

ISSN 2073-7599 (print)
ISSN 2618-6748 (online)

Сельскохозяйственные машины и технологии

AGRICULTURAL MACHINERY AND TECHNOLOGIES

Том 16 N 1 2022

Vol. 16 N 1 2022

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC-THEORETICAL JOURNAL



1 2022





ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
ЦЕНТР

Сельскохозяйственные МАШИНЫ и ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал зарегистрирован
Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
(РОСКОМНАДЗОР)
Свидетельство ПИ № ФС77-68608
от 3 февраля 2017 г.

Журнал включен в перечень изданий,
рекомендованных ВАК РФ для публика-
ции трудов соискателей ученых степе-
ней кандидата и доктора наук

Журнал включен
в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ)

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

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

НАД НОМЕРОМ РАБОТАЛИ:

В.В. Бижаев,
Л.А. Горелова,
С.В. Гришуткина,
Р.М. Нурбагандова

Перевод – Светлана Сорокина

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

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

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

© ФГБУ ФНАЦ ВИМ, 2022

Отпечатано в ФГБУ ФНАЦ ВИМ
Формат 205 x 290 мм
Подписано в печать 14.03.2022
Тираж 500 экз.

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Андрей Юрьевич Измайлов

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, член Президиума Российской академии наук, директор Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Яков Петрович Лобачевский (ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА)

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, первый заместитель директора Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация

Виктор Валентинович Альт

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, заслуженный деятель науки Российской Федерации, академик НАН Монголии, руководитель научного направления Сибирского физи-ко-технического института аграрных проблем, г. Новосибирск, Российская Федерация

Христо Иванов Белоев

доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Болгарской академии наук, Русенский универси-тет, г. Русе, Республика Болгария

Михаил Никитиевич Ерохин

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, Москва, Рос-сийская Федерация

Юрий Анатольевич Иванов

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Российской академии наук, директор Всероссий-ского научно-исследовательского института механизации животноводства, г. Подольск, Российская Феде-рация

Йошисуке Кишида

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

Юрий Федорович Лачуга

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Антонин Махалек

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

Тадеуш Павловски

доктор технических наук, профессор, директор Промышленного института сельскохозяйственной техники, г. Познань, Республика Польша

Владимир Дмитриевич Попов

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, руководитель научного на-правления Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Жарылкасын Сарсембекович Садыков

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

Даврон Рустамович Норчаев

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

Юлия Сергеевна Ценч

кандидат педагогических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация

Вячеслав Иванович Черноиванов

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация



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. ФЦ77-68608
from February, 3, 2017

**The Journal is included in the
list of peer-reviewed scientific
publications recommended
by the Higher Attestation
Commission for publishing the
research results from theses for
Ph.D. and Dr.Sc. degrees.**

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

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

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

EXECUTIVE EDITORS:

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

EDITORIAL OFFICE'S ADDRESS

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

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

**Printed by FSAC VIM
Russian Academy of Science**

The format is 205 × 290 mm
The issue was submitted 14.03.2022
The circulation is 500 copies

[SEL'SKOKHOZYAYSTVENNYE MASHINY I TEKHOLOGII]

**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, First Deputy Director of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Viktor V. Al't

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Honoured Scientist of Russian Federation, Academician of NAS of Mongolia, Head of Scientific Division of Siberian Physical and Technical Institute of Agrarian Problems, Novosibirsk, Russian Federation

Khristo I. Beloev

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Corresponding Member of the Bulgarian Academy of Sciences, University of Ruse, Republic of Bulgaria

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, Academician Secretary of Department of Agricultural Sciences at the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Antonin Makhalek

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

Tadeush Pavlovsky

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Director of the Industrial Institute of Agricultural Machines, Poznan, Poland

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

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

Yulia S. Tsench

Ph.D.(Ed.), Associate Professor, Leading Researcher of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Vyacheslav I. Chernov

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



НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

- Кирсанов В.В.**
Структурно-функциональные модели
построения автоматизированных
и роботизированных молочных ферм
нового поколения. 4
- Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А., Хименко А.В.**
Сравнительный анализ методов расчета
лучистого обогрева молодняка
в животноводческих помещениях 10

ТЕХНИКА ДЛЯ РАСТЕНИЕВОДСТВА

- Дорохов А.С., Аксенов А.Г., Сибирев А.В.,
Мосяков М.А., Сазонов Н.В.**
Исследование сепарирующей системы
с использованием теплоты отработавших
газов двигателя свеклоуборочного комбайна . . . 19
- Дерепаскин А.И., Куваев А.Н., Токарев И.В.**
Математическая модель для определения
конструктивной массы
почвообрабатывающего орудия 27
- Тошболтаев М.Т., Мурадова З.О.**
Определение показателей оценки работы
средств малой механизации
сельскохозяйственного назначения 34
- Камбулов С.И., Пархоменко Г.Г., Бабенко О.С.,
Божко И.В.**
Влияние параметров рабочего органа
культиватора на качество крошения
почвенного пласта 41
- Старовойтов С.И., Гринь А.М.**
Плужный корпус для прецизионной
обработки почвы 47

ИННОВАЦИИ

- Марченко Л.А., Смирнов И.Г., Курбанов Р.К.,
Спиридонов А.Ю.**
Себестоимость применения беспилотной
авиационной системы для внесения
пестицидов и удобрений. 53

ЭКОЛОГИЯ

- Миронова А.В.**
Технологические и физико-механические
свойства задерненных почв 63

ЗЕРНОУБОРОЧНАЯ ТЕХНИКА

- Липкань А.В., Кувшинов А.А., Усанов В.С.,
Смолянинова Н.О., Сахаров В.А.**
Методика определения потерь зерна
за жаткой и молотилкой комбайна
при уборке сои 69

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Крестовников К.Д., Ерашов А.А.,
Васюнина Ю.Г., Савельев А.И.**
Разработка устройства сопряжения
для модульной сельскохозяйственной
робототехнической платформы 78

NEW MACHINERY AND TECHNOLOGIES

- Kirsanov V.V.**
Structural and functional models for building
new generation automated and robotic
dairy farms. 4
- Kuz'michev A.V., Tikhomirov D.A., Khimenko A.V.**
Comparative analysis of methods for calculating
radiant heating of young animals in livestock
premises. 10

MACHINERY FOR PLANT GROWING

- Dorokhov A.S., Aksenov A.G., Sibirev A.V.,
Mosyakov M.A., Sazonov N.V.**
Study of an exhaust gas heat separation system
for the beet harvester. 19
- Derepaskin A.I., Kuvaev A.N., Tokarev I.V.**
A mathematical model for determining the specific
structural weight of a tillage implement. 27
- Toshboltaev M.T., Muradova Z.O.**
Identifying performance assessment indicators
for agricultural small-scale machinery. 34
- Kambulov S.I., Parkhomenko G.G., Babenko O.S.,
Bozhko I.V.**
Influence of the cultivator working body
parameters on the soil crumbling quality. 41
- Starovoytov S.I., Grin' A.M.**
Working tool for precision tillage 47

INNOVATION

- Marchenko L.A., Smirnov I.G., Kurbanov R.K.,
Spiridonov A.Yu.**
Operational costs of unmanned aircraft system
for applying pesticides and fertilizers 53

ECOLOGY

- Mironova A.V.**
Technological and physico-mechanical
properties of blackened soils. 63

GRAIN HARVESTING MACHINERY

- Lipkan' A.V., Kuvshinov A.A., Usanov V.S.,
Smolyaninova N.O., Sakharov V.A.**
Method for determining grain losses behind
the combine header and thresher during
soybean harvesting 69

DIGITAL TECHNOLOGIES

- Krestovnikov K.D., Erashov A.A.,
Vasyunina Yu.G., Savel'ev A.I.**
Development of interface device for modular
agricultural robotic platform 78

Структурно-функциональные модели построения автоматизированных и роботизированных молочных ферм нового поколения

Владимир Вячеславович Кирсанов,
доктор технических наук, главный научный
сотрудник, e-mail: kirvv2014@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Показали, что крупные молочно-товарные комплексы на 2000 коров и более создают повышенную экологическую нагрузку на окружающую среду. Назвали основные возникающие при этом задачи: создание оптимального микроклимата в помещениях для разных половозрастных групп; обеспечение щадящих и комфортных режимов технологического и ветеринарно-санитарного обслуживания и содержания животных; переработка отходов; повышение продуктивного долголетия коров до 4-5 лактаций. (*Цель исследований*) Разработать методологии модульного построения расширенного типоразмерного ряда автоматизированных и роботизированных животноводческих ферм нового поколения. (*Материалы и методы*) Предложили основные критерии и показатели построения «умной» фермы: минимальные затраты корма на единицу продукции; пониженный расход энергии; оптимальная капиталоемкость оборудования и инженерных сооружений в расчете на одно скотоместо; минимальная себестоимость единицы продукции при ее высоком качестве. Получили критериальное уравнение для суммарного функционала молочной фермы. (*Результаты и обсуждение*) Проанализировали структурно-функциональные схемы молочных ферм различной конфигурации и размеров (Т-Н-образной формы), в том числе совмещенные фермы-хранилища, позволяющие создать объединенную функционально-логистическую инфраструктуру, состоящую из типовых модульных единиц. Предложили концепцию построения технологического модуля «умной» роботизированной фермы на 400 голов с совмещенными секционными хранилищами кормов и отходов, роботизированным доильным залом, многофункциональным электрифицированным роботизированным погрузчиком-пододвигателем-кормораздатчиком и оборудованием для дифференцированного обеспечения микроклимата. (*Выводы*) Разработали методы, модели и структурно-функциональные схемы модульного построения автоматизированных и роботизированных молочных ферм нового поколения различных форм и типоразмеров. Подтвердили их преимущества: оптимальные сроки возведения, щадящее воздействие на биологические объекты и окружающую среду, повышение уровня цифровизации и автоматизации производства, продуктивного долголетия животных, рентабельности молочного животноводства в целом.

Ключевые слова: молочная ферма Т-Н-образной формы, молочно-товарный комплекс, модульная единица, технологический модуль, коровник, доильно-молочный блок.

Для цитирования: Кирсанов В.В. Структурно-функциональные модели построения автоматизированных и роботизированных молочных ферм нового поколения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №1. С. 4-9. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-4-9.

Structural and Functional Models for Building New Generation Automated and Robotic Dairy Farms

Vladimir V. Kirsanov,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: kirvv2014@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The authors showed that large dairy complexes for over 2,000 cows create an increased environmental burden on the environment. The main tasks arising in this case were named: creating an optimal indoor microclimate for different age and gender groups of animals; providing sparing and comfortable modes of technological, veterinary and sanitary care and keeping animals; waste recycling; increasing the productive longevity of cows up to 4-5 lactations. (*Research purpose*) To develop methodologies for modular construction of an expanded standard-size range of new generation automated and

robotic livestock farms. (*Materials and methods*) The authors proposed the main criteria and indicators for building a "smart" farm: minimum feed costs per unit of production; reduced energy consumption; optimal capital intensity of equipment and engineering structures per one livestock place; the minimum cost per unit of production with its high quality. The authors received the criterion equation for the total functional of the dairy farm. (*Results and discussion*) The authors analyzed the structural and functional diagrams of various configuration and size dairy farms (T-H-shaped), including combined storage farms, which make it possible to create a combined functional and logistics infrastructure consisting of standard modular units. The authors proposed the concept of building a technological module for a "smart" robotic farm for 400 heads with combined sectional feed and waste storage facilities, a robotic milking parlor, a multifunctional electrified robotic feed loader-pusher-dispenser and equipment for microclimate differentiated provision. (*Conclusions*) The authors developed methods, models, structural and functional schemes for modular construction of new generation automated and robotic dairy farms of various shapes and sizes. Their following advantages were confirmed: the optimal construction time, a sparing effect on biological objects and the environment, an increase in the production digitalization and automation level, the animal productive longevity, the dairy farming profitability in general.

Keywords: T-H-shaped dairy farm, dairy complex, modular unit, technological module, cowshed, milking and dairy unit.

For citation: Kirsanov V.V. Strukturno-funktsional'nye modeli postroeniya avtomatizirovannykh i robotizirovannykh molochnykh ferm novogo pokoleniya [Structural and functional models for building new generation automated and robotic dairy farms]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N1. 4-9 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-4-9.

Животноводческие комплексы – крупные объекты компактной моноблочной или павильонной застройки, осуществляемой по единому генеральному плану [1]. Хранилища кормов, помещения для животных, зооветблоки и другая инфраструктура находятся, как правило, на одной закрытой территории. В непосредственной близости от объекта расположены системы водоснабжения, переработки и хранения навоза. В последние годы в разных регионах России строят очень крупные комплексы на 2000, 3000 и более голов КРС, что создает повышенную экологическую нагрузку на окружающую среду [2].

Основные проблемы связаны с обслуживанием и лечением животных. Постоянное нахождение коров в одном помещении, отсутствие активного движения вызывают стрессы, заболевания и, как следствие, сокращение периода эффективного использования животных в пределах 2,5-3 лактаций, а также необходимость содержания большого количества ремонтного поголовья [3]. К тому же стремление к максимально высоким годовым надоям (12-13 тыс. л) также сокращает сроки хозяйственного использования животных. Основные факторы выбраковки: заболеваемость животных маститом (до 30-35%), болезни копыт (до 30-35%), репродуктивных органов и др. Отсюда возникает необходимость использовать щадящие способы обслуживания животных, создавать комфортную среду обитания (микроклимат, навозоудаление, удобные боксы для содержания), сокращать время ожидания при доении, кормлении, зооветеринарном обслуживании, родовспоможении и др. [4].

При этом важно минимизировать траектории перемещения материальных потоков и животных к кормовому столу, автопоилкам и доильному залу, обе-

спечить постоянную доступность корма на кормовом столе, чистоту и сухость стойл (наличие подстилки), кратность и полноту уборки навозных каналов [5]. При расположении в моноблочном коровнике разных половозрастных групп следует позаботиться о дифференцированном микроклимате в одном помещении [6]. Кратчайшее расстояние между хранилищами и фермой, а в случае их совместного размещения «ферма – хранилище» или «ферма – кормокухня» с быстрым подвозом кормов, дают возможность использовать электрифицированные раздатчики ограниченной мобильности без выезда с территории фермы, что позволит повысить кратность обслуживания и гигиену кормления животных.

Такие проекты уже начинают реализовывать с использованием доильных роботов, систем автоматического кормления в виде кормовагонов подвешенного типа или наземных управляемых кормораздатчиков по типу *Vector* фирмы *Lely*, что исключает раздачу «с колес» кормомиксером и возможное при этом загрязнение кормового стола [7].

Цель исследования – разработать методологию модульного построения расширенного типоразмерного ряда автоматизированных и роботизированных животноводческих ферм нового поколения с единой функционально-логистической инфраструктурой.

Материалы и методы. Перечислим основные критерии и показатели «умной» фермы:

- минимальные затраты корма на единицу продукции ($K_{\text{корм}}$, кг/кг);
- минимальный расход энергии на единицу продукции ($\mathcal{E}_{\text{пр}}$, кДж/кг) [8];
- оптимальная капиталоемкость оборудования и инженерных сооружений на 1 скотоместо ($K_{\text{об}}$, тыс. руб./гол.);

- минимальная себестоимость литра молока при его высоком качестве ($C_{пр}$, руб./л) [9];
 - минимальная выбраковка и оптимальное продуктивное долголетие молочного скота – не менее 4-5 лактаций ($L_{ж}$, лакт.);
 - эффективное интеллектуализированное управление технологическими процессами и материальными потоками с минимальными их потерями, обеспечивающими оптимальную кратность обслуживания животных ($IUV_{тп}$);
 - максимальное использование генетического потенциала ($ГП_{ж}$);
 - минимальные трудозатраты на единицу продукции ($З_{тр}$, чел.ч);
 - экологически безопасное воздействие на окружающую среду и расположенные поблизости населенные пункты ($Э_6$) [10];
 - оптимальные размеры фермы, соответствующие размерам собственного кормопроизводства и земельного участка, обеспечивающего полную утилизацию навозной массы или ее глубокую переработку со сбором жидкой фракции в водоемы ($F_{опт}$, га) [11].
- Таким образом, суммарный критериальный функционал фермы можно записать в следующем виде:
- $$F_{\Sigma} = f(K_{корм}) + f(Э_{пр}) + f(K_{об}) + f(C_{пр}) + f(L_{ж}) + f(ГП_{ж}) + f(IUV_{тп}) + f(З_{тр}) + f(F_{опт}) + f(Э_6), \quad (1)$$
- где $f(K_{корм}) \dots f(Э_6)$ – соответствующие критериальные функционалы.
- Изучение этих функционалов представляет решение отдельных задач, выполняемых в соответствии с общей задачей эффективного функционирования и управления сложной биотехнической системой (Ч-М-Ж) молочной фермы [12, 13].
- При этом особое внимание следует уделить ключевым технологиям, обеспечивающим повышение продуктивности и комфорта содержания животных, сокращение их заболеваемости и выбраковки. Для этого необходимо:
- внедрить автоматизированное или роботизированное почтвортное доение, сокращающее заболеваемость животных маститом [14, 15];
 - обеспечить минимальную продолжительность контакта навозной массы с копытами животных (использование щелевых полов с проталкиванием навоза и последующим удалением из помещения);
 - предусмотреть многократную дозированную раздачу корма и обслуживание кормового стола для полноценного кормления;
 - создать дифференцированный микроклимат для содержания различных половозрастных групп животных [16];
 - обеспечить активный моцион животных с выгульными дворами и прифермскими пастбищами;
 - организовать эффективный контроль и обследование животных [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Рассмотрим примерную композицию технологических модулей автоматизированных и роботизированных молочных ферм с совмещенными хранилищами и кормокухнями (рис. 1, 2).

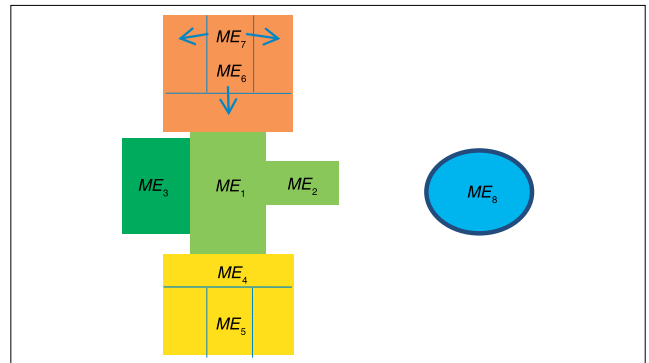


Рис. 1. Т-образная модульная « $M_1=M_T$ » ферма с одним коровником (ME_1) и доильно-молочным блоком (ME_2) на 25-50-100-200-300-400-500-600 голов; $ME_3 \dots ME_7$ – соответственно, модульные единицы выгульных площадок, кормоприготовительных отделений, секционных хранилищ кормов, площадок для ферментации навоза, секционных навозохранилищ и объектов водоснабжения; ME_8 – модульная единица водоснабжения

Fig. 1. T-shaped modular « $M_1=M_T$ » farm with one cowshed (ME_1) and a milking unit (ME_2) for (25-50-100-200-300-400-500-600) heads; $ME_3 \dots ME_7$ – respectively, modular units of paddock sites, feed preparation departments, sectional feed storages, manure fermentation sites, sectional manure storage facilities and objects of water supply facilities; ME_8 – modular unit of water supply

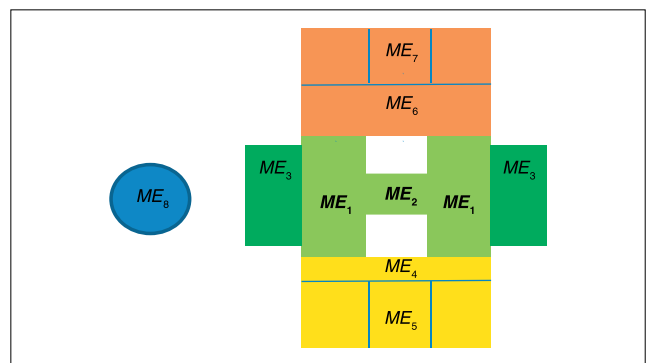


Рис. 2. H-образная « $M_2=M_H$ » ферма с двумя коровниками на 200-400-600-800-1000-1200 голов

Fig. 2. H-shaped « $M_2=M_H$ » farm with two cowsheds for (200-400-600-800-1000-1200) heads

Таким образом, примерные структурные формулы модульных молочных ферм различной вместимости и конфигурации могут быть записаны следующим образом:

$$M_T = ME_1 \wedge ME_2 \wedge ME_3 \wedge ME_4 \wedge ME_5 \wedge ME_6 \wedge ME_7 \wedge ME_8;$$

$$M_H = 2M_T = 2ME_1 \wedge 2ME_2 \wedge 2ME_3 \wedge ME_4 \wedge ME_5 \wedge ME_6 \wedge \wedge ME_7 \wedge ME_8, \quad (2)$$

где $ME_1 \dots ME_8$ – базовые модульные единицы структуры молочной фермы;

$\wedge$ – оператор логического сложения.

Таким образом, произвольный типоразмер модульной фермы может быть записан в виде:

$$\begin{aligned} M_1 &= M_T; \\ M_2 &= 2M_1 = 2M_T = M_H; \\ M_3 &= 3M_1 = M_H + M_T = M_{SH}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$M_n = nM_1 = M_{n-1} + M_1 \text{ (для любых значений } n);$$

$$M_n = nM_1 = (n-2)M_{n-2} \text{ (для четных } n \geq 2).$$

В соответствии с выражениями (3) для типоразмера $M_3 = M_{SH}$ (Ш-образной формы) будем иметь максимальное значение поголовья $3M_1 = 3 \cdot 600 = 1800$, а для типоразмера $(2M_H)$ или $M_4 = 4M_1 = 4 \cdot 600 = 2400$, или $M_4 = (4-2)M_2 = 2 \cdot 1200 = 2400$ и т.д.

В приведенном примере расчета фермы взят максимальный размер модульной единицы $M_1 = 600$ гол., что следует считать пределом для строений с павильонной застройкой. Однако для моноблочных помещений он даже может быть увеличен до 1000-1200 гол. Это прежде всего касается мегаферм. С точки зрения снижения экологической нагрузки, оптимальным размером модульной единицы можно считать средний размер 400 гол. для сельхозорганизаций и 50-100 гол. для КФХ.

Примерные базовые типоразмеры молочных ферм включают 8 основных модульных единиц (рис. 1, 2):

- помещения для животных M_1 ;
- доильно-молочные блоки M_2 ;
- выгульные площадки (прифермские пастбища) M_3 ;
- площадки (кормокухни) для подготовки кормосмеси M_4 ;
- секционные кормохранилища траншейного или башенного типов M_5 , заблокированные с фермой;
- площадки с оборудованием для переработки навоза M_6 ;
- секционные навозохранилища траншейного или башенного типа для жидкой фракции или технической воды с системой рециркуляции после ее глубокой переработки M_7 ;
- объекты водоснабжения M_8 .

Такая компоновка, безусловно, может включать дополнительные модульные единицы, объединенные с вышеперечисленными. Здесь принципиально важным моментом остается компактная моноблочная компоновка основных технологических и инженерных сооружений, позволяющая реализовать принципы интеллектуализированного автоматизированного или роботизированного управления [18], минимальную протяженность подачи и отведения материальных потоков, уменьшение выбросов вредных газов и жидких отходов и соответствующее снижение нагрузки на окружающую среду.

Анализ биотехнических систем в животноводстве

позволяет разработать методы построения и компьютерного проектирования технологических модулей молочных ферм, основанных на модульных единицах технологического типа ME_1 (коровник, телятник и т.д.), ME_2 (доильно-молочный блок и др.) и др.

Модульные единицы могут включать индивидуальные KE_H и групповые KE_T конечные элементы: боксы, поилки, накопители животных и др. Создается библиотека «проволочных» каркасов поперечных сечений модульных единиц и, методом «выталкивания» с определенным шагом, формируется объемная 3D-модель. Групповые конечные элементы генерируются из индивидуальных конечных элементов, которые импортируются из соответствующей базы данных:

$$ME_{1 \dots n} = \sum KE_H \wedge \sum KE_T, \quad (4)$$

где KE_H , KE_T – соответственно, индивидуальные и групповые конечные элементы.

Строительные конструкции аналогичным образом моделируются стержневыми и пластинчатыми элементами, проводится расчет силовых (ветровых, снеговых) и тепловых нагрузок, осуществляется альтернативный выбор строительных материалов из базы данных [19].

