).
12. Drabkina E.V., Zuev A.N. Printsip raboty modulirovannoy gorelki [The principle of modulating burner operation] *Tekhnicheskie i estestvennye nauki. Sbornik izbrannykh statey po materialam Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. 2020. 58-61 (In Russian).
  13. Abdaliev U.K., Asanov R.E., Satybaldyev A.B. Razrabotka vysokoeffektivnoy gorelki «Universal» dlya kompozitsionnykh topliv [Development of highly efficient “Universal” burner for composite fuels]. *Izvestiya Oshskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2021. N1. 101-105 (In Russian).
  14. Vasil'ev A.Yu. Strokin V.N., Shilova T.V. Ob osobennostyakh kerosino-vodorodnoy kamery sgoraniya gibridnogo gazoturbinnogo dvigatelya [On the features of a kerosene-hydrogen combustion chamber of a hybrid gas turbine engine]. *Aviatsionnye dvigateli*. 2022. N3(16). 43-50 (In Russian).
  15. Tikhonchik S.S., Puchko N.I. Nizkonapornaya forsunka s aerodinamicheskimi raspylom topliva [Low-pressure nozzle with aerodynamic fuel atomization]. *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk*. 2020. Vol. 65. N3. 357-364 (In Russian).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Заявленный вклад соавторов:

Ключников А.С. – подготовка текста статьи, анализ экспериментальных результатов, разработка конструкции жиклера;

Лапин Е.Н. – проведение испытаний жиклеров, анализ экспериментальных результатов.

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

#### Coauthors' contribution:

Kliuchnikov A.S. – manuscript preparation, experimental results analysis, jet design development.

Lapin E.N. – jet testing, experimental results analysis

*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

21.12.2022  
10.02.2023

## Диагностирование опорных узлов трансмиссии на основе изучения термонагруженности

**Александр Геннадиевич Пастухов,**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой,  
e-mail: pastukhov\_ag@mail.ru;

**Евгений Петрович Тимашов,**  
доктор технических наук, доцент,  
e-mail: timachov@mail.ru

Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина, Белгородская область, Российская Федерация

**Реферат.** Отметили, что рабочая температура узла трансмиссии влияет на показатели его надежности и может служить диагностическим критерием. С целью учета влияния на диагностическую температуру узла температуры воздуха, нагрева от солнечной радиации и смежных тепловыделяющих объектов предложили диагностировать техническое состояние по величине температуры в зоне трения. (*Цель исследования*) Обеспечить контролепригодность подшипникового узла на основе изучения термонагруженности. (*Материалы и методы*) Использовали результаты расчета номинальной и эксплуатационной нагруженности заднего вала отбора мощности трактора Беларус-82.1. Применили трехмерное моделирование и конечно-элементный анализ распределения температуры в условиях стационарной теплопроводности. Для поиска функциональной зависимости между температурой в зоне трения и диагностической температурой задействовали метод конечно-элементного анализа в условиях стационарной теплопроводности. (*Результаты и обсуждение*) Для подшипника редуктора вала отбора мощности 60310А определили максимальные нагрузочные режимы и температуры в зоне трения при агрегатировании с различными сельхозмашинами: садовой фрезой ФС-2,0У (540 оборотов в минуту) – 4300 Ньютонов и 2,4 градуса Цельсия; оросительным насосом Rovatti ТЗК80/90/2 (540) – 4126 и 40,7; разбрасывателем органических удобрений РОУ-6 (1000) – 956 и 13,0; косилкой-плющилкой КПРН-3,0А (1000) – 2615 Ньютонов и 36,6 градуса Цельсия. Установили диагностический критерий – предельную температуру в зоне трения, которая равна: при частоте вращения коленчатого вала двигателя 540 оборотов в минуту – 41,7 градуса Цельсия, при 1000 оборотах в минуту – 31 градус Цельсия. (*Выводы*) Поскольку непосредственное измерение температуры в зоне трения практически невозможно без изменения конструкции подшипников, предложили определять диагностическую температуру на поверхности узла, применимой для монтажа датчика температуры. Определили коэффициент пропорциональности конечно-элементной модели, равный 0,53. С целью практической реализации диагностирования в автоматическом режиме разработали алгоритм цифрового регистратора неисправности трансмиссии. Изготовили его конструкцию на базе программируемого микроконтроллера *Atmega328* и датчиков температуры *ТМР36*. Установили, что цифровой регистратор неисправности трансмиссии обеспечивает автоматический контроль до семи разных узлов трансмиссии одновременно с учетом температуры окружающего воздуха.

**Ключевые слова:** вал отбора мощности, цифровой регистратор неисправности трансмиссии, конечно-элементный анализ, контролепригодность подшипникового узла, термодиагностика, термонагруженность, трактор, опорные узлы трансмиссии.

■ **Для цитирования:** Пастухов А.Г., Тимашов Е.П. Диагностирование опорных узлов трансмиссии на основе изучения термонагруженности // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №2. С. 61-68. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-61-68. EDN UHICBZ.

## Diagnostics of Transmission Bearing Units Based on Thermal Load Study

**Aleksandr G. Pastukhov,**  
Dr.Sc.(Eng.), professor, head of department,  
e-mail: pastukhov\_ag@mail.ru;

**Evgeniy P. Timashov,**  
Dr.Sc.(Eng.), associate professor,  
e-mail: timachov@mail.ru

Belgorod State Agricultural University named after V. Gorin, Belgorod region, Russian Federation

**Abstract.** The operating temperature of the transmission unit is noted to affect its reliability and can serve as a diagnostic criterion. It is proposed to diagnose the transmission unit technical condition by the temperature in the friction zone in order to take into

account the influence of air temperature, solar radiation heating and adjacent heat-producing objects. (Research purpose) To ensure the bearing unit controllability based on the thermal load study. (*Materials and methods*) The study uses the results of calculating the nominal and operational load of the rear power take-off shaft of the Belarus-82.1 tractor. The study uses the three-dimensional modeling and finite element analysis of the temperature distribution under steady-state thermal conductivity conditions. To establish the functional relationship between the temperature in the friction zone and the diagnostic temperature, the method of finite element analysis is used under steady-state thermal conductivity conditions. (*Results and discussion*) The maximum load modes and temperatures in the friction zone were determined for the 60310A bearing of the power take-off shaft gearbox during aggregation with different agricultural machines such as 4300 Newtons and 2.4 degrees Celsius for FS-2.0U garden cutter (540 revolutions per minute); 4126 Newtons and 40.7 degrees Celsius for Rovatti T3K80/90/2 (540 revolutions per minute) irrigation pump; 956 Newtons and 13.0 degrees Celsius for ROU-6 (1000) manure spreader; 2615 Newtons and 36.6 degrees Celsius for KPRN-3.0A (1000) mower-conditioner. The maximum temperatures as a diagnostic criterion are established in the friction zone, which equal to 41.7 degrees Celsius at 540 revolutions per minute engine speed and 31 degrees Celsius at 1000 revolutions per minute. (*Conclusions*) Since the direct measurement of the temperature in the friction zone is hardly possible without changing the bearings design, it is proposed to measure the diagnostic temperature on the unit used for mounting the temperature sensor. The coefficient of proportionality  $k=0.53$  of the finite element model is determined. In order to implement diagnostics in an automatic mode, an algorithm is developed for a digital transmission malfunction recorder. Its design is based on the ATmega328 programmable microcontroller and TMP36 temperature sensors. It is found that the digital transmission malfunction recorder provides automatic control of up to seven different transmission units simultaneously, taking into account the ambient temperature. **Keywords:** power take-off shaft, digital transmission malfunction recorder, finite element analysis, bearing unit controllability, thermal diagnostics, thermal load, tractor, transmission bearing units.

■ **For citation:** Pastukhov A.G., Timashov E.P. Diagnostirovanie opornykh uzlov transmissii na osnove izucheniya termonagruzhennosti [Diagnostics of transmission bearing units based on thermal load study]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N2. 61-68 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-61-68. EDN UHICBZ.

**Т**епловой режим и термонагруженность узлов трансмиссии возникают в результате трения, нагрева узлов от сопряженных источников теплоты, теплообмена с окружающей средой и нагрева от солнечной радиации [1, 2]. Свойства смазочных материалов, применяемых в опорных подшипниковых узлах трансмиссии, в значительной степени зависят от температурного режима [3]. Таким образом, с одной стороны, рабочая температура узла трансмиссии влияет на показатели его надежности, а с другой стороны, температура узла может служить диагностическим критерием. Прямое применение методов термодиагностики к подшипниковым узлам существенно затруднено вследствие комплекса вышеупомянутых факторов, которые формируют итоговую диагностическую температуру. Для разрешения этой проблемы предлагается вычлениить из диагностической температуры все факторы, за исключением нагрева из-за трения. Определение температуры, вызванной работой сил трения узла, необходимо для оценки его технического состояния. Предельной температурой в зоне трения подшипниковых узлов на основании эмпирических исследований принята величина 215-250°C [4].

Измерение температуры подшипниковых узлов при диагностировании служит косвенным методом, связанным с рабочими процессами узла. Расчет теоретической величины температуры в зоне трения необходим для принципиальной оценки применимости термодиагностики для конкретного подшипниково-

го узла. Получение адекватных результатов теоретической температуры в зоне трения при номинальных нагрузках свидетельствует о возможности использования термодиагностики.

Электронные датчики температуры в комплексе с программируемыми контроллерами открывают широкие перспективы для автоматизации диагностирования подшипниковых узлов трансмиссии [5-8]. Например, с помощью одного контроллера на базе процессора *ATmega328* можно одновременно диагностировать до семи подшипниковых узлов, работающих в различных условиях.

**Цель исследования** – обеспечение контролепригодности подшипникового узла на основе изучения термонагруженности.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Использовали результаты расчета номинальной и эксплуатационной нагруженности заднего вала отбора мощности (ВОМ) трактора Беларусь-82.1 [9]. Применили трехмерное моделирование и конечно-элементный анализ распределения температуры в условиях стационарной теплопроводности.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Задний ВОМ трактора Беларусь-82.1 может обеспечить привод сельскохозяйственных машин в синхронном и асинхронном режиме. При асинхронном (независимом) приводе и номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя  $2100 \text{ мин}^{-1}$ , трансмиссия обеспечивает две частоты вращения ВОМ – 540 и  $1000 \text{ мин}^{-1}$ . При номинальной механической мощности ВОМ 55 кВт крутя-

щие моменты составят:  $T^{540}=973$  Нм и  $T^{1000}=525$  Нм. В условиях реальной эксплуатации величины номинальных нагрузок могут быть превышены, поэтому примеры расчетов проведем для нескольких машин, потребляющих механическую мощность от ВОМ трактора в реальных эксплуатационных условиях.

При расчете эксплуатационных нагрузок использовано агрегатирование с машинами:

- садовой фрезой ФС-2,0У;
- оросительным насосом *Rovatti* ТЗК80/90/2;
- разбрасывателем органических удобрений РОУ-6;
- косилкой-плющилкой КПРН-3,0А.

Рассмотрим каждый случай отдельно.

В варианте с садовой фрезой частота вращения ВОМ равна  $504 \text{ мин}^{-1}$ , удельные затраты энергии при движении агрегата со скоростью  $0,8 \text{ м/с}$  составляют  $140 \text{ кДж/м}^3$ . Рассчитаем затраты энергии на обработку  $1 \text{ м}$  при ширине захвата  $2,0 \text{ м}$  и глубине обработки  $0,2 \text{ м}$ :  $2,0 \times 0,2 \times 1,0 \times 140 = 56 \text{ кДж}$ , то есть потребляемая мощность с учетом скорости агрегата  $56 \times 0,8 = 44,8 \text{ кВт}$ . В этом случае крутящий момент составит  $T_1^{540} = 56000 : 56,5 = 990 \text{ Нм}$ .

При агрегатировании с оросительным насосом частота вращения ВОМ –  $504 \text{ мин}^{-1}$ , потребляемая мощность –  $73 \text{ л.с. (53,7 кВт)}$ . Крутящий момент равен  $T_2^{540} = 53700 : 56,5 = 950 \text{ Нм}$ .

В случае с разбрасывателем органических удобрений РОУ-6, когда частота вращения ВОМ на уровне  $1000 \text{ мин}^{-1}$ , максимальная мощность достигает  $23 \text{ кВт}$ , а крутящий момент равен  $T_3^{1000} = 23000 : 104,67 = 220 \text{ Нм}$ .

При работе с косилкой-плющилкой частота вращения ВОМ составит  $1000 \text{ мин}^{-1}$ , ее паспортная мощность –  $44 \text{ кВт}$ . Тогда крутящий момент составит  $T_4^{1000} = 44000 : 104,67 = 418 \text{ Нм}$ . Однако косилка может эксплуатироваться на густых травостоях урожайностью до  $25 \text{ т/га}$ , рабочая скорость будет не более  $0,972 \text{ м/с}$ . Удельная работа резания для таких условий составит  $21,6 \times 103 \text{ Дж/м}^2$ . Тогда удельная мощность составит  $21 \text{ кВт/м}$ , а мощность при ширине захвата  $3 \text{ м}$  –  $63 \text{ кВт}$ . В этом случае максимальный крутящий момент  $T_4^{1000 \text{ max}} = 63000 : 104,67 = 602 \text{ Нм}$ .

Поперечная сила, действующая на вал редуктора ВОМ, образуется при его включении, зависит от крутящего момента и диаметра вращения осей сателлитов  $d = 120 \text{ мм}$  и определяется по формуле:  $F = 2T/d$ .

Результаты расчета поперечной силы для режимов:

$$F_1^{540} = 2 \times 990/0,12 = 16500 \text{ Н};$$

$$F_2^{540} = 2 \times 950/0,12 = 15833 \text{ Н};$$

$$F_3^{1000} = 2 \times 220/0,12 = 3667 \text{ Н};$$

$$F_4^{1000 \text{ max}} = 2 \times 602/0,12 = 10033 \text{ Н}.$$

Рассчитаем реакцию в опоре  $B$  как радиальную силу, действующую на подшипник редуктора ВОМ 60310А ГОСТ 7242-81 (рис. 1):

$$R_1^{540} = 4300 \text{ Н};$$

$$R_2^{540} = 4126 \text{ Н};$$

$$R_3^{1000} = 956 \text{ Н};$$

$$R_4^{1000} = 2615 \text{ Н}.$$

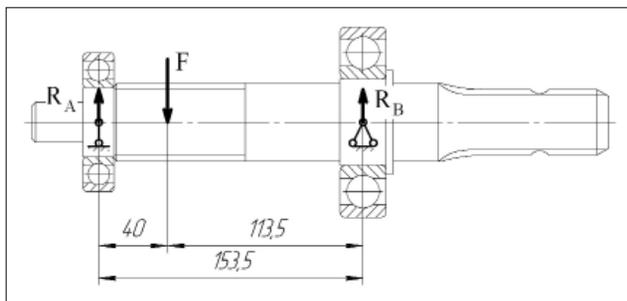


Рис. 1. Определение радиальной силы для подшипника 60310:  $R_A, R_B$  – реакции подшипников опор;  $F$  – поперечная сила  
Fig. 1. Determining the radial force for 60310bearing:  $R_A, R_B$  – reactions of bearing supports,  $F$  – transverse force

Расчеты теоретической величины температуры в зоне трения для подшипников качения вызывают существенные затруднения, поэтому применим условное приведение подшипника качения к подшипнику скольжения и воспользуемся математической моделью А.Д. Дубинина (рис. 2):

$$\Theta_F = \frac{\delta f F \omega}{2h \left( \lambda \sqrt{\frac{2\alpha(h+\pi r)}{\lambda h \pi r}} + k' \rho c \cdot 2,6 \sqrt{\frac{a \omega r}{\lambda_d}} \right)}, \quad (1)$$

где  $\Theta_F$  – температура в зоне трения,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\delta$  – коэффициент распределения теплоты между трущимися телами;

$f$  – коэффициент трения;

$F$  – нагрузка на подшипник, Н;

$\omega$  – угловая скорость,  $\text{с}^{-1}$ ;

$h$  – длина шипа, м;

$r$  – радиус шипа, м;

$\lambda$  – теплопроводность,  $\text{Вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи поверхности,  $\text{Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;

$k'$  – коэффициент пропорциональности;

$\rho$  – плотность материала  $\text{кг/м}^3$ ;

$c$  – удельная теплоемкость  $\text{Дж/кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;

$a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\lambda_d$  – длина волны неровностей на трущейся поверхности, м.