Реализация предлагаемых методов и моделей обеспечит создание специализированных программных продуктов (баз данных и компьютерных программ) для адресного ускоренного (в 3-4 раза) технологического и «строительного» проектирования животноводческих объектов в вариантном исполнении (рис. 3) [20].

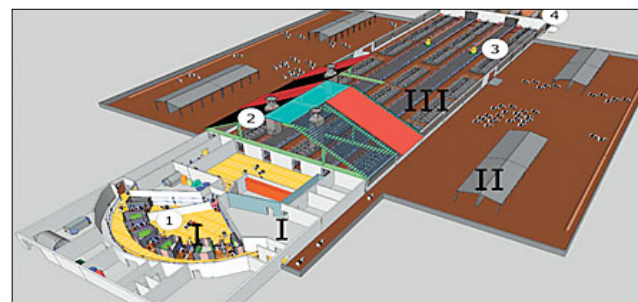


Рис. 3. Концепт-модель роботизированной молочной фермы на 400 голов: I – доильный блок; II – выгульная площадка; III – помещение для содержания молочных коров; 1 – роботизированный доильный зал «Веер» на 10 станкомест; 2 – автоматизированный модуль микроклимата; 3 – роботизированный кормораздатчик; 4 – роботизированная площадка для заготовки кормосмеси

Fig. 3. Concept model of a 400-head robotic dairy farm: I – milking block; II – walking area; III – room for keeping dairy cows; 1 – robotic milking parlor «Veer» for 10 stalls; 2 – automated microclimate module; 3 – robotic feed dispenser; 4 – robotic platform for feed mixture preparation

Выводы. Разработанные методы, модели и компоновочные схемы позволяют проектировать новые автоматизированные и роботизированные и рекон-

структурировать существующие механизированные фермы любых форм и типоразмеров в оптимальные сроки. Их достоинства:

- щадящее воздействие на биологические объекты и окружающую среду;
- единая функционально-логистическая инфраструктура, обеспечивающая оптимальную капиталоемкость строительных и инженерных конструкций и технологического оборудования;
- минимальные количество накопительно-регулирующих емкостей и протяженность перемещения материальных потоков;

- комфортное содержание;
- эффективное многократное кормление;
- переработка отходов;
- высокое качество продукции.

Все это в конечном итоге обеспечивает повышение уровня цифровизации и автоматизации производства, продуктивного долголетия животных, рентабельности молочного животноводства, способствует стабилизации работы отрасли в целом, созданию высококвалифицированных рабочих мест операторов-программистов технологического оборудования и систем управления технологическими процессами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Измайлов А.Ю., Цой Ю.А., Кирсанов В.В. Технологические основы алгоритмизации и цифрового управления процессами молочных ферм: Монография. М.: ИНФРА. 2019. 208 с.
2. Попов В.Д., Ерохин М.Н., Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Шалавина Е.В. Перспективы создания экологических центров промышленной переработки органических отходов животноводства // *Агроинженерия*. 2020. N3(97). С. 4-11.
3. Stojkov J., von Keyserlingk M.A.G., Duffield T. Fitness for transport of cull dairy cows at livestock markets. *Journal of Dairy Science*. 2020. Vol. 103. Iss. 3. 2650-2661.
4. Chernoiivanov V., Katkov A., Gabitov I., Yukhin G., Martynov V., Khasanov E., Mudarisov S., Baltikov D., Khammatov R., Kovalev P. Technical equipment of farms for comfortable cow keeping in winter conditions. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2019. Vol. 25. N2. 45-53.
5. Ерохин М.Н., Кирсанов В.В., Цой Ю.А., Казанцев С.П. Структурно-технологическое моделирование процессов и функциональных систем в молочном скотоводстве // *Научные труды ГНУ ВНИИМЖ Россельхозакадемии*. 2007. Т. 17. N1. С. 19-31.
6. Новиков Н.Н., Кольчик И.Е. Современное оборудование и технические средства обеспечения микроклимата на животноводческих фермах // *Техника и технологии в животноводстве*. 2020. N1(37). С. 81-88.
7. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Михайличенко С.М. Технологическая линия приготовления и раздачи кормосмесей на базе автоматического кормового вагона // *Сельский механизатор*. 2020. N1. С. 14-15.
8. Tikhomirov D., Izmailov A., Lobachevsky Ya., Tikhomirov A. Energy consumption optimization in agriculture and development perspectives. *International Journal of Energy Optimization and Engineering*. 2020. Vol. 9. N4. С. 1-19
9. Kilcawley K.N., Faulkner, H., Clarke, H.J., O'Sullivan, M.G., Kerry, J.P. Factors influencing the flavour of bovine milk and cheese from grass based versus non-grass based milk production systems. *Foods*. 2018. N7(3). E37.
10. McDermoot A., Visentin G., McParland S., Berry D.P., Fenelon M.A., De Marchi M. Effectiveness of midinfrared spectroscopy to predict the color of bovine milk and the relationship between milk color and traditional milk quality traits. *Journal of Dairy Science*. 2016. N99(5). 3267-3273.
11. Иванов Ю.А., Скоркин В.К., Аксенова В.П. Оптимизация и модернизация технологических процессов молочных ферм // *Международный технико-экономический журнал*. 2020. N4. С. 7-15.
12. Попечителей Е.П. Проблемы синтеза биотехнических систем // *Научное обозрение. Технические науки*. 2016. N2. С. 54-62
13. Черноиванов В.И. Биомашсистемы: возникновение, развитие и перспективы // *Биомашсистемы*. 2017. Т. 1. N1. С. 7-58.
14. Durmaz U., Ozdemir M., Pehlivan H. An experimental investigation into heat transfer in milk cooling vessels. *Scientia Iranica B*. 2018. N25(3). 1258-1265.
15. Hogenboom J.A., Pellegrino L., Sandrucci A. Invited review: Hygienic quality, composition, and technological performance of raw milk obtained by robotic milking of cows. *Journal of Dairy Science*. 2019. Vol. 9. 7640-7654.
16. Jovović V., Pandurević T., Važić B., Erbez M. Microclimate parameters and ventilation inside the barns in the lowland region of Bosnia and Herzegovina. *Journal of Animal Science of BiH*. 2019. Vol. 1. N2. 14-18.
17. Морозов Н.М. Инновационная техника и технологии в животноводстве // *Экономика сельского хозяйства России*. 2020. N2. С. 2-8.
18. Ju C., Son H. I. Modeling and control of heterogeneous agricultural field robots based on Ramadge – Wonham theory. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019. Vol. 5. N1. 48-55.
19. Замрий А.А. Проектирование и расчет методом конечных элементов трехмерных конструкций в среде APM Structure 3D. М.: АПМ. 2006. 288 с.
20. Mahalakshmi J., Kuppusamy K., Kaleeswari C., Maheswari P. IoT Sensor-Based Smart Agricultural System. Emerging Technologies for Agriculture and Environment. Singapore. Springer. 2020. 39-52.

REFERENCES

1. Izmaylov A.Yu., Tsoy Yu.A., Kirsanov V.V. Tekhnologicheskie osnovy algoritimizatsii i tsifrovogo upravleniya protsessami molochnykh ferm: Monografiya [Algorithmization of technological foundations and digital control of dairy farm

- processes: Monograph]. Moscow: INFRA. 2019. 208 (In Russian).
2. Popov V.D., Erokhin M.N., Bryukhanov A.Yu., Vasil'ev E.V., Shalavina E.V. Perspektivy sozdaniya ekologicheskikh tsentrov promyshlennoy pererabotki organicheskikh otkhodov zhivotnovodstva [Prospects of establishing ecological centers for industrial processing of organic animal waste]. *Agroinzheneriya*. 2020. N3(97). 4-11 (In Russian).
 3. Stojkov J., von Keyserlingk M.A.G., Duffield T. Fitness for transport of cull dairy cows at livestock markets. *Journal of Dairy Science*. 2020. Vol. 103. N3. 2650-2661 (In English)
 4. Chernov Ivanov V., Katkov A., Gabitov I., Yukhin G., Martynov V., Khasanov E., Mudarisov S., Baltikov D., Khammatov R., Kovalev P. Technical equipment of farms for comfortable cow keeping in winter conditions. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2019. Vol. 25. N2. 45-53 (In English)
 5. Erokhin M.N., Kirsanov V.V., Tsoy Yu.A., Kazantsev S.P. Strukturno-tekhnologicheskoe modelirovanie protsessov i funktsional'nykh sistem v molochnom skotovodstve [Structural and technological modeling of processes and functional systems in dairy farming]. *Nauchnye trudy GNIIMZh Rosselkhozakademii*. 2007. Vol. 17. N1. 19-31 (In Russian)
 6. Novikov N.N., Kol'chik I.E. Sovremennoe oborudovanie i tekhnicheskie sredstva obespecheniya mikroklimata na zhivotnovodcheskikh fermakh [The modern equipment and technical means of microclimate on livestock farms providing]. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve*. 2020. N1(37). 81-88 (In Russian)
 7. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Mikhaylichenko S.M. Tekhnologicheskaya liniya prigotovleniya i razdachi kormosmesey na baze avtomaticheskogo kormovogo vagona [Technological line for preparation and distribution of feed mixtures based on an automatic feed car]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2020. N1. 14-15 (In Russian).
 8. Tikhomirov D., Izmailov A., Lobachevsky Ya., Tikhomirov A. Energy consumption optimization in agriculture and development perspectives. *International Journal of Energy Optimization and Engineering*. 2020. Vol. 9. N4. 1-19 (In English).
 9. Kilcawley K.N., Faulkner H., Clarke H.J., O'Sullivan M.G., Kerry J.P. Factors influencing the flavour of bovine milk and cheese from grass based versus non-grass based milk production systems. *Foods*. 2018. N7(3). E37 (In English).
 10. McDermoot A., Visentin G., McParland S., Berry D.P., Fenelon M.A., De Marchi M. Effectiveness of midinfrared spectroscopy to predict the color of bovine milk and the relationship between milk color and traditional milk quality traits. *Journal of Dairy Science*. 2016. N99(5). 3267-3273 (In English).
 11. Ivanov Yu.A., Skorkin V.K., Aksenova V.P. Optimizatsiya i modernizatsiya tekhnologicheskikh protsessov molochnykh ferm [Optimization and modernization of dairy farms' technological processes]. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal*. 2020. N4. 7-15 (In Russian).
 12. Pepochitelev E.P. Problemy sinteza biotekhnicheskikh sistem. Nauchnoe obozrenie [Synthesis problem biotechnical systems]. *Tekhnicheskie nauki*. 2016. N2. 54-62 (In Russian).
 13. Chernov Ivanov V.I. Biomashsistemy: vzniknovenie, razvitiye i perspektivy [Biomash systems: emergence, development and prospects]. *Biomashsistemy*. 2017. Vol. 1. N1. 7-58 (In Russian).
 14. Durmaz U., Ozdemir M., Pehlivan H. An experimental investigation into heat transfer in milk cooling vessels. *Scientia Iranica B*. 2018. N25(3). 1258-1265 (In English).
 15. Hogenboom J.A., Pellegrino L., Sandrucci A. Invited review: Hygienic quality, composition, and technological performance of raw milk obtained by robotic milking of cows. *Journal of Dairy Science*. 2019. Vol. 9. 7640-7654 (In English).
 16. Jovović V., Pandurević T., Vazić B., Erbez M. Microclimate parameters and ventilation inside the barns in the lowland region of Bosnia and Herzegovina. *Journal of Animal Science of BIH*. 2019. Vol. 1. N2. 14-18 (In English).
 17. Morozov N.M. Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve [Innovative techniques and technologies in livestock]. *Ekonomika sel'skogo khozyaystva Rossii*. 2020. N2. 2-8 (In Russian).
 18. Ju C., Son H.I. Modeling and control of heterogeneous agricultural field robots based on Ramadge – Wonham theory. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019. Vol. 5. N1. 48-55 (In English).
 19. Zamriy A.A. Proektirovanie i raschet metodom konechnykh elementov trekhmernykh konstruktov v srede APM Structure 3D [Design and calculation by the finite element method of three-dimensional structures in the APM Structure 3D environment]. Moscow: APM. 2006. 288 (In Russian).
 20. Mahalakshmi J., Kuppusamy K., Kaleeswari C., Maheswari P. IoT Sensor-Based Smart Agricultural System. Emerging Technologies for Agriculture and Environment. Singapore. Springer. 2020. 39-52 (In English).

Конфликт интересов

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

Conflict of interest

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

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

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

02.12.2021
14.01.2022

Сравнительный анализ методов расчета лучистого обогрева молодняка в животноводческих помещениях

Алексей Васильевич Кузьмичев,
научный сотрудник, e-mail: alkumkuzm@mail.ru;
Дмитрий Анатольевич Тихомиров,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник, e-mail: tihda@mail.ru;

Алексей Викторович Хименко,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: avmkh87@gmail.com

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Показали, что эффективность инженерных систем на животноводческих предприятиях определяется возможностью создания требуемых условий при содержании молодняка во взаимодействии с внешними температурными параметрами. (*Цель исследования*) Провести оценку и выбрать рациональный метод расчета лучистого теплообмена в системе поверхностей с произвольной конфигурацией, отображающих состояние биологического объекта в условиях животноводческого помещения и распределение тепловых потоков в зонах расположения молодняка. (*Материалы и методы*) Рассмотрели условия комфортного теплового режима для молодняка животных и физическую модель теплопередачи. Определили области изменения температуры облучающей панели и влияние конфигурации и оптических характеристик оболочки системы при создании комфортных условий содержания поросят, применяя различные методы расчета теплообмена. (*Результаты и обсуждение*) Установили, что расчетную модель теплообмена в системе изотермических диффузно поглощающих и излучающих поверхностей можно рассматривать в качестве расширения существующих расчетных методов. Отметили, что она учитывает дополнительные факторы, в том числе влияние «скрытых» поверхностей через многократное отражение в замкнутой термодинамической системе. Выявили соответствие результатов расчетов теплообмена различными методами, если оптические показатели оболочки такой системы близки к характеристикам абсолютно черного тела. (*Выводы*) Установили, что оптические характеристики оболочки системы значительно влияют на температурный режим поверхности облучающей панели, а предложенная расчетная модель определения температурного режима обогреваемой панели в системе изотермических диффузно поглощающих и излучающих поверхностей может быть применена в сельскохозяйственных помещениях, различных по своей конфигурации и геометрии.

Ключевые слова: животноводческие помещения, обогрев молодняка, содержание поросят, облучающая панель, расчетная модель, методы расчета лучистого теплообмена.

Для цитирования: Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А., Хименко А.В. Сравнительный анализ методов расчета лучистого обогрева молодняка в животноводческих помещениях // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №1. С. 10-18. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-10-18.

Comparative Analysis of Methods for Calculating Radiant Heating of Young Animals in Livestock Premises

Alexey V. Kuz'michev,
researcher, e-mail: alkumkuzm@mail.ru;
Dmitry A. Tikhomirov,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher, e-mail: tihda@mail.ru

Alexey V. Khimenko,
Ph.D.(Eng), senior researcher,
e-mail: avmkh87@gmail.com

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The effectiveness of engineering systems at livestock enterprises is shown to be determined by the possibility of creating the required conditions where young animals are kept in interaction with external temperature parameters of their habitat. (*Research purpose*) The research aims to evaluate and choose a rational method for calculating radiant heat transfer in a system of surfaces with an arbitrary configuration that reflect the state of a biological object in a livestock room and the distribution of heat flows in the areas where young animals are located. (*Materials and methods*) The authors considered the conditions of a comfortable thermal regime for young animals and a physical model of animal heat transfer with the environment. The use of various methods

for calculating heat transfer helped to determine the areas of change in the radiation panel temperature and the influence of the configuration and the system shell optical characteristics when creating comfortable conditions for keeping piglets. (*Results and discussion*) It was established that the computational model of heat transfer in a system of isothermal diffusely absorbing and radiating surfaces can be considered as an extension of existing computational methods. The model takes into account additional impact factors, including the influence of "hidden" surfaces through multiple reflections in a closed thermodynamic system. There is consistency between the results of heat transfer calculations by various methods, under the assumption that the system shell optical parameters are close to the characteristics of absolutely black body. (*Conclusions*) It was revealed that the system shell optical characteristics have a significant impact on the temperature regime of the irradiation panel surface, and the proposed computational model for determining the heated panel temperature regime in a system of isothermal diffusely absorbing and radiating surfaces can be applied to a wide range of agricultural premises of various configurations and geometries.

Keywords: livestock buildings, heating of young animals, keeping piglets, radiation panel, IR panel, computational model, methods for calculating radiant heat transfer.

For citation: Kuz'michev A.V., Tikhomirov D.A., Khimenko A.V. Sravnitel'nyy analiz metodov rascheta luchistogo obogreva molodnyaka v zhivotnovodcheskikh pomeshcheniyakh [Comparative analysis of methods for calculating radiant heating of young animals in livestock premises]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol.16. N1. 10-18 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-10-18.

Для полноценной реализации генетического потенциала животных и роста их продуктивности необходимо создать оптимальный тепловой режим при их содержании. В частности, поросята раннего возраста чувствительны к температурным изменениям окружающей среды. Для поддержания здорового теплообмена для молодняка важно обеспечить комфортные условия, в том числе с помощью лучистой энергии от искусственно созданного источника. Выбор математических моделей и методов расчета, наиболее адекватно отображающих связи в биотехнической системе, позволяет определить конструктивные параметры и обосновать температурный режим поверхности облучающей панели в зоне содержания молодняка для различных условий окружающей среды.

Цель исследования – провести оценку и выбрать рациональный метод расчета лучистого теплообмена в системе поверхностей с произвольной конфигурацией, отображающих состояние биологического объекта в условиях животноводческого помещения и распределение тепловых потоков в зонах расположения молодняка.

Материалы и методы. Для создания благоприятного теплового режима в зонах размещения животных раннего возраста применяют различные технические средства инфракрасного (ИК) обогрева. Однако известные методики расчета рационального выбора ИК-обогревателей и режимов их работы обладают различной достоверностью и точностью. Поэтому актуален анализ теоретических положений расчета лучистого обогрева для молодняка животных (поросята, телята и др.) при помощи ИК-панелей. Предложили обобщенную методику расчета локального обогрева на примере поросят раннего возраста (до 1 мес), учитывающую конструктивные и теплотехнические параметры животноводческого помещения.

Предлагаемый подход позволяет расширить применение рассмотренной методики для различного типа ИК-излучателей и видов животных.

Поросята раннего возраста наиболее чувствительны к температурным изменениям окружающей среды [1, 2]. На тепловой баланс животных существенное влияние оказывает лучистая энергия при их теплообмене с ограждающими конструкциями. Важно создать искусственную среду с определенными термодинамическими параметрами для обеспечения комфортных условий содержания животных [3, 4]. Выбор математических моделей, наиболее адекватно отображающих связи и их взаимодействие в биотехнической системе «животное – окружающая среда», позволяет обосновать параметры инфракрасных обогревателей и режим их работы, обеспечивающие оптимальные тепловые условия в зоне содержания молодняка [5, 6].

Интенсивность отдачи тепла животным зависит от температуры ограждающих конструкций и поверхностей, их расположения и размеров. При комфортных условиях сохраняется тепловое равновесие и отсутствует напряжение организма в процессе терморегуляции [7, 8].

Общепринятое математическое представление этого условия для производственных и жилых помещений имеет вид [4, 5]:

$$Q_{\text{ж}}^{\text{л-к}} = F_{\text{л}} \sum C \varphi_1 b_1 (t_{\text{ж}} - t_1) + F_{\text{к}} \alpha_{\text{к}} (t_{\text{ж}} - t_{\text{в}}) + F_{\text{конд}} k_{\text{п}} (t_{\text{ж}} - t_{\text{п}}), \quad (1)$$

где $Q_{\text{ж}}^{\text{л-к}}$ – лучистая, конвективная и кондуктивная теплоотдача животного в окружающую среду, Вт;

$F_{\text{л}}$ – поверхность животного, участвующая в лучистом теплообмене, м^2 ;

C – приведенный коэффициент излучения;

φ_1 – угловой коэффициент облученности со стороны элементарной поверхности животного в направ-

лении i -ой поверхности;

b_i – поправочный коэффициент;

F_k – поверхность животного, участвующая в конвективном теплообмене, m^2 ;

α_k – коэффициент конвективной теплоотдачи, $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$;

$F_{конд}$ – поверхность животного, участвующая в кондуктивном теплообмене, m^2 ;

k_p – коэффициент теплопередачи с поверхности животного в пол, $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$;

t_i – температура i -поверхности, $^\circ C$;

$t_{ж}, t_{в}, t_{п}$ – температура кожи животного, окружающего воздуха, пола соответственно, $^\circ C$;

U – зона основного теплообмена животного, $Вт$ [3, 4].

При расчете радиационной составляющей теплообмена в производственных и жилых помещениях величину приведенного коэффициента излучения в выражении (1) принимают $C = 4,65 \text{ Вт}/(m^2 K^4)$ [9].

Среднее значение теплоотдачи с элементарной площадки поверхности животного равно:

$$q = Q_{ж}^{л-к} F_{ж}, \quad (2)$$

где $F_{ж}$ – поверхность животного, m^2

Из соотношений (1) и (2) следует заключение:

$$q_{л} \subset (Q_{яв.min}/F_{ж} \dots Q_{яв.max}/F_{ж}), \quad (3)$$

где $q_{л}$ – лучистая теплоотдача с элементарной поверхности животного, $Вт/m^2$,

$Q_{яв.min} \dots Q_{яв.max}$ – граница явных тепловыделений $Q_{яв}$ животного конкретного вида и возраста в условиях теплового комфорта в зоне основного обмена U , $Вт$.

При расположении животного около нагретых или охлажденных поверхностей определяющей величиной будет интенсивность лучистого теплообмена на наиболее чувствительной к излучению поверхности тела.

Уравнение лучистого теплообмена для элементарной площадки с поверхности животного в системе излучающих поверхностей имеет вид:

$$q_{л} = \Sigma C \varphi_i b_{ж-i} (t_{ж} - t_i) + C(1 - \Sigma \varphi_i) b_{ж-п} (t_{ж} - t_r), \quad (4)$$

где φ_i – угловой коэффициент облученности со стороны элементарной поверхности животного в сторону i -ой поверхности;

$b_{ж-i} = 0,81 + 0,01 \tau_{срi}$ – поправочный температурный коэффициент, $\tau_{срi} = 0,5(t_{ж} + t_i)$;

$b_{ж-п} = 0,81 + 0,01 \tau_{срr}$ – поправочный температурный коэффициент, $^\circ C$; $\tau_{срr} = 0,5(t_{ж} + t_r)$, $^\circ C$;

t_r – средняя температура ограждений помещения, $^\circ C$.

Значения явных тепловыделений $Q_{яв}$ и теплопродукции конкретного животного, температура поверхности $t_{ж}$ должны соответствовать зоне основного обмена U [7, 8].

Величину удельного потока теплоты $q_{л}$, передава-

емой элементарной поверхностью животного ограждениям помещения определяют по формуле Христиансена [9-12]:

$$q_{л} = \Sigma C_{прi} \left[\left(\frac{T_{ж}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_i}{100} \right)^4 \right] \varphi_i + C_{пр} (1 - \Sigma \varphi_i) \left[\left(\frac{T_{ж}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{в.п}}{100} \right)^4 \right], \quad (5)$$

где $C_{прi} = C_0(1/\varepsilon_{ж} + 1/\varepsilon_i - 1)$ и $C_{пр} = C_0(1/\varepsilon_{ж} + 1/\varepsilon_{в.п} - 1)$ – приведенные коэффициенты излучения, $Вт/(m^2 K^4)$;

C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $Вт/(m^2 K^4)$;

$\varepsilon_{ж}, \varepsilon_i, \varepsilon_{в.п}$ – степень черноты поверхности животного, i -ой поверхности и оболочки системы;

$T_{ж}$ – температура поверхности животного, K ;

T_i – температура i -поверхности, K ;

$T_{в.п}$ – температура оболочки системы, K .

Рассмотрим обобщенную схему модели теплообмена животного с радиационной панелью (рис. 1). Запишем уравнение лучистого теплообмена для этого варианта на основе соотношения (4):

$$q_{л} = C \varphi_{п} b_{ж-п} (t_{ж} - t_{п}) + C(1 - \varphi_{п}) b_{ж-в.п} (t_{ж} - t_{в.п}); \quad (6)$$

$$t_{п} = t_{ж} + \frac{1 - \varphi_{п}}{\varphi_{п}} \frac{b_{ж-п}}{b_{ж-в.п}} (t_{ж} - t_{в.п}) - \frac{q_{л}}{C \varphi_{п} b_{ж-п}}, \quad (6a)$$

где $b_{ж-п}$ и $b_{ж-в.п}$ – температурные коэффициенты;

$\varphi_{п}$ – угловой коэффициент облученности со стороны элементарной поверхности животного в сторону облучающей поверхности.

Запишем уравнение лучистого теплообмена для рассматриваемого варианта на основе соотношения (5):

$$q_{л} = C_0 \left(\frac{1}{\varepsilon_{ж}} + \frac{1}{\varepsilon_{п}} - 1 \right) \left[\left(\frac{T_{ж}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{п}}{100} \right)^4 \right] \varphi_{п} + C_0 \left(\frac{1}{\varepsilon_{ж}} + \frac{1}{\varepsilon_{в.п}} - 1 \right) (1 - \varphi_{п}) \left[\left(\frac{T_{ж}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{в.п}}{100} \right)^4 \right]. \quad (7)$$

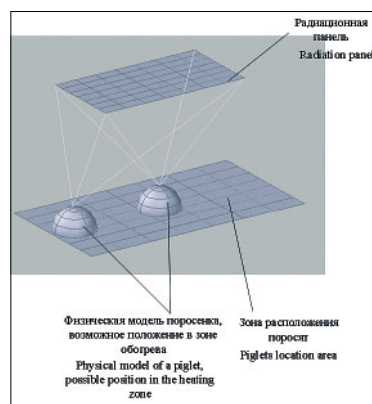


Рис. 1. Модель теплообмена животного с радиационной панелью

Fig. 1. Model of heat exchange of an animal with a radiation panel

Модель лучистого теплообмена, основанная на соотношениях (4)-(7), ограничивается описанием лучистых потоков для «видимых» поверхностей и не учитывает диффузную составляющую лучистого потока от скрытых поверхностей, характерную для диффузно поглощающих и излучающих тел.

Расширение модели лучистого теплообмена для условия диффузно поглощающих и излучающих тел в адиабатной замкнутой системе позволяет получить более полное описание протекающих термодинамических процессов (рис. 2, 3).

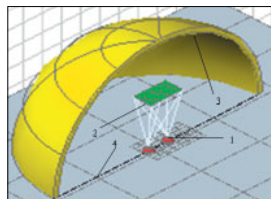


Рис. 2. Физическая модель теплообмена в системе изотермических диффузно поглощающих и излучающих поверхностей: 1 – элементарная поверхность животного; 2 – излучающая панель; 3 – поверхность ограждающих конструкций; 4 – поверхность пола

Fig. 2. Physical model of heat transfer in a system of isothermal diffusely absorbing and radiating surfaces: 1 – elementary surface of the animal; 2 – radiating panel; 3 – the surface of the enclosing structures; 4 – floor surface

Рассмотрим замкнутую термодинамическую систему, состоящую из N поверхностей конечных размеров.

Термодинамическая модель теплообмена строится с учетом следующих ограничений:

- каждая поверхность – изотермическая;
- каждая поверхность системы – серая;
- излучение, отражаемое от поверхностей, диффузно распределяется в пространстве;
- излучение, испускаемое каждой поверхностью, диффузно распределяется в полупространстве;
- поверхностная плотность потока эффективного излучения одинакова во всех точках каждой из поверхностей системы, при этом угловые коэффициенты не зависят от величины и поверхностного распределения потоков излучения.

При известных температурах поверхностей системы для произвольной i -поверхности плотность потока результирующего излучения определяется по выражению [13, 14]:

$$\frac{Q_i}{F_i} = \sum_{j=1}^N A_{ij} \sigma T_j^4, \quad 1 \leq i \leq N, \quad (8)$$

где $A_{ij} = (\varepsilon_i / (1 - \varepsilon_i)) (\delta_{ij} - \psi_{ij})$,

δ_{ij} – символ Кронекера, $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$; $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$.

Q_i – поток результирующего излучения с поверхности F_i .

Коэффициенты ψ_{ij} определяют на основе вычисления обратной матрицы χ :

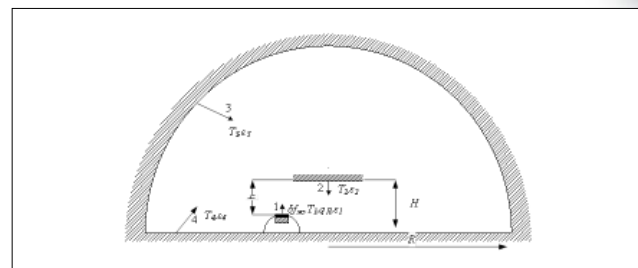


Рис. 3. Термодинамическая модель лучистого теплообмена между поверхностями: 1 – элементарная поверхность $\delta_{\text{жк}}$, м^2 ; $T_1(t_1)$ – температура поверхности, К ; q_1 – результирующее излучение с элементарной поверхности, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $\varepsilon_1 - \varepsilon_4$ – степень ее черноты; 2 – облучающая панель; $T_2(t_p)$ – температура поверхности, К ; ε_2 – степень ее черноты; 3 – поверхность ограждающих конструкций (потолок, стены); $T_3(t_3)$ – температура ограждения, К ; ε_3 – степень ее черноты; 4 – поверхность пола; $T_4(t_4)$ – температура, К ; ε_4 – степень ее черноты; H – высота подвеса облучателя, м ; h – высота облучателя над поверхностью $\delta_{\text{жк}}$, м ; R – обобщенный размер помещения, м

Fig. 3. Thermodynamic model of radiant heat transfer between surfaces: 1 – elementary surface $\delta_{\text{жк}}$, м^2 ; $T_1(t_1)$ – surface temperature, К ; q_1 – the resulting radiation from the elementary surface, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $\varepsilon_1 - \varepsilon_4$ – the degree of its blackness; 2 – radiation panel; $T_2(t_p)$ – surface temperature, К ; ε_2 – the degree of its blackness; 3 – the surface of enclosing structures (ceiling, walls); $T_3(t_3)$ – fencing temperature, К ; ε_3 – the degree of its blackness; 4 – floor surface; $T_4(t_4)$ – temperature, К ; ε_4 – the degree of its blackness; H – the height of the irradiator suspension, м ; h – the height of the irradiator above the surface $\delta_{\text{жк}}$, м ; R – generalized room size, м

$$\psi = \chi^{-1} = \begin{bmatrix} \psi_{11} & \cdots & \psi_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{N1} & \cdots & \psi_{NN} \end{bmatrix},$$

$$\text{где } \chi_{ij} = \frac{\delta_{ij} - (1 - \varepsilon_i) \phi_{F_i - F_j}}{\varepsilon_i} \text{ и } \chi = \begin{bmatrix} \chi_{11} & \cdots & \chi_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \chi_{N1} & \cdots & \chi_{NN} \end{bmatrix}.$$

Для рассматриваемой модели определение угловых коэффициентов основывается на аксиомах существования, аддитивности, замкнутости и вытекающей из этих положений теоремы взаимности и конгруэнтности [16].

Если рассматривать замкнутую систему, состоящую из $N = 4$ поверхностей конечных размеров, то аналитические расчеты значительно упрощаются, а подобная модель служит обобщающей структурой для различных по геометрии и размерам животноводческих помещений (рис. 2, 3).

Введем следующие определения и ограничения:

- обобщенный размер помещения выразим параметром $R = (\Sigma F_{\text{ст}} / 3\pi) 0,5$, где $\Sigma F_{\text{ст}}$ – суммарная площадь поверхности стен, потолка и пола;

- линейные размеры поверхностей 1 и 2 значительно меньше размеров оболочки 3 и 4, и экранирующее влияние на величину лучистых потоков между поверхностями оболочки не учитываются (рис. 3).

При этом угловые коэффициенты излучения между взаимодействующими поверхностями принимают следующие соотношения:

$$\varphi_{11} = 0,$$

$$\varphi_{12} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{X}{(1+X^2)^{-2}} \tan^{-1} \left(\frac{Y}{(1+X^2)^{-2}} \right) + \frac{Y}{(1+Y^2)^{-2}} \tan^{-1} \left(\frac{X}{(1+Y^2)^{-2}} \right) \right],$$

где $X = a/c$, $Y = b/c$; a и b – линейные размеры прямоугольной излучающей поверхности, м;

c – расстояние до элементарной поверхности животного $\delta_{fж}$ от торца излучающей поверхности, м.

Запишем:

$$\varphi_{13} = 1 - \varphi_{12}; \varphi_{14} = 0;$$

$$\varphi_{21} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{X}{(1+X^2)^{-2}} \tan^{-1} \left(\frac{Y}{(1+X^2)^{-2}} \right) + \frac{Y}{(1+Y^2)^{-2}} \tan^{-1} \left(\frac{X}{(1+Y^2)^{-2}} \right) \right] \frac{\delta f}{F}, \quad \varphi_{22} = 0;$$

$$\varphi_{23} = \int_0^{2\pi} \int_0^H \frac{h(R^2 - (H-h)^2)^{-2}}{\pi R^3} dh d\varphi; \quad \varphi_{24} = 1 - \varphi_{23};$$

$$\varphi_{31} = (1 - \varphi_{12}) \frac{\delta f}{F_{31}},$$

где $\delta_{fж}$ – элементарная площадка поверхности животного;

F_{31} – «видимая» поверхность F_3 с элементарной площадки $\delta_{fж}$;

H – высота подвеса облучателя, м;

h – высота облучателя над элементарной поверхностью животного $\delta_{fж}$, м;

$$\varphi_{32} = 0,5\varphi_{23}F_2/\pi RH; \quad \varphi_{33} = 1 - (F_4/F_3); \quad \varphi_{34} = F_4/F_3;$$

$$\varphi_{41} = 0; \quad \varphi_{42} = (1 - \varphi_{23})(F_2/\pi R^2); \quad \varphi_{43} = 1; \quad \varphi_{44} = 0.$$

Приведенные соотношения служат основой для определения требуемой температуры поверхности обогреваемой панели, излучающей тепловую энергию, а также для сравнительной оценки расчетных результатов рассмотренных методов.

В дальнейшем будем считать, что выражения (6)–(8) отражают различные три метода расчета.

Результаты и обсуждение. Общая постановка задачи расчета обогрева и охлаждения зон содержания молодняка определяется системой уравнений общего теплообмена в помещении и условиями комфортности. На радиационную температурную обстановку в помещении влияют основные группы поверхностей – нагревающих, охлаждающих и нейтральных. Для расчета лучистых потоков в помещении учитывают температуру внутренних поверхностей ограждений. В этом случае математическое описание для определения площади обогревающих поверхностей

и их температуры значительно упрощаются. Особенность составления соотношений для разных групп поверхностей состоит в определении значений коэффициентов облученности между взаимодействующими поверхностями, усредненных значений коэффициентов приведенного излучения, потока эффективного излучения и других параметров процесса.

Решение для полной системы, состоящей из нескольких уравнений, оказывается достаточно сложным, поэтому используют упрощенные расчетные схемы. Для этого устанавливают температуру наружных ограждений, обращенных в помещение, и внутренних. В этом случае искомой величиной станет температура или площадь обогревающей поверхности ИК-облучателя. Подобный подход к решению поставленной задачи позволяет заменить систему уравнений теплообмена в помещении одним равенством.

Поле излучения в системе произвольно заданной конфигурации и размеров поверхностей, разделенных диатермической средой, служит функцией полей температур и оптических констант на границе системы. Конфигурация локальной системы стандартна – это выделенная зона в общей системе с инфракрасным источником излучения (рис. 2) [15]. Сельскохозяйственные помещения имеют довольно широкий размерный ряд зданий и помещений – от небольших ферм до крупных животноводческих комплексов. В связи с этим целесообразно привести многообразие геометрических форм объектов к обобщенному параметру R , отражающему размеры помещения (рис. 3).

С учетом вышесказанного постановка задачи имеет следующую трактовку:

- определить температуру (или площадь) излучающей поверхности в замкнутой системе диффузно излучающих тел, при этом температура и результирующее излучение с элементарной поверхности животного $\delta_{fж}$ должна находиться в интервалах:

$$t_1 \in (t_{1\min} \cdot t_{1\max}) \text{ и } q_{\lambda} \in (q_{\lambda\min} \cdot q_{\lambda\max});$$

- выявить области вариации расчетных значений в зависимости от переменных параметров: температуры ограждений, пола, оптических характеристик поверхностей;

- оценить влияние оптических характеристик взаимодействующих тел;

- установить условия применения расчетных моделей.

В качестве исходных данных приняты конструктивные и технологические параметры термодинамической системы с учетом норм технологического проектирования свиноводческих маточников:

- размер излучающей панели по ширине и длине $0,5 \times 1 \text{ м}^2$, высота h над поверхностью $\delta_{fж}$ составляет 1 м;

- результирующее излучение с элементарной поверхности $\delta f q_{\lambda} = 18 \text{ Вт/м}^2$, температура поверхности $t_1 = 33^\circ\text{C}$;

- оптические характеристики излучающей системы поверхностей варьируются в интервалах $\varepsilon_i = 0,80-0,98$, $i = 1-4$, температура термически однородных поверхностей 3 и 4 находится в пределах $t_3 = 10-25^\circ\text{C}$, $t_4 = 5-25^\circ\text{C}$.

Расчетные зависимости температуры поверхности облучающей панели t_p от температуры ограждения t_3 , вычисленные по первому и второму методам, близки между собой, и для характерных значений температуры ограждения разница результатов не превышает 10% (рис. 4).

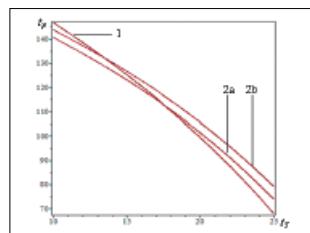


Рис. 4. Зависимости температуры поверхности панели от температуры оболочки (стены, потолок) в помещении, $^\circ\text{C}$: 1 – расчет по методу 1; 2a и 2b – расчет по методу 2 для $\varepsilon_3 = 0,96$ и $\varepsilon_3 = 0,80$ соответственно

Fig. 4. The dependence of the panel surface temperature on the shell (walls, ceiling) temperature in the room, $^\circ\text{C}$: 1 – calculation by method 1; 2a and 2b – calculation by method 2 for $\varepsilon_3 = 0,96$ and $\varepsilon_3 = 0,80$, respectively

При расчете по третьему методу поверхности 1 и 2 ограничивают область изменения t_p в интервале $\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0,80-0,96$ (рис. 5).

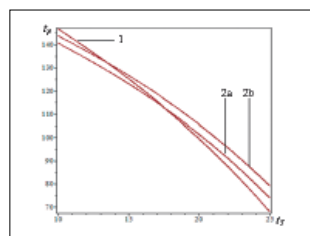


Рис. 5. Область значений температуры поверхности панели t_p в зависимости от температуры t_3 (потолок, стены) и t_4 (пол), $^\circ\text{C}$: 1 – при $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0,80$; 2 – при $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0,96$

Fig. 5. The range of panel surface temperature values depending on the temperature t_3 (ceiling, walls) and t_4 (floor), $^\circ\text{C}$: 1 – panel temperature at $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0,80$; 2 – panel temperature at $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0,96$

При обеспечении заданного в математических моделях результирующего излучения $q_{\text{л}}$ с элементарной поверхности животного $\delta f_{\text{ж}}$ и ее температурой t_1 значения температуры поверхности излучающей панели, рассчитанные по второму и третьему методу, существенно отличаются (разница результатов достигает 50-60%). Это обусловлено учетом влияния отраженных диффузных тепловых потоков и оптических

характеристик взаимодействующих поверхностей (рис. 6). При условии, когда оптические характеристики оболочки системы близки к характеристикам абсолютно черным ($\varepsilon \approx 1$), интерпретации в терминах рассматриваемых моделей находятся в близком соответствии (3-5%) (рис. 6).

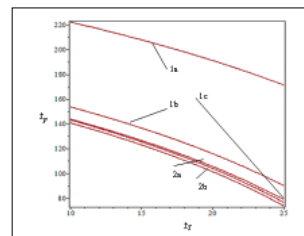


Рис. 6. Зависимости температуры поверхности облучающей панели t_p от температуры ограждения t_3 , $^\circ\text{C}$: 1a и 1b – по методу 3 для параметров, входящих в расчетную модель: $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0,80$, $t_4 = 10^\circ\text{C}$, $R = 15$ м и $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0,96$ соответственно; графики 2a и 2b – по методу 2 для $\varepsilon_3 = 0,96$ и $\varepsilon_3 = 0,80$ соответственно; график 1c – по методу 3 при $t_4 = 20^\circ\text{C}$, $R = 15$ м и $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 \rightarrow 1$

Fig. 6. The dependence of the radiation panel surface temperature $t_p(^\circ\text{C})$ on the fencing temperature $t_3(^\circ\text{C})$: 1a and 1b – by method 3 for the parameters included in the calculation model: $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0.80$, $t_4 = 10^\circ\text{C}$, $R = 15$ m and $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0.96$, respectively; graphs 2a and 2b – by method 2 for $\varepsilon_3 = 0.96$ and $\varepsilon_3 = 0.80$, respectively; graph 1c – by method 3 at $t_4 = 20^\circ\text{C}$, $R = 15$ m and $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 \rightarrow 1$

Расчетная зависимость температуры поверхности облучающей панели t_p от оптических характеристик оболочки системы по соотношению (7) выявила существенное влияние на тепловой режим в зоне обогрева животных (рис. 7). При создании теплового режима и уровня облучения в зоне обогрева необходимо учитывать тип помещений и их конструктивные особенности.

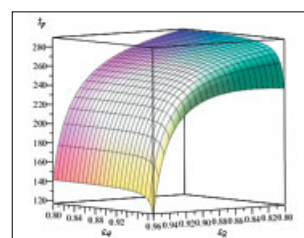


Рис. 7. Зависимость температуры поверхности облучающей панели t_p от оптических характеристик оболочки системы: ε_3 – степень черноты ограждений (потолок, стены); ε_4 – степень черноты пола

Fig. 7. Dependence of the radiation panel surface temperature $t_p(^\circ\text{C})$ on the system shell optical characteristics: ε_3 – the degree of fencing (ceiling, walls) blackness; ε_4 – the degree of the floor blackness

Проведенные расчеты показали, что при любых фиксированных значениях оптических характеристик

поверхностей системы и их температур (например, при $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0,8$, $t_3 = 15^\circ\text{C}$ и $t_4 = 10^\circ\text{C}$), входящих в расчетную модель (7), размеры и конфигурация помещения, отраженные в обобщенном параметре помещения R , существенно не влияют на температуру облучающей панели (рис. 8).

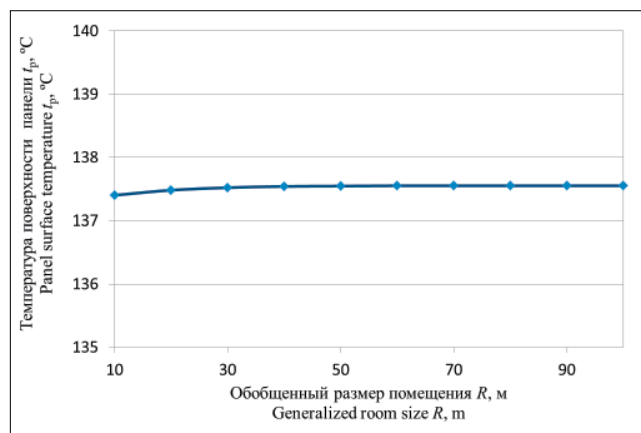


Рис. 8. Зависимость температуры поверхности облучающей панели t_p от параметра R

Fig. 8. Dependence of the radiation panel surface temperature t_p on R parameter

Расчет температуры поверхности проведен для конкретной облучающей панели в системе изотермических диффузно поглощающих и излучающих поверхностей с заданной геометрией и определенным значением удельного потока результирующего излучения с элемента поверхности в заданной пространственной точке. Рассмотренный пример является частным выражением, отражающим общие закономерности связей в замкнутой термодинамической системе.

В инженерной практике преобладает использование первых двух методов расчета для оценки теплового комфорта. Это обусловлено тем, что при изменении тепловых условий в определенном диапазоне организм животных может адаптировать метаболические реакции к тепловому состоянию среды. Расчеты, проводимые с использованием подобных моделей, определяют термодинамические параметры в до-

пустимых границах с достаточной точностью для их практической реализации при обосновании параметров технических средств ИК-облучателей.

Однако в первые часы и дни жизни механизм терморегуляции у молодняка животных находится в стадии становления, и тепловые параметры системы, влияющие на уровень тепловых потоков в зоне содержания животных, варьируются в достаточно узком диапазоне. Поэтому расчетная модель должна наиболее полно отражать функциональную связь между всеми элементами рассматриваемой термодинамической системы [16-18].

Реализация предложенного метода расчета при проектировании и разработке систем локального ИК-обогрева молодняка животных обеспечит его сохранность, увеличит привесы при снижении энергозатрат на производство продукции [19-21].

Выводы. Приведенные методы расчета основаны на общих фундаментальных принципах. Предлагаемая модель и метод расчета теплообмена в системе изотермических диффузно поглощающих и излучающих поверхностей (метод 3) представляет собой расширение первых двух методов. Этот метод учитывает опосредованное влияние «скрытых» поверхностей животноводческого помещения через многократное отражение тепловых потоков в замкнутой термодинамической системе.

Установлено, что оптические характеристики оболочки системы значительно влияют на температурный режим поверхности облучающей панели. В предельном случае, когда оптические характеристики оболочки системы близки к характеристикам абсолютно черным, интерпретации в терминах рассматриваемых моделей находятся в близком соответствии, и разница в полученных результатах не превышает 10%.

Рассмотренная модель и метод расчета актуальны при обосновании теплоэнергетических и конструктивных параметров облучающих ИК-панелей для обеспечения заданного микроклимата при содержании животных раннего возраста.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Caldara F.R., dos Santos L.S., Machado S.T., Moi M., Nasas I.D., Foppa L., Garcia R.G., dos Santos R.D.S. Piglets' Surface Temperature Change at Different Weights at Birth. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2014. Vol. 27. N3. 431-438.
2. Lane K.J., Stalder K.J., Harmon J.D., Karriker L.A., Johnson A.K. Comparison of multiple heat sources in the farrowing house: Effect on production and energy efficiency. *Journal of Animal Science*. 2019. Vol. 97. N2. 232-233.
3. Wheeler E.F., Vasdal G., Flo A., Boe K.E. Static space requirements for piglet creep area as influenced by radiant temperature. *Transactions of the ASABE*. 2008. Vol. 51. N1. 271-278.
4. Кузьмичев А.В., Лямцов А.К., Тихомиров Д.А. Теплоэнергетические показатели ИК облучателей для молодняка животных // *Светотехника*. 2015. N3. С. 57-58.
5. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Kuzmichev A.V., Rastishin S.A., Shepvalova O.V. Energy-efficient thermoelectric unit for microclimate control on cattlebreeding premises. *Energy Reports*. 2020. Vol. 6. N6. 293-305.
6. Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А., Хименко А.В. Установка с термостатируемой панелью для поросят // *Элек-*



- тротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68. N3(44). С. 21-28.
7. Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А. Тепловой режим в зонах размещения поросят // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N3(36). С. 17-22.
 8. Кузьмичев А.В. Описание процессов теплообмена в системе «животное-среда» // *Вестник ВИЭСХ*. 2017. N3(28). С. 33-38.
 9. Богословский В.И. Тепловой режим зданий. М.: Стройиздат. 1979. 248 с.
 10. Shatskov A.O. Determining temperature of adiabatic surfaces in rooms with radiant heating. *Thermal engineering*. 2021. Vol. 68. N9. 717-722.
 11. Spodyniuk N., Zhelykh V., Dzeryn O. Combined heating systems of premises for breeding of young pigs and poultry. *FME Transactions*. 2018. Vol. 46. N4. 651-657.
 12. Tikhomirov D.A., Rastimeshin S.A., Trunov S.S., Ukhanova V.Yu., Kuzmichev A.V. Mathematical Modelling and Energy Accounting of Heaters for Growing Stock. *Environmental Science*. 2020. Vol. 10. N4. 13-20.
 13. Howell J.R., Mengüç M.P., Daun K., Siegel R. Thermal Radiation Heat Transfer. Taylor and Francis. 2021. 1040.
 14. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Наука, 1970. 660 с.
 15. Rabanillo-Herrero M., Padilla-Marcos M.A., Feijo-Munoz J., Meiss A. Effects of the radiant heating system location on both the airflow and ventilation efficiency in a room. *Indoor and built environment*. 2019. Vol. 28. N3. 372-383.
 16. Andersen H.M.-L., Pedersen L.J. Effect of radiant heat at the birth site in farrowing crates on hypothermia and behaviour in neonatal piglets. *Cambridge University Press*. 2016. Vol. 10. N1. 128-134.
 17. Benjamin C.S., Brett C.R., Steven J.H. Modeling and assessing heat transfer of piglet microclimates. *AgriEngineering*. 2021. N3. 768-782.
 18. Botto L., Lendelová J. Surface temperature of warm-water pads for heating piglets in farrowing pens. *Slovak Journal of Animal Science*. 2016 (3). 49. 116-121.
 19. Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Tikhomirov D.A., Tikhomirov A.V. The state, promising directions and strategies for the development of the energy base of agriculture. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020. N51(3). 24–35.
 20. Васильев А.Н., Дорохов А.С., Ершова И.Г. и др. Методология исследования энергосберегающих технологических систем обработки сельхозпродукции как объектов управления // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2019. Т. 12. N4(63). С. 86-104.
 21. Дорохов А.С. Компьютерное зрение как инструмент системы управления технологическими процессами // Система технологий и машин для инновационного развития АПК России. Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 145-летию со дня рождения основоположника земледельческой механики В.П. Горячкина. М.: ВИМ. 2013. С. 355-357.