При приведении размеров подшипника параметр  $h$  (длина шипа) приравнивается к ширине кольца подшипника, а радиус  $r$  вычисляется из выражения:

$$r = \frac{1}{4}(D + d), \text{ где } D, d - \text{ наружный и внутренний диаметр подшипника соответственно.}$$

На основании формулы (1) и теплофизических характеристик материалов разработана компьютерная программа – калькулятор температуры в зоне трения подшипниковых узлов (рис. 3). При использовании программы вводят величины размеров подшипника, причем радиус шипа  $r$  вычисляется алгоритмом программы. Затем вводят величины радиальной силы и частоты вращения. При необходимости можно скор-

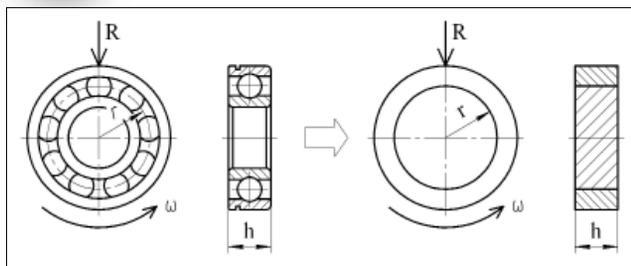
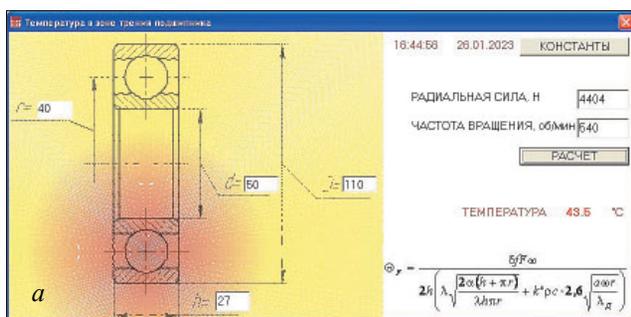


Рис. 2. Приведение размеров подшипника качения к размерам подшипника скольжения:  $R$  – радиальная нагрузка подшипника;  $r$  – радиус шипа;  $h$  – длина шипа;  $\omega$  – угловая скорость  
 Fig. 2. Reducing the rolling bearing dimensions to the sliding bearing dimensions:  $R$  – bearing radial load,  $r$  – axle radius,  $h$  – axle length,  $\omega$  – angular velocity



а

б

ПОСТОЯННЫЕ. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РАСЧЕТЕ:			
Коэффициент распределения теплоты между трущимися телами	-	$\xi$	0,5
Коэффициент трения	-	$f$	0,075
Коэффициент теплопроводности	$\frac{Вт}{м \cdot К}$	$\lambda$	45,4
Коэффициент теплоотдачи поверхности	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\alpha$	7,9
Коэффициент пропорциональности	-	$k'$	1
Плотность материала	$\frac{кг}{м^3}$	$\rho$	7800
Удельная теплоемкость	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$	$c$	0,115
Коэффициент температуропроводности	$\frac{м^2}{с}$	$a$	0,00001172
Длина волны неровностей на трущейся поверхности	м	$\lambda_d$	0,00001

Рис. 3. Рабочие окна программы: а – основное окно программы; б – справочная таблица постоянных величин  
 Fig. 3. Program work windows: а – program main window; б – reference table of constants

ректировать постоянные величины, используемые в расчете, например при замене материала подшипника. После нажатия кнопки «Расчет» на экран выводится величина температуры в зоне трения.

С учетом размеров подшипника 60310А  $d = 50$  мм,  $D = 110$  мм,  $h = 27$  мм и нагрузок  $R_1$ - $R_4$  при соответствующих частотах вращения получены следующие величины температуры в зоне трения:

- садовая фреза ФС:  $\Theta_1^{540} = 42,4^\circ\text{C}$ ;
- оросительный насос Rovatti ТЗК80/90/2:  $\Theta_2^{540} = 40,7^\circ\text{C}$ ;
- разбрасыватель органических удобрений РОУ-6:  $\Theta_3^{1000} = 13,0^\circ\text{C}$ ;
- косилка-плющилка КПРН-3,0А:  $\Theta_4^{1000} = 36,6^\circ\text{C}$ .

Аналогичный расчет проведем для максимальных

нагрузок при номинальной механической мощности ВОМ:

- крутящие моменты  $T^{540} = 973$  и  $T^{1000} = 525$  Нм;
- поперечные силы  $F^{540} = 16217$  Н и  $F^{1000} = 8750$  Н;
- радиальные силы, действующие на подшипник,  $R^{540} = 4226$  Н и  $R^{1000} = 2280$  Н;
- номинальные температуры в зоне трения  $\Theta^{540} = 41,7^\circ\text{C}$  и  $\Theta^{1000} = 31,0^\circ\text{C}$ .

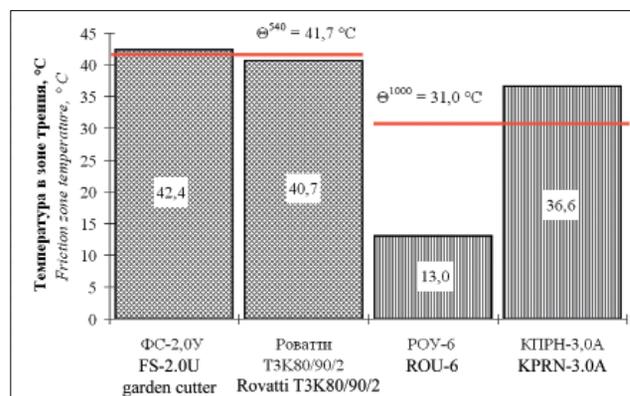


Рис. 4. Результаты расчета температуры в зоне трения  
 Fig. 4. Friction zone temperature calculation results

В зоне трения величины температур при номинальной механической мощности превышены в случае агрегатирования садовой фрезы ФС-2,0У и косилки-плющилки КПРН-3,0А (рис. 4). Это объясняется чрезмерным ростом номинальных крутящих моментов, возможным при кратковременных увеличениях нагрузки на рабочие органы сельскохозяйственных машин в эксплуатации. Кратковременное превышение номинальных температур в зоне трения не сможет повлиять на температуру поверхности узла из-за тепловой инерции. Однако длительное превышение номинальных температур можно принять как диагностический критерий. Таким образом, наряду с предельной величиной температуры в зоне трения 215-250°C, для подшипника ВОМ предельной температурой в зоне трения при частоте вращения 540 мин<sup>-1</sup> можно считать 41,7°C, а для частоты вращения 1000 мин<sup>-1</sup> – 31,0°C.

Непосредственное измерение температуры в зоне трения  $\Theta_F$  практически невозможно без изменения конструкции подшипников, поэтому предлагается измерять диагностическую температуру  $\Theta_D$  на поверхности узла, применимой для монтажа датчика температуры. Для установления функциональной зависимости между  $\Theta_F$  и  $\Theta_D$  традиционно используют методики расчета теплового баланса. Такие расчеты достаточно трудоемки, поэтому воспользуемся методом конечно-элементного анализа в условиях стационарной теплопроводности при установившихся значениях температур при прогревом подшипниковом узле, который выведен на номинальный режим работы.

Тепловой расчет проведем на трехмерной модели

подшипникового узла (рис. 5а). Модель состоит из подшипника 60310А, вала редуктора ВОМ и крышки. Диагностическую температуру  $\Theta_D$  целесообразно измерять на поверхности крышки, в непосредственной близости к подшипнику. Конечно-элементный анализ проводили в программе *Компас-3D V21* с прикладной библиотекой *APM FEM*. Модель разбили на сетку конечных элементов (рис. 5б). При моделировании температурные нагрузки прилагали к телам качения – шарикам подшипника, поверхностям вала и крышки, за исключением зоны для измерения диагностической температуры  $\Theta_D$ , где устанавливали температуру 0°C.

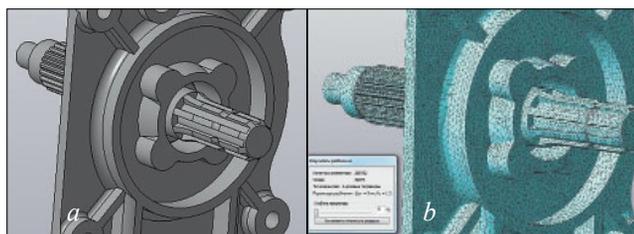


Рис. 5. Модель подшипникового узла: а – модель узла; б – сетка конечных элементов

Fig. 5. Bearing unit model: a – unit model; b – finite element grid

Численный эксперимент проводили многократно, с установлением температуры в зоне трения от 0 до 240°C и измерением диагностической температуры  $\Theta_D$  на поверхности крышки.

Карта температурных полей показывает, что поверхность крышки в непосредственной близости от подшипника пригодна для измерения диагностической температуры (рис. 6а). На разрезе подшипникового узла наглядно представлено распределение температуры от зоны трения к поверхности крышки – зоне, пригодной для измерения диагностической температуры (рис. 6б).

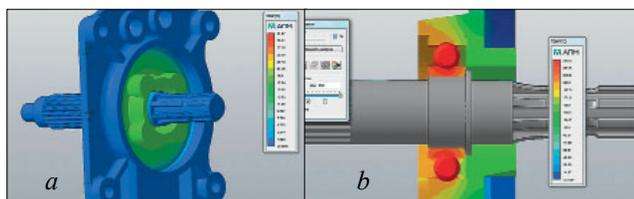


Рис. 6. Результаты конечно-элементного анализа: а – общий вид узла с картой температурных полей; б – разрез подшипникового узла

Fig. 6. Finite element analysis results: a – a unit general view with a map of temperature fields; b – the bearing unit section

Диагностическая температура при имитационном моделировании зависит от температуры в зоне трения (рис. 7).

Аппроксимация данных графика показывает, что при увеличении температуры в зоне трения на 1°C диагностическая температура увеличивается на 0,53°C.

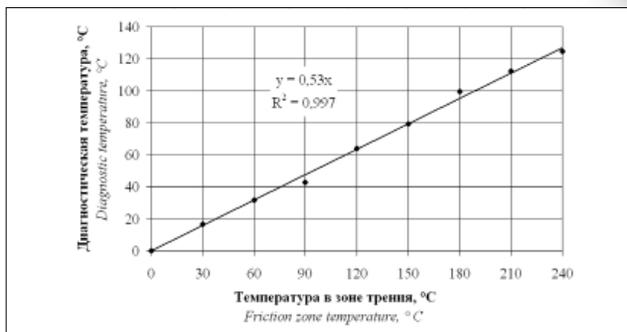


Рис. 7. Зависимость диагностической температуры от температуры в зоне трения

Fig. 7. Dependence of the diagnostic temperature on the friction zone temperature

Таким образом, для косвенного вычисления температуры в зоне трения можно использовать коэффициент пропорциональности конечно-элементной модели  $k = 0,53$ , а температуру в зоне трения определять из выражения  $\Theta_F = \Theta_D/k$ . Полученные результаты расчетов температуры в зоне трения и диагностической температуры сопоставимы с данными других исследований [10-12].

С учетом полученного коэффициента пропорциональности конечно-элементной модели диагностическая температура  $\Theta_D$  для ВОМ составит:

- садовая фреза ФС – 22,5°C;
- оросительный насос *Rovatti* ТЗК80/90/2 – 21,6°C;
- разбрасыватель органических удобрений РОУ-6 – 6,9°C;
- косилка-плющилка КПРН-3,0А – 19,4°C.

Приведенные величины даны без учета температуры окружающей среды, поэтому при диагностировании необходимо делать поправку на температуру воздуха. При этом нужно от измеренной температуры  $\Theta$  отнимать температуру воздуха  $\Theta_0$ , а полученную диагностическую температуру  $\Theta_D$  делить на коэффициент  $k = 0,53$ . В итоге получим температуру в зоне трения  $\Theta_F$ , пригодную для сравнения с допустимой температурой  $\Theta_L$ :

$$\Theta_F = \frac{\Theta - \Theta_0}{k} \leq \Theta_L. \quad (2)$$

На основе разработанных положений реализован алгоритм работы цифрового регистратора неисправности трансмиссии (RU 209268) (рис. 8). При написании программного кода (RU 2022618385) устанавливают постоянные значения для предельной температуры, коэффициента пропорциональности конечно-элементной модели, временного интервала между измерениями и предельной скорости изменения температуры.

Разработанный алгоритм позволяет выполнять двухуровневый контроль диагностируемого узла: по достижению предельной температуры и по достижению предельной скорости изменения температуры. Первый датчик установлен в зоне, пригодной для из-

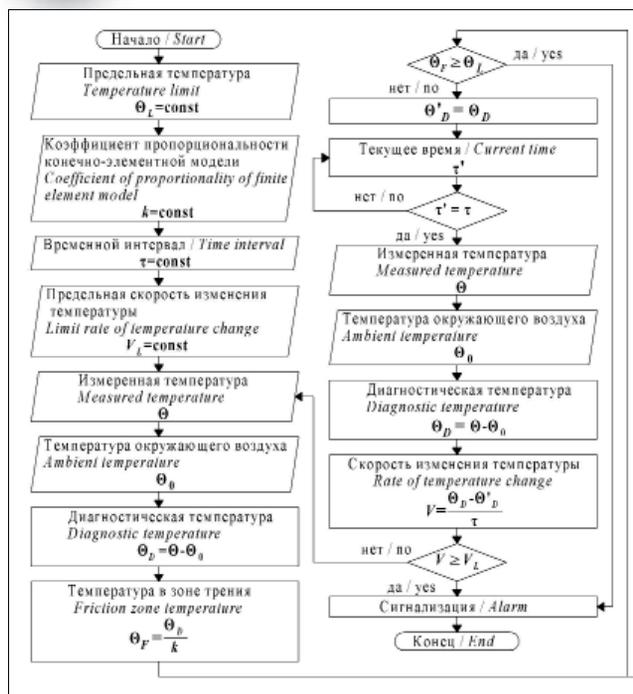


Рис. 8. Алгоритм работы цифрового регистратора неисправности трансмиссии

Fig. 8. Operation algorithm of the digital transmission malfunction recorder

мерения диагностической температуры, второй датчик регистрирует температуру окружающего воздуха. Затем вычисляется диагностическая температура с учетом поправки на температуру окружающего воздуха и температура в зоне трения, после чего проводится сравнение температуры в зоне трения с предельным значением. Если условие выполняется, то включаются световая индикация и звуковая сигнализация, в противном случае величина диагностической температуры заносится в память. Через заданный временной интервал следует повторное измерение двумя датчиками, вычисляются новая диагностическая температура и скорость изменения температуры с учетом величины диагностической температуры из памяти и промежутка времени между измерениями. Если скорость изменения температуры больше предельной, то включаются световая индикация и звуковая сигнализация, иначе – проводятся новые измерения температуры и алгоритм повторяется.