REFERENCES

1. Caldara F.R., dos Santos L.S., Machado S.T., Moi M., Nasas I.D., Foppa L., Garcia R.G., dos Santos R.D.S. Piglets' Surface Temperature Change at Different Weights at Birth. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2014. Vol. 27. N3. 431-438 (In English).
2. Lane K.J., Stalder K.J., Harmon J.D., Karriker L.A., Johnson A.K. Comparison of multiple heat sources in the farrowing house: Effect on production and energy efficiency. *Journal of Animal Science*. 2019. Vol. 97. N2. 232-233 (In English).
3. Wheeler E.F., Vasdal G., Flo A., Boe K.E. Static space requirements for piglet creep area as influenced by radiant temperature. *Transactions of the ASABE*. 2008. Vol. 51. N1. 271-278 (In English).
4. Kuz'michev A.V., Lyamtsov A.K., Tikhomirov D.A. Teplo-energeticheskie pokazateli IK obluchateley dlya molodnyaka zhivotnykh [Heat and energy indicators of IR irradiators for young animals]. *Svetotekhnika*. 2015. N3. 57-58 (In Russian).
5. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Kuzmichev A.V., Rastimeshin S.A., Shepvalova O.V. Energy-efficient thermoelectric unit for microclimate control on cattlebreeding premises. *Energy Reports*. 2020. Vol. 6. N6. 293-305 (In English).
6. Kuz'michev A.V., Tikhomirov D.A., Khimenko A.V. Ustanovka s termostatiруемой panel'yu dlya porosyat [Installation with a thermostatically controlled panel for piglets]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2021. Vol. 68. N3(44). 21-28 (In Russian).
7. Kuz'michev A.V., Tikhomirov D.A. Teplovoy rezhim v zonakh razmeshcheniya porosyat [Thermal regime in piglet placement areas]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N3(36). 17-22 (In Russian).
8. Kuz'michev A.V. Opisanie protsessov teploobmena v sisteme «zhivotnoe-sreda» [Description of heat exchange processes in the «animal-environment» system]. *Vestnik VIESKH*. 2017. N3(28). 33-38 (In Russian).
9. Bogoslovskiy V.N. Teplovoy rezhim zdaniy [Thermal regime of buildings]. Moscow: Stroyizdat. 1979. 248 (In Russian).
10. Shatskov A.O. Determining temperature of adiabatic surfaces in rooms with radiant heating. *Thermal engineering*. 2021. Vol. 68. N9. 717-722 (In English).
11. Spodyniuk N., Zhelykh V., Dzeryn O. Combined heating systems of premises for breeding of young pigs and poultry. *FME Transactions*. 2018. Vol. 46. N4. 651-657 (In English).
12. Tikhomirov D.A., Rastimeshin S.A., Trunov S.S., Ukhanova V.Yu., Kuzmichev A.V. Mathematical Modelling and Energy Accounting of Heaters for Growing Stock. *HELIX*. 2020. Vol. 10. N4. 13-20 (In English).
13. John R. Howell M. Pinar Mengüç, Kyle Daun, Robert Siegel. Thermal Radiation Heat Transfer. Taylor and Francis.

2021. 1040 (In English).
14. Kutateladze S.S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of heat transfer theory]. Moscow: Nauka. 1970. 660 (In Russian)
 15. Rabanillo-Herrero M., Padilla-Marcos M.A., Feijo-Munoz J., Meiss A. Effects of the radiant heating system location on both the airflow and ventilation efficiency in a room. *Indoor and built environment*. 2019. Vol. 28. N3. 372-383 (In English).
 16. Andersen H.M.-L., Pedersen L.J. Effect of radiant heat at the birth site in farrowing crates on hypothermia and behaviour in neonatal piglets. *Cambridge University Press*. 2016. Vol. 10. N1. 128-134 (In English).
 17. Benjamin C.S., Brett C.R., Steven J.H. Modeling and assessing heat transfer of piglet microclimates. *AgriEngineering*. 2021. Vol. 3. 768-782 (In English).
 18. Botto L., Lendelová J. Surface temperature of warm-water pads for heating piglets in farrowing pens. *Slovak Journal of Animal Science*. 2016. Vol. 49. 116-121 (In English).
 19. Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Tikhomirov D.A., Tikhomirov A.V. The state, promising directions and strategies for the development of the energy base of agriculture. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020. Vol. 51. N3. 24-35. (In English).
 20. Vasil'ev A.N., Dorokhov A.S., Ershova I.G.. et al. Metodologiya issledovaniya energosberegayushchikh tekhnologicheskikh sistem obrabotki sel'khozproduktov kak obektov upravleniya [Methodology of research of energy-saving technological systems of processing of agricultural products as objects of management]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2019. Vol. 12. N4(63). 86-104 (In Russian).
 21. Dorokhov A.S. Komp'yuternoe zrenie kak instrument sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami. Sistema tekhnologiy i mashin dlya innovatsionnogo razvitiya APK Rossii. *Sbornik nauchnykh dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 145-letiyu so dnya rozhdeniya osnovopolozhnika zemledel'cheskoy mekhaniki V.P. Goryachkina*. Moscow: VIM. 2013. 355-357 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Кузьмичев А.В. – подготовка начального варианта статьи, формулирование цели и задачи исследования, разработка теоретических предпосылок;
 Тихомиров Д.А. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования;
 Хименко А.В. – доработка текста, формирование общих выводов и литературный анализ.
 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Kuz'michev A.V. – preparation of the manuscript draft, formulation of the study purpose and objectives, development of theoretical premises;
 Tikhomirov D.A. – scientific guidance, formulation of the research main directions;
 Khimenko A.V. – manuscript revision, general conclusions and literature review.
 The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
 Статья принята к публикации

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

03.11.2021
 04.02.2022

Исследование сепарирующей системы с использованием теплоты отработавших газов двигателя свеклоуборочного комбайна

Алексей Семенович Дорохов,
доктор технических наук,
член-корреспондент Российской академии наук,
главный научный сотрудник;
Александр Геннадьевич Аксенов,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник;

Алексей Викторович Сибирев,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник;
Максим Александрович Мосяков,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник;
Николай Викторович Сазонов,
младший научный сотрудник,
e-mail: Sazonov_Nikolay@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что повышенная влажность почвы ухудшает качество уборки корнеплодов из-за снижения полноты сепарации. Чтобы повысить сепарирующую способность щелевых устройств для очистки корнеплодов, предложили усовершенствовать обогрев сепарирующей поверхности горячим выхлопным газом. (*Цель исследований*) Оптимизировать конструктивно-технологические параметры сепарирующего устройства с использованием теплоты отработавших газов силовой установки машины для уборки сахарной свеклы. (*Материалы и методы*) В Федеральном научном агроинженерном центре ВИМ разработали сепарирующую систему машины для уборки корнеплодов и картофеля в условиях повышенной влажности с использованием теплоты отработавших газов силовой установки. Качество очистки сепарирующей системы самоходного комбайна для уборки сахарной свеклы определяли при последовательном нагружении двигателя от 0 до 100 процентов номинальной мощности. Измеряли температуру отработавших газов с учетом изменения нагрузки двигателя и его эффективной мощности. (*Результаты и обсуждение*) Выявили повышение полноты сепарации вороха корнеплодов с 96,0 до 98,8 процентов при 26-32-процентной влажности почвы благодаря сепарирующей системе в виде очистительной звезды, где используется теплота отработавших газов двигателя. Установили оптимальные значения рассматриваемых факторов: частота вращения сепарирующей звезды 21,8 оборота в минуту, расстояние между сепарирующей звездой и дефлектором – 128,4 миллиметра. (*Выводы*) Определили, что качественное выполнение технологического процесса уборки корнеплодов в условиях повышенной влажности почвы с полнотой сепарации 97 процентов возможно при оптимизации конструктивно-технологических параметров сепарирующего устройства: при частоте вращения сепарирующей звезды 20-22 оборотов в минуту и расстоянии между сепарирующей звездой и дефлектором 120-140 миллиметров. Отметим перспективность разработки данной системы и необходимость теоретических и экспериментальных исследований по совершенствованию конструкции и технологического процесса работы сепарирующей системы уборочных машин.

Ключевые слова: уборка корнеплодов, свеклоуборочный комбайн, сепарирующая система, сепарирующая звезда, отработавшие газы.

Для цитирования: Дорохов А.С., Аксенов А.Г., Сибирев А.В., Мосяков М.А., Сазонов Н.В. Исследование сепарирующей системы с использованием теплоты отработавших газов двигателя свеклоуборочного комбайна // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №1. С. 19-26. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-19-26.

Study of an Exhaust Gas Heat Separation System for the Beet Harvester

Alexey S. Dorokhov,
Dr.Sc.(Eng), corresponding member of Russian Academy
of Sciences, chief researcher;
Alexander G. Aksekov,
Ph.D.(Eng.), leading researcher;
Alexey V. Sibirev,
Dr.Sc.(Eng), senior researcher;

Maksim A. Mosyakov,
Ph.D.(Eng.), senior researcher;
Nikolay V. Sazonov,
junior researcher,
e-mail: Sazonov_Nikolay@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. It was noted that increased soil moisture worsens the quality of harvesting root crops due to a decrease in the completeness of separation. To increase the separating capacity of a slotted cleaner for root crops, it was proposed to improve the heating of the separating surface with hot exhaust gas. (*Research purpose*) To optimize the design and technological parameters of an exhaust gas heat separation system of the sugar beet harvester power plant. (*Materials and methods*) Federal Scientific Agroengineering Center VIM developed an exhaust gas heat separation system for harvesting root crops and potatoes in high moisture conditions using the heat of the harvester power plant exhaust gases. The cleaning quality of the separating system of a self-propelled sugar beet harvester was determined under the gradual engine load from 0 to 100 percent of the nominal rated power. The temperature of the exhaust gases was measured with the assumption of changes in the engine load and its effective power. (*Results and discussion*) The experiment revealed an increase in the completeness of the separation of a root crops heap from 96.0 to 98.8 percent at 26-32 percent soil moisture due to the separation system in the form of a cleaning star, which uses the heat of the engine exhaust gases. The established optimal values of the factors under consideration are as follows: the separating star rotation rate is 21.8 revolutions per minute, the distance between the separating star and the deflector is 128.4 millimeters. (*Conclusions*) It was determined that the high quality of the technological process of root crops harvesting in high soil moisture conditions ensuring a 97-percent separation efficiency is possible if optimize the separating device design and technological parameters and maintain the separating star rotation rate at 20-22 revolutions per minute and the distance between the separating star and the deflector within 120-140 millimeters. The authors noted the prospects of developing this system and the need for theoretical and experimental studies to improve the design and technological process of the harvester separating system.

Keywords: root crops harvesting, beet harvester, separating system, separating star, exhaust gases.

For citation: Dorokhov A.S., Aksenov A.G., Sibirev A.V., Mosyakov M.A., Sazonov N.V. Issledovanie separiruyushchey sistemy s ispol'zovaniem teploty otrabotavshikh gazov dvigatelya svekloborochnogo kombayna [Study of an exhaust gas heat separation system for the beet harvester]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N1. 19-26 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-19-26.

От качественной уборки корнеплодов и картофеля зависят их товарные свойства [1-3]. В большинстве регионов России осенние уборочные работы сопровождаются большим количеством осадков [4-7]. Повышенная влажность почвы затрудняет работу уборочной машины при извлечении корнеплодов и последующей очистке от механических примесей [8-11]. Механическая очистка просветов между прутками сепарирующего устройства повышает повреждение товарной продукции, так как интенсификаторы сепарации взаимодействуют не только с рабочей поверхностью очистительных устройств, но и с корнеплодами [1-3].

Эффективность машин повышается благодаря более интенсивному использованию в их конструкции электронной техники и полимерных материалов, а также совмещению ряда технологических операций с максимально возможным использованием полезной мощности энергетических средств [5]. Несмотря на значительное количество научных изысканий, посвященных проблеме энерго-, ресурсосбережения при возделывании и уборке сельскохозяйственных культур и разработке средств механизации, обеспечивающих качественное выполнение технологических операций, остаются вопросы, которые до настоящего времени решены не полностью.

Для повышения интенсивности сепарации щелевых рабочих органов в условиях повышенной влажности почвы определяющее значение имеют тепло-

вое воздействие на рабочую поверхность сепарирующего устройства, теплотворная способность охлаждающей жидкости гидравлической системы машинно-технологического комплекса [4, 8].

Разработано конструктивное исполнение функционирующего элемента уборочной машины, обеспечивающего сепарацию товарной продукции совместно с отводом теплоты рабочей жидкости из гидравлической системы. Такое решение исключает потери теплоты в атмосферу и направляет полезную работу на обогрев рабочей поверхности очистительного устройства [12]. Однако существенным недостатком стало отсутствие независимой гидравлической системы в уборочных машинах, широко применяемых на небольших площадях крестьянско-фермерских и личных подсобных хозяйств [13].

Наиболее перспективное направление повышения сепарирующей способности щелевых устройств для очистки корнеплодов – совершенствование способа обогрева сепарирующей поверхности горячим выхлопным газом энергетической установки уборочной машины или привода [4].

Цель исследования – совершенствование технологического процесса очистки корнеплодов в условиях повышенной влажности в ходе оптимизации конструктивно-технологических параметров сепарирующего устройства с использованием теплоты отработавших газов силовой установки машины для уборки сахарной свеклы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Потери теплоты в атмосферу дизельного двигателя свеклоуборочного комбайна *Holmer Terra Dos T3* составляют 51960 Дж/с, что на 1100 Дж/с превышает количество теплоты, эквивалентной эффективной работе [2].

Для снижения травмирования и повышения качества очистки корнеплодов сахарной свеклы от механических и растительных примесей разработана сепарирующая система с использованием теплоты отработавших газов двигателя самоходной уборочной машины (рис. 1) [11, 14-17].

Для определения технологических параметров сепарирующей системы с использованием теплоты отработавших газов двигателя свеклоуборочного комбайна *Holmer Terra Dos T3* проведены экспериментальные исследования в производственных условиях ООО «Красная Горка» Пензенской области (рис. 2).

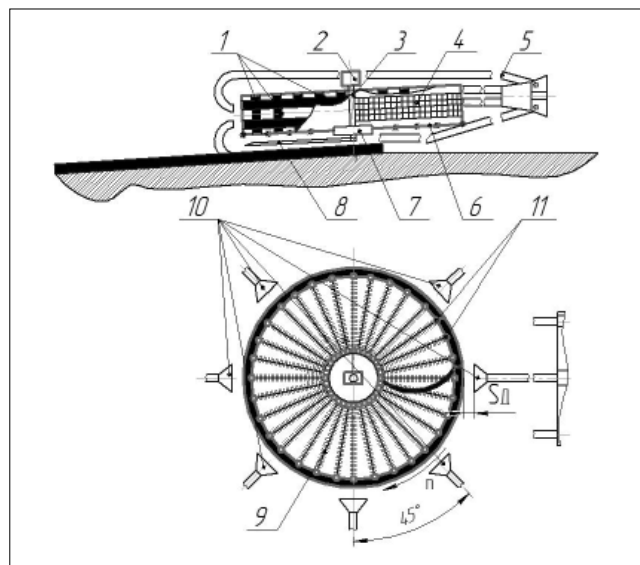


Рис. 1. Сепарирующая система с использованием теплоты отработавших газов двигателя: 1 – ограждение; 2 – гидронасос; 3 – ступица; 4 – щиток решетчатый; 5 – система воздухопроводов; 6 – ограждение резиботехническое; 7 – ступица; 8 – чистик; 9 – спицы счесывающие; 10 – дефлекторы; 11 – шарнирное сочленение; S_d – расстояние между сепарирующей звездой и дефлектором; n – частота вращения

Fig. 1. Exhaust gas heat separation system: 1 – fence; 2 – hydraulic pump; 3 – hub; 4 – lattice flap; 5 – air duct system; 6 – rubber fence; 7 – hub; 8 – guillotine; 9 – combing needles; 10 – deflector; 11 – articulated joint; S_d – the distance between the separating star and the deflector; n – rotation rate

Экспериментальная очистительная система представляет собой комплексное оборудование, состоящее из взаимосвязанных между собой сепарирующей системы и системы отработавших газов двигателя внутреннего сгорания самоходного свеклоуборочного комбайна [11]. Воздуховоды выполнены из армированного материала, что позволяет обеспечить их перемещение в вертикальной и горизонтальной пло-

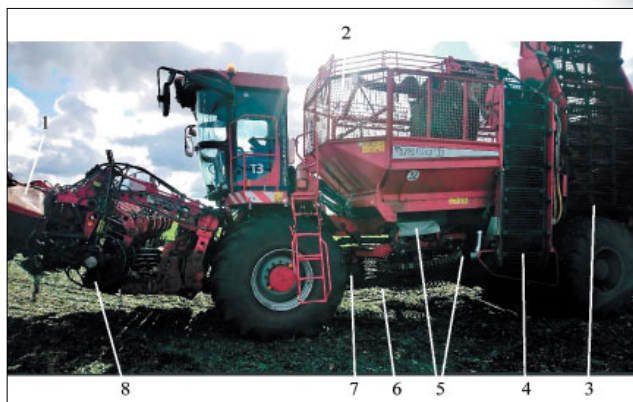


Рис. 2. Общий вид свеклоуборочного комбайна *Holmer Terra Dos T3* и сепарирующей системы с использованием теплоты отработавших газов двигателя: 1 – ботвоудалитель; 2 – бункер; 3 – транспортер выгрузной; 4 – прутковый транспортер загрузки; 5 – дефлектор; 6 – воздуховод; 7 – звезды сепарирующие; 8 – корчеватель

Fig. 2. General view of *Holmer Terra Dos T3* beet harvester and exhaust gas heat separation system: 1 – haulm remover; 2 – tanker; 3 – unloading conveyor; 4 – rattle chain; 5 – deflector; 6 – air duct; 7 – separating stars; 8 – grubber

скостях по всему диаметру очистителя [18]. Кроме того, для равномерного обдува теплым воздухом сепарирующей поверхности дефлекторы расположены равноудаленно по диаметру сепарирующей звезды под углом 45° относительно воздухопроводов (рис. 3).

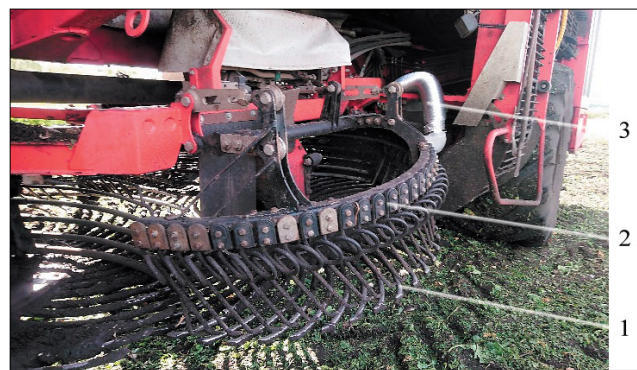


Рис. 3. Общий вид сепарирующей системы с использованием теплоты отработавших газов двигателя свеклоуборочного комбайна *Holmer Terra Dos T3*: 1 – звезда сепарирующая; 2 – дефлектор; 3 – воздуховод

Fig. 3 – General view of the exhaust gas heat separation system of *Holmer Terra Dos T3* beet harvester: 1 – separating star; 2 – deflector; 3 – air duct

Методика проведения исследований при различных соотношениях тепловой подачи воздуха заключалась в следующем.

Требуемую влажность почвы при проведении экспериментальных исследований обеспечивали гидравлическим воздействием на почву неньютоновской жидкости на всей площади учетной делянки (длина 100 м) до фиксируемого значения необходимого соот-

ветствия интервалу в абсолютных значениях $W=26-32\%$.

Далее прогревали двигатель самоходного комбайна *Holmer Terra Dos T3* до рабочей температуры 90°C с последовательным включением функционирующих элементов – от приемно-подкапывающей части до последних ступеней очистки комбайна – с установленными значениями технологических параметров: частоты вращения сепарирующей звезды в соответствии с планом проведения эксперимента при номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя.

Подачу сепарируемой массы сахарной свеклы ($4-6\text{ кг/с}$) регулировали, изменяя рабочую скорость комбайна в пределах $5-9\text{ км/ч}$.

При проведении экспериментальных исследований определяли влияние частоты вращения сепарирующей звезды и расстояния между сепарирующей звездой и дефлектором на полноту сепарации корнеплодов сахарной свеклы в условиях повышенной влажности почвы (табл. 1) [12].

Составили матрицу планирования 2-факторного эксперимента (табл. 2).

Далее осуществляли последовательное нагружение двигателя от 0 до 100% номинальной мощности и определяли температуру отработавших газов в зависимости от нагрузки двигателя при номинальном тепловом режиме.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Провели теоретические исследования, определяющие остаточное давление отработавших газов на выходе из воздуховода, температуру и частоту вращения сепарирующей звезды.

В связи с тем, что на силовой установке энергетического средства предполагается монтаж только выпускного воздуховода, коэффициент сопротивления выпускной системы $\zeta_{\text{вып}}$ можно принять равным 1,05. Тогда остаточное давление на выходе из воздуховода составит [11]:

$$P_r = \zeta_{\text{вып}} \cdot p_0 = 1,05 \cdot 0,1 = 0,1050, \quad (1)$$

УРОВНИ И ИНТЕРВАЛЫ ВАРЬИРОВАНИЯ ФАКТОРОВ ПРИ СЕПАРАЦИИ ВОРОХА КОРНЕПЛОДОВ СЕПАРИРУЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОТЫ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЯ LEVELS AND INTERVALS OF FACTORS VARIATION WHEN SEPARATING A HEAP OF ROOT CROPS BY AN EXHAUST GAS HEAT SEPARATION SYSTEM					
Уровни варьирования Levels of variation	Варьируемые факторы / Variables		Критерий оптимизации Optimization criteria		
	расстояние между сепарирующей звездой и дефлектором, S_d , мм Distance between separating star and deflector, S_d , mm	частота вращения сепарирующей звезды, $n_{сн}$, мин Separating star rotation rate, $n_{сн}$, min ⁻¹	полнота сепарации корнеплодов, v , % Completeness of root crops separation, v , %		
				Интервал варьирования, Δ / Variation interval, Δ	
				30	5,0
				верхний (+1) upper	160
нижний (-1) lower	100	15			
основной (0) fundamental	130	20			
кодовые обозначения reference designations	X_1	X_2			

Номер опыта Experiment number	Факторы / Factors	
	расстояние между сепарирующей звездой и дефлектором, S_d , мм Distance between separating star and deflector, S_d , mm	частота вращения сепарирующей звезды, $n_{\text{сн}}$, мин ⁻¹ Separating star rotation rate, $n_{\text{сн}}$, min ⁻¹
	X_1	X_2
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	1	0
6	-1	0
7	0	1
8	0	-1

где p_0 – давление на входе в воздуховод, МПа.

Температуру остаточных газов принимаем по среднему значению, то есть $T_r = 850$ К. Температура, сообщаемая сепарирующей звезде посредством передачи через систему воздуховодов и дефлекторов от силовой установки, будет равна [11]:

$$t_2 = (Q_i + t_1), \quad (2)$$

где Q_i – составляющая теплового баланса, Дж/с;

t_1 – температура сепарирующей звезды до воздействия воздушного потока отработавших газов от силовой установки, К.

Для достижения требуемой температуры сепарирующей поверхности очистительной звезды необходимо, чтобы частота ее вращения обеспечивала равномерный обдув рабочей поверхности, при постоянной частоте вращения n_{cy} коленчатого вала двигателя силовой установки при номинальном режиме и максимальной передаче теплоты $Q_r = \max$ через систему выброса отработавших газов [11]:

$$n_{СП} = n_{cy} \cdot k_{П}, \quad (3)$$

где $n_{СП}$ – частота вращения сепарирующей звезды, мин^{-1} ;

n_{cy} – частота вращения коленчатого вала двигателя силовой установки при номинальном режиме, мин^{-1} ;

$k_{П}$ – коэффициент передачи мощности, $k_{П} = 0,006$.

Для обеспечения равномерного распределения вороха товарной продукции по сепарирующей рабочей поверхности необходимо соблюдение условия [12]:

$$v_{ЭЛ} = v_K \cdot A, \quad (4)$$

где $v_{ЭЛ}$ – угловая скорость сепарирующей звезды, м/с;

v_K – скорость движения уборочной машины, м/с;

A – коэффициент, $A=1,3$.

Угловую скорость сепарирующей звезды определяют по выражению [12]:

$$v_{ЭЛ} = \frac{\pi \cdot n_{СП}}{30} \cdot R_{СП}, \quad (5)$$

где $R_{СП}$ – радиус сепарирующей звезды, м.

Согласно выражениям (4) и (5) частота вращения сепарирующей звезды равна [12]:

$$n_{СП} = \frac{30A \cdot v_K}{\pi \cdot R_{СП}}. \quad (6)$$

Расстояние между сепарирующей звездой и дефлектором определяли исходя из обеспечения максимальной полноты обдува и температуры рабочей поверхности в сечениях воздуховода в области нахождения дефлекторов при различных значениях их температурных полей и геометрии воздуховода.

Критерием оптимизации выбран показатель качества уборки корнеплодов сахарной свеклы – полнота сепарации. При этом были учтены критерии, определяющие производительность и энергоёмкость про-

цесса уборки.

После обработки результатов экспериментальных исследований получили математическую модель, интерпретирующую влияние выбранных параметров на качество сепарации:

$$Y = 125,72 - 0,15x_1 - 2,08x_2 + 0,002x_1^2 + 0,043x_2^2 + 0,02x_1x_2. \quad (7)$$

Ее адекватность подтвердили в ходе статистического анализа (табл. 3).

Таблица 3				Table 3				
СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОШИБКИ ОПЫТА STATISTICAL CHARACTERISTICS OF THE EXPERIMENT ERROR								
№	Y_1	Y_2	Y_3	$\bar{Y}_u$	Y_u	S_y^2	S_{LF}^2	$(Y_u - \bar{Y}_u)^2$
1	98,6	98,9	98,3	98,6	98,43	0,7	0,381	1,413
2	96,3	95,1	95,7	95,7	93,77	1,06	0,581	2,131
3	97,8	96,9	97,2	97,3	96,68	1,08	0,589	2,162
4	95,6	94,9	96,9	95,8	96,93	0,04	0,021	0,081
5	98,7	97,4	99,2	98,5	95,48	0,03	0,016	0,063
6	93,3	92,2	92,3	92,6	95,54	0,06	0,033	0,124
7	95,8	98,2	96,4	96,8	96,78	1,48	0,807	2,961
8	95,5	95,7	95,9	95,7	93,65	1,24	0,675	2,475
Σ	—	—	—	771,0	—	5,691	3,103	11,412

Значение критерия Фишера F_r при 5%-ном уровне значимости для полученного уравнения составляет:

$$F_{РАСЧ} = \frac{5,691}{2,625} = 2,168 < F_{ТАБЛ} = F_{0,05} = 7,71. \quad (8)$$

Для определения оптимальных параметров сепарирующей системы необходимо выполнить дифференцирование уравнения (7) с определением координат центра поверхности отклика:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx_1} = 0,15 + 0,004x_1 + 0,02x_2 = 0, \\ \frac{dy}{dx_2} = -2,08 + 0,86x_2 + 0,032x_1 = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Решая систему уравнений (9), нашли координаты центра поверхности выбранного критерия оптимизации в закодированном и раскодированном видах соответственно: $x_1 = -56,15$; $x_2 = 3,72$; $S_d = 128,4$ мм; $n_{СП} = 21,8$ мин^{-1} .

Подстановкой полученных значений в закодированном виде определили критерий оптимизации в центре полученных графических зависимостей:

$$Y_s = 96,86.$$

Результаты полученных канонических преобразований уравнения (7) и угол поворота осей представлены в выражениях:

$$Y - 96,86 = 0,0015x_1^2 - 0,471x_2^2; \quad (10)$$

$$\text{tg } 2\alpha_2 = \frac{0,005}{0,11 - 0,005} = 0,047. \quad (11)$$

Угол $\alpha_1 = -1,26^\circ$.

Корреляционная зависимость между исследуемыми факторами ($S_d, n_{сп}$), влияющими на полноту очистки корнеплодов сахарной свеклы в условиях повышенной влажности почвы, выражается уравнением параболических функций:

$$v = 125,72 - 0,1564 n_{сп} - 2,0805 S_d + 0,05 n_{сп}^2 + 0,23 n_{сп} S_d + 0,044 S_d^2. \quad (12)$$

Полнота сепарации вороха корнеплодов зависит от частоты вращения сепарирующей звезды и удаленности от нее дефлектора (рис. 4).

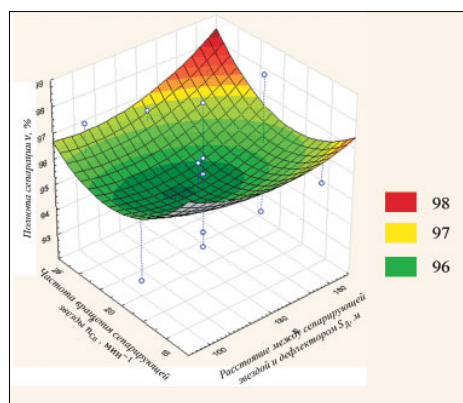


Рис. 4. Зависимость полноты сепарации вороха корнеплодов от частоты вращения сепарирующей звезды и расстояния между сепарирующей звездой и дефлектором

Fig. 4. Dependence of the completeness of separation of a root crops heap on the separating star rotation rate and the distance between the separating star and the deflector

Этот показатель достигает 98,8% при оптимальных значениях рассматриваемых факторов: частота вращения сепарирующей звезды $n_{сп} = 21,8 \text{ мин}^{-1}$ и расстояние между сепарирующей звездой и дефлектором $S_d = 128,4 \text{ мм}$. Увеличение частоты вращения сепарирующей звезды от 15 до 20 мин^{-1} ухудшает качество сепарации на 1,0-1,5% в сравнении с предыдущим интервалом частоты вращения. Сокращение времени на обдув рабочей поверхности сепарирующей

звезды при интервале значений 20-25 мин^{-1} снижает полноту сепарации до 96%.

Установлено, что содержание почвенных примесей на сходе с рабочей поверхности очистительной звезды более 20% не в полной мере отвечает требованиям полноты очистки корнеплодов (менее 8%) [6]. Это объясняется тем, что процесс сепарации на первом этапе трехступенчатой системы очистки происходит при влажности почвы 23-25%. Качество очистки улучшается при переходе на каждую последующую ступень сепарирующей системы.

Выводы. Оптимизация конструктивно-технологических параметров сепарирующего устройства с использованием теплоты отработавших газов силовой установки машины для уборки сахарной свеклы обеспечила повышение полноты сепарации корнеплодов более 97% при соблюдении расстояния между сепарирующей звездой и дефлектором 120-140 мм и частоте вращения сепарирующей звезды 20-22 мин^{-1} .

Для качественного выполнения технологического процесса уборки корнеплодов сахарной свеклы в условиях повышенной влажности почвы необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования по совершенствованию конструкции и технологического процесса работы сепарирующей системы уборочных машин, в том числе по исследованию влияния выхлопных газов двигателя свеклоуборочного комбайна на качество корнеплодов сахарной свеклы, которые будут выполнены при финансировании Российского научного фонда при реализации проекта «Энергосберегающая технология уборки корнеплодов и картофеля с цифровой системой экологической оценки качества товарной продукции» конкурса 2021 г. «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами».

Работа выполнена в рамках стипендии Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых СП-1004.2021.1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Протасов А.А. Функциональный подход к созданию лущоуборочной машины // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. 2011. N2 (47). С. 37-43.
2. Колпаков, В. Е., Шкорлаков Р. В. Исследования зависимости температуры выпускных газов от мощностных режимов автотракторных дизелей // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2014. N35. С. 289-294.
3. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G. Dynamic systems modeling using artificial neural networks for agricultural machines. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019. 2(58). 63-75.
4. Сорокин А.А. Теория и расчет картофелеуборочных машин: Монография. М.: ВИМ. 2006. 159 с.
5. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Дорохов А.С., Сибирев А.В., Крючков В.А., Сазонов Н.В. Современные технологии и техника для сельского хозяйства – тенденции выставки Agrotechnika 2019 // Тракторы и сельхозмашины. 2020. N6. С. 28-40.
6. Костенко М.Ю., Костенко Н.А. Вероятностная оценка сепарирующей способности элеватора картофелеубо-

- рочной машины // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2009. N2. С. 4.
7. Краснощеков Н.В. Агроинженерная стратегия: от механизации сельского хозяйства к его интеллектуализации // *Тракторы и сельхозмашины*. 2010. N8. С. 5–7.
 8. Камалетдинов Р.Р. Объектно-ориентированное имитационное моделирование в среде теории информации (информационное моделирование) // *Известия Международной академии аграрного образования*. 2012. Т. 1. N14. С. 186–194.
 9. Рейнгарт Э.С., Сорокин А.А., Пономарев А.Г. Унифицированные картофелеуборочные машины нового поколения // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2006. N10. С. 3–5.
 10. Hevko R.B., Tkachenko I.G., Synii S.V. Development of design and investigation of operation processes of small-scale root crop and potato harvesters. *INMATEH – Agricultural engineering*. 2016. 49. 2. 53–60.
 11. Дорохов А.С. Аксенов А.Г., Сибирев А.В., Мосяков М.А., Сазонов Н.В. Теоретические предпосылки повышения сепарирующей системы машины для уборки корнеплодов тепловой энергией системы отработавших газов // *Вестник Казанского ГАУ*. 2021. N1(61). С. 71–77.
 12. Уханов А.П., Уханов Д.А., Адгамов И.Ф. Теоретический анализ энергозатрат машинно-тракторного агрегата при работе на дизельном смесевом топливе // *Нива Поволжья*. 2015. N1(34). С. 66–71.
 13. Бейлис В.М., Ценч Ю.С., Коротченя В.М. и др. Тенденции развития прогрессивных машинных технологий и техники в сельскохозяйственном производстве // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N4(33). С. 150–156.
 14. Калинин А.Б. Теплинский И.З., Кудрявцев П.П. Оценка параметров почвенного состояния при выполнении технологических процессов возделывания картофеля по интенсивной технологии // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2015. N38. С. 288–293.
 15. Пахомов В.И., Каун В.Д., Красюков К.В. Теоретические основы сушки сельскохозяйственных материалов // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2011. N8. С. 2–4.
 16. Зыкин Е.С., Курдюмов В.И., Субаева А.К. Перспективы развития парка сельскохозяйственной техники в современных условиях // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. N1–1. С. 772.
 17. Евтехов Д.В., Безносюк Р.В., Кодиров С.Т. и др. Исследование эксплуатационных показателей картофелеуборочных машин с модернизированными рабочими органами // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. 2021. N1(49). С. 112–119.
 18. Овчинников Е.В., Федоткин Р.С., Уютлов С.Ю., Крючков В.А. Комбинированная силовая установка с улучшенными экологическими показателями // *Экология промышленного производства*. 2021. N2(114). С. 44–47.

REFERENCES

1. Protasov A.A. Funktsional'nyy podkhod k sozdaniyu luko-uborochnoy mashiny [Functional approach to onion harvester designing]. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet im. V.P. Goryachkina*. 2011. N2 (47). 37–43 (In Russian).
2. Kolpakov V.E., Shkorlakov R.V. Issledovaniya zavisimosti temperatury vypusknykh gazov ot moshchnostnykh rezhimov avtotraktornykh dizeley [Studies of the exhaust gases temperature dependence on the power modes of autotractor diesel engines]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2014. N35. 289–294 (In Russian).
3. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G. Dynamic systems modeling using artificial neural networks for agricultural machines. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019. 2(58). 63–75 (In English).
4. Sorokin A.A. Teoriya i raschet kartofeleuborochnykh mashin. Monografiya. [Theory and calculation of potato harvesters: Monograph]. Moscow; VIM. 2006. 159 (In Russian).
5. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Kryuchkov V.A., Sazonov N.V. Sovremennye tekhnologii i tekhnika dlya sel'skogo hozyaystva – tendentsii vystavki Agrotechnika 2019 [Modern agriculture technologies and equipment – trends of an agrotechnika 2019 exhibition]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2020. N6. 28–40 (In Russian).
6. Kostenko M.Yu., Kostenko N.A. Veroyatnostnaya otsenka separiruyushchey sposobnosti elevatora kartofeleuborochnoy mashiny [Probabilistic assessment of the potato harvester elevator's separating capacity]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo hozyaystva*. 2009. N2. 4 (In Russian).
7. Krasnoshchekov N.V. Agroinzhenernaya strategiya: ot mekhanizatsii sel'skogo hozyaystva k ego intellektualizatsii [Agroengineering strategy: from mechanization of agriculture to its intellectualization]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2010. N8. 5–7 (In Russian).
8. Kamaltdinov R.R. Obektno-orientirovannoe imitatsionnoe modelirovanie v srede teorii informatsii (informatsionnoe modelirovanie) [Object-oriented imitating modeling in the environment of the information theory (information modeling)]. *Izvestiya Mezhdunarodnoy akademii agrarnogo obrazovaniya*. 2012. Vol. 1. N14. 186–194 (In Russian).
9. Reyngart E.S., Sorokin A.A., Ponomarev A.G. Unifitsirovannye kartofeleuborochnye mashiny novogo pokoleniya [New generation unified potato harvesters]. *Traktory i sel'skogo hozyaystvennye mashiny*. 2006. N10. 3–5 (In Russian).
10. Hevko R.B., Tkachenko I.G., Synii S.V. Development of design and investigation of operation processes of small-scale

root crop and potato harvesters. *INMATEH – Agricultural engineering*. 2016. 49. 2. 53-60 (In English).

11. Dorokhov A.S., Aksenov A.G., Sibirev A.V., Mosyakov M.A., Sazonov N.V. Teoreticheskie predposylki povysheniya separiruyushchey sistemy mashiny dlya uborki korneplodov teplovoi energiei sistemy otrabotavshikh gazov [Theoretical background of increasing the separating system of a root harvesting machine with thermal energy of the exhaust gas system]. *Vestnik Kazanskogo GAU*. 2021. N1(61). 71-77 (In Russian).
12. Ukhanov A.P., Ukhanov D.A., Adgamov I.F. Teoreticheskiy analiz energozatrat mashinno-traktornogo agregata pri rabote na dizel'nom smesevom toplive [Theoretical analysis of energy consumption of machine-tractor unit when running on diesel-mixed fuel]. *Niva Povolzh'ya*. 2015. N1(34). 66-71 (In Russian).
13. Beylis V.M., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M., et al. Tendentsii razvitiya progressivnykh mashinnykh tekhnologii i tekhniki v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [Trends in the development of advanced machine technologies and techniques in agricultural production]. *Vestnik VIESH*. 2018. N4(33). 150-156 (In Russian).
14. Kalinin A.B. Teplinskiy I.Z., Kudryavtsev P.P. Otsenki parametrov pochvennogo sostoyaniya pri vypolnenii tekhnologicheskikh protsessov vozdeystviya kartofelya po intensivnoy tekhnologii [Parameter estimation of soil state in the implementation of technological processes in the cultivation of potatoes on intensive technology]. *Izvestiya Sankt-Petersburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015. N38. 288-293 (In Russian).
15. Pakhomov V.I., Kaun V.D., Krasnyukov K.V. Teoreticheskie osnovy sushki sel'skokhozyaystvennykh materialov [Theoretical foundations of drying agricultural materials]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2011. N8. 2-4 (In Russian).
16. Zykin E.S., Kurdyumov V.I., Subaeva A.K. Perspektivy razvitiya parka sel'skokhozyaystvennoy tekhniki v sovremennykh usloviyakh [Prospects of development of agricultural equipment in modern conditions]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015. N1-1. 772 (In Russian).
17. Evtekhov D.V., Beznosyuk R.V., Kodirov S.T., et al. Issledovanie ekspluatatsionnykh pokazateley kartofeleuborochnykh mashin s modernizirovannymi rabochimi organami [Study of performance indicators of potato harvesting machines with modernized working bodies]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva*. 2021. N1(49). 112-119 (In Russian).
18. Ovchinnikov E.V., Fedotkin R.S., Uyutov S.Yu., Kryuchkov V.A. Kombinirovannaya silovaya ustanovka s uluchshennymi ekologicheskimi pokazatelyami [Combined power plant with improved environmental performance]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*. 2021. N2(114). 44-47 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Дорохов А.С. – научное руководство, формулирование основных целей и задач экспериментальных исследований, доработка текста, формирование общих выводов.
 Аксенов А.Г. – разработка методики эксперимента, анализ существующих технологических решений и машин для уборки корнеплодов в условиях повышенной влажности почвы.
 Сибирев А.В. – разработка конструктивных схем и устройства для очистки корнеплодов при помощи обогрева separирующей поверхности горячим выхлопным газом энергетической установки уборочной машины или привода машины, проведение экспериментальных исследований, разработка теоретических предпосылок.
 Мосяков М.А. – обработка полученных результатов экспериментальных исследований.
 Сазонов Н.В. – построение графиков, редактирование и оформление материалов
 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Dorokhov A.S. – scientific supervision, formulation of the experimental research goals and objectives, the manuscript revision, general conclusions.
 Aksenov A.G. – development of experimental methods, analysis of existing technological solutions and machines for root crops harvesting in high soil moisture conditions.
 Sibirev A.V. – development of structural schemes and devices for cleaning root crops by heating the separating surface with hot exhaust gas of the harvester power plant or drive, conducting experimental research, developing theoretical premises.
 Mosyakov M.A. – processing of the experimental studies results.
 Sazonov N.V. – construction of graphs, materials proofreading and design.
 The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
 Статья принята к публикации

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

12.01.2022
 01.02.2022

Математическая модель для определения конструктивной массы почвообрабатывающего орудия

Алексей Иванович Дерепаскин¹,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: celinnii@mail.ru;

Антон Николаевич Куваев²,
докторант, e-mail: kuvaevanthon@yandex.ru;
Иван Владимирович Токарев¹,
научный сотрудник, e-mail: Tokarev_Ivan.V@mail.ru

¹Костанайский филиал Научно-производственного центра агроинженерии, г. Костанай, Республика Казахстан;

²Костанайский региональный университет имени А. Байтурсынова, г. Костанай, Республика Казахстан

Реферат. Показали, что удельная конструктивная масса почвообрабатывающего орудия влияет на ширину захвата и заглубляющую способность. Отметим, что для улучшения производительности и экономической эффективности предпочтительно минимизировать этот показатель до определенной величины, чтобы обеспечить заглубляющую способность. Приняли во внимание зависимость от фактического количества рабочих органов и рамных элементов, приходящихся на единицу ширины захвата. (*Цель исследований*) Разработать математическую модель для определения минимально допустимой и фактической удельной конструктивной массы в зависимости от условий эксплуатации почвообрабатывающего орудия и его конструктивно-технологической схемы. (*Материалы и методы*) Использовали математическое моделирование, абстрагирование, анализ, синтез, положения классической механики. (*Результаты и обсуждение*) Разработали математическую модель для нахождения минимально допустимой и фактической удельной конструктивной массы, которая учитывает физико-механические характеристики обрабатываемой почвы, количество рабочих органов и рамных элементов, приходящихся на единицу ширины захвата почвообрабатывающего орудия. Установили, что увеличение ширины захвата рабочего органа позволяет уменьшить фактическую удельную конструктивную массу орудия при прочих равных условиях. Предложили использовать математическую модель при проектировании почвообрабатывающих орудий, проведении силовых расчетов и сравнительной оценки металлоемкости в зависимости от установки и расположения рабочих органов различной ширины захвата. (*Выводы*) Установили, что при пределе прочности почвы сжатия 100 000 паскалей для обеспечения заглубления плоскорезающего орудия на заданную глубину минимально допустимая конструктивная масса орудия должна составлять 334 килограмма на метр. Фактическая удельная конструктивная масса орудия в рассматриваемых условиях будет иметь минимальное значение при ширине захвата рабочего органа 0,7 и 0,8 метра – 375 и 335 килограмма на метр соответственно.

Ключевые слова: почвообрабатывающее орудие, удельная конструктивная масса, математическая модель, плоскорезающие рабочие органы, ширина захвата, заглубляющая способность.

Для цитирования: Дерепаскин А.И., Куваев А.Н., Токарев И.В. Математическая модель для определения конструктивной массы почвообрабатывающего орудия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №1. С. 27-33. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-27-33.

A Mathematical Model for Determining the Specific Structural Weight of a Tillage Implement

Aleksey I. Derepaskin¹,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: celinnii@mail.ru;

Anton N. Kuvaev²,
Ph.D. student (Eng.), e-mail: kuvaevanthon@yandex.ru;
Ivan V. Tokarev¹,
research associate, e-mail: Tokarev_Ivan.V@mail.ru

¹Kostanay branch Scientific production center of agricultural engineering, Kostanay, Republic of Kazakhstan;
Kostanay Regional University named after Ahmet Baitursynov, Kostanay, Republic of Kazakhstan

Abstract. The authors have shown that the tillage specific constructive weight affects the working width and penetration ability. In order to increase the working width of the tillage implement, and therefore its performance and economic efficiency as well as its penetration ability, it is preferable to minimize the value of this indicator. It is taken into account that the implement specific

structural weight will depend on the actual number of working tools and frame elements per unit of the working width. (*Research purpose*) The aim of the work is to develop a mathematical model to determine the minimum allowable and actual specific structural weight depending on the tillage implement operating conditions and its structural design and technological scheme. (*Materials and methods*) The research methodology is based on mathematical modeling, abstraction, analysis, synthesis, and principles of classical mechanics. (*Results and discussion*) The proposed mathematical model for determining the minimum allowable and actual specific structural weight was developed. The model takes into account the physical and mechanical characteristics of the cultivated soil, the number of working bodies and frame elements per unit of the tillage implement working width. It was found out that an increase in the working width makes it possible to reduce the implement actual specific structural weight, all other things being equal. It was proposed to use the mathematical model for designing tillage tools, carrying out force calculations and comparative assessment of metal consumption, depending on the installation and location of working bodies with different working widths. (*Conclusions*) It was found out that with the soil ultimate compressive strength of 100,000 pascal, the implement minimum allowable structural weight should be 334 kilograms per meter to ensure the tillage tool penetration to a given depth. Under the considered conditions, the implement actual specific structural weight will have a minimum value at the working width of 0.7 and 0.8 meters – 375 kilograms per meter and 335 kilograms per meter, respectively.

Keywords: tillage tool, specific structural weight, mathematical model, flat-cutting working bodies, working width, penetration ability.

For citation: Derpaskin A.I., Kuvaev A.N., Tokarev I.V. Matematicheskaya model' dlya opredeleniya konstruktivnoy massy pochvoobrabatyvayushchego orudiya [A mathematical model for determining the specific structural weight of a tillage implement]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N1. 27-33 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-27-33.

При проектировании почвообрабатывающих машин важно учитывать конструктивную ширину захвата, от которой зависят производительность и экономическая эффективность.