Практическая реализация технологического процесса термодиагностики подшипниковых узлов представлена разработкой прибора – цифрового регистратора неисправности трансмиссии, при конструировании которого использованы датчики температуры TMP36 и микроконтроллер ATmega328 (рис. 9, 10). К аналоговым входам A0 и A1 микроконтроллера DD1 подключены датчики температуры DD2 и DD3, питание которых осуществлено от выводов 5V и GND микроконтроллера. К цифровому выводу D4 через ограничительный резистор R1 подключен светодиод AL1

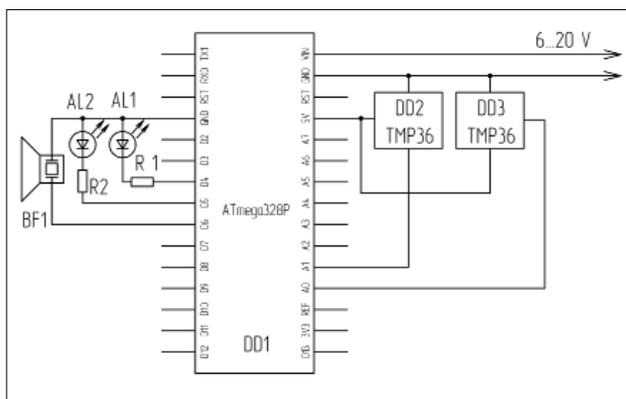


Рис. 9. Принципиальная схема цифрового регистратора неисправности трансмиссии (описание в тексте статьи)

Fig. 9. Schematic diagram of the digital transmission malfunction recorder

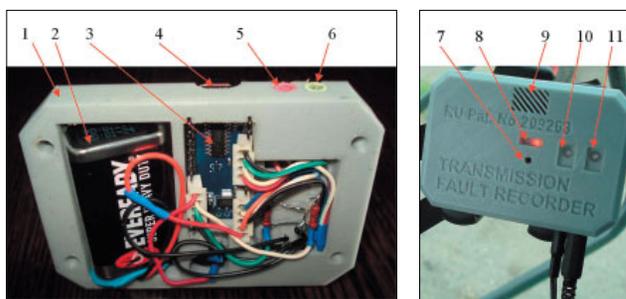


Рис. 10. Цифровой регистратор неисправности трансмиссии: а – открытый корпус; б – общий вид: 1 – корпус; 2 – батарея для автономного питания; 3 – плата микроконтроллера ATmega328; 4 – разъем USB; 5 – разъем для подключения датчика температуры диагностируемого узла; 6 – разъем для подключения датчика температуры; 7 – отверстие кнопки сброса; 8 – индикатор работы регистратора; 9 – решетка активного зуммера; 10 – индикатор превышения предельной температуры; 11 – индикатор превышения предельной скорости роста температуры

Fig. 10. Digital transmission malfunction recorder: a - view of the open housing; b - general view: 1 – housing; 2 – battery for autonomous power supply; 3 – ATmega328 microcontroller board; 4 – USB connector; 5 – connector for the diagnosed unit temperature sensor; 6 – connector for the temperature sensor; 7 – reset button hole; 8 – recorder operation indicator; 9 – active buzzer grille; 10 – indicator of exceeding the limit temperature; 11 – indicator of exceeding the limit temperature growth rate

индикации превышения предельной температуры, а к цифровому выводу D5 через ограничительный резистор R2 – светодиод AL2 индикации превышения предельной скорости изменения температуры. К цифровому выводу D6 подключен активный зуммер BF1. Для обеспечения питания от бортовой сети сельскохозяйственной техники или автономного питания от батареи задействованы выводы GND и VIN. Свободные аналоговые входы A2-A7 позволяют подключить еще шесть датчиков температуры для диагностики разных узлов трансмиссии.

При программировании контроллера проводится тарировка датчиков температуры: *DD2* – диагностируемого узла, *DD3* – окружающего воздуха. Кроме этого, программируются режимы включения светодиодов *AL1*, *AL2* и активного зуммера *BFI*.

### Выводы

1. Для подшипника редуктора ВОМ 60310А определили максимальные нагрузочные режимы и температуры в зоне трения при агрегатировании с различными сельхозмашинами:

- садовой фрезой ФС-2,0У (540 мин<sup>-1</sup>) – 4300 Н и 2,4°C;
- оросительным насосом *Rovatti* ТЗК80/90/2 (540 мин<sup>-1</sup>) – 4126 Н и 40,7°C;
- разбрасывателем органических удобрений РОУ-6 (1000 мин<sup>-1</sup>) – 956 Н и 13,0°C;

- косилкой-плющилкой КППН-3,0А (1000 мин<sup>-1</sup>) – 2615 Н и 36,6°C.

2. Установили диагностический критерий – предельную температуру в зоне трения: при 540 мин<sup>-1</sup> – 41,7°C; 1000 мин<sup>-1</sup> – 31,0°C.

3. Применили конечно-элементный анализ для определения зон, пригодных для измерения температуры, и установили зависимость между диагностической температурой на поверхности и температурой в зоне трения – коэффициент пропорциональности, равный 0,53.

4. Разработали алгоритм и принципиальную схему, изготовили и апробировали цифровой регистратор неисправности трансмиссии для автоматического диагностирования узлов трансмиссии.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gabitov I., Negovora A., Nigmatullin S., et al. Development of a method for diagnosing injectors of diesel engines. *Коммуникация*. 2021. Vol. 23. N1. B46-B57.
2. Костомахин М.Н. Оценка режимов работы сельскохозяйственной техники // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N4. С. 78-83.
3. Kostomakhin M.N., Kataev Y.V., Petrishchev N.A., et al. System for Remote Monitoring of Tractors and Detection of Their Incorrect Operation. *Russian Engineering Research*. 2022. Vol. 42. N4. 360-364.
4. Pastukhov A., Timashov E., Parnikova T., Kravchenko I. Thermometric diagnostics of elements of reaper drive for sunflower harvesting. *Engineering for Rural Development*. 2021. 20. 43-48.
5. Ерохин М.Н., Дорохов А.С., Катаев Ю.В. Интеллектуальная система диагностирования параметров технического состояния сельскохозяйственной техники // *Агроинженерия*. 2021. N2(102). С. 45-50.
6. Костомахин М.Н., Петрищев Н.А., Саяпин А.С. Система дистанционного контроля технического состояния на примере коробки перемены передач трактора «Кировец» // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N3. С. 22-27.
7. Федоренко В.Ф., Таркинский В.Е. Цифровые беспроводные технологии для оценки показателей сельскохозяйственной техники // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N1. С. 10-15.
8. Pestryakov E.V., Sayapin A.S., Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A. Analysis of the Technical Condition of Agricultural Machinery Using Neural Networks. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022. Vol. 121. 92-101.
9. Lazar V.V., Skorokhodov D.M., Kazantsev S.P., et al. Quality assessment of spare parts for the final drive reduction gear used in the MTZ-82.1 tractors. *Journal of Physics: Conference Series*, Krasnoyarsk, 2020. 42058.
10. Szurgacz D., Zhironkin S., Vöth S., Pokorny J., Spearing A.J.S., Cehlar M., Stempniak M., Sobik L. Thermal Imaging Study to Determine the Operational Condition of a Conveyor Belt Drive System Structure. *Energies*. 2021. N14. 3258.
11. Stempniak M., Zhironkin V., Trzop K., Szurgacz D. Preliminary research to determine the thermal condition of the belt conveyor's drive unit in an underground hard coal mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. 684. 012010.
12. Jakubek B., Grochalski K., Rukat W., Sokol H. Thermovision Measurements Of Rolling Bearings. *Measurement*. 2021. 110512.

### REFERENCES

1. Gabitov I., Negovora A., Nigmatullin S., et al. Development of a method for diagnosing injectors of diesel engines. *Коммуникация*. 2021. Vol. 23. N1. B46-B57 (In English).
2. Kostomakhin M.N. Otsenka rezhimov raboty sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Evaluation of agricultural machinery operation modes]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N4. 78-83 (In Russian).
3. Kostomakhin M.N., Kataev Y.V., Petrishchev N.A., et al. System for Remote Monitoring of Tractors and Detection of Their Incorrect Operation. *Russian Engineering Research*. 2022. Vol. 42. N4. 360-364 (In English).
4. Pastukhov A., Timashov E., Parnikova T., Kravchenko I. Thermometric diagnostics of elements of reaper drive for sunflower harvesting. *Engineering for Rural Development*. 2021. 20. 43-48 (In English).
5. Erokhin M.N., Dorokhov A.S., Kataev Yu.V. Intellektual'naya sistema diagnostirovaniya parametrov tekhnicheskogo sostoyaniya sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Intelligent system for diagnosing the parameters of the technical condition of tractors]. *Agroinzheneriya*. 2021. N2(102). 45-50 (In Russian).

6. Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A., Sayapin A.S. Sistema distantsionnogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya na primere korobki peremeny peredach traktora «Kirovets» [A system for the remote monitoring of vehicle technical condition: Kirovets tractor gearbox case study]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N3. 22-27 (In Russian).
7. Fedorenko V.F., Tarkivskiy V.E. Tsifrovye besprovodnye tekhnologii dlya otsenki pokazateley sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Digital wireless technology to measure agricultural performance]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N1. 10-15 (In Russian).
8. Pestryakov E.V., Sayapin A.S., Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A. Analysis of the Technical Condition of Agricultural Machinery Using Neural Networks. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022. Vol. 121. 92-101 (In English).
9. Lazar V.V., Skorokhodov D.M., Kazantsev S.P., et al. Quality assessment of spare parts for the final drive reduction gear used in the MTZ-82.1 tractors. *Journal of Physics: Conference Series*. Krasnoyarsk. 2020. 42058 (In English).
10. Szurgacz D., Zhironkin S., Vöth S., Pokorny J., Spearing A.J.S., Cehlar M., Stempniak M., Sobik L. Thermal Imaging Study to Determine the Operational Condition of a Conveyor Belt Drive System Structure. *Energies*. 2021. N14. 3258 (In English).
11. Stempniak M., Zhironkin V., Trzop K., Szurgacz D. Preliminary research to determine the thermal condition of the belt conveyor's drive unit in an underground hard coal mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. 684. 012010 (In English).
12. Jakubek B., Grochalski K., Rukat W., Sokol H. Thermovision Measurements Of Rolling Bearings. *Measurement*. 2021. 110512 (In English).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Заявленный вклад соавторов:

Пастухов А.Г. – общая корректировка текста; критический пересмотр статьи в части значимого интеллектуального содержания; окончательное одобрение варианта статьи для опубликования;

Тимашов Е.П. – существенный вклад в замысел и дизайн исследования; сбор данных, анализ и интерпретация данных; подготовка статьи.

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

#### Coauthors' contribution:

Pastukhov A.G. – general text correction; critical revision of the paper in terms of its intellectual significance; proofreading of the final draft

Timashov E.P. – research concept and design; data collection, analysis and interpretation; preparing the paper.

*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  
02.03.2023

## Моделирование трибологических процессов абразивного износа почворежущих деталей

**Виктор Иванович Мяленко,**  
доктор технических наук, профессор,  
e-mail: library82@ksai.ru

Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия, г. Кемерово, Российская Федерация

**Реферат.** Показали, что имитационное моделирование физических процессов дает возможность изучить взаимодействие почворежущих деталей с почвой в течении 2-6 часов наблюдений, когда требуется сжатие временной шкалы на создание новой конструкции. (*Цель исследования*) Разработать модели трибологического процесса абразивного износа почворежущих деталей на основе совмещения имитационного нагружения поверхностей трения с параметрами силовых эквивалентов реальных почв при последующей эксплуатации. (*Материалы и методы*) Применили метод имитационного нагружения. На примере плоских эпюр нагружения использовали метод сопоставления силовых эквивалентов имитационного и реального нагружения поверхностей трения почворежущей детали. Описали особенности нестандартного лабораторного оборудования, обеспечивающего построение эпюр нормальных давлений по поверхностям трения. В качестве опытного образца исследовали прямой клин-рыхлитель. (*Результаты и обсуждение*) Установили эпюры нагружения поверхности трения при изменении углов рыхления, при этом площадь эпюры давления изменялась от 2000 до 12000 квадратных миллиметров. Определили величины силовых эквивалентов, действующих со стороны реальных почв предполагаемых зон эксплуатации. Отметим, что совмещение характеристик имитационного нагружения рабочих органов с параметрами силовых эквивалентов реальных почв позволяет прогнозировать надежность и срок службы создаваемых конструкций почворежущих деталей. (*Выводы*) Установили, что полученная модель трибологического процесса абразивного износа почворежущих деталей обеспечивает совмещение результатов имитационного нагружения с величинами силовых эквивалентов реальных почв, позволяющее при этом сократить сроки создания новых конструкций деталей в пределах 0,5-1 года и с нормативными показателями надежности и качества выполнения технологического процесса.

**Ключевые слова:** почвообработка, почворежущие детали, клин-рыхлитель, абразивный износ, имитационное моделирование, силовые эквиваленты почвенного нагружения.

■ **Для цитирования:** Мяленко В.И. Моделирование трибологических процессов абразивного износа почворежущих деталей // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №2. С. 69-75. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-69-75. EDN WEUTDP.

## Modeling of Tribological Processes for Abrasive Wear of Soil-Cutting Part

**Viktor I. Myalenko,**  
Dr.Sc.(Eng.), professor,  
e-mail: library82@mail.ru

Kuzbass State Agricultural Academy, Kemerovo, Russian Federation

**Abstract.** It is shown that simulation modeling of physical processes makes it possible to study the interaction of soil-cutting parts with soil during the observation period of 2-6 hours, when it is required to compress the time scale for creating a new design. (*Research purpose*) To develop models of the tribological process for abrasive wear of soil-cutting parts based on the combination of simulated loading of friction surfaces with the parameters of the real soil force equivalents. (*Materials and methods*) This study is based on the simulated loading method and the method of comparing the force equivalents of simulated and real loadings of the friction surfaces of soil-cutting parts using the example of loading flat diagrams. The paper describes the features of non-standard laboratory equipment that facilitates the construction of normal stress diagrams on friction surfaces. As a prototype, a straight wedge opener was investigated. (*Results and discussion*) As a result the friction surface loading diagrams were obtained with a change in the loosening angles and the range of the stress diagram area from 2,000 to 12,000 square millimeters. The values of force equivalents acting from the real soils of the proposed operating areas were determined. It was noted that combining the

characteristics of simulated loading of working parts with the parameters of real soil force equivalents makes it possible to predict the reliability and service life of the created structures of soil-cutting parts. (*Conclusions*) It has been established that the obtained model of the tribolithic process for abrasive wear of soil-cutting part ensures the superposition of simulated loading results with the values of real soil force equivalents, thus providing a 0.5-1 year reduction in the terms of creating new parts and maintaining the normative indices of technological process reliability and quality.

**Keywords:** tillage, tillage parts, wedge-grinder, abrasive wear, simulation modeling, force equivalents of soil loading.

**For citation:** Myalenko V.I. Modelirovanie tribologicheskikh protsessov abrazivnogo iznosa pochvorezhushchikh detaley [Modeling of tribological processes for abrasive wear of soil-cutting part]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N2. 69-75 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-69-75. EDN WEUTDP.

**И**митационное моделирование физических процессов востребовано в инженерном поиске при совершенствовании рабочих органов сельскохозяйственных машин для обработки почвы и ухода за культурными растениями [1]. Оно дает возможность изучить процессы взаимодействия почвообрабатывающего орудия с почвой, когда требуется сжатие временной шкалы наблюдения.

В реальных условиях эксплуатации почвообрабатывающих орудий довольно сложно обеспечить необходимую приборную базу наблюдений за характером процессов, происходящих как в обрабатываемой почве, так и при силовом нагружении почворежущих деталей [2, 3].

Вместе с тем имитация реальных физических процессов даже с обеспечением высокой степени подобия своего осуществления позволяет лишь судить о характере протекания процесса, в данном случае, о характере распределения нагружения по поверхностям трения почворежущих деталей. Действительные значения величин нагружения можно установить только с учетом свойств реальных почвенных сложенных. Необходимо специальное «тестирование» почв, где предполагается дальнейшая эксплуатация почвообрабатывающих орудий.

**Цель исследования** – разработка модели трибологического процесса абразивного износа почворежущих деталей на основе совмещения имитационного нагружения поверхностей трения с параметрами силовых эквивалентов реальных почв при последующей эксплуатации.

**Материалы и методы.** Анализ процессов абразивного износа почворежущих деталей как правило проводят, основываясь на классических законах Амонтона-Кулона и Арчарда [4]:

$$F = \mu \cdot N, \quad (1)$$

где  $F$  – сила трения, Н;

$\mu$  – постоянный коэффициент трения;

$N$  – нормальное давление, Н;

$$V = \mu NL/H, \quad (2)$$

где  $V$  – объем материала, выносимого с поверхности трения, мм<sup>3</sup>;

$L$  – путь трения, мм;

$H$  – твердость более мягкой из двух контактирующих поверхностей, МПа.

Сила трения и объем материала, выносимого с поверхности трения, зависят от одной переменной величины – нормального давления. Тогда при организации имитационного моделирования предопределяется техническая задача: найти возможность практического измерения величин нормального давления в разных точках поверхностей трения испытываемого образца при его физическом нагружении в лабораторных условиях.

При решении этой задачи всякое применение конструкторских решений, связанных с установкой специальных силоизмерителей, взаимодействующих с поверхностями трения испытываемых деталей, приводит к нарушениям самой природы перемещения почвы по поверхностям рабочих органов. В исследовательской практике в подобных случаях применяют методы косвенного измерения нормального давления [5, 6]. Так, при абразивном износе сопоставляют объемы изнашиваемого материала с величинами нормального давления (пропорциональная зависимость), выявляя те, которые были причиной износа.