Математическая модель для определения данного показателя должна учитывать скорость движения, физико-механические характеристики почвы, тяговые возможности энергетического средства и тяговое сопротивление, создаваемое почвообрабатывающей машиной [1-4]. В качестве примера рассмотрим формулу для нахождения допустимой ширины захвата почвообрабатывающего орудия [5]:

$$W_i \leq \frac{N_e \cdot \eta_t \cdot \eta_u}{(M_{sp} \cdot g \cdot f + k \cdot a + \rho \cdot a \cdot V^2) \cdot V} \quad (1)$$

где W_i – ширина захвата орудия, м;

N_e – мощность, развиваемая двигателем энергетического средства (эффективная мощность), кВт;

η_t – тяговый КПД энергетического средства;

η_u – коэффициент тягового запаса энергетического средства;

M_{sp} – удельная конструктивная масса орудия, приходящейся на 1 м ширины захвата, кг/м;

g – ускорение свободного падения, м/с²

f – коэффициент трения почвы по стали;

k – удельное сопротивление почвы, Н/м²;

a – глубина обработки, м;

ρ – плотность почвы, кг/м³;

V – скорость движения орудия, м/с.

Как видно из формулы (1), уменьшение удельной конструктивной массы орудия при прочих равных условиях позволяет увеличить ширину захвата, а сле-

довательно, производительность агрегата. Кроме того, от массы зависит стоимость почвообрабатывающего орудия, что тоже учитывается в математической модели [6].

Удельная конструктивная масса влияет не только на эксплуатационно-технологические, энергетические и экономические, но и на агротехнические показатели работы агрегата, в частности на заглубляющую способность почвообрабатывающего орудия [7]. Этот показатель служит лимитирующим фактором.

Удельная конструктивная масса орудия будет зависеть также от фактического количества рабочих органов и их конструкции, включающей симметричные (плоскорежущие или стрелчатые) и ассиметричные (плужный корпус), а также рамных элементов, приходящихся на единицу ширины захвата.

На металлоемкость почвообрабатывающего орудия влияют схемы расположения рабочих органов, ширина захвата и прочие конструктивные факторы [8]. Следует учитывать глубину обработки, схему расположения рабочих органов, режим работы (блокированный, полублокированный или свободный) на общую металлоемкость орудия [9-11]. Однако зависимость данного показателя от физико-механических свойств почвы еще не изучена.

Существует большое количество почвообрабатывающих рабочих органов, имеющих различную конструкцию и схему расположения на раме орудия [12]. Создание универсальной математической модели, учитывающей все существующее многообразие конструкций рабочих органов и их особенности, затруднительно. Мы разработали модель на примере симметрич-

ного плоскорежущего рабочего органа, наиболее распространенного в почвозащитном земледелии [13]. Данная система земледелия или ее отдельные элементы активно применяются в регионах, подверженных ветровой эрозии: в Республике Казахстан – Костанайская, Северо-Казахстанская, Павлодарская, Акмолинская области, в Российской Федерации – Курганская, Новосибирская, Омская области, Алтайский край [14]. Несмотря на появление современных технологий, исключая механическое воздействие на почвенный слой и обладающих определенными достоинствами, проведение механической обработки почвы остается эффективным способом борьбы с уплотнением почвенного слоя и накопления влаги в условиях недостаточного увлажнения [15-17, 19-21].

Цель исследований – разработка математической модели, которая позволит определить минимально допустимую и фактическую удельную конструктивную массу в зависимости от условий эксплуатации почвообрабатывающего орудия и его конструктивно-технологической схемы.

Материалы и методы. В основу методики проведения исследований были положены математическое моделирование, абстрагирование, анализ и синтез. При составлении математических моделей использованы положения классической механики.

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим почвообрабатывающее орудие с рабочими органами симметричной конструкции, равномернодвигающееся из точки *A*, соответствующей начальному положению, в точку *B*, расположенную на глубине хода рабочих органов (рис. 1).

Угол наклона отрезка *AB* относительно горизонта будет характеризовать угол заглубления рабочих органов. В этом случае движение орудия можно представить как движение тела по наклонной плоскости. Со стороны почвенного монолита на рабочие органы орудия будет действовать сила реакции *N* и сила подпора *F_П*:

$$F_{\text{П}} = \sigma \cdot S = \sigma \cdot l_{\text{Р.К.}} \cdot b_{\text{Р.К.}}, \quad (2)$$

где *F_П* – сила подпора, Н;

σ – предел прочности почвы сжатию, Па;

S – площадь режущей кромки рабочего органа, м²;

l_{Р.К.} – общая длина режущих кромок, м;

b_{Р.К.} – ширина режущей кромки, м.

В соответствии со вторым законом Ньютона и законом Амонтона-Кулона, выражением (2) при равномерном движении орудия сумма всех сил будет равна:

- по оси *x*:

$$m \cdot g \cdot \sin \alpha_3 - F_{\text{ТР}} - \sigma \cdot l_{\text{Р.К.}} \cdot b_{\text{Р.К.}} = 0, \quad (3)$$

где *m* – масса почвообрабатывающего орудия, кг;

α_3 – угол заглубления почвообрабатывающего орудия, град.;

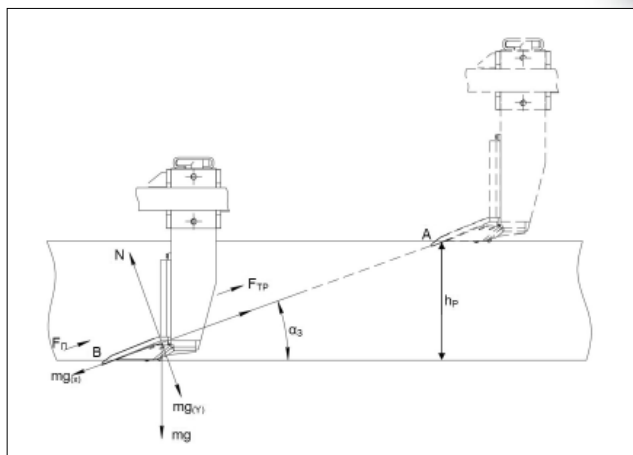


Рис. 1. Силы, действующие на почвообрабатывающее орудие при его заглублении: *A* – начальное положение почвообрабатывающего орудия на поверхности поля; *B* – рабочее положение почвообрабатывающего орудия на заданной глубине; *h_р* – заданная глубина обработки; *N* – сила реакции опоры; *F_П* – сила подпора недеформированного почвенного слоя; *F_{ТР}* – сила трения скольжения; α_3 – угол заглубления почвообрабатывающего орудия; *mg*, *mg_(x)* и *mg_(y)* – результирующая, горизонтальная и вертикальная составляющие силы тяжести почвообрабатывающего орудия соответственно

Fig. 1. Forces acting on the tillage implement when penetrating: *A* – the tillage tool initial position on the field surface; *B* – the tillage tool working position at a given depth; *h_p* – specified processing depth; *N* – the support reaction force; *F_П* – the back-up force of the undeformed soil layer; *F_{ТР}* – sliding friction force; α_3 – the tillage penetration angle; *mg*, *mg_(x)* and *mg_(y)* are the resulting, horizontal and vertical components of the tillage implement gravity, respectively

F_{ТР} – сила трения скольжения, возникающая при взаимодействии почвообрабатывающего орудия и почвенного слоя, Н;

- по оси *y*:

$$N - m \cdot g \cdot \cos \alpha_3 = 0. \quad (4)$$

Решив совместно уравнения (3) и (4), получим формулу для нахождения минимальной удельной конструктивной массы орудия, необходимой для его заглубления в рассматриваемый почвенный монолит:

$$m_{\text{уд.мин}} = \frac{\sigma \cdot b_{\text{Р.К.}}}{g \cdot (\sin \alpha_3 - \mu \cdot \cos \alpha_3)}, \quad (5)$$

где *m_{уд.мин}* – минимально допустимая конструктивная масса орудия, кг/м;

μ – коэффициент трения скольжения.

По формуле (1) можно вычислить минимальную удельную массу орудия. Однако для определения ее фактического значения необходимо знать, какое количество рабочих органов и рамных элементов конструкции приходится на единицу ширины захвата. В качестве примера рассмотрим наиболее распространенную шеренговую схему расположения симметрич-

ных плоскорежущих рабочих органов на раме орудия (рис. 2).

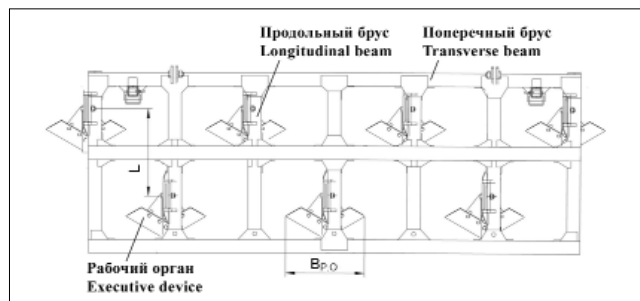


Рис. 2. Шеренговая схема расположения рабочих органов на раме орудия: L – расстояние между стойками рабочих органов; $B_{p.o.}$ – ширина захвата рабочего органа

Fig. 2. Ranking diagram of the working bodies arrangement on the implement frame: L – is the distance between the racks of the working bodies; $B_{p.o.}$ – the working width of the working body

Фактическая удельная конструктивная масса орудия равна:

$$m_{уд.ФАКТ.} = m_{p.o.(уд)} + m_{РАМ(уд)}, \quad (6)$$

где $m_{уд.ФАКТ.}$ – фактическая удельная конструктивная масса орудия, кг/м;

$m_{p.o.(уд)}$ – удельная конструктивная масса рабочих органов, приходящихся на единицу ширины захвата орудия, кг/м;

$m_{РАМ(уд)}$ – удельная конструктивная масса рамы орудия, приходящаяся на единицу ширины захвата орудия, кг/м.

В свою очередь $m_{РАМ(уд)}$ можно представить в упрощенном виде:

$$m_{РАМ(уд)} = m_{ПР.Б.(уд)} + m_{П.Б.(уд)} + m_{Э(уд)}, \quad (7)$$

где $m_{ПР.Б.(уд)}$ – удельная конструктивная масса продольных брусьев рамы, приходящаяся на единицу ширины захвата орудия, кг/м;

$m_{П.Б.(уд)}$ – удельная конструктивная масса поперечных брусьев рамы, приходящаяся на единицу ширины захвата орудия, кг/м;

$m_{Э(уд)}$ – удельная конструктивная масса добавочных элементов (накладок), усиливающих сварные швы, приходящаяся на единицу ширины захвата орудия, кг/м.

При этом:

$$m_{p.o.(уд)} = m_{p.o.} / B_{p.o.}, \quad (8)$$

где $m_{p.o.}$ – масса одного рабочего органа, кг;

$B_{p.o.}$ – ширина захвата рабочего органа, м.

Конструктивная масса продольных брусьев равна:

$$m_{ПР.Б.(уд)} = \frac{L \cdot M_{ПР.Б.(уд)}}{B_{p.o.}}, \quad (9)$$

где L – расстояние между стойкам рабочих органов, м;

$M_{ПР.Б.(уд)}$ – удельная конструктивная масса 1 м продольного бруса, кг/м.

Аналогично:

$$m_{П.Б.(уд)} = \frac{M_{П.Б.(уд)} \cdot k}{B_{p.o.}}, \quad (10)$$

где k – количество поперечных брусьев ($2k \leq 3$), шт.

Как показал анализ конструкций существующих почвообрабатывающих орудий, между $m_{Э(уд)}$, $m_{ПР.Б.(уд)}$ и $m_{П.Б.(уд)}$ существует следующая зависимость:

$$m_{Э(уд)} = 0,1 \cdot m_{ПР.Б.(уд)} + m_{П.Б.(уд)}. \quad (11)$$

Решая уравнения (6)–(11) совместно, получим:

$$m_{уд.ФАКТ.} = m_{p.o.(уд)} + 1,1 \cdot (m_{ПР.Б.(уд)} + m_{П.Б.(уд)}) = \frac{m_{p.o.} + 1,1 \cdot (L \cdot M_{ПР.Б.(уд)} + k \cdot M_{П.Б.(уд)})}{B_{p.o.}} \quad (12)$$

Для нахождения расстояния между стойкам рабочих органов можно воспользоваться формулой [18]:

$$L = 1,5 \cdot h_p \cdot \operatorname{ctg} \psi + l_l \cdot \sin \beta + \frac{V^2 \cdot \sin 2\beta \cdot \cos \beta}{g}, \quad (13)$$

где ψ – угол наклона плоскости сдвига почвенного слоя под воздействием рабочего органа, град.;

l_l – ширина лемеха, м;

β – угол установки лемеха ко дну борозды, град.

При проектировании почвообрабатывающих орудий для обеспечения заглубления орудия на требуемую глубину в заданных условиях эксплуатации должно выполняться следующее условие:

$$m_{уд.min} \leq m_{уд.ФАКТ.} \quad (14)$$

Следовательно, если для рассматриваемого варианта расчетное значение $m_{уд.ФАКТ.}$ не будет соответствовать формуле (14), то для обеспечения заглубления орудия в рассматриваемых почвенных условиях должно быть принято, что $m_{уд.ФАКТ.} = m_{уд.min.}$

Рассмотрим влияние ширины захвата плоскорежущего рабочего органа для глубокой обработки на удельную конструктивную массу почвообрабатывающего орудия.

Для расчета используем исходные данные:

предел прочности почвы сжатию, σ	100 000 Па;
ширина режущей кромки, $b_{p.k.}$	0,002 м;
ускорение свободного падения, g	9,81 м/с ² ;
угол заглубления почвообрабатывающего орудия, α_3	20 град.;
коэффициент трения скольжения стали по почве, μ	0,3;
масса плоскорежущего рабочего органа, $m_{p.o.}$, при ширине захвата рабочего органа $B_{p.o.}$:	
0,6 м	65 кг;
0,7 м	70 кг;
0,8 м	75 кг;
0,9 м	80 кг;
1,0 м	85 кг;

расстояние между стойкам рабочих органов, L 0,9 м;
удельная конструктивная масса 1 м бруса:
продольного, МПР.Б.(уд) 45 кг/м;
поперечного, МП.Б.(уд) 45 кг/м;
количество поперечных брусьев, k 3 шт.

В соответствии с формулой (5) определим минимальную удельную конструктивную массу орудия:

$$m_{уд.min} = \frac{100000 \cdot 0,002}{9,81 \cdot (0,34 - 0,30 \cdot 0,94)} = 334,00 \text{ кг/м.}$$

Используя выражение (12), найдем расчетное значение $m_{уд.ФАКТ.}$ для плоскорезящих рабочих органов шириной захвата $B_{р.о.} = 0,6-1,0$ м. Получили зависимость $m_{уд.ФАКТ.} = f(B_{р.о.})$ (рис. 3).

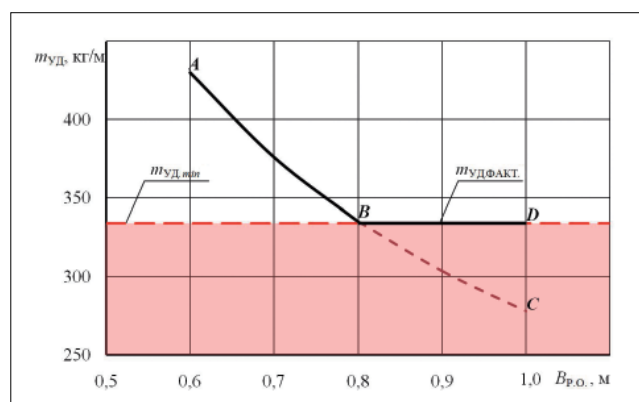


Рис. 3. Влияние ширины захвата плоскорезящего рабочего органа $B_{р.о.}$ на удельную конструктивную массу орудия $m_{уд.}$: $m_{уд.ФАКТ.}$ – фактическая удельная конструктивная масса орудия; $m_{уд.min}$ – минимально допустимая конструктивная масса орудия; AB – участок, где $m_{уд.ФАКТ.} \rightarrow min$; BC – недопустимые значения $m_{уд.ФАКТ.}$; BD – участок, где $m_{уд.ФАКТ.} = const$.

Fig. 3. Influence of the flat-cutting tool working width $B_{р.о.}$ on the tool specific structural weight – $m_{уд.}$: $m_{уд.ФАКТ.}$ – the tool actual specific structural weight; $m_{уд.min}$ – the tool minimum allowable structural weight; AB – the area, where $m_{уд.ФАКТ.} \rightarrow min$; BC – invalid values of $m_{уд.ФАКТ.}$; BD – the area, where $m_{уд.ФАКТ.} = const$.

Анализ полученных результатов показал следующее:

- на интервале $B_{р.о.} = [0,6; 0,8]$ м наблюдается относительно крутое убывание функции $m_{уд.ФАКТ.} = f(B_{р.о.})$ – участок кривой AB . Так, при $B_{р.о.} = 0,7$ м значение $m_{уд.ФАКТ.}$ снизилось на 12,8% ($m_{уд.ФАКТ.} = 375$ кг/м), при $B_{р.о.} = 0,8$ м – на 22,1% ($m_{уд.ФАКТ.} = 335$ кг/м) в сравнении с начальной точкой $B_{р.о.} = 0,6$ м ($m_{уд.ФАКТ.} = 430$ кг/м). Значение функции $m_{уд.ФАКТ.} = f(B_{р.о.})$ на рассматриваемом интервале соответствует условию, указанному в формуле (14);

- на интервале $B_{р.о.} = [0,9; 1,0]$ м значение функции $m_{уд.ФАКТ.} = f(B_{р.о.})$ меньше $m_{уд.min}$ – участок кривой BC (выделен пунктиром). Так, при $B_{р.о.} = 0,9$ м расчетное значение $m_{уд.ФАКТ.} = 303$ кг/м, при $B_{р.о.} = 0,9$ м – 278 кг/м. Следовательно, на этом интервале для обеспечения заглубления орудия в рассматриваемых почвенных условиях в соответствии с формулой (14) $m_{уд.ФАКТ.} = m_{уд.min} = 334$ кг. Функция $m_{уд.ФАКТ.} = f(B_{р.о.})$ будет постоянной – участок BD .

Увеличение $B_{р.о.}$ до определенного предела, который главным образом зависит от прочностных свойств почвы, что отражено в формуле (2), способствует уменьшению $m_{уд.ФАКТ.}$ – участок кривой AB (рис. 3). Дальнейший рост этого показателя уже не дает аналогичного эффекта, так как снижение удельной конструктивной массы орудия в соответствии с формулой (14) возможно до тех пор, пока выполняется условие $m_{уд.min} \leq m_{уд.ФАКТ.}$. В этом случае значение фактической удельной массы орудия должно удовлетворять равенству $m_{уд.ФАКТ.} = m_{уд.min}$, а функция $m_{уд.ФАКТ.} = f(B_{р.о.})$ будет постоянной – участок кривой BD (рис. 3).

Полученные результаты исследований могут быть использованы при проектировании почвообрабатывающих орудий. Однако при обосновании ширины захвата рабочего органа $B_{р.о.}$ необходимо учесть, что ее оптимальное значение должно определяться в первую очередь из условия обеспечения качественного выполнения технологического процесса в заданных условиях.

Выводы. Предложили математическую модель для нахождения минимально допустимой и фактической удельной конструктивной массы почвообрабатывающего орудия, которая учитывает физико-механические характеристики обрабатываемой почвы, количество рабочих органов и рамных элементов конструкции, приходящихся на единицу ширины захвата. Представленная математическая модель может быть использована при проектировании вновь создаваемых почвообрабатывающих орудий, проведении силовых расчетов и сравнительной оценки металлоемкости орудий с рабочими органами различной ширины захвата.

Установили, что при пределе прочности почвы сжатию 100 000 Па для обеспечения заглубления плоскорезящего орудия на заданную глубину минимально допустимая конструктивная масса орудия должна составлять 334 кг/м. Фактическая удельная конструктивная масса орудия в рассматриваемых условиях будет иметь минимальное значение при ширине захвата рабочего органа 0,7 и 0,8 м – 375 кг/м и 335 кг/м соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хафизов К.А., Хафизов Р.Н. Энергетический метод оптимизации основных параметров трактора // Вестник Казанского аграрного университета. 2015. N1(35). С. 75-81.
2. Хафизов К.А., Хафизов Р.Н. Результаты многофактор-

- ного эксперимента по определению зависимости максимального давления колес трактора на почву от параметров трактора и физико-механических свойств почвы. Анализ уравнений // *Вестник Казанского аграрного университета*. 2016. N4(42). С. 94-98.
3. Cardei P, Matache M.G., Nutescu C. Optimum working conditions for variable width ploughs. *ResearchGate*. 2017. August.
 4. Nurmiev A., Khafizov C. Optimization of main parameters of tractor working with soil-processing implement. *Engineering for rural development*. 2018. 161-167.
 5. Kuvaev A., Derpaskin I., Tokarev I. Substantiation of the working width of the tillage implement. *Acta universitatis agriculturae et silviculturae mendellianae brunensis*. 2021. Vol. 69. 21-31.
 6. Yezekyan T., Benetti M., Armentano G., Trestini S., Sartori L., Marinello F. Definition of Reference Models for Power, Mass, Working Width, and Price for Tillage Implements. *Agriculture*. 2021. Vol. 11(3). 197.
 7. Синеоков Г.Н. Проектирование почвообрабатывающих машин. М.: Машиностроение. 1965. 310 с.
 8. Бледных В.В. Техничко-экономический анализ производительности пахотных агрегатов // *Труды ЧИМЭСХ*. 1973. N72. С. 65-84.
 9. Рахимов Р.С., Рахимов И.Р., Касымов Ф.Ф. и др. Определение металлоемкости орудий при их проектировании // *АПК России*. 2015. N74. С. 110-117.
 10. Дерепаскин А.И., Комаров А.П. Обоснование схем расположения рабочих органов почвообрабатывающих орудий по критериям металлоемкости и тяговому сопротивлению // *Техника и оборудование для села*. 2021. N8. С. 10-13.
 11. Дерепаскин А.И., Полищук Ю.В., Дядюченко А.Ф. Обоснование схемы расположения рабочих органов широкозахватного плоскореза к трактору тягового класса 8 по критериям материалоемкости и тяговому сопротивлению // *Сельскохозяйственные технологии*. 2019. Т. 1. N4. С. 1-9.
 12. Дерепаскин А.И., Куваев А.Н. Классификация рабочих органов для механической обработки почвы // *3i: intellect, idea, innovation*. 2020. N2. С. 73-81.
 13. Бараев А.И. Почвозащитное земледелие М.: Колос. 1975. 301 с.
 14. Ершов В.Л., Авдеев А.И., Калошин А.А. Адаптация почвозащитных агротехнологий в земледелии лесостепных и степных ландшафтов Западной Сибири // *Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ*. 2017. N2(9).
 15. Blanco-Canqui H., Ruis J. S. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*. 2018. Vol. 326. N15. 164-200.
 16. Peixoto D.S., Moreira de Silva L., Batista de Melo L., et al. Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. *Science of the total environment*. 2020. Vol. 745. 140887.
 17. Schneider F., Don A., Hennings I., et al. The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know? *Soil and tillage research*. 2017. Vol. 174. 193-204.
 18. Дерепаскин А.И., Полищук Ю.В., Куваев А.Н., Токарев И.В. Обоснование технологической схемы и параметров рабочих органов для основной обработки уплотненных почв // *Международная агроинженерия*. 2016. N3. С. 29-37.
 19. Лобачевский Я.П., Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Аспекты цифровизации системы технологий и машин // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N3(36). С. 40-45.
 20. 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.
 21. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И., Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С. Цифровые технологии в почвообработке // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2019. N1(30). С. 191-197.