Одним из наиболее распространенных способов измерения интенсивности абразивного износа (косвенно нормального давления) считается способ контрольных баз, или вырезанных лунок на исследуемых поверхностях трения [5, 7]. В процессе износа испытываемого образца по измерению глубины лунки до и после износа судят о величине нормального давления, которое вызвало этот износ. Однако лунки на поверхности детали создают дополнительное сопротивление и тем самым нарушают природу движения почвы по поверхности почворежущей детали. Известен оригинальный метод моделирования износа поверхностей трения почворежущих лезвий, проводимый в лабораторных условиях с искусственной абразивной средой [8]. В данном случае в состав абразивной среды входили парафин, кварцевые частицы, церезин и вазелин. Тем самым достигалась адекватность реальным суглинистым почвам, подтверждаемая критериями подобия. Вместе с тем реализация этого метода моделирования представляется весьма

трудоемкой в практическом использовании и требует специальной приборной базы. Наиболее перспективные методы оценки нормального давления основаны на нанесении на поверхности трения легкоистираемых материалов [9]. Тогда косвенным путем можно определить величины нормального давления в тех или иных точках поверхностей трения.

В качестве приборной базы применили круговой почвенный стенд (рис. 1).

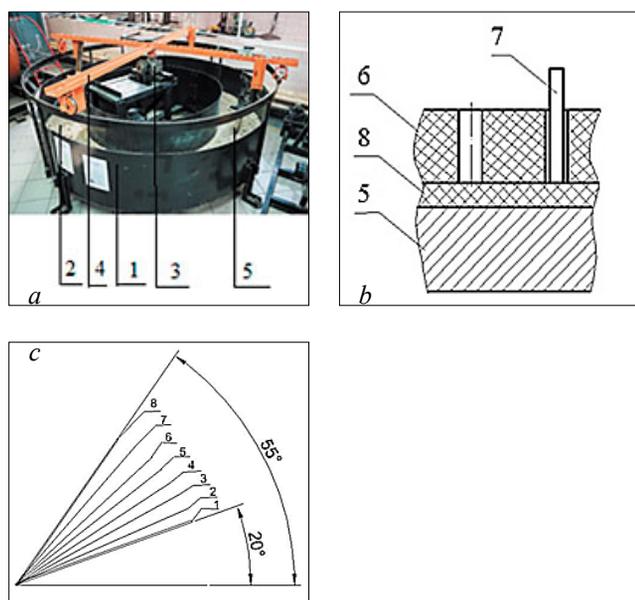


Рис. 1. Круговой имитационный стенд: а – общий вид; б – магнитоиндукционный измеритель; с – опытный образец с разными углами рыхления; 1 – емкость с почвенной средой; 2 – почвенная среда; 3 – привод вала вращения; 4 – водило; 5 – испытательный образец; 6 – кондуктор; 7 – щуп с сердечником; 8 – слой легкоистираемого материала

Fig. 1. Circular simulation bench: a – general view; b – magneto-induction meter; c – test sample with different loosening angles; 1 – vessel with soil medium; 2 – soil medium; 3 – rotation shaft drive; 4 – driver; 5 – test sample; 6 – conductor; 7 – probe with core; 8 – abradable material layer

При имитационном нагружении испытываемый образец помещали в заранее подготовленную почвенную среду. На его поверхность трения нанесен слой легкоистираемого материала. По интенсивности истирания магнитоиндукционным способом щупом измерителя оценивали вынос легкоистираемого материала с конкретных точек поверхности трения. Удельное нормальное давление определяли косвенным методом в соответствии с зависимостями (1) и (2):

$$N = \Delta V_{из} / \mu K, \tag{3}$$

где  $\Delta V_{из}$  – точечная величина износа материала с поверхности трения, мм<sup>3</sup>.

$K$  – коэффициент, характеризующий сопротивляемость абразивному износу легкоистираемого материала.

В качестве опытного образца почворежущей де-

тали исследовали прямой клин-рыхлитель (100×140 мм) с постановкой разных углов рыхления в интервале 20-55° к горизонту. Адекватность характера распределения внешнего нагружения по поверхности трения (эпюры) в имитационной модели достигалась с учетом трех основных составляющих подобия реальным условиям эксплуатации:

- обрабатываемой среды – почвы;
- геометрических параметров почворежущей детали;
- адекватных режимов перемещения почворежущей детали в имитационной среде, как в реальных условиях эксплуатации.

Почва – многомерная среда, состояние ее агротехнической спелости при прочих условиях (влажность, температура и др.) характеризуется снижением сил взаимодействия между отдельными микроагрегатами, когда при механическом рыхлении она способна распасться на отдельные устойчивые совокупности [9]. В соответствии с этим при физическом моделировании имитационная среда представляла собой связно-сыпучую структуру, в основе которой были песчаные (абразивные) составляющие.

При имитационном нагружении геометрические параметры почворежущей детали (клина-рыхлителя) и режимы его перемещения в почвенной среде были сохранены и соответствовали реальным условиям эксплуатации почворежущей детали.

Контур эпюры нормальных давлений представляет собой объемную фигуру. Ее верхняя поверхность составлена величинами нормальных давлений, а нижняя представлена поверхностью трения с точками приложения нормальных давлений (рис. 2).

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Угол рыхления влияет на характер распределения нормального давления по поверхности трения. Для дальнейшего анализа удобно перейти от объемной эпюры к ее плоской части, представляющей средние значения по всей ширине клина-рыхлителя. Положение центра давления плоской эпюры зависит от угла рыхления и площади эпюры  $S = f(\alpha)$  (рис. 3).

При увеличении угла  $\alpha$  центр давления эпюры  $L_0$  перемещался ближе к кромке лезвия клина-рыхлителя, хотя при этом значительно увеличивалась площадь самой эпюры  $S$ .

Запишем уравнение регрессии верхнего контура плоской эпюры (усредненные значения, полученные для угла рыхления  $\alpha = 35^\circ$ ):

$$N_{и} = 0,0028L^2 - 0,7195L - 75,962, \tag{4}$$

где  $N_{и}$  – нормальное давление имитационного нагружения, Н;

$L$  – текущее значение аргумента, расстояния от кромки лезвия до точки приложения нормального давления, мм (рис. 4).

Центр давления  $L_0$  на поверхности трения опреде-

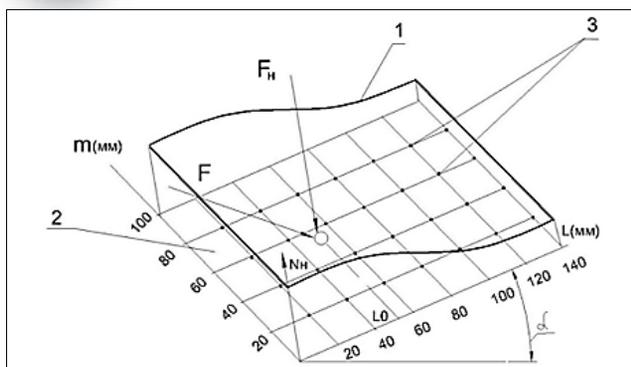


Рис. 2. Контур объемной эпюры нормального давления: 1 – верхняя грань эпюры; 2 – поверхность трения почворезущей детали; 3 – точки измерения выноса легкоистираемого материала;  $m$  – ширина клина;  $L$  – длина клина;  $N_H$  – положение вектора реактивного нормального давления;  $F$  – главный вектор внешнего имитационного нагружения;  $F_H$  – нормальная составляющая главного вектора имитационного нагружения;  $\alpha$  – угол рыхления

Fig. 2. Contour of normal pressure volumetric diagram: 1 – the top edge of the diagram; 2 – the friction surface of the soil-cutting part; 3 – the points of measurement of abrasible material removal;  $m$  – wedge width;  $L$  – wedge length;  $N_H$  – position of reactive normal stress vector;  $F$  – the main vector of external simulated loading;  $F_H$  – normal component of the main vector of simulated loading;  $\alpha$  – loosening angle

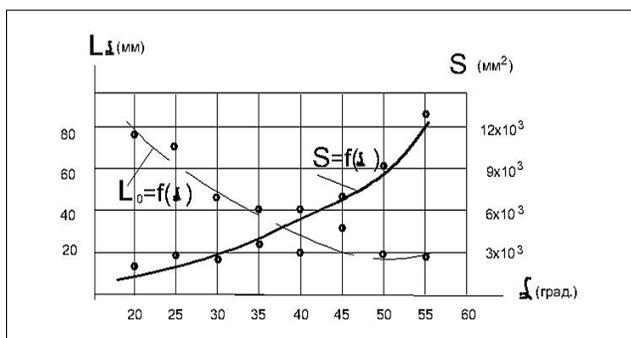


Рис. 3. Влияние угла рыхления на характер распределения нормального давления по поверхности трения клина-рыхлителя:  $L_0$  – положение центра давления эпюры, расстояние от кромки лезвия;  $S$  – площадь эпюры давления;  $\alpha$  – угол рыхления

Fig. 3. Influence of loosening angle on the characteristics of normal stress distribution over the wedge-roller friction surface:  $L_0$  – position of diagram pressure center, distance from blade edge;  $S$  – the area of stress diagram;  $\alpha$  – loosening angle

ляли в соответствии с выражением:

$$S_1 = \int_0^{L_0} f(L) dL = S_2 = \int_{L_0}^{140} f(L) dL, \quad (5)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – две равные по величине площади эпюры, расположенные с разных сторон относительно центра давления  $L_0$  (в данном примере  $L_0 = 51,2$  мм).

Необходимость определения центра давления вызвана требованиями проведения прочностных расчетов в случае применения новой конструкции рабочего органа, а также при обосновании устойчивого по-

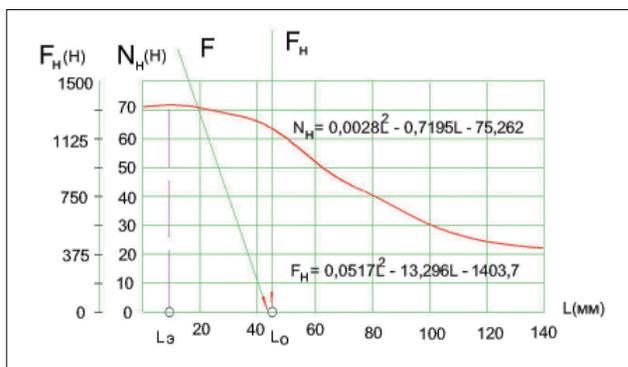


Рис. 4. Контур плоской эпюры нормального давления:  $N_H$  – нормальное давление имитационного нагружения;  $N_p$  – ожидаемое нормальное давление при реальной эксплуатации;  $L_s$  – абсцисса экстремума функции нормального давления;  $L_0$  – абсцисса центра давления

Fig. 4. Contour of normal stress flat diagram:  $N_H$  – simulated loading normal stress;  $N_p$  – expected normal stress during the real operation;  $L_s$  – extremum abscissa of normal stress function;  $L_0$  – the abscissa of stress center

ложения при движении почвообрабатывающего орудия из нескольких рабочих органов.

Полученная модель имитационного нагружения позволяет более детально рассматривать характер распределения внешней нагрузки по поверхностям трения клина-рыхлителя, устанавливать участки большей или меньшей нагруженности в случаях изменения технологических углов крошения. Вместе с тем действительные величины сил в реальных условиях эксплуатации вполне могут отличаться от значений, полученных при имитационном нагружении. Сопоставление результатов имитационного нагружения с характеристиками реальных почв позволит получить более точные параметры трибологического процесса нагружения поверхностей трения и последующего абразивного износа.

Обрабатываемые в реальных условиях почвы разнообразны по механическим свойствам и сопротивляемости механической обработке, при которой основной энергетической характеристикой их воздействия на рабочий орган служит силовой эквивалент внешнего нагружения [10, 11]. В случае плоскостной системы нагружения, применительно к клину-рыхлителю, учитываются экспериментальные данные о положении равнодействующей силе  $F$  как о некоторой суммарной силе, действующей со стороны почвы на поверхность трения [12-19].

Такая же суммарная сила  $N_H$  сумм по своим свойствам при имитационном нагружении может быть определена исходя из площади имитационной эпюры. Тогда для  $\alpha = 35^\circ$  имеем:

$$N_{исум} = N_H S = N_H \int_0^{140} 0,0028L^2 - 0,7195L - 75,962 dL = 614,65H, \quad (6)$$

где  $N_{исум}$  – суммарная величина нормального давле-

ния при имитационном нагружении, Н;

$N_{ни}$  – удельное давление при имитационном нагружении, Н/мм<sup>2</sup>;

$S$  – площадь эпюры, мм<sup>2</sup>.

Показатели  $F$  и  $N_{исум}$  имеют равнозначное смысловое значение:  $F$  – силовой эквивалент, полученный при нагружении в условиях реальной эксплуатации («тестирование» почв), а  $N_{исум}$  – такой же силовой эквивалент, полученный путем имитационного нагружения. При этом в последнем случае изучен характер распределения нормального давления по поверхностям трения с построением соответствующих эпюр.

В зависимости (6) удельное давление при имитационном нагружении образца для удобства дальнейших преобразований принято равным единице, то есть  $N_{ни} = 1$  Н/мм<sup>2</sup>. Величины  $F$  и  $N_{исум}$  по определению имеют равный характер распределения по поверхности трения и отличаются только значениями этих сил, поэтому для их совмещения достаточны правила пропорций.

Функция имитационного нагружения  $N_{и} = f(L)$  и функция реального давления обрабатываемой почвы  $N_{р} = f(L)$  имеют равный характер распределения по аргументу. Экстремум функции в нашем примере:

$N_{и}' = f(L) = 0$  имеет аргумент  $L_{э} = 10,1$  мм и функцию  $N_{иэ} = 71$  Н.

Измеренная в реальных условиях эксплуатации равнодействующая сила  $F$  является суммарной, действующей со стороны почвы на поверхность трения, и имеет свою нормальную составляющую  $F_{н}$ . Действительно, нормальные силы  $F_{н}$  и  $N_{и}$ , полученные на реальных почвах и путем имитационного нагружения, по своей природе – эквивалентные величины, имеющие одинаковый характер распределения давления по поверхности трения. Тогда по соотношению эквивалентных величин имеем:

$$F_{н}/N_{и} = F_{р,э}/N_{и,э}, \quad (7)$$

где  $F_{р,э}$ ,  $N_{и,э}$  – экстремумы (максимумы) функций реального и имитационного нагружения.

Отсюда для данного примера имеем величину  $F_{р,э} = 1312$  Н. Наносим вторую шкалу ординат  $F_{н}$ , посредством которой и ранее полученной кривой воспроизводятся реальные величины нормальных давлений по поверхности трения клина-рыхлителя (рис. 4). Аналитическая зависимость  $F_{н} = f(L)$  будет иметь следующий вид:

$$F_{н} = 0,0517L^2 - 13,296L - 1403,77. \quad (8)$$

Таким образом, полученная кривая описывает характер изменения процесса нагружения поверхности трения при имитационном нагружении и при рыхлении реального почвенного сложения (рис. 4). При этом характер нагружения равный, но шкалы осей ординат разные.

Совмещение характеристик имитационного нагружения рабочих органов с параметрами силовых эквивалентов реальных почв позволяет прогнозировать ожидаемую надежность и срок службы создаваемых конструкций. Результаты моделирования служат исходными данными для инженерных расчетов и прогноза поведенческих характеристик в последующей эксплуатационной практике разрабатываемых конструкций рабочих органов почвообрабатывающих орудий.