REFERENCES

1. Khafizov K.A., Khafizov R.N. Energeticheskiy metod optimizatsii osnovnykh parametrov traktora [Energy method for the optimization of tractor main parameters]. *Vestnik Kazanskogo agrarnogo universiteta*. 2015. N1(35). 75-81 (In Russian).
2. Khafizov K.A., Khafizov R.N. Rezul'taty mnogofaktornogo eksperimenta po opredeleniyu zavisimosti maksimal'nogo davleniya koles traktora na pochvu ot parametrov traktora i fiziko-mekhanicheskikh svoystv pochvy. Analiz uravneniy [Results of multivariate experiment to determine the dependence of tractor wheels' maximum pressure on soil on tractor's parameters and soil physical and mechanical properties. Equation analysis]. *Vestnik Kazanskogo agrarnogo universiteta*. 2016. N4(42). 94-98 (In Russian).
3. Cardei P, Matache M.G., Nutescu C. Optimum working conditions for variable width ploughs. *ResearchGate*. 2017. August (In English).
4. Nurmiev A., Khafizov C. Optimization of main parameters of tractor working with soil-processing implement. *Engineering for rural development*. 2018. 161-167 (In English).
5. Kuvaev A., Derpaskin I., Tokarev I. Substantiation of the working width of the tillage implement. *Acta universitatis agriculturae et silviculturae mendellianae brunensis*. 2021. Vol. 69 (In English).
6. Yezekyan T., Benetti M., Armentano G., Trestini S., Sartori L., Marinello F. Definition of Reference Models for Power, Mass, Working Width, and Price for Tillage Implements. *Agriculture*. 2021. Vol. 11 (In English).
7. Sineokov G.N. Proektirovanie pochvoobrabatyvayushchikh mashin [Design of the tillage implement]. Moscow: Mashinostroenie. 1965. 310 (In Russian).
8. Blednykh V.V. Tekhniko-ekonomicheskiy analiz proizvod-

- tel'nosti pakhotnykh agregatov [Technical and economic analysis of the tillage implement efficiency]. *Trudy CHIMESKH*. 1973. N72. 65-84 (In Russian).
9. Rakhimov R.S., Rakhimov I.R., Kasymov F.F., et al. Opredelenie metalloemkosti orudiy pri ikh proektirovanii [Determining the specific metal content when designing tools]. *APK Rossii*. 2015. N74. 110-117 (In Russian).
 10. Derpaskin A.I., Komarov A.P. Obosnovanie skhem raspolozheniya rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh orudiy po kriteriyam metalloemkosti i tyagovomu soprotivleniyu [Justification of schemes of position of the tillage tools of agricultural implements on the criteria of material capacity and traction resistance]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2021. N8. 10-13 (In Russian).
 11. Derpaskin A.I., Polishchuk Yu.V., Dyadyuchenko A.F. Obosnovanie skhemy raspolozheniya rabochikh organov shirokoyakhvatnogo ploskoreza k traktoru tyagovogo klassa 8 po kriteriyam materialoemkosti i tyagovomu soprotivleniyu [The rationale for the layout of working bodies of the wide-reach flat cutter for the tractor of traction class 8 by the criteria of material consumption and rolling resistance]. *Sel'sk Khozyaystvennye tekhnologii*. 2019 N4 (In Russian).
 12. Derpaskin A.I., Kuvaev A.N. Klassifikatsiya rabochikh organov dlya mekhanicheskoy obrabotki pochvy [Classification of working tools for mechanical soil tillage]. *3i: intellect, idea, innovation*. 2020. N2. 73-81 (In Russian).
 13. Baraev A.I. Pochvozashchitnoe zemledelie [Soil protection agriculture]. Moscow: Kolos. 1975. 301 (In Russian).
 14. Ershov V.L., Avdeenko A.I., Kaloshin A.A. Adaptatsiya pochvozashchitnykh agrotekhnologiy v zemledelii lesostepnykh i stepnykh landshaftov Zapadnoy Sibiri [Optimization of Soil Protective Agricultural Technologies in Crop Farming of Forest-Steppe and Steppe Landscapes in Western Siberia]. *Elektronnyy nauchno-metodicheskiy zhurnal Omskogo GAU*. 2017. N2 (In Russian).
 15. Blanco-Canqui H., Ruis J. S. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*. 2018. Vol. 326 (In English).
 16. Peixoto D.S., Moreira de Silvia L., Batista de Melo L., et al. Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. *Science of the total environment*. 2020. Vol. 745 (In English).
 17. Schneider F., Don A., Hennings I., et al. The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know? *Soil and tillage research*. 2017. Vol. 174 (In English).
 18. Derpaskin A.I., Polishchuk Yu.V., Kuvaev A.N., Tokarev I.V. Obosnovanie tekhnologicheskoy skhemy i parametrov rabochikh organov dlya osnovnoy obrabotki uplotnennykh pochv [Rationale technological schemes and parameters of working organs for primary treatment compaction]. *Mezhdunarodnaya agroinzheneriya*. 2016. N3. 29-37 (In Russian).
 19. Lobachevskiy Ya.P., Beylis V.M., Tsench Yu.S. Aspekty tsifrovizatsii sistemy tekhnologiy i mashin [Aspects of digitalization of the system of technologies and machines]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N3(36). 40-45 (In Russian).
 20. 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).
 21. Lobachevskiy Ya.P., Starovoytov S.I., Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S. Tsifrovye tekhnologii v pochvoobrabotke [Digital technologies in tillage]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2019. N1(30). 191-197 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Дерпаскин А.И. – научное руководство, формирование основных направлений исследований.

Куваев А.Н. – изучение состояния вопроса, разработка математических моделей, анализ полученных результатов.

Токарев И.В. – изучение состояния вопроса, проведение расчетов, визуализация.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Derpaskin A.I. – scientific supervision, overall research design.
Kuvaev A.N. – study of the general state of knowledge in the research area, development of mathematical models, analysis and interpretation of the obtained results.

Tokarev I.V. – study of the general state of knowledge in the research area, performing calculations, 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

08.02.2022

03.03.2022

Определение показателей оценки работы средств малой механизации сельскохозяйственного назначения

Махамад Тожалиевич Тошболтаев,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: paytbaev@list.ru;

Зухра Олтибаевна Мурадова,
самостоятельный исследователь

Научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, Ташкентская область, Республика Узбекистан

Реферат. Отметим популярность использования средств малой механизации (СММ) в сельскохозяйственных, транспортных и других работах на мелкоконтурных полях фермерских и крестьянских хозяйств, приусадебных участках и личных подворьях, на холмистых землях и неудобьях, где использование традиционной энергонасыщенной техники невозможно или экономически нецелесообразно. Показали, что СММ наряду с мощной сельхозтехникой редко проходят государственные испытания. Среди причин назвали главную – отсутствие систем показателей для агротехнической, эксплуатационно-технологической, надежности, экономической и эргономической оценки. Подчеркнули актуальность выбора таких систем (множеств, критериев). (*Цель исследования*) Установить показатели оценки качества функционирования СММ путем ранжирования критериев для мощных машин на основе опытов эксплуатации и использования мини-техники в условиях мелких хозяйств Узбекистана. (*Материалы и методы*) В качестве первичных материалов использовали показатели оценки качества работы сельхозтехники, предусмотренные существующими государственными и отраслевыми стандартами. Применили методы системного анализа, логического мышления, монографического наблюдения и теории множеств. (*Результаты и обсуждение*) В ходе ранжирования выбрали множества критериев для агротехнической, эксплуатационно-технологической, надежности, экономической и эргономической оценки СММ. (*Выводы*) Установили, что для общей оценки параметров конструкции, качества технологического процесса и функциональных возможностей опытных образцов СММ целесообразно использовать 26 основных и 14 вспомогательных показателей. Прогнозировали сокращение материальных и трудовых ресурсов в процессе проведения испытаний.

Ключевые слова: средство малой механизации, мини-техника, испытания сельхозтехники, оценка работы средств малой механизации.

Для цитирования: Тошболтаев М.Т., Мурадова З.О. Определение показателей оценки работы средств малой механизации сельскохозяйственного назначения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №1. С. 34-40. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-34-40.

Identifying Performance Assessment Indicators for Agricultural Small-scale Machinery

Makhamad T. Toshboltaev,
Dr.Sc.(Eng.), professor, e-mail: paytbaev@list.ru;

Zukhra O. Muradova,
independent researcher

Research Institute of Agricultural Mechanization, Tashkent Region, Republic of Uzbekistan

Abstract. The use of small-scale machinery proves to be common for agricultural, transportation and other types of work on small-scale farms, peasant farms, family gardens, farmsteads, on hilly lands and inconvenient areas, where the use of traditional powerful machinery is impossible or economically impractical. Small-scale machinery as well as powerful agricultural machinery rarely passes state tests. One of the main reasons for that is a lack of indicator systems for agrotechnical, operational and technological, reliability, economic and ergonomic assessment. The necessity of determining such systems (sets, criteria, indicators) is argued to be important. (*Research purpose*) The research aims to identify performance assessment indicators for agricultural small-scale machinery by capitalizing on the existing indicators for powerful machines and hands-on experience of exploiting mini-machinery in small farms of Uzbekistan. (*Materials and methods*) The primary materials are the performance indicators for the agricultural machinery, provided by the existing state and industry standards. The study uses the methods of system analysis, logical thinking, monographic observation and set theory. (*Results and discussion*) As a result of ranking, several performance

indicator systems were selected for the agrotechnical, operational-technological, reliability, economic and ergonomic assessment of small-scale machinery. (*Conclusions*) It was found out that for the general assessment of the structure parameters, the quality of the technological process and the functionality of small-scale machinery prototypes, it is reasonable to use 26 main and 14 auxiliary indicators. At the same time, a reduction in material and labor resources is expected in the process of testing.

Keywords: small-scale machinery, mini-machinery, agricultural machinery testing, small-scale machinery performance assessment.

For citation: Toshboltaev M.T., Muradova Z.O. Opredelenie pokazateley otsenki raboty sredstv maloy mekhanizatsii sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya [Identifying performance assessment indicators for agricultural small-scale machinery]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N1. 34-40 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-34-40.

Мобильные средства малой механизации (СММ) представлены такими группами машин, как малогабаритные тракторы (мини-тракторы), малогабаритные сельхозмашины (мини-машины), энергоблоки, мотоблоки и мотоорудия (например, мотокультиваторы, моторыхлители, мотофрезы, мотокосилки) [1-3]. Их широко применяют при механизации сельскохозяйственных, транспортных и других работ на мелкоконтурных полях фермерских и крестьянских хозяйств, приусадебных участках и личных подворьях, а также на холмистых землях и неудобьях, где использование традиционной («большой») техники невозможно или экономически нецелесообразно [4-7].

Для удовлетворения спроса на СММ освоено их серийное или мелкосерийное производство в России, Китае, Украине, Беларуси, Грузии, Болгарии, Германии, США, Японии, Италии, Чехии, Польши, Ирана и других странах. Ташкентский завод сельскохозяйственной техники и опытный завод «БМКБ-Агромаш» Узбекистана выпустили опытные партии мини-тракторов ТТЗ-30 (30 л.с.), ВУ-304-2 (40 л.с.) и ТТЗ-2Si38 (38 л.с.), двухкорпусный плуг (ширина захвата 60 см), чизель-культиватор (160 см), бороновальный агрегат (300 см), сеялки для мелко- и крупно-семенных культур (90-280 см), штанговый опрыскиватель (500 см), стеблеизмельчитель (180 см), однобрусную косилку (150-210 см), набор мелиоративных орудий (147-210 см), почвенную фрезу (140-180 см), культиватор-гребнеделатель (140-180 см) и другие мини-машины.

Ученые Узбекского научно-исследовательского института механизации сельского хозяйства выполняют грантовые исследования по созданию шлейфа мини-машин для мотоблока с номинальной мощностью двигателя 12 л.с. Уже разработаны, изготовлены и апробированы в полевых условиях однорядная сеялка для мелкосеменных овощных культур СОМ-1 и картофелесажалка КСМ-1 [8].

Все новые образцы СММ отечественного и зарубежного производства должны проходить государственные (приемочные) и адаптационные испытания на зональных машиноиспытательных станциях [4]. К

сожалению, на практике их или не организуют вообще, или проводят не в полной мере и некачественно. Эти недостатки обусловлены рядом причин.

Во-первых, отсутствуют государственные стандарты, регламентирующие методы испытаний СММ. Поэтому испытатели при оценке агротехнических, энергетических, эксплуатационно-технологических, эргономических, надежности и экономических показателей вынуждены опираться на государственные или отраслевые стандарты, разработанные для «большой» техники.

Во-вторых, мощная техника обладает крупными габаритно-массовыми и энергетическими параметрами, а для СММ важны простота конструкции и обслуживания, малогабаритность, незначительная масса, удобство управления и регулировки рабочих органов, ремонтпригодность, низкие расходы мощности и топлива, небольшая годовая загрузка, доступная цена.

В-третьих, в удаленных от областных центров регионах СММ изготавливают и частные предприниматели, которые обычно не заинтересованы в испытаниях.

В-четвертых, в большинстве машиноиспытательных станций отсутствуют лаборатории или группы по испытанию СММ, соответствующие стенды, измерительные средства и контрольные приборы.

В-пятых, показатели назначения и качества «большой» техники соответствуют повышенным режимам работы: большая ширина захвата (например, зерно- и кормоуборочные комбайны), сравнительно высокие рабочие скорости (5-10 км/ч), глубинная обработка (до 40 см) почвы, повышенная дневная, сезонная и годовая выработка, групповое использование и т.д.

Эти обстоятельства в совокупности требуют уточнения показателей оценки СММ с учетом их конструктивных особенностей и режимов эксплуатации.

Цель исследования – установить показатели оценки качества работы СММ путем анализа результатов использования и эксплуатации опытных образцов в условиях мелких хозяйств Узбекистана.

Материалы и методы. В Республике Узбекистан определенная часть орошаемых полей состоит из мел-

ких контуров до 3 га с длиной гона менее 200 м [9].

Общая длина поворота и разворота большегабаритных машинно-тракторных агрегатов (МТА) на таких мелкоконтурных участках в среднем составляет 40% от суммарно пройденного ими пути по полю. Установлено, что рост холостых ходов МТА снижает сменную производительность на 50-60% и повышает расход горючего на 40-50% [9].

Участки крестьянских хозяйств еще мельче – 0,35-1,00 га [8]. Зачастую они имеют сложную конфигурацию и ограничены зелеными насаждениями, поэтому машинными агрегатами обрабатывается далеко не вся площадь. Значительную часть мелких участков из-за невозможности заезда и разворота МТА обрабатывают вручную, что увеличивает затраты труда и себестоимость конечного продукта.

Устранить эти недостатки возможно только ис-

пользованием на мелкоконтурных полях СММ. Для этого в первую очередь необходимо сформировать рациональные множества показателей для оценки при испытаниях.

Использованы методы системного анализа, логического мышления, монографического наблюдения, анкета-запроса, сопоставления и анализа собранных материалов.

Результаты и обсуждение. Провели ранжирование показателей работы, включенных в нормативные документы Российской Федерации и Узбекистана, для агротехнической, энергетической, эксплуатационно-технологической, эргономической, надежностной и экономической оценки сельскохозяйственной техники (табл. 1-7) [10-14].

Такие показатели, как скорость движения агрегата, ширина захвата, регулировка узлов и другие, описы-

Таблица 1		Table 1		
РАНЖИРОВКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ПО ГОСТ 33736-2016 «ТЕХНИКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ. МАШИНЫ ДЛЯ ГЛУБОКОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ» ДЛЯ МИНИ-ПЛУГА MINI-PLOW ASSESSMENT INDICATORS RANKED AGAINST GOST 33736-2016 “AGRICULTURAL MACHINERY. DEEP TILLAGE MACHINES. TEST METHODS”				
№	Показатели / Indicators	Ранг*/Rank*		
		О	И	В
1	Отклонение глубины вспашки от установленного (y_{11}), см / Ploughing depth deviation from the set one (y_{11}), cm	+		
2	Глубина заделки растительных остатков, см / Plant residue embedment depth, cm			+
3	Содержание фракций почвы размерами менее 50 мм (y_{12}), % / Content of soil fractions smaller than 50 mm (y_{12}), %	+		
4	Гребнистость поверхности пашни, см /Roughness of the arable land surface, cm		+	
*О – основные показатели, наиболее приемлемые при оценке функциональных возможностей СММ; И – исключаемые, которыми можно пренебречь из-за специфичности конструкций; В – вспомогательные, учитываемые или неучитываемые показатели, выбор которых зависит от вероятности их влияния на качество работы и функционирования конкретной модели СММ. *O – the main indicators mostly acceptable when assessing the small-scale machinery functionality; И – excludable, that can be neglected due to the structures specificity; B – secondary, the indicators taken into account or not depending on the likelihood of their impact on the quality of work and the functioning of a particular SMM model.				

Таблица 2		Table 2		
РАНЖИРОВКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ПО ГОСТ 31345-2017 «СЕЯЛКИ ТРАКТОРНЫЕ. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ» ДЛЯ МИНИ-СЕЯЛКИ MINI-PLOW ASSESSMENT INDICATORS RANKED AGAINST GOST 31345-2017 "TRACTOR SEEDERS. TEST METHODS"				
№	Показатели / Indicators	Ранг/Rank		
		О	И	В
1	Заданная норма высева семян / Target seeding rate: мелкосеменных культур (лук, морковь и т.д.), кг/га / small-seeded crops (onions, carrots, etc.), kg/ha крупносеменных культур (кукуруза, арахис и т.д.), тыс. шт./га / large-seeded crops (corn, peanuts, etc.), thousand units/ha			+
2	Допустимые отклонения фактических норм от заданных (y_{11}), % Permissible deviations between the actual and given norms (y_{11}), %	+		
3	Степень повреждения семян (y_{12}), % / Damage degree of seeds (y_{12}), %	+		
4	Глубина заделки семян (y_{13}), см / Seeding depth (y_{13}), cm	+		
5	Отклонение ширины основных междурядий от установочной, см / Width deviation of the main row spacing and the set one, cm			+
6	Глубина заделки удобрений, см / Fertilizers placement depth, cm		+	
7	Почвенная прослойка между семенами и удобрениями, см / Soil layer between seeds and fertilizers, cm		+	
8	Число семян, не заделанных в почву, шт./м ² / The number of seeds not planted in the soil, pcs/m ²			+
9	Высота гребней после прохода сеялки, см / The height of the ridges after the seeder passage, cm		+	
10	Число всходов, шт./м ² / Number of seedlings, pcs/m ²		+	
11	Относительная полевая всхожесть (y_{14}), % / Relative field germination (y_{14}), %	+		
12	Ширина стыковых междурядий, см / Width of butt row spacing, cm		+	
13	Плотность почвы, г/см ³ / Soil density, g/cm ³		+	

Таблица 3

Table 3

РАНЖИРОВКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ПО ГОСТ 24055-88 (СТ СЭВ 5628-86) «ТЕХНИКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ. МЕТОДЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ» ДЛЯ СММ
SMALL-SCALE MACHINERY ASSESSMENT INDICATORS RANKED AGAINST GOST 24055-88 (ST SEV 5628-86)
“AGRICULTURAL MACHINERY. METHODS OF OPERATIONAL AND TECHNOLOGICAL ASSESSMENT”

№	Показатели / Indicators	Ранг/Rank		
		О	И	В
1	Производительность за час основного времени (y_{31}), га/ч / Productivity per main time hour (y_{31}), ha/h	+		
2	Производительность за час сменного времени, га/ч / Productivity per shift time hour, ha/h			+
3	Производительность за час эксплуатационного времени, га/ч / Productivity per operating time hour, ha/h			+
4	Удельный расход топлива (y_{32}), га/ч / Specific fuel consumption (y_{32}), ha/h	+		
5	Число обслуживающего персонала / The number of service personnel		+	
6	Количество и качество продукции (агрозоотехнические показатели или объем выполненной работы) Production quantity and quality of (agro-zootechnical indicators or volume of work performed)		+	

Таблица 4

Table 4

РАНЖИРОВКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ПО О'ZDSr 3197:2017 «ИСПЫТАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ И МЕТОДЫ ИХ ОЦЕНКИ» ДЛЯ СММ
SMALL-SCALE MACHINERY ASSESSMENT INDICATORS RANKED AGAINST O'ZDSr 3197:2017 “TESTING OF AGRICULTURAL MACHINERY. RELIABILITY INDICATORS AND METHODS FOR THEIR EVALUATION”

№	Показатели / Indicators	Ранг/Rank		
		О	И	В
1	Срок службы (y_{41}), моточасы (лет) / Service life (y_{41}), engine hours (years)	+		
2	Гарантийный срок службы (y_{42}), лет / Warranty period (y_{42}), years	+		
3	Гамма-процентный ресурс, моточасов / Gamma percentage resource, engine hours		+	
4	Наработка на отказ (y_{43}), моточасов / Time between failures (y_{43}), engine hours	+		
5	Число отказов I, II, III групп сложности, шт. / The number of failures of I, II, III complexity groups, pcs			+
6	Среднее время восстановления (y_{44}), ч / Average recovery time (y_{44}), h	+		
7	Оперативная трудоемкость ежесменного технического обслуживания, чел.-ч Operational labor intensity of shift maintenance, man-hour		+	
8	Трудоемкость ежесменного технического обслуживания, чел.-ч / Labor intensity of shift maintenance, man-hour			+
9	Удельная суммарная трудоемкость технических обслуживаний, (чел.-ч)/моточас Specific total labor intensity of technical services, (man-hour) / engine hour			+
10	Удельная суммарная трудоемкость технических ремонтов, (чел.-ч)/моточас Specific total labor intensity of technical repairs, (man-hour) / engine hour			+
11	Коэффициент готовности (y_{45}) / Availability factor (y_{45})	+		
12	Коэффициент технического использования / Technical utilization factor			+

Таблица 5

Table 5

РАНЖИРОВКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ПО ГОСТ 34393-2018
«ТЕХНИКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ. МЕТОДЫ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ» ДЛЯ СММ
SMALL-SCALE MACHINERY ASSESSMENT INDICATORS RANKED AGAINST GOST 34393-2018
“AGRICULTURAL MACHINERY. METHODS OF ECONOMIC EVALUATION”

№	Показатели / Indicators	Ранг/Rank		
		О	И	В
1	Снижение потребности в моторном топливе для выполнения годового условного объема i -го вида работы (y_{51}), % Reducing the need for motor fuel to complete the annual equivalent volume of the i -th work type (y_{51}), %	+		
2	Затраты труда на единицу i -го вида работы (y_{52}), чел.-ч/ед. Нарботки Labor costs per unit of the i -th work type (y_{52}), person-hour/unit. Operating time	+		
3	Прямые эксплуатационные затраты денежных средств, приходящиеся на выполнение единицы наработки i -го вида работы, сум/ед. Нарботки Direct operating costs attributable to performing an operating time unit of the i -th work type, sum / unit. Operating time			+
4	Совокупные затраты денежных средств на выполнение единицы наработки i -го вида работы или себестоимость выполнения единицы i -го вида работы (y_{53}), сум/ед. Нарботки The total cost of performing an operating time unit of the i -th work type or the cost of performing an operating time unit of the i -th work type (y_{53}), sum/unit. Operating time	+		
5	Себестоимость годового условного объема i -го вида работы, сум The cost of the annual equivalent volume of the i -th work type, sum		+	
6	Годовая экономия совокупных затрат денежных средств в сравнении с аналогом, сум Annual total cash cost savings in comparison with the analogue, sum			+
7	Снижение себестоимости выполнения i -й работы (y_{54}), % / Reduction in the cost of performing the i -th work (y_{54}), %	+		

Таблица 6		Table 6		
Ранжировка показателей оценки по ГОСТ 12.2.019-76 «СИСТЕМА СТАНДАРТОВ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА. ТРАКТОРЫ И МАШИНЫ САМОХОДНЫЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ» для СММ SMALL-SCALE MACHINERY ASSESSMENT INDICATORS RANKED AGAINST GOST 12.2.019-76 “SYSTEM OF LABOR SAFETY STANDARDS. TRACTORS AND SELF-PROPELLED AGRICULTURAL MACHINES. GENERAL SECURITY REQUIREMENTS”				
№	Показатели / Indicators	Ранг/Rank		
		О	И	В
1	Температура воздуха в кабине (y_{61}), град. / Cab air temperature (y_{61}), deg.	+		
2	Относительная влажность воздуха в кабине (y_{62}), % / Relative degree of humidity in the cab (y_{62}), %	+		
3	Концентрация пыли в кабине (y_{63}), мг/м ³ / Dust concentration in the cab (y_{63}), mg/m ³	+		
4	Степень звукового давления на рабочем месте (y_{64}), дБА / Degree of sound pressure at the workplace (y_{64}), dBA	+		
5	Среднеквадратическое значение вертикального ускорения на сиденье водителя (y_{65}), м/с ² Root mean square (RMS) value of vertical acceleration on the driver's seat (y_{65}), m/s ²	+		
6	Годовая экономия совокупных затрат денежных средств в сравнении с аналогом, сум Annual total cash cost savings in comparison with the analogue, sum	+		

Таблица 7		Table 7		
РАНЖИРОВКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ПО ГОСТ 34631-2019 «ТЕХНИКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ. МЕТОДЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ» для СММ SMALL-SCALE MACHINERY ASSESSMENT INDICATORS RANKED AGAINST GOST 34631-2019 “AGRICULTURAL MACHINERY. ENERGY ASSESSMENT METHODS”				
№	Показатели / Indicators	Ранг/Rank		
		О	И	В
1	Часовой расход топлива (y_{21}), кг/ч Hourly fuel consumption (y_{21}), kg/h	+		
2	Мощность, потребляемая машиной (y_{22}), агрегатом, кВт Power consumption of the machine (y_{22}), unit, kW	+		
3	Удельные энергозатраты машины, МДж/га Specific energy consumption of the machine, MJ/ha		+	
4	Тяговое сопротивление машины (навесной, полунавесной, прицепной, полуприцепной), Н Traction resistance of the machine (mounted, semi-mounted, trailed, semi-trailed), N			+
5	Мощность, затрачиваемая на привод рабочих органов (y_{23}), кВт Power spent on the working body drive (y_{23}), kW	+		

ющие режим работы из-за почти их идентичности для большинства типов СММ, не внесены в таблицы.