**Выводы.** Полученная модель триботического процесса абразивного износа почворезущих деталей обеспечивает совмещение результатов имитационного нагружения, полученных в качестве эпюр распределения нормальных давлений по поверхностям трения, с величинами силовых эквивалентов реальных почв предполагаемых зон последующей эксплуатации. Совмещение достигается путем использования характера имитационного нагружения и пропорциональностью экстремумов функций имитационного и реального нагружения. Применение полученной модели позволяет сократить сроки создания новых конструкций почворезущих деталей до 0,5-1 года с обеспечением нормативных показателей надежности и качества выполнения технологических операций.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Скиркис Р., Янкаускас В., Гайдис Р. Моделирование рабочих контактных нагрузок почвообрабатывающего элемента // *Трение и износ*. 2016. Т. 37. №4. С. 510-515.
2. Дроздов Ю.Н., Юдин Е. Г., Белов А.И. Прикладная трибология (трение, износ, смазка). М.: Эко-Пресс. 2010. 603 с.
3. Григорьев П.А., Сладкова Л.А. Модель изнашивания рабочих органов землеройных машин при взаимодействии с грунтовым массивом // *Трение и износ*. 2022. Т. 43. №4. С. 397-404.
4. Bedolla P.O., Vorlaufer G., Rechberger C., Bianchi D., Eder S.J., Polak R., Pauschitz A. Combined experimental and numerical simulation of abrasive wear and its application to a tillage machine component. *Tribology International*. 2018. Vol. 127. 122-128.
5. Хрущев М.М., Бабичев М.Д. Абразивное изнашивание. М.: Наука. 1970. 252 с.
6. Севернев М.М., Подлекарев Н.Н., Сохадзе В.Ш., Китиков В.О. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин. Минск: Беларус. Навука. 2011. 334 с.
7. Янкаускас В., Катинас Э., Пусвашкис М., Лейшис Р. Исследование ресурса упроченных плужных долот // *Трение и износ*. 2020. Т. 41. №1. С. 104-111
8. Миронов Д.А., Лискин И.В., Сидоров С.А., Нагорный В.Д., Афонина И.И., Костомахин М.Н. Моделирование изнашивания почворезущего лезвия // *Сельскохозяйствен-*

- ная техника: обслуживание и ремонт. 2019. N12. С. 61-68.
9. Мясенко В.И. Карта абразивного износа поверхности трения почворезущей детали // *Трение и износ*. 2020. N1(41). С. 128-132.
  10. Napiorkowski J., Lemecha M., Konat L. Forecasting the Wear of Operating Parts in an Abrasive Soil Mass Using the Holm–Archard Model. *Materials*. 2019. 12(13). 2180.
  11. Панов И.М., Ветохин В.И. Физические основы механики почв. Киев: Феникс. 2008. 266 с.
  12. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука. 2001. 477 с.
  13. Моторин В.А., Гапич Д.С., Борисенко И.Б., Курбанов Д.Б. Моделирование процесса износа рабочих органов чизельного плуга // *Трение и износ*. 2020. N1(41). С. 95-103.
  14. Мясенко В.И. Методы экспериментального определения силовых характеристик рабочих органов почвообрабатывающих орудий. Новосибирск: Новосибирский ГУ. 1991. 105 с.
  15. 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. Т. 60. N11-12. С. 1290-1294.
  16. Лобачевский Я.П., Эльшеих А.Х. Обоснование расстановки дисковых рабочих органов в комбинированных почвообрабатывающих агрегатах // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2009. N4. С. 22-25
  17. Лобачевский Я.П., Сидоров С.А., Миронов Д.А. и др. Новые износостойкие наплавочные материалы в сельскохозяйственном машиностроении // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2014. Т. 8. N1. С. 27-31.
  18. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сидоров С.А., Хорошенков В.К., Лужнова Е.С., Миронов Д.А., Зайцев А.И., Родионова И.Г., Павлов А.А., Амежнов А.В. Использование биметаллических сталей для повышения ресурса рабочих органов сельскохозяйственных машин // *Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2013. N2. С. 80-81.
  19. Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х., Старовойтов С.И., Ценч Ю.С., Шогенов А.Х. Трехсекционный почвообрабатывающий агрегат с универсальными сменными рабочими органами // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2019. Т. 14. N3(54). С. 92-95.

## REFERENCES

1. Skirkus R., Yankauskas V., Gaydis R. Modelirovanie rabochikh kontaktnykh nagruzok pochvoobrabatyvayushchego elementa [Modeling contact loads of tillage element]. *Trenie i iznos*. 2016. Vol. 37. N4. 510-515 (In Russian).
2. Drozdov Yu.N., Yudin E. G., Belov A.I. Prikladnaya tribologiya (trenie, iznos, smazka) [Applied tribology (friction, wear, lubrication)]. Moscow: Eko-Press. 2010. 603 (In Russian).
3. Grigor'ev P.A., Sladkova L.A. Model' iznashivaniya rabochikh organov zemleroynykh mashin pri vzaimodeystvii s gruntovym massivom [The model of wear of the working bodies of earthmoving machines in interaction with the soil mass]. *Trenie i iznos*. 2022. Vol. 43. N4. 397-404 (In Russian).
4. Bedolla P.O., Vorlaufer G., Rechberger C., Bianchi D., Eder S.J., Polak R., Pauschitz A. Combined experimental and numerical simulation of abrasive wear and its application to a tillage machine component. *Tribology International*. 2018. Vol. 127. 122-128 (In English).
5. Khrushchev M.M., Babichev M.D. Abrabivnoe iznashivanie [Abrasive wear]. Moscow: Nauka. 1970. 252 (In Russian).
6. Severnev M.M., Podlekarev N.N., Sokhadze V.Sh., Kitikov V.O. Iznos i korroziya sel'skokhozyaystvennykh mashin [Wear and corrosion of agricultural machinery]. Minsk: Belarus. Navuka. 2011. 334 (In Russian).
7. Yankauskas V., Katinas E., Pusvashkis M., Leyshis R. Issledovanie resursa uprochnennykh pluzhnykh dolot [Hardened plow bits capacity]. *Trenie i iznos*. 2020. Vol. 41. N1. 104-111 (In Russian).
8. Mironov D.A., Liskin I.V., Sidorov S.A., Nagornyy V.D., Afonina I.I., Kostomakhin M.N. Modelirovanie iznashivaniya pochvorenzhushchego lezviya [Simulation of soil cutting blade wear]. *Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2019. N12. 61-68 (In Russian).
9. Myalenko V.I. Karta abrabivnogo iznosa poverkhnosti treniya pochvorenzhushchey detali [Map of friction surface abrasive wear of the soil-cutting part]. *Trenie i iznos*. 2020. N1(41). 128-132 (In Russian).
10. Napiorkowski J., Lemecha M., Konat L. Forecasting the Wear of Operating Parts in an Abrasive Soil Mass Using the Holm–Archard Model. *Materials*. 2019. 12(13). 2180 (In English).
11. Panov I.M., Vetokhin V.I. Fizicheskie osnovy mekhaniki pochv [Fundamentals of soil mechanics]. Kiev: Feniks. 2008. 266 (In Russian).
12. Goryacheva I.G. Mekhanika friktsionnogo vzaimodeystviya [Mechanics of frictional interaction]. Moscow: Nauka. 2001. 477 (In Russian).
13. Motorin V.A., Gapich D.S., Borisenko I.B., Kurbanov D.B. Modelirovanie protsessa iznosa rabochikh organov chizel'nogo pluga [Simulation of the wear of the working bodies of chisel plows]. *Trenie i iznos*. 2020. N1(41). 95-103 (In Russian).
14. Myalenko V.I. Metody eksperimental'nogo opredeleniya silovykh kharakteristik rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh orudiy [Methods for experimental obtaining the power characteristics of tillage machinery working bodies]. Novosibirsk: Novosibirskiy GU. 1991. 105 (In Russian).
15. 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 us-



- ing plasma surfacing. *Metallurgist*. 2017. Vol. 60. N11-12. 1290-1294 (In English).
16. Lobachevskiy Ya.P., El'sheikh A.Kh. Obosnovanie rasstanovki diskovykh rabochikh organov v kombinirovannykh pochvoobrabatyvayushchikh agregatakh [Justification of the arrangement of disk working bodies in combined tillage units]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2009. N4. 22-25 (In Russian).
17. Lobachevskiy Ya.P., Sidorov S.A., Mironov D.A., et al. Novye iznosostoykie naplavochnye materialy v sel'skokhozyaystvennom mashinostroenii [New wear-resistant surfacing materials in agricultural engineering]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2014. Vol. 8. N1. 27-31 (In Russian).
18. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., Luzhnova E.S., Mironov D.A., Zaytsev A.I., Rodionova I.G., Pavlov A.A., Amezhnov A.V. Ispol'zovanie bimetallicheskikh staley dlya povysheniya resursa rabochikh organov selskokhozyaystvennykh mashin [The use of bimetallic steels to increase the resource of working bodies of agricultural machines]. *Vestnik Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk*. 2013. N2. 80-81 (In Russian).
19. Ahalaya B.Kh., Shogenov Yu.Kh., Starovoytov S.I., Tsench Yu.S., Shogenov A.Kh. Trekhseksionnyy pochvoobrabatyvayushchiy agregat s universal'nymi smennymi rabochimi organami [Three-section tillage unit with universal replaceable working bodies]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2019. Vol. 14. N3(54). 92-95 (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

07.02.2023  
05.05.2023

## Генератор пара для гидротермообработки сельскохозяйственного оборудования

**Валентин Александрович Гусаров,**  
главный научный сотрудник,  
доктор технических наук,  
e-mail: cosinys50@mail.ru;

**Леонид Юрьевич Юферев,**  
главный научный сотрудник,  
доктор технических наук,  
e-mail: leouf@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Отметим негативные стороны загрязнения рабочих поверхностей сельскохозяйственной техники. Описали существующее современное оборудование для ее очистки. (*Цель исследования*) Разработать систему очистки машин, оборудования и инструмента в полевых условиях с помощью мобильного генератора пара, способного обеспечить давление 5 килограммов на квадратный сантиметр и температуру 150 градусов Цельсия и работать на биотопливе (дровах, чурках, соломе и других отходах сельскохозяйственного производства). (*Материалы и методы*) Описали алгоритм работы парогенератора. Представили его основные технические характеристики, схему устройства. Теоретически рассчитали расход воздуха для систем постоянной и регулируемой подачи воздуха. (*Результаты и обсуждение*) Установили, что при одной загрузке 8 килограммов биотоплива и 6 литров воды время активной выработки пара составляет 20-25 минут. Генератор пара оснастили двумя системами подачи воздуха в топку, предохранительным клапаном сброса пара при избыточном давлении. В котел встроили пароперегреватель, обеспечивающий необходимые характеристики пара на выходе из котла. (*Выводы*) Выявили преимущества разработанного генератора пара: мобильность, использование биотоплива, непрерывная подача перегретого пара на одной загрузке в течение 20-25 минут. Заключение, что новая установка предназначена для продолжительной работы и способна не только разморозить и обработать примерзший навозоборочный транспортер, тележку и разбрасыватель навоза, рабочие органы погрузчиков, но и разогреть более крупную сельхозтехнику. Она пригодна также для санобработки посевного уборочного и животноводческого оборудования в полевых условиях.

**Ключевые слова:** генератор пара, биотопливо, система постоянной подачи воздуха, система регулируемой подачи воздуха, очистка сельхозтехники и оборудования.

■ **Для цитирования:** Гусаров В.А., Юферев Л.Ю. Генератор пара для гидротермообработки сельскохозяйственного оборудования // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №2. С. 76-81. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-76-81. EDN WQWRNL.

## Steam Generator for Hydrothermal Treatment of Agricultural Equipment

**Valentin A. Gusarov,**  
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,  
e-mail: cosinys50@mail.ru;

**Leonid Yu. Yuferev,**  
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,  
e-mail: leouf@yandex.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The paper highlights the importance of keeping the working surfaces of agricultural machinery clean and describes the existing modern equipment for its cleaning. (*Research purpose*) To develop a biofuel system for cleaning machines, equipment and tools in the field. It is proposed to apply a mobile steam generator using wood, chocks, straw and other agricultural waste as a fuel and capable of providing pressure of 5 kilograms per square centimeter and a temperature of 150 degrees Celsius. (*Materials and methods*) The paper describes the algorithm of the steam generator operation and presents its main technical characteristics and the design diagram. Theoretical calculations of the air consumption for the constant and adjustable air supply systems are provided. (*Results and discussion*) It has been established that one load of 8 kilograms of biofuel and 6 liters of water ensures 20-25 minutes of intense steam production. The steam generator was equipped with two systems for supplying air to the furnace, a safety valve for dumping steam at excess pressure. The boiler has a built-in superheater that ensures the necessary steam characteristics at the boiler outlet. (*Conclusions*) The developed steam generator reveals the following advantages: mobility, use of biofuel, a 20-25 minutes continuous supply of superheated steam at one load. The new unit is designed for long-term operation and it is capable

of not only defrosting and cleaning a frozen manure conveyor, a manure trolley, a spreader, and loader working bodies, but also warming up larger agricultural machinery. It is also suitable for sanitizing seed harvesting and livestock equipment in the field.

**Keywords:** steam generator, biofuel, constant air supply system, controlled air supply system, agricultural machinery and equipment cleaning.

**For citation:** Gusarov V.A., Yuferev L.Yu. Generator para dlya gidrotermoobrabotki sel'skokhozyaystvennogo oborudovaniya [Steam generator for hydrothermal treatment of agricultural equipment]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N2. 76-81 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-76-81. EDN WQWRNL

Для повышения надежности и долговечности машин, их узлов и деталей в процессе эксплуатации, перед техническим обслуживанием и ремонтом применяют различные технологии очистки поверхностей [1-3].

Одновременно с этим важно предохранить семена от заражения инфекциями во время использования посевного оборудования [4-6]. После выполнения посевных работ в сеялках часто остается посевной материал, на котором со временем возникает грибковая микрофлора.

Сельскохозяйственная техника требует ухода, промывки и обеззараживания. Для этого применяют различные способы, например мойку высокого давления [7, 8]. В наиболее перспективных и распространенных технологиях очистки и мойки сельхозтехники используют йодные струи высокого давления [10]. Однако повышенный распыл и разбрызгивание водной струи снижают интенсивность, качество очистки и повышают влажность воздуха рабочей зоны оператора, что отрицательно сказывается на его здоровье. Кроме того, как правило такой процесс очистки возможен только от стационарного источника электропитания.

Перед вводом сельхозтехники в эксплуатацию выполняют комплекс операций по удалению веществ противокоррозионной защиты. Расконсервация включает в себя снятие машин с хранения, разгерметизацию и удаление консервационных составов [11]. Для этого используют различные способы очистки:

- физико-химические (в растворе электролита или под действием специальных химических реагентов);
- механические (с помощью щеток, механизированного инструмента, гидроабразивных и воздушно-абразивных струй) [12].

Механический способ очистки по принципу воздействия можно разделить на воздушно-абразивный, с воздействием энергии водяных струй, и механический, за счет энергии вращательного движения скребков и щеток (рис. 1).

Но в зимнее время такой способ не приемлем, так как в последнее время участились случаи атмосферных осадков в виде ледяного дождя (рис. 2).

На помощь приходят бытовые генераторы пара. Однако из-за малой мощности ими можно отогреть лишь небольшие узлы и механизмы автомобильной



Рис. 1. Механический способ очистки воздействием воздушно-абразивных струй

Fig. 1. Mechanical cleaning by air-abrasive jets



Рис. 2. Последствие ледяного дождя

Fig. 2. Effect of freezing rain



Рис. 3. Разморозка тормозных барабанов

Fig. 3. Brake drum defrosting

и сельскохозяйственной техники (рис. 3).

**Цель исследования** – разработать систему очистки машин, оборудования и инструмента в полевых

условиях с помощью мобильного генератора пара, способного обеспечить давление  $5 \text{ кг/см}^2$  и температуру  $150^\circ\text{C}$  и работать на биотопливе (дровах, чурках, соломе и других отходах сельскохозяйственного производства).

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** В работе применены методы моделирования и конструирования, а также экспериментальные исследования скорости разогрева, продолжительности работы, расхода биотоплива, давления в системе.

В целях безопасности установка должна располагаться в местах, где поблизости отсутствуют легко воспламеняющиеся предметы. Разведение огня допустимо согласно ГОСТ 34518-2019 (Печи промышленные и агрегаты тепловые. Правила организации и производства работ, контроль выполнения и требования к результатам работ). Пар подается по резинометаллическому шлангу с теплоотражающим покрытием в соответствии с ГОСТ 31598-2012 (Стерилизаторы паровые большие).

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Генератор пара включает: кожух котла, систему постоянной подачи воздуха, систему регулируемой подачи воздуха, двухсекционный паровой котел, пароперегреватель, манометр, аварийный клапан, запорную аппаратуру (рис. 4). Разработан также узел загрузки топлива генератора пара (рис. 5).

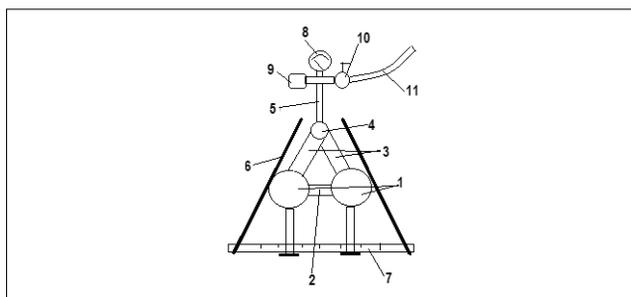


Рис. 4. Схема устройства генератора пара: 1 – водяные трубы котла; 2 – водоперепускная труба; 3 – паропровод влажного пара; 4 – пароперегреватель; 5 – паропровод перегретого пара; 6 – термостойкий кожух котла; 7 – воздухопровод постоянной подачи; 8 – манометр; 9 – предохранительный клапан; 10 – запорная арматура; 11 – резинометаллический шланг

Fig. 4. The steam generator design diagram: 1 – boiler water pipes; 2 – water bypass pipe; 3 – wet steam pipeline; 4 – superheater; 5 – superheated steam pipeline; 6 – heat-resistant boiler casing; 7 – constant supply air duct; 8 – manometer; 9 – safety valve; 10 – shutoff valves; 11 – rubber-metal hose

Новая установка предназначена для продолжительной работы и способна не только разморозить и обработать примерзший навозоуборочный транспортер, тележку и разбрасыватель навоза, рабочие органы погрузчиков, но и разогреть более крупную сельхозтехнику. Она пригодна также для санобработки



Рис. 5. Узел загрузки топлива

Fig. 5. Fuel loading unit

посевного уборочного и животноводческого оборудования в полевых условиях.

Источником тепла служит биотопливо, рабочим телом – вода или водные растворы.

Для контроля эффективности парогенератора при известном количестве топлива определяют количество воздуха  $V_B$ , подаваемого в топочное отделение. Для этого рассчитывают коэффициент избытка воздуха  $\alpha_B$ :

$$\alpha_B = \alpha_{\text{ппв}} + \alpha_{\text{рпв}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{\text{рпв}}$  – коэффициент избытка воздуха при регулируемой подаче, равный 1,25;

$\alpha_{\text{ппв}}$  – коэффициент избытка воздуха при постоянной подаче, равный 0,06,

$$\text{то есть } \alpha_B = 1,25 + 0,06 = 1,31.$$

Удельный теоретический расход воздуха  $V_B^0$ ,  $\text{м}^3/\text{кг}$ , определяется исходя из состава рабочей массы топлива:

$$V_B^0 = 0,0889(C^p + 0,375S^p) + 0,265H^p - 0,0333O^p, \quad (2)$$

где  $C^p$  – удельная доля углерода, 46,4%;

$S^p$  – удельная доля серы, 3,5%;

$H^p$  – удельная доля водорода, 3,4%;

$O^p$  – удельная доля кислорода, 5,6%.

Подставив значения, получаем:

$$V_B^0 = 0,0889 \cdot (3,7 + 0,375 \cdot 3,5) + 0,265 \cdot 3,4 - 0,0333 \times 5,6 = 1,16 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

При потреблении топлива 8 кг расход воздуха составляет:

$$V_B = m_T \cdot V_B^0 \cdot \alpha_B, \quad (3)$$

$$V_B = 8 \cdot 1,16 \cdot 1,31 = 12,16 \text{ м}^3.$$

Для разработанной системы с естественной конвекцией расход воздуха составил  $12,15 \text{ м}^3$  за один рабочий цикл, продолжительность цикла – 34 мин.

Расход воздуха системой постоянной подачи воздуха равен:

$$V_{\text{ппв}} = V_B \cdot \alpha_{\text{ппв}}, \quad (4)$$

$$V_{\text{ппв}} = 12,16 \cdot 0,06 = 0,73 \text{ м}^3.$$

Расход воздуха системой регулируемой подачи воздуха составляет:

$$V_{\text{РПВ}} = V_{\text{В}} \cdot \alpha_{\text{РПВ}}, \quad (5)$$

$$V_{\text{РПВ}} = 12,16 \cdot 1,25 = 15,2 \text{ м}^3.$$

Техническая характеристика генератора пара (рис. 6):

- рабочее давление пара – 5 кг/см<sup>2</sup>;
- предельно допустимое давление пара – 18 кг/см<sup>2</sup>;
- емкость для воды – 6 л;
- расход биотоплива – 8 кг;
- температура исходящего пара – 150°С;
- время эффективного парообразования – 20-25 мин.



Рис. 6. Генератор перегретого пара в работе  
Fig. 6. Superheated steam generator in operation

В котел генератора пара через горловину заливают 6 л воды или водного раствора и плотно закручивают крышку. Во избежание образования накипи на внутренней поверхности котла рекомендуется применять очищенную или дистиллированную воду. Затем в узел загрузки топлива помещают 8 кг древесных чурок влажностью не более 20% или другое горючее сухое биотопливо схожей теплотворности. Топливо разжигают и в ручном режиме регулируют подачу воздуха в топку для стабильного горения.

При температуре более 100°С в котле образуется пар, давление в замкнутом пространстве поднимается до критического – 5 кг/см<sup>2</sup>. При превышении этого уровня происходит сброс пара в атмосферу через предохранительный клапан, что служит сигналом начала использования пара, температура которого около 150°С.

Пар для очистки оборудования поступает через запорный кран и гибкий резинометаллический шланг. Но сначала необходимо через шланг выпустить в атмосферу небольшое количество воды и влажного пара, после чего можно использовать перегретый пар. Запорная аппаратура имеет соответствующее проходное сечение, которое предотвращает чрезмерно большой расход пара, создавая устойчивый баланс с его выработкой.

Генератор пара имеет две системы подачи воздуха в котел. Первая – для постоянной подачи воздуха, нерегулируемая. Воздухопровод размещен под топочным отделением. Она предназначена для окончатель-

ного сжигания топлива после испарения воды и предотвращает образование высокой концентрации угарного газа. Вторая система, регулируемая, обеспечивает подачу воздуха через узел загрузки топлива для его эффективного сжигания.

Определили технические характеристики при производстве перегретого пара (рис. 7 и 8). На прогрев и достижение необходимого давления от начала розжига топлива требуется примерно 15 мин. Далее, по достижении давления 3 кг/см<sup>2</sup>, идет рабочее время, которое зависит от объема водяных труб котла. В нашем случае оно составляет около 40 мин. Рабочее давление – 3-5 кг/см<sup>2</sup>. Затем вода заканчивается и давление пара снижается. Загружаемое топливо также должно быть рассчитано на время генерации пара.

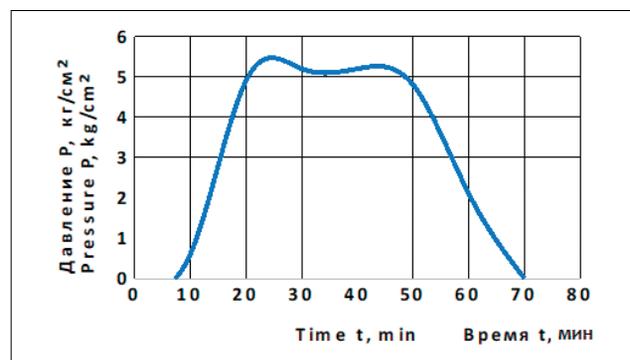


Рис. 7. Изменение давления в зависимости от времени  
Fig. 7. Pressure change over time

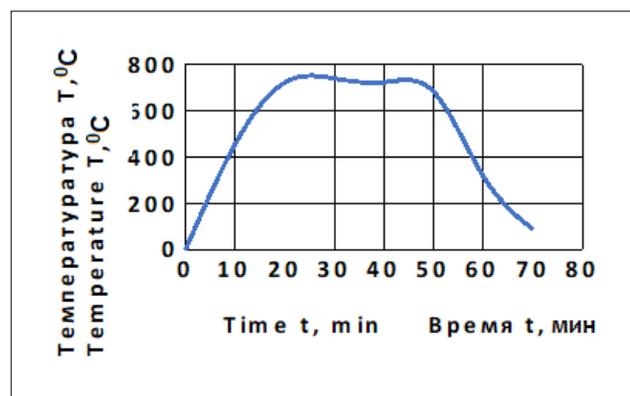


Рис. 8. Изменение температуры газов в районе осушителя пара в зависимости от времени  
Fig. 8. Changes in gases temperature in the steam dryer area by time

### Выводы

Преимущества разработанной установки заключаются в ее мобильности, использовании биотоплива, в непрерывной подаче перегретого пара на одной загрузке в течение 20-25 мин. Этого времени достаточно, например, для обработки навозоуборочного транспортера, тележек, разбрасывателя навоза, рабочих органов погрузчиков, разогрева сельхозтехники и других аппаратов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кравченко И.Н., Амелин С.С., Курменев Д.В., Величко С.А., Преображенская Е.В., Лутьянов А.В. Математическая модель процесса формирования рабочего потока термодинамического абразивоструйного инструмента для обработки поверхностей // *Вестник машиностроения*. 2022. N4. С. 64-68.
2. Pavlenko A., Koshlak H. Formation of the steam phase in superheated liquids in the state of metastable equilibrium. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 5. N5(89). 35-42.
3. Егоров С.А., Коробов Д.В., Свиридов И.А., Фомин Ю.Г. Конструкция парогенератора // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2016. N1(361). С. 195-197.
4. Ляшенко А.Л. Математическая модель тепловых процессов парового котла теплоэлектростанции // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2018. N5(199). С. 100-110.
5. Макаров А.Н., Окунева В.В., Галичева М.К. Влияние длины факела на тепловой поток на горелочное устройство // *Электрические станции*. 2017. N6(1031). С. 19-23.
6. Plevako A.P. Possibility of using of thermal pumps at thermal power plants and heat boiler stations // *Вестник Инновационного Евразийского университета*. 2019. N2(74). С. 62-66.
7. Филимонова А.А., Чичириков А.А., Чичирова Н.Д., Баталова А.А. Спектроскопическое исследование поведения органических примесей в технологических водах тепловых электростанций // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2022. Т. 14. N3(55). С. 3-12.
8. Неверов В.В., Клевцов П.Н., Лебедев С.В. Дефектоскопия сварных соединений паровых котлов высокого давления и прогнозирование остаточного ресурса // *Вестник Липецкого государственного технического университета*. 2018. N3(37). С. 51-57.
9. Богомолов О.В. Технология очистки резервуаров для хранения нефтепродуктов с применением парогенераторов Интерблок // *Бурение и нефть*. 2022. N11. С. 14.
10. Tashakor S., Afsari A., Hashemi-Tilehnoee M. Sensitivity analysis of thermal-hydraulic parameters to study the corrosion intensity in nuclear power plant steam generators. *Nuclear Engineering and Technology*. 2019. Vol. 51. N2. 394-401.
11. Bersano A., Falcone N., Bertani C., De Salve M., Panella B. Conceptual design of a bayonet tube steam generator with heat transfer enhancement using a helical coiled downcomer. *Progress in Nuclear Energy*. 2018. Vol. 108. 243-252.
12. Егоров М.Ю. Вертикальные парогенераторы для АЭС с ВВЭР // *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2018. N3. С. 88-99.

## REFERENCES

1. Kravchenko I.N., Amelin S.S., Kurmenev D.V., Velichko S.A., Preobrazhenskaya E.V., Lut'yanov A.V. Matematicheskaya model' protsesssa formirovaniya rabocheho potoka termodinamicheskogo abrazivostruyinogo instrumenta dlya obrabotki poverkhnostey [Mathematical model of the process of forming the working flow of a thermodynamic abrasive jet tool for surface treatment]. *Vestnik mashinostroeniya*. 2022. N4. 64-68 (In Russian).
2. Pavlenko A., Koshlak H. Formation of the steam phase in superheated liquids in the state of metastable equilibrium. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 5. N5(89). 35-42 (In English).
3. Egorov S.A., Korobov D.V., Sviridov I.A., Fomin Yu.G. Konstruktsiya parogeneratora [The steam generator design]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. 2016. N1(361). 195-197 (In Russian).
4. Lyashenko A.L. Matematicheskaya model' teplovykh protsessov parovogo kotla teploelektrostantsii [Mathematical model of thermal processes in a heat-electric power station steam boiler]. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki*. 2018. N5(199). 100-110 (In Russian).
5. Makarov A.N., Okuneva V.V., Galicheva M.K. Vliyaniye dliny fakela na teplovoy potok na gorelochnoe ustroystvo [The effect of the torch length on the heat flow to the burner device]. *Elektricheskie stantsii*. 2017. N6(1031). 19-23 (In Russian).
6. Plevako A.P. Possibility of using of thermal pumps at thermal power plants and heat boiler stations. *Vestnik Innovatsionnogo Evraziyskogo universiteta*. 2019. N2(74). 62-66 (In English).
7. Filimonova A.A., Chichirov A.A., Chichirova N.D., Batalova A.A. Spektroskopicheskoye issledovaniye povedeniya organicheskikh primesey v tekhnologicheskikh vodakh teplovykh elektrostantsiy [Spectroscopic study of the organic impurities behaviour in thermal power plants technological waters]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2022. Vol. 14. N3(55). 3-12 (In Russian).
8. Neverov V.V., Klevtsov P.N., Lebedev S.V. Defektoskopiya svarynykh soedineniy parovykh kotlov vysokogo davleniya i prognozirovaniye ostatochnogo resursa [Defectoscopy of welded joints of highpressure steam generators and forecasting of a residual resource]. *Vestnik Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018. N3(37). 51-57 (In Russian).
9. Bogomolov O.V. Tekhnologiya ochistki rezervuarov dlya khraneniya nefteproduktov s primeneniem parogeneratorov Interblok [Technology for storing petroleum products tanks cleaning using «Interblock» steam generators]. *Bureniye i nef't*. 2022. N11. 14 (In Russian).
10. Tashakor S., Afsari A., Hashemi-Tilehnoee M. Sensitivity analysis of thermal-hydraulic parameters to study the corrosion intensity in nuclear power plant steam generators. *Nuclear Engineering and Technology*. 2019. Vol. 51. N2. 394-401 (In English).



11. Bersano A., Falcone N., Bertani C., De Salve M., Panella B. Conceptual design of a bayonet tube steam generator with heat transfer enhancement using a helical coiled downcomer. *Progress in Nuclear Energy*. 2018. Vol. 108. 243-252 (In English).
12. Egorov M.Yu. Vertikal'nye parogeneratory dlya AES s VVER [Vertical steam generators for VVER NPPS]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*. 2018. N3. 88-99 (In Russian).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

#### Заявленный вклад соавторов:

Гусаров В.А. – подготовка и первичный анализ литературных источников, подготовка материалов, описание результатов, подготовка начального варианта текста, формирование основной концепции;

Юферев Л.Ю. – подготовка и первичный анализ литературных источников, обобщение и описание результатов, подготовка начального варианта текста, формирование основной концепции.

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### Coauthors' contribution:

Gusarov V.A. – primary literature review, preparation of materials, description and interpretation of the results, preparing the manuscript draft, formulating the research main concepts;

Yuferev L.Yu. – primary literature review, description and interpretation of the results, preparing the manuscript draft, formulating the research main concepts.

*The authors read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию  
Статья принята к публикации

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

03.02.2023  
14.03.2023

## Разработка однорядной сеялки с диско-кассетным высевальным устройством для посева зерновых культур колосьями

**Марсель Марселевич Шайхов**,  
ведущий специалист,  
e-mail: mars.shaihov@yandex.ru;  
**Андрей Сергеевич Чулков**,  
кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник;  
**Алексей Викторович Подзоров**,  
научный сотрудник;

**Арсен Хасанбиевич Текушев**,  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
e-mail: kmk3.vim@mail.ru;  
**Татьяна Васильевна Чаплыгина**,  
специалист, магистрант

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** В селекционно-семеноводческом процессе создания и размножения новых сортов зерновых культур особое место в сравнении с посевом семенами занимает технология посева колосьями, обеспечивающая сортовую чистоту с высокой гарантией. (*Цель исследования*) Разработать экспериментальный образец однорядной сеялки с диско-кассетным высевальным устройством для посева зерновых колосовых культур колосьями в селекционных и семеноводческих питомниках, определить параметры высевального устройства и агротехнические показатели выполнения технологического процесса. (*Материалы и методы*) Предложили схему однорядной селекционной сеялки для посева колосьями с диско-кассетным высевальным устройством. Выполнили расчеты и определили параметры диско-кассетного высевального устройства. Разработали методику лабораторно-полевых испытаний экспериментального образца. (*Результаты и обсуждение*) Разработали и изготовили экспериментальный образец однорядной колосовой сеялки. Проверили работу диско-кассетного высевального устройства. Провели лабораторно-полевые испытания экспериментального образца сеялки на посеве озимой пшеницы сорта Ивита. Определили основные агротехнические показатели выполнения технологического процесса посева колосьями. (*Выводы*) Установили рациональные параметры диско-кассетного высевального устройства: диаметр диска – 27 сантиметров; средний диаметр окружности, вдоль которой расположены отверстия под ячейки для высеваемого материала, – 21 сантиметр; количество ячеек – 16; внутренний диаметр ячеек – 3 сантиметра; длина ячеек – 15 сантиметров. Вывели формулу зависимости плотности посева колосьев от конструктивных параметров сеялки. Получили в полевых условиях ряд значений агротехнических показателей выполнения технологического процесса экспериментальным образцом: расстояние между колосьями в полосе посева составило 29,5 и 30,8 сантиметров для установочных значений глубины хода сошника 3,5 и 5 сантиметров соответственно. Показали, что средняя фактическая глубина борозды составила 3 и 4 сантиметра соответственно, ширина дна борозды – 6 сантиметров.

**Ключевые слова:** селекционная сеялка, сеялка для посева колосьями, колосовая сеялка, посев зерновых культур, селекция, семеноводство, диско-кассетное высевальное устройство.

■ **Для цитирования:** Шайхов М.М., Чулков А.С., Подзоров А.В., Текушев А.Х., Чаплыгина Т.В. Разработка однорядной сеялки с диско-кассетным высевальным устройством для посева зерновых культур колосьями // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №2. С. 82-88. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-82-88. EDN TVYYHO.

## Development of a Single-Row Ear Seeder Equipped with a Disk-Cassette Sowing Device

**Marsel' M. Shaykhov**,  
leading specialist,  
e-mail: mars.shaihov@yandex.ru;  
**Andrey S. Chulkov**,  
Ph.D.(Eng.), leading researcher;  
**Aleksey V. Podzorov**,  
researcher;

**Arsen Kh. Tekushev**,  
Ph.D.(Eng.), senior researcher,  
e-mail: kmk3.vim@mail.ru;  
**Tatyana V. Chaplygina**,  
specialist, master's student

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The technique of seed sowing using ears plays a crucial role in the cultivation, selection, and propagation of new grain crop varieties. It offers distinct advantages over traditional seed sowing methods, as it provides a higher guarantee of varietal purity. (*Research purpose*) The objectives of this research are twofold: first, to design and develop a prototype of a single-row seeder equipped with a disk cassette sowing device, specifically tailored for ear sowing in breeding and seed nurseries of grain crops; and second, to assess the performance parameters of the sowing device and the agrotechnical indicators of the entire technological process. (*Materials and methods*) A schematic diagram of a single-row seeder equipped with a disk-cassette sowing device has been proposed. The specifications of the disk-cassette sowing device were obtained through calculations. Additionally, a methodology for conducting laboratory and field testing of the experimental sample has been developed. (*Results and discussion*) A prototype single-row ear seeder has been developed and manufactured. The functionality and performance of the disk-cassette sowing device have been evaluated and verified. The effectiveness and reliability of the prototype ear seeder have been assessed through laboratory and field tests, specifically during the sowing of Ivita winter wheat. These tests have enabled the determination of key agrotechnical indicators for the ear sowing process. (*Conclusions*) The optimal parameters for the disk-cassette sowing device have been determined, which include a disk diameter of 27 centimeters, an average diameter of the circle containing the cells for the seeded material of 21 centimeters, a total of 16 cells, each with an inner diameter of 3 centimeters and a length of 15 centimeters. A formula was derived to establish the correlation between the ear seeding density and the design parameters of the seeder. Field experiments conducted with the prototype provided data on various agrotechnical indicators relevant to the implementation of the technological process. Specifically, the measurements revealed that the distance between the ears in the sowing pass was recorded as 29.5 centimeters and 30.8 centimeters for the respective coulter travel depth settings of 3.5 centimeters and 5 centimeters. Furthermore, the average actual depth of the furrow was found to be 3 centimeters and 4 centimeters for the corresponding settings, while the width of the furrow bottom was measured at 6 centimeters.

**Keywords:** selection seeder, seeder for ear sowing, ear seeder, grain sowing, selection, seed production, disk-cassette sowing device.

**■ For citation:** Shaykhov M.M., Chulkov A.S., Podzorov A.V., Tekushev A.Kh., Chaplygina T.V. Razrabotka odnoryadnoy seyal'ki s disko-kassetnym vysewayushchim ustroystvom dlya poseva zernovykh kul'tur kolos'yami [Development of a single-row ear seeder equipped with a disk-cassette sowing device]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N2. 82-88 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-82-88. EDN TVYYHO.

**Р**азработке и совершенствованию технологий и технических средств для селекционно-семеноводческого процесса создания и размножения новых сортов культур уделяется внимание во многих научных учреждениях сельскохозяйственного профиля [1-6]. Много моделей посевных машин и рабочих органов к ним для различных этапов селекционных работ и выполнения разных способов посева сельхозкультур разработано в ФНАЦ ВИМ [7-10]. В селекционно-семеноводческой работе с зерновыми колосовыми культурами особое место занимает технология посева колосьями, дающая в сравнении с посевом семенами более высокую гарантию сортовой чистоты [11-14]. Технология посева семенами имеет риск смешивания сортов из-за наличия операции обмолота колосьев при подготовке посевного материала. В настоящее время технология посева колосьями в селекционно-опытных учреждениях очень трудоемка из-за нехватки или отсутствия функциональных и надежных средств механизации [15]. По этим причинам разработка и совершенствование технических средств для реализации технологии посева колосьями – актуальная задача для исследователей-разработчиков сельхозмашин.

**Цель исследования** – разработать экспериментальный образец однорядной сеялки с диско-кассетным высевальным устройством (ДКВУ) для посева зерновых колосовых культур колосьями в се-

лекционных и семеноводческих питомниках, определить параметры высевального устройства и агротехнические показатели выполнения технологического процесса.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Экспериментальный образец однорядной сеялки с ДКВУ разработали в ФНАЦ ВИМ на основе патента РФ на изобретение № 2784081 «Сеялка с дисковыми кассетами для посева сельхозкультур» в ходе научно-исследовательской работы по совершенствованию технических средств для реализации технологии посева колосьями. При этом учли конструкцию сеялки с ленто-кассетным высевальным устройством [14, 16].

Предложили высевальное устройство дискового типа для посева колосьев. Вывели математическую формулу зависимости плотности посева колосьев от конструктивных параметров сеялки. Выполнили проработку конструкции экспериментального образца сеялки, обеспечивающей надежное прохождение высеваемого материала (колосьев, капсул с колосьями) из ячеек ДКВУ в колосопровод и далее в борозду. Разработали схему экспериментального образца однорядной сеялки с ДКВУ (рис. 1), методику лабораторно-полевых испытаний экспериментального образца однорядной селекционной сеялки для посева зерновых культур колосьями. Проанализировали результаты проведенных испытаний экспериментального образца сеялки.

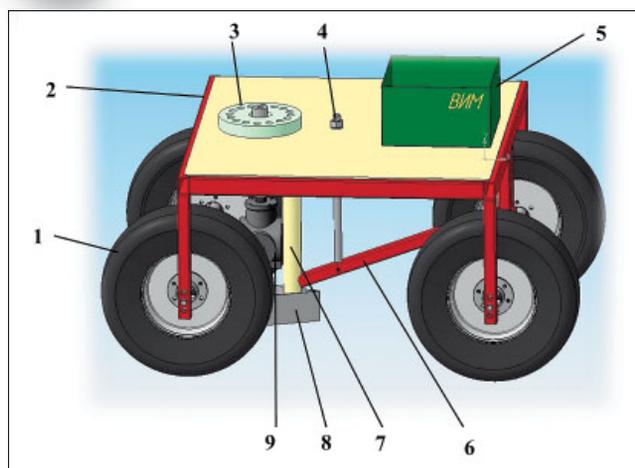


Рис. 1. Схема экспериментального образца однорядной сеялки для посева колосьями с дисковым кассетным высевальным устройством: 1 – опорно-приводное колесо; 2 – рама; 3 – сменный кассетный диск; 4 – механизм регулирования глубины хода и подъема сошника; 5 – емкость для высеваемого материала; 6 – механизм подвески сошника; 7 – колосопровод; 8 – сошник; 9 – механизм привода ДКВУ

Fig. 1. The schematic diagram of a prototype single-row seeder for ear sowing equipped with a disk cassette sowing device: 1 – support-drive wheel; 2 – frame; 3 – removable cassette disc; 4 – a mechanism for regulating the depth of travel and lifting the coulter; 5 – container for the seeded material; 6 – coulter suspension mechanism; 7 – ear conveyor; 8 – coulter; 9 – drive mechanism of the Disk-Cassette Sowing Device

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Конструкция экспериментального образца сеялки включает раму, рабочий стол, ДКВУ, колосопровод, сошник с механизмом подвески и заделывающим устройством, механизм регулирования глубины хода и подъема сошника, опорно-приводные колеса, механизм привода ДКВУ. В состав ДКВУ входят кассета (сменный кассетный диск) с ячейками под высеваемый материал, стержень-держатель для установки кассеты в рабочее положение, емкость для высеваемого материала и сменных кассет. Сошник полосного посева смонтирован на механизме подвески, выполненном в виде параллелограмма. Сеялка может быть укомплектована анкерным клиновидным или дисково-анкерным сошником (типа сошника полосного посева с фиксированной или регулируемой шириной полосы высева к универсальной зернотуковой сеялке СУЗТ-4) [14, 17]. Привод ДКВУ от опорно-приводного колеса выполнен с помощью цепной передачи со сменными звездочками на вал контрпривода и последующей передачи с применением конической пары.

С началом движения сеялки начинается вращение высевального диска ДКВУ. При этом обеспечивается равномерная подача колосьев, размещенных в ячейках кассетного диска, через высевальную щель рабочего стола в колосопровод и далее в борозду, формируемую сошником. Выпадение колоса из ячейки кас-

сетного диска происходит под действием силы тяжести. Для посева используют колосья, предварительно подготовленные путем обрезания подколосовых ножек и торчащих остей для обеспечения свободного прохождения колосьев через колосопровод и сошник.

В ходе исследований по разработке экспериментального образца особое внимание уделено обеспечению надежной защиты чистоты сорта в условиях естественного осыпания зерен с колосьев. Сеялка изготовлена с высевальным устройством, оснащенным вращающимся диском с цилиндрическими ячейками под высеваемый материал. Ячейки расположены равномерно по краю высевального диска вдоль окружности. Ее средний диаметр при диаметре несущего диска  $D = 27$  см был выбран равным  $d_1 = 21$  см, а ее длина  $C \approx 3,14 \cdot 21 \approx 66$  см. При установке вдоль этой окружности 16 ячеек с угловым расстоянием между ячейками  $22,5^\circ$  длина дуги между осями ячеек составила около 4,1 см. При внешнем диаметре ячейки 3,2 см зазор между цилиндрами ячеек – около 0,9 см.

В ходе разработки ДКВУ выведена формула зависимости плотности  $N$ , шт./м, высева в борозду посевного материала (колосьев, капсул) от конструктивных параметров сеялки:

$$N = i \cdot k / (\pi \cdot d) = w_2 / w_1 \cdot k / (\pi \cdot d), \quad (1)$$

где  $i$  – передаточное отношение (коэффициент передачи вращения от опорно-приводного колеса к высевальному диску);

$k$  – число сквозных отверстий вдоль края высевального диска для размещения ячеек с посевным материалом, шт.;

$$\pi \approx 3,14;$$

$d$  – диаметр приводного колеса сеялки, м;

$w_2$  – частота вращения высевального диска,  $c^{-1}$ ;

$w_1$  – частота вращения опорно-приводного колеса,  $c^{-1}$ .

Оценочный расчет плотности  $N$  высева колосьев по формуле (1) показал, что для значений конструктивных параметров экспериментального образца сеялки  $i = 0,2$ ;  $k = 16$  шт.;  $d = 0,32$  м:

$$N \approx 0,2 \cdot 16 / (3,14 \cdot 0,32) \approx 3,185 \text{ шт./м.}$$

Соответствующая оценка среднего расстояния между колосьями (капсулами) в рядке – около 31,4 см – попадает в рекомендуемый апробированный интервал значений, указанный в техническом задании на экспериментальный образец сеялки – 30–35 см.

За время одного полного оборота высевального диска сеялка проходит отрезок деланки длиной около 5,02 м.

В *таблице 1* представлены основные технические показатели экспериментального образца однорядной сеялки для посева зерновых культур колосьями.

Провели лабораторно-полевые испытания экспериментального образца сеялки на посевах озимой пше-

Техническая характеристика экспериментального образца однорядной колосовой сеялки TECHNICAL SPECIFICATIONS OF THE PROTOTYPE SINGLE-ROW EAR SEEDER	
Наименование показателя / Indicator name	Значение показателя / Indicator value
Тип и назначение сеялки / Seeder type and function	Сеялка селекционная однорядная ручная для посева зерновых культур колосьями A single-row manual selective ear seeder
Тип высевающего устройства / Sowing device type	Диско-кассетное с приводом от опорно-приводного колеса A disk cassette sowing device powered by the support-drive wheel.
Длина, мм / Length, mm	910
Ширина, мм / Width, mm	880
Высота, мм / Height, mm	610
Тип сошника / Coulter type	Анкерный клиновидный / Anchor wedge coulter
Заделяющее устройство / Closing device	Двухдисковое / Double disc closing device
Колосопровод / Ear conveyor	Телескопический пластиковый / Telescopic plastic
Пределы установки глубины хода сошника, см / Limits of the coulter travel depth setting, cm	3-7
Масса, кг / Weight, kg	25

ницы сорта Ивита. В ходе испытаний снимали изменения координат высеванных в борозду колосьев – расстояний (в см) от стартовой линии до места их высева, по которым рассчитаны средние расстояния между ними, а также измеряли другие параметры. Опыты выполнили в трех повторностях для двух установочных значений заглубления сошника (3,5 и 5 см). Каждая повторность соответствовала проходу сеялки по делянке в течение времени одного полного оборота высевающего диска. Результаты обработки опытных данных, полученных в ходе испытаний сеялки в полевых условиях селекционных делянок, сведены в *таблице 2*.

Средние по проходам значения исследуемых параметров для установок заглубления сошника 3,5 и 5 см составили соответственно: длина прохода сеялки по делянке, соответствующая одному обороту высевающего диска  $L_{cp}$  – 443 и 462 см; расстояние между высеванными в борозду колосьями  $s_{cp}$  – 29,5 и 30,8 см; время прохода сеялки (время засева отрезка делянки), соответствующее одному обороту высевающего диска  $t_{пр}^{cp}$  – 11 и 12 с (для сравнения: время заделки того же количества колосьев вручную составляет 65-69 с); время зарядки высевающего диска (кассеты) перед проходом сеялки  $t_{зар}^{cp}$  – 63 и 63,3 с; глубина высева колосьев, соответствующая фактической величине заглубления сошника  $h_{cp}$  – 2,8 и 4,1 см.

Тяговое усилие на перемещение экспериментального образца при выполнении технологической операции посева при заглублении сошника 3,5 см составило 0,21-0,25 кН (значительно зависит от почвенных условий).

Средние расстояния между колосьями в полосе высева (рядке) – 29,5 и 30,8 см для двух установочных значений глубины хода сошника 3,5 и 5 см при посеве озимой пшеницы сорта Ивита с использованием экспериментального образца близки аналитической

оценке среднего расстояния между колосьями (капсулами) в рядке (около 31,4 см), полученной с использованием приведенной выше расчетной формулы. Абсолютная разность между фактическим и оценочным значениями показателя не превышает 1,9 см, то есть отличие составляет около 6%. При этом значения коэффициента вариации (19,9 и 21% соответственно) свидетельствуют о достаточно стабильной работе высевающего устройства экспериментального образца сеялки.



Рис. 2. Экспериментальный образец однорядной сеялки для посева колосьями на испытаниях

Fig. 1: The prototype single-row ear seeder during field testing

Создание экспериментального образца однорядной сеялки (рис. 2) с ДКВУ для посева зерновых культур колосьями позволило провести проверку машинного выполнения этой важной технологической операции, установить рациональные параметры ДКВУ, наметить пути совершенствования конструкции машины и получить данные для проектирования многосекционной (до четырех рядов) колосовой сеялки.

**Выводы.** Внедрение специальной посевной машины с диско-кассетным высевающим устройством для посева семян элитных растений зерновых культур колосьями в селекционных и семеноводческих питом-

**Таблица 2**
**Table 2**
**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И АГРОТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ОДНОРЯДНОЙ КОЛОСОВОЙ СЕЯЛКИ**  
**TABLE 1: TECHNOLOGICAL AND AGROTECHNICAL INDICATORS FOR THE PROTOTYPE SINGLE-ROW EAR SEEDER**

Номер прохода сеялки по делянке / Pass number of the seeder across the field plot	Длина прохода по делянке, см. / Length of pass across the field plot, cm	Расстояние между колосьями, см / Distance between ears, cm.	Время одного прохода, с / Duration of a single pass, in seconds.	Время зарядки высевающего диска, с / Seed disc loading time, in seconds	Глубина высева колосьев, см / Ear seeding depth, cm	Тяговое усилие при посеве, кН / Seeding traction force, kN	Примечание / Notes
<i>При установке заглубления сошника 3,5 см / Setting the coulter depth to 3.5 cm</i>							
1	429	28,6	11	66	3,4	0,25	
2	446	29,7	12	63	2,6	0,23	
3	453	30,2	10	60	2,5	0,21	
	443	29,5 (19,9% – коэффициент вариации / variation coefficient)	11 (65-69 с – при ручной заделке / with manual sealing)	63	2,8	0,23	среднее по проходам / mean value across passes
<i>При установке заглубления сошника 5 см / Setting the coulter depth to 5 cm</i>							
1	453	30,2	12	60	3,9	–	
2	488	32,5	12	67	3,9	–	
3	444	29,6	12	63	4,6	–	
	462	30,8 (21% – коэффициент вариации / variation coefficient)	12	63,3	4,1	–	среднее по проходам / mean value across passes

никах создаст предпосылки для снижения трудоемкости выполнения технологического процесса, в сравнении с технологией посева с использованием ручного труда, и обеспечения сохранения сортовой чистоты.

Установили рациональные параметры ДКВУ: диаметр диска – 27 см; средний диаметр окружности, вдоль которой расположены отверстия под ячейки для высеваемого материала, – 21 см; количество ячеек – 16; внутренний диаметр ячеек – 3 см; длина ячеек – 15 см.

Вывели формулу зависимости плотности высева колосьев или капсул с колосьями от передаточного отношения приводного устройства и других конструк-

ционных параметров. Обоснованные рациональные параметры высевающего устройства могут быть использованы при проектировании многорядной колосовой сеялки.

Определили ряд агротехнических показателей выполнения технологического процесса экспериментальным образцом на посеве колосьями озимой пшеницы сорта Ивита. Среднее расстояние между колосьями в полосе высева – 29,5 и 30,8 см для установочных значений глубины хода сошника 3,5 и 5 см соответственно. При этом средняя фактическая глубина борозды составила соответственно 3 и 4 см. Ширина дна борозды – 6 см.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Кынев Н.Г. ВИМ – основатель производства селекционной техники в России // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2008. N4. С. 9-11.
- Анискин В.И., Некипелов Ю.Ф. Механизация опытных работ в селекции, сортоиспытании и первичном семеноводстве зерновых и зернобобовых культур. М.: ВИМ. 2004. 199 с.
- Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N4. С. 6-10. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
- Несмиян А.Ю., Ценч Ю.С. Тенденции и перспективы развития отечественной техники для посева зерновых культур // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018.



- Т. 12. N3. С. 45-52. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-3-45-52.
5. Beloiev H., Borisov B., Adamchuk V., et al. Theory of Movement of the Combined Seeding Unit. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2015. Vol. 7. 21-26. DOI 10.1016/j.aaspro.2015.12.024.
  6. Yaropud V., Datsiuk D. By improving breeding seeder sowing device small seeded crops. *Vibrations in engineering and technology*. 2021. Iss. 1 (100). 152-162. DOI 10.37128/2306-8744-2021-1-15.
  7. Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С., Квас С.А. Технология комбинированного способа посева и высеваше аппараты для его осуществления // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N4(33). С. 61-65.
  8. Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С., Миронова А.В. Разработка и исследование дозирующей системы высеваше устройства пневматической сеялки // *Техника и оборудование для села*. 2021. N6(288). С. 8-11. DOI 10.33267/2072-9642-2021-6-8-11.
  9. Lavrov A., Smirnov I., Litvinov M. Justification of the construction of a self-propelled selection seeder with an intelligent seeding system. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 224. 05011. DOI 10.1051/mateconf/201822405011.
  10. Текушев А.Х., Чаплыгин М.Е., Чулков А.С. и др. Автоматизированные технические средства в посевной технике для селекции и семеноводства сельхозкультур // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2022. Т. 69. N3(48). С. 49-55. DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-3-49-55.
  11. Грабовец А.И., Фоменко М.А. Озимая пшеница. Ростов н/Д: Юг. 2007. 560 с.
  12. Шайхов М.К., Жалнин Э.В., Шайхов М.М. и др. К разработке селекционной сеялки для посева зерновых культур колосьями // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N3(32). С. 114-120.
  13. Podzorov A., Shaikhov M., Khamuev V., et al. Machines and Equipment for Sowing Grain Crops on Plots of the I and II Stages of Selection Work. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 988. Iss. 3. 032021. DOI 10.1088/1755-1315/988/3/032021.
  14. Чаплыгин М.Е., Шайхов М.М., Чулков А.С. и др. Определение показателей лентокассетного высеваше устройства для селекционного посева зерновых культур колосьями // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N2. С. 56-61. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-2-56-61.
  15. Блохин В.И., Шайхов М.К., Шайхов М.М. и др. Опыт использования колосковой сеялки в селекции и семеноводстве зерновых культур // *Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации Государственной программы развития сельского хозяйства: сборник научных докладов Международной научно-технической конференции*. Ч. 1. М.: ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2015. С. 307-310.
  16. Крючина Н.В., Мишанин А.Л., Машков С.В. и др. Теоретическое обоснование конструктивных и технологических параметров питающего окна дисково-ленточного высеваше аппарата // *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021. N3. С. 46-54.
  17. Шайхов М.М., Шайхов М.К. Рабочие органы зернотуковой сеялки с регулируемой шириной полосы посева // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N1(34). С. 68-72.

## REFERENCES

1. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Kynev N.G. VIM – osnovatel' proizvodstva selektsionnoy tekhniki v Rossii [VIM - the founder of the breeding equipment production in Russia]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2008. N4. 9-11 (In Russian).
2. Aniskin V.I., Nekipelov Yu.F. Mekhanizatsiya opytnykh rabot v selektsii, sortoispytanii i pervichnom semenovodstve zernovykh i zernobobovykh kul'tur [Mechanization of experimental work in breeding, variety testing and primary seed production of grain and leguminous crops]. Moscow: VIM. 2004. 199 (In Russian).
3. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Tsifrovyye tekhnologii i robotizirovannyye tekhnicheskyye sredstva dlya sel'skogo khozyaystva [Digital technologies and robotic devices in the agriculture]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N4. 6-10 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
4. Nesmiyan A.Yu., Tsench Yu.S. Tendentsii i perspektivy razvitiya otechestvennoy tekhniki dlya poseva zernovykh kul'tur [Trends and prospects for the development of domestic grain sowing equipment]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. N3. 45-52 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-3-45-52.
5. Beloiev H., Borisov B., Adamchuk V., et al. Theory of Movement of the Combined Seeding Unit. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2015. Vol. 7. 21-26 (In English). DOI 10.1016/j.aaspro.2015.12.024.
6. Yaropud V., Datsiuk D. By improving breeding seeder sowing device small seeded crops. *Vibrations in engineering and technology*. 2021. N1 (100). 152-162 (In English). DOI 10.37128/2306-8744-2021-1-15.
7. Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S., Kvas S.A. Tekhnologiya kombinirovannogo sposoba poseva i vysevayushchie apparaty dlya ego osushchestvleniya [Combined method of sowing and sowing machines for its implementation]. *Vestnik VIESH*. 2018. N4(33). 61-65 (In Russian).
8. Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S., Mironova A.V. Razrabotka i issledovanie doziryushchey sistemy vysevayushchego ustroystva pnevmaticheskoy seyalki [Development and research of a pneumatic seed drill seedmetering unit]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2021. N6(288). 8-11 (In Russian). DOI 10.33267/2072-9642-2021-6-8-11.
9. Lavrov A., Smirnov I., Litvinov M. Justification of the construction of a self-propelled selection seeder with an intelli-

- gent seeding system. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 224. 05011 (In English). DOI 10.1051/mateconf/201822405011.
10. Tekushev A.Kh., Chaplygin M.E., Chulkov A.S. et al. Avtomatizirovannye tekhnicheskie sredstva v posevnoy tekhnike dlya selektsii i semenovodstva sel'khozkul'tur [The automated technical means in sowing equipment for breeding and seed production of agricultural crops]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2022. Vol. 69. N3(48). 49-55 (In Russian). DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-3-49-55.
  11. Grabovets A.I., Fomenko M.A. Ozimaya pshenitsa [Winter wheat]. Rostov n/D: Yug. 2007. 560 (In Russian).
  12. Shaykhov M.K., Zhalnin E.V., Shaykhov M.M., et al. K razrabotke selektsionnoy seyalki dlya poseva zernovykh kul'tur kolos'yami [Development of a selective seeder for sowing grain crops with ears]. *Vestnik VIESH*. 2018. N3(32). 114-120 (In Russian).
  13. Podzorov A., Shaikhov M., Khamuev V., et al. Machines and Equipment for Sowing Grain Crops on Plots of the 1 and 2 Stages of Selection Work. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 988. N3. 032021 (In English). DOI 10.1088/1755-1315/988/3/032021.
  14. Chaplygin M.E., Shaykhov M.M., Chulkov A.S. et al. Opredelenie pokazateley lentokassetnogo vysewayushchego ustroystva dlya selektsionnogo poseva zernovykh kul'tur kolos'yami [Specifying the indicators of a breeding tape-cassette sowing device for sowing grain crops by ears]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N2. 56-61 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-2-56-61.
  15. Blokhin V.I., Shaykhov M.K., Shaykhov M.M., et al. Opyt ispol'zovaniya koloskovoy seyalki v selektsii i semenovodstve zernovykh kul'tur [Experience of using a spikelet seeder in the selection and seed production of grain crops]. *Intellektual'nye mashinnye tekhnologii i tekhnika dlya realizatsii Gosudarstvennoy programmy razvitiya sel'skogo khozyaystva: sbornik nauchnykh dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. C. 1. Moscow: FSAC VIM, 2015. 307-310 (In Russian).
  16. Kryuchina N.V., Mishanin A.L., Mashkov S.V., et al. Teoreticheskoe obosnovanie konstruktivnykh i tekhnologicheskikh parametrov pitayushchego okna diskovo-lentochnogo vysewayushchego apparata [Theoretical justification of design and process dependent parameters of a supply port of a belt feed with disks]. *Izvestiya Samarskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2021. N3. 46-54 (In Russian).
  17. Shaykhov M.M., Shaykhov M.K. Rabochie organy zernotukovoy seyalki s reguliruemoy shirinoy polosy vyseva [Working parts of grain-fertilizer drill with adjustable width of the seeding strip]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N1(34). 68-72 (In Russian).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Заявленный вклад соавторов:

- Шайхов М.М. – формулирование цели и задач исследований, обоснование параметров высевающего устройства, формирование общих выводов, итоговая доработка текста статьи;
- Чулков А.С. – составление начального варианта статьи, визуализация материалов исследований, доработка текста статьи, формирование общих выводов;
- Подзоров А.В. – разработка теоретических предпосылок, подготовка и проведение исследований экспериментального образца, формирование общих выводов;
- Текушев А.Х. – подготовка и проведение исследований экспериментального образца, обработка результатов испытаний;
- Чаплыгина Т.В. – анализ литературных источников, обработка результатов исследований, доработка текста статьи.

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Coauthors' contribution:

- Shaykhov M.M. – formulation of research objectives and tasks, justification of seeding device parameters, formulation of general conclusions, final editing of the article manuscript;
- Chulkov A.S. – drafting the initial version of the article, research materials visualization, the article manuscript proofreading, formulation of general conclusions;
- Podzorov A.V. – development of theoretical assumptions, preparing and conducting the experimental sample research, formulation of general conclusions;
- Tekushev A.Kh. – preparing and conducting the experimental sample research, test result processing;
- Chaplygina T.V. – literature review, research result processing, working on the article manuscript.

*The authors read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию  
Статья принята к публикации

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

03.04.2023  
25.05.2023



## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Журнал «Сельскохозяйственные машины и технологии» входит в Перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации трудов соискателей ученых степеней кандидата и доктора наук по специальностям: 4.1.5 / 4.3.1 / 4.3.2 / 5.6.6.

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования и в Международную информационную систему по сельскому хозяйству *AGRIS, RSCI*. Электронные версии журнала размещаются на сайтах Российской универсальной научной электронной библиотеки, Российской государственной библиотеки и Российской книжной палаты.

Статьи, направляемые в журнал для публикации, должны соответствовать основной тематике журнала.

Статьи, поступившие в редакцию, проходят двойное слепое рецензирование. Отрицательная рецензия является основанием для отказа в публикации.

Редакция принимает рукописи и электронные версии статей, набранные в Word шрифтом 14 пт. через 1,5 интервала, объемом 15-20 страниц.

Приведенные в статье формулы должны иметь пояснения и расшифровку всех входящих в них величин с указанием единиц измерения в СИ. Графические материалы должны быть приложены в виде отдельных файлов: фотографии – *jpg* или *tif* с разрешением *300 dpi*, графики, диаграммы – в *eps* или *ai*. Все графические материалы, рисунки и фотографии должны быть пронумерованы, подписаны на русском и английском языках и иметь ссылку в тексте.

Простые внутристрочные и однострочные формулы должны быть набраны символами в редакторе формул *Microsoft Word* без использования специальных редакторов. Не допускается набор: часть формулы символами, а часть в редакторе формул. Если формулы заимствованы из других источников, то не следует приводить в них подробных выводов: авторы формул это уже сделали, повторять их не следует. Ссылки на обозначения формул обязательны. Статья должна содержать не более 10 формул, 3-4 иллюстрации, 3-4 таблицы, размер таблиц не более 1/2 страницы.

В каждой статье должны быть указаны следующие данные:

- название статьи;
- фамилия, имя и отчество автора(ов) полностью;
- e-mail автора(ов), контактный телефон;
- место работы автора(ов) (аббревиатуры не допускаются), почтовый адрес;

- ученая степень, ученое звание автора(ов);
- реферат (объем 200-250 слов);
- ключевые слова;
- библиографический список.

Статью следует структурировать, обязательно указав следующие разделы:

- Введение (актуальность);
- Цель исследования;
- Материалы и методы;
- Результаты и обсуждение;
- Выводы.

Библиографический список (не менее 20 источников из них 3-4 иностранных, входящих в базу данных *Web of Science*, за последние 5 лет) следует оформлять по ГОСТ Р 7.05-2008.

Реферат

Реферат – это самостоятельный законченный материал. Вводная часть минимальна. Нужно коротко и емко отразить актуальность и цель исследований, условия и схемы экспериментов, привести полученные результаты (с обязательным аргументированием на основании цифрового материала), сформулировать выводы.

Объем реферата – 200-250 слов.

Нельзя использовать в реферате аббревиатуры и сложные элементы форматирования (например, верхние и нижние индексы).

На английский язык следует перевести:

- название статьи;
- фамилию, имя, отчество (полностью);
- ученая степень, ученое звание, место работы автора (ов);
- реферат и ключевые слова;
- библиографический список.

Машинный перевод недопустим!

В конце рукописи необходимо указать фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. Приводится на русском и английском языках.

Рукопись статьи должна быть подписана лично авторами. Автор несет юридическую и иную ответственность за содержание статьи.

Несоответствие статьи хотя бы одному из перечисленных условий может служить основанием для отказа в публикации.

**Подписку на журнал**  
можно оформить в агентстве «Урал-Пресс»  
на сайте: [www.ural-press.ru](http://www.ural-press.ru),  
а также в редакции журнала.

Индекс издания **66060**

**КОНТАКТЫ:**

Тел.: 8 (499) 174-88-11, 8 (499) 174-89-01  
[www.vimsmit.com](http://www.vimsmit.com)      e-mail: [smit@vim.ru](mailto:smit@vim.ru)