СММ применяют на тех же агрофонах и с теми же сельскохозяйственными объектами, для которых предназначена традиционная сельхозтехника. Они должны соответствовать основным агротехническим требованиям, предусмотренным соответствующими государственными или отраслевыми стандартами, техническими заданиями и условиями [15-19].

Например, показатели оценки «большого» плуга лимитированы ГОСТом 33736-2016 (табл. 1). Из четырех показателей для мини-плуга целесообразно считать основными № 3 и 1. Гребнистость поверхности почвы (№ 4) можно исключить – вероятность его образования при неглубокой вспашке очень низкая. Показатель № 2 следует отнести к вспомогательным, так как сорные растения на полях либо есть, либо нет.

Основные агротехнические требования для мини-сеялки (табл. 2): посев семян на заданную глубину (№ 4) с большой полевой всхожестью, наименьшими повреждениями (№ 3) и отклонениями от нормы. Показатели № 6, 7, 9, 10, 12 и 13 исключены по результатам анализа его конструкции и технологического процесса работы. Показатели № 5 и 8 соответствуют рангу В.

В результате ранжировки показателей надежности два показателя исключены: первый – из-за его субъекто-теоретичности, а второй – неприемлемости понятия «сменности» для крестьянских хозяйств (табл. 4). Пять показателей отнесены к «вспомогательным». Пяти критериям присвоен ранг «основной».

Остальные показатели оценки ранжированы на основе вышеприведенных принципов (табл. 3, 5-7).

Итоги ранжирования показали, что из всех 53 показателей агротехнической, энергетической, эксплуатационно-технологической, надежностной, экономической и эргономической оценки 26 отнесены к рангу «основной», 14 – к рангу «вспомогательный», 13 параметров исключены.

Основные показатели оценки работы СММ любого типа в общем еще описываются с помощью множества [9, 20]:

$$Y = \{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6\}, \quad (1)$$

где Y_1 – агротехнические показатели;

Y_2 – энергетические параметры;

Y_3 – эксплуатационно-технологические показатели;

Y_4 – показатели надежности;

Y_5 – экономические показатели;

Y_6 – эргономические показатели.

По имеющимся данным запишем множества агротехнических показателей мини-плуга и мини-сеялки (табл. 1, 2):

$$Y_1 = \{Y_{11}, Y_{12}\}; Y_1 = \{Y_{11}, Y_{12}, Y_{13}, Y_{14}\}. \quad (2)$$

Аналогично определим (табл. 3-7):

$$Y_2 = \{Y_{21}, Y_{22}, Y_{23}\}; \quad (3)$$

$$Y_3 = \{Y_{31}, Y_{32}\}; \quad (4)$$

$$Y_4 = \{Y_{41}, Y_{42}, Y_{43}, Y_{44}, Y_{45}\}; \quad (5)$$

$$Y_5 = \{Y_{51}, Y_{52}, Y_{53}, Y_{54}\}; \quad (6)$$

$$Y_6 = \{Y_{61}, Y_{62}, Y_{63}, Y_{64}, Y_{65}, Y_{66}\}. \quad (7)$$

Выводы. Из всех 53 оценочных показателей крупногабаритной техники, включенных в соответствующие ГОСТ, для испытания функциональных возможностей работы СММ в качестве критериальных достаточно использовать 26. Сокращение числа оценочных параметров наполовину снижает затраты материально-технических и временных ресурсов на государственные и полевые испытания СММ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тошболтаев М., Садиров А. Технологии и технические средства для укрепления кормовой базы аридного животноводства. Ташкент: Fan va texnologiya. 2017. 116 с.
2. Norchaev D.R., Yakubov K.K., Ruziyev I.S., Khusainov B.S., Xayitov A. Energy saving potato-digger machines. *Journal of Hunan University (Natural Science)*. 2021. Vol. 48. Iss. 12. 2105-2111.
3. Khondoker A. Mottaleb, Dil Bahadur Rahut, Akhter Ali, Bruno Gerard and Olaf Erenstein. Enhancing smallholder access to agricultural machinery services: lessons from Bangladesh. *The Journal of Development Studies*. 2017. Vol. 53. N9. 1502-1517.
4. Khondoker A. Mottaleb, Timothy J. Krupnik, Olaf Erenstein. Factors associated with small-scale agricultural machinery adoption in Bangladesh: Census findings. *Journal of Rural Studies*. 2016. Vol. 46. 155-168.
5. Росабоев А., Пардаев О. Совершенствование устройства для отделения семян сельскохозяйственных культур // *Агроилм*. 2018. N5. С. 97.
6. Росабоев А.Т., Эгамназаров Г.Г., Йулдошев О.К., Пардаев О.Р. Устройство для отделения семян сельскохозяйственных культур // *Молодой ученый*. 2016. N 7.2(111.2). С. 70-72.
7. Росабоев А.Т., Пардаев О.Р. Обоснование параметров загрузочного бункера устройства для отделения семенной сои от бобов. *Science and Education*. 2020. N1(1). С. 220-226.
8. Байметов Р., Туланов И. Выбор марки мотоблока для выращивания овощных культур и картофеля на мелких участках фермерских и крестьянских хозяйств // *Агроилм*. 2019. N3. С. 101-102.
9. Тошболтаев М. Научно-методологические принципы повышения степени использования машинно-тракторных агрегатов в сельском хозяйстве Узбекистана: Монография. Ташкент: Наука и технология. 2016. 604 с.
10. Лобачевский Я.П., Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Аспекты цифровизации системы технологий и машин // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N3(36). С. 40-45.
11. Норчаев Ж., Тошболтаев М. Машина для уборки лука-севка // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2016. N3. С. 13-14.
12. Astanakulov K.D., Fozilov G.G., Khatamov B.A. Development harvesting method and machines of grain in condition of Uzbekistan. *Bulletin of the agrarian science of Uzbekistan*. 2018. N3(73). 116-121.
13. Хатамов Б.А. Обоснование параметров початкоотрывочных вальцев кукурузоуборочной машины // *Ирригация и мелиорация*. 2018. N4. 66-69.
14. Astanakulov K.D., Rasulov A.D. Characteristic indicators and sizes of the mash bean seed That are important for cleaning. *Scientific and technical Journal of Namangan institute of engineering and technology*. 2020. Vol. 5. Iss. 3. 112-118.
15. Астанакулов К., Фозилов Г. Исследование сдирания оберток початков кукурузы под действием рабочих органов // *Агроилм*. 2018. N4(54). 93-95.
16. Астанакулов К.Д., Хатамов Б.А. Теоретическое и экспериментальное определение скорости движения кукурузоуборочной машины // *Вестник Туринского политехнического университета в городе Ташкенте*. 2018. N3. С. 81-83.
17. Astanakulov K.D., Khatamov B.A.. Development harvesting method and machines the corn for grain in condition of Uzbekistan. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering end Technology*. 2019. Vol. 6. Iss. 1. 7999-8001.
18. Astanakulov K.D., Rasulov A.D. Determination of Fine Particles in the Cleaning of Mung Bean Grain on a Cylindrical Milling Machine. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering end Technology*. 2020. Vol. 7. Iss. 6. 14240-14242.
19. Rosaboev A.T., Pardaev O.R. Theoretical study of the separation process of soybean seed from bean-pod under influence of rickers. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering end Technology*. 2020. Vol. 7. Iss. 5. 13917-13921.
20. Уланов А.С., Купряшкин В.Ф. Теоретическое исследование устойчивости движения мотоблока с плугом при вспашке почвы // *Нива Поволжья*. 2019. N1(15). С. 101-108.

REFERENCES

1. Toshboltaev M., Sadirov A. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya ukrepleniya kormovoy bazy aridnogo zhivotnovodstva [Technologies and technical means for strengthening the fodder base of arid animal husbandry]. Tashkent: Fan va texnologiya. 2017. 116 (In Russian).
2. Norchaev D.R., Yakubov K.K., Ruziyev I.S., Khusainov B.S., Xayitov A. Energy saving potato-digger machines. *Journal of Hunan University (Natural Science)*. 2021. Vol. 48. Iss. 12. 2105-2111 (In English).
3. Mottaleb K.A., Rahut D.B., Ali A., Gerard B. and Erenstein O. Enhancing smallholder access to agricultural machinery services: lessons from alBangladesh. *The Journal of Develop-*

- ment Studies. 2017. Vol. 53. N9. 1502-1517 (In English).
4. Mottaleb K.A., Krupnik T.J., Erenstein O. Factors associated with small-scale agricultural machinery adoption in Bangladesh: Census findings. *Journal of Rural Studies*. 2016. Vol. 46. 155-168 (In English).
 5. Rosaboev A., Pardaev O. Sovershenstvovanie ustroystva dlya otdeleniya semyan sel'skokhozyaystvennykh kultur [Improving the device for separating seeds of agricultural crops]. *Agroilm*. 2018. N5. 97.
 6. Rosaboev A.T., Egamnazarov G.G., Yuldoshev O.K., Pardaev O.R. Ustroystvo dlya otdeleniya semyan sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Device for separating seeds of agricultural crops]. *Molodoy uchenyy*. 2016. N 7.2(111.2). 70-72.
 7. Rosaboev A.T., Pardaev O.R. Obosnovanie parametrov zagruzochnogo bunkera ustroystva dlya otdeleniya semennoy soi ot bobov [Substantiation of the parameters of the loading hopper of a device for separating seed soybeans from beans]. *Science and Education*. 2020. N1(1). 220-226 (In Russian).
 8. Baimetov R., Tulanov I. Vyborki marki motobloka dlya vyrashchivaniya ovoshchnykh kul'tur i kartofelya na melkikh uchastkakh fermerskikh i krest'yanskikh hozyaystv [Choice of brand of motoblock for growing vegetables and potatoes on small plots of farms and peasant farms]. *Agroilm*. 2019. N3. 101-102 (In Russian).
 9. Toshboltaev M. Nauchno-metodologicheskie printsipy povysheniya stepeni ispol'zovaniya mashinno-traktornykh agregatov v sel'skom hozyaystve Uzbekistana: Monografiya [Scientific and methodological principles of increasing the degree of use of machine-tractor units in agriculture of Uzbekistan: Monograph]. Tashkent: Nauka i tekhnologiya. 2016. 604 (In Russian).
 10. Lobachevskiy Ya.P., Beylis V.M., Tsench Yu.S. Aspekty tsifrovizatsii sistemy tekhnologii i mashin [Aspects of digitalization of the system of technologies and machines]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N3(36). 40-45 (In Russian).
 11. Norchaev Zh., Toshboltaev M. Mashina dlya uborki luka-sevka [Onion set harvester]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo hozyaystva*. 2016. N3. 13-14 (In Russian).
 12. Astanakulov K.D., Fozilov G.G., Khatamov B.A. Development harvesting method and machines of grain in condition of Uzbekistan. *Bulletin of the agrarian science of Uzbekistan*. 2018. N3(73). 116-121 (In English).
 13. Khatamov B.A. Obosnovanie parametrov pochatkootryvochnykh val'tsev kukuruzoubochnoy mashiny [Substantiation of the parameters of the corn-harvesting rollers of the corn harvester]. *Irrigatsiya i melioratsiya*. 2018. N4. 66-69 (In Russian).
 14. Astanakulov K.D., Rasulov A.D.. Characteristic indicators and sizes of the mash bean seed That are important for cleaning. *Scientific and technical Journal of Namangan institute of engineering and technology*. 2020. Vol. 5. Iss. 3. 112-118 (In English).
 15. Astanakulov K., Fozilov G. Issledovanie sdiraniya obertok pochatkov kukuruzy pod deystviem rabochikh organov [Study of peeling off corn cobs under the action of working bodies]. *Agroilm*. 2018. N4(54). 93-95 (In Russian).
 16. Astanakulov K.D., Khatamov B.A. Teoreticheskoe i eksperimental'noe opredelenie skorosti dvizheniya kukuruzoubochnoy mashiny [Theoretical and experimental determination of the speed of the corn harvester]. *Vestnik Turinskogo politekhnicheskogo universiteta v gorode Tashkente*. 2018. N3. 81-83 (In Russian).
 17. Astanakulov K.D., Khatamov B.A.. Development harvesting method and machines the corn for grain in condition of Uzbekistan. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering end Technology*. 2019. Vol. 6. N1. 7999-8001 (In English).
 18. Astanakulov K.D., Rasulov A.D. Determination of Fine Particles in the Cleaning of Mung Bean Grain on a Cylindrical Milling Machine. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering end Technology*. 2020. Vol. 7. N6. 14240-14242 (In English).
 19. Rosaboev A.T., Pardaev O.R. Theoretical study of the separation process of soybean seed from bean-pod under influence of rickers. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering end Technology*. 2020. Vol. 7. N5. 13917-13921 (In English).
 20. Ulanov A.S., Kupryashkin V.F. Teoreticheskoe issledovanie ustoychivosti dvizheniya motobloka s plugom pri vspashke pochvy [Theoretical study of the movement stability of rotary tiller with plow during tillage]. *Niva Povolzh'ya*. 2019. N1(15). 101-108 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Тошболтаев М.Т. – научное руководство, разработка методики исследований, формирование выводов.
 Муродова З.О. – литературный анализ, сбор нормативных документов, ранжирование показателей оценки, оформление материалов.

Авторы одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Toshboltaev M.T. – scientific supervision, research methodology development, formation of conclusions.
 Murodova Z.O. – literature review, collecting reference documents, assessment indicators ranking, manuscript design.
 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

24.01.2022

25.02.2022

Влияние параметров рабочего органа культиватора на качество крошения почвенного пласта

Сергей Иванович Камбулов^{1,2},
доктор технических наук, доцент,
главный научный сотрудник, профессор;
Галина Геннадьевна Пархоменко¹,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник;

Ольга Сергеевна Бабенко²,
ассистент;
Игорь Владимирович Божко¹,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: i.v.bozhko@mail.ru

¹Аграрный научный центр «Донской», г. Зерноград, Российская Федерация;

²Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Реферат. Показали, что почва – особый вид природных ресурсов, который может быть возобновлен при разумном возделывании различными способами обработки. Отметим, что для этого необходимы рабочие органы, отвечающие качественным агротехническим показателям технологического процесса. (*Цель исследования*) Усовершенствовать конструкцию рабочего органа, соответствующего качественным показателям технологического процесса мелкой обработки почвы. (*Материалы и методы*) Определили основные агротехнические показатели рабочего органа культиватора. (*Результаты и обсуждение*) Подтвердили, что разработанные в Аграрном научном центре «Донской» рабочие органы соответствуют агротехническим требованиям, предъявляемым к показателям технологического процесса мелкой обработки почвы по качеству крошения пласта: содержание фракций размером менее 25 миллиметров в обработанном слое почвы по количественному составу составляет 81-92 процента. Выявили, что наиболее высокое качество крошения пласта на глубину мелкой обработки почвы с преобладающим содержанием фракций размером менее 25 миллиметров (в среднем 90-91 процента) стало результатом воздействия рабочего органа с углом заточки стойки 30 градусов. Определили, что при этом возрастает доля эрозионно опасных пылевидных частиц – на 1,3-3,0 процента, что недопустимо по агротехническим требованиям к мелкой обработке почвы. (*Выводы*) Рабочие органы с углом заточки стойки 50 и 70 градусов и углом раствора лапы 94; 104 и 114 градусов соответствуют агротехническим требованиям по всем качественным показателям технологического процесса мелкой обработки почвы и могут быть использованы в качестве противозрозионных в составе комбинированных агрегатов, оборудованных приспособлением для мульчирования поверхностного слоя почвы на стерневых фонах без предварительной обработки.

Ключевые слова: почва, рабочий орган, мелкая обработка почвы, плоскорежущая лапа, качество крошения почвы.

■ Для цитирования: Камбулов С.И., Пархоменко Г.Г., Бабенко О.С., Божко И.В. Влияние параметров рабочего органа культиватора на качество крошения почвенного пласта // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №1. С. 41-46. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-41-46.

Influence of the Cultivator Working Body Parameters on the Soil Crumbling Quality

Sergey I. Kambulov^{1,2},
Dr.Sc.(Eng.), associate professor,
chief researcher, professor;
Galina G. Parkhomenko¹,
Ph.D.(Eng.), leading researcher;

Olga S. Babenko²,
assistant;
Igor V. Bozhko¹,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: i.v.bozhko@mail.ru

¹Agricultural Research Center "Donskoy", Zernograd, Russian Federation;

²Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract. It was shown that soil is a specific type of natural resource that can be renewed when reasonably cultivated by various tillage methods. It requires the availability of working bodies that meet the qualitative agrotechnical indicators of the technological process. (*Research purpose*) To improve the design of the working body meeting the qualitative agrotechnical indicators of the

shallow tillage technological process. (*Materials and methods*) The main agrotechnical indicators of the cultivator's working body were determined. (*Results and discussion*) It was proved that the working bodies developed at the Agrarian Scientific Center "Donskoy" meet the agrotechnical requirements for the indicators of the shallow tillage technological process in terms of the crumbling quality: the content of fractions less than 25 millimeters in size in the treated soil layer is 81-92 percent in terms of quantitative composition. It was found out that the highest quality of seam crumbling during the shallow tillage process with a predominant content of fractions less than 25 millimeters in size (on average 90-91 percent) was made possible with the help of a working body with a 30-degree rack sharpening angle. It was determined that at the same time the share of erosive dust-like particles increased by 1.3-3.0 percent, which is unacceptable due to the agrotechnical requirements for shallow tillage. (*Conclusions*) Working bodies with a rack sharpening angle of 50 and 70 degrees and a paw opening angle of 94, 104 and 114 degrees compile with agrotechnical requirements for all qualitative indicators of the shallow tillage technological process and can be applied as anti-erosion ones when used in the combined units equipped with a device for mulching the surface soil layer on stubble backgrounds without preliminary processing.

Keywords: soil, working body, shallow tillage, flat-cutting paw, quality of soil crumbling.

For citation: Kambulov S.I., Parkhomenko G.G., Babenko O.S., Bozhko I.V. Vliyanie parametrov rabocheho organa kul'tivatora na kachestvo krosheniya pochvennogo plasta [Influence of the cultivator working body parameters on the soil crumbling quality]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N1. 41-46 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-41-46.

Почва – основной природный ресурс для растениеводства, ее необходимо сохранять и защищать [1]. Этот ресурс может быть возобновлен при разумном возделывании различными способами обработки [2, 3].

Одно из почвозащитных мероприятий – снижение переуплотнения и твердости обрабатываемого пласта рабочими органами. Решение этой задачи возможно путем уменьшения массы и оптимизации конструкции рабочих органов [4, 5]. В засушливых условиях необходимо предотвращать непродуктивные потери влаги, в том числе при обработке почвы [6]. Из-за повышенной твердости почвенного слоя корневые системы становятся мелкими, что ускоряет его высыхание и дальнейшее затверждение [7]. Корням еще труднее проникнуть более глубокие слои, где может содержаться влага. Твердость почвы, корневая архитектура и водопоглощение тесно взаимосвязаны и определяют потенциал растений для доступа к почвенным водным бассейнам [8]. Представлен новый способ учета градиентов корневой влаги в засушливых условиях для глинистой почвы [9]. В зависимости от архитектуры корня возникают градиенты влаги в непосредственной близости от них, но что более важно, взаимодействие между прилегающими корнями может сильно влиять на водопоглощение при достаточно разрыхленном пласте, обработанном рабочими органами.

К почвозащитным мероприятиям относится препятствие эрозионным процессам [10-18]. Для этого разрабатывают соответствующие конструкции рабочих органов, отвечающие агротехническим показателям технологического процесса по качеству обработки почвы [19, 20].

Цель исследований – усовершенствовать конструкцию рабочего органа, соответствующего качественным показателям технологического процесса мелкой обработки почвы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Основные агротехнические показатели рабочего определяли, основываясь на СТО АИСТ 4.6-2018, ГОСТ 33736-2016, ГОСТ 33687-2015.

В АНЦ «Донской» разработана конструкция рабочих органов, представляющих плоскорежущие лапы в виде двух лемехов, соединенных с долотом и установленных на вертикальной стойке. Рабочие органы предназначены для культивации почвы на мелкую глубину – 8-16 см. Исследования проводили на двух фонах: дискованной и необработанной стерне озимой пшеницы. Рабочие органы культиватора имели различные углы заточки стойки и раствор плоскорежущей лапы (рис. 1, 2).



Рис. 1. Угол заточки стойки рабочих органов

Fig. 1 A sharpening angle for the working body rack



Рис. 2. Угол раствора лапы

Fig. 2 Paw opening angle

Результаты и обсуждение. Качество крошения пласта представляет собой один из основных агротехнических показателей технологического процесса обработки почвы рабочими органами. Он характеризуется содержанием в обработанном слое фракций определенного размера. При мелкой обработке почвы количество фракций размером менее 25 мм должно составлять не менее 80% (табл. 1).

Содержание фракций размером менее 25 мм в обработанном слое почвы по количественному составу соответствует агротехническим требованиям и составляет 81-92%. При этом изменение скорости агрегата и глубины обработки почвы не оказало существенного влияния на качество крошения пласта рабочими органами. Их можно использовать на любой глубине мелкой обработки почвы (8-16 см) при условии соответствия агротехническим требованиям по другим показателям технологического процесса. При этом следует отдать предпочтение более высокой скорости агрегата как важному условию роста производительности. С увеличением скорости агротехнические показатели рабочих органов не ухудшаются и соответствуют норме, следовательно, они пригодны для высокоскоростных почвообрабатывающих агрегатов.

Данные по рассматриваемым вариантам и повторностям показателя соответствуют требованиям нормативной документации и приведены в виде среднего арифметического с округлением до целого числа (табл. 1). Поскольку при изменении режимов функционирования рабочих органов не наблюдалось существенных различий показателя, было произведено усреднение полученных данных по глубине обработки почвы и по скорости агрегата (табл. 2).

В результате усреднения получили наглядное представление о наиболее высоком качестве крошения (90-91% мелких фракций) рабочим органом с углом заточки стойки 30°. Изменение угла раствора лапы (94; 104 и 114°) не снижает качества обработки.

Следует отметить, что чрезмерно высокая степень измельчения пласта может привести к распылению почвы и эрозионным процессам. Распыление почвы возникает при наличии значительного количества эрозионно опасных пылевидных частиц размером менее 1 мм в верхнем слое (0-5 см) обрабатываемого пласта (табл. 3). В соответствии с агротехническими требованиями после обработки почвы количество таких частиц не должно возрастать. Полностью исключить их не представляется возможным.

Таблица 1

Table 1

СОДЕРЖАНИЕ ФРАКЦИЙ РАЗМЕРОМ МЕНЕЕ 25 мм В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА КУЛЬТИВАТОРА, %
SEAM CRUMBLING QUALITY (THE CONTENT OF FRACTIONS LESS THAN 25 mm IN SIZE) DEPENDING ON THE PARAMETERS AND MODES OF THE CULTIVATOR WORKING BODY FUNCTIONING, %

Фон Background	Параметры рабочего органа Parameters of the working body		Заданная глубина, см / Set depth, cm								
			8			12			16		
	угол раствора лапы, град. paw opening angle, degrees	угол заточки стойки, град. rack sharpening angle, degrees	заданная скорость, км/ч / set speed, km/h								
			6,8	8,2	11,4	6,8	8,2	11,4	6,8	8,2	11,4
Дискованная стерня озимой пшеницы Disc stubble of winter wheat	94	30	89	92	92	90	91	90	92	92	90
		50	85	82	84	85	84	84	83	82	85
		70	82	82	84	82	84	84	83	82	85
	104	30	90	91	92	90	91	91	92	92	90
		50	84	82	84	85	84	84	83	82	83
		70	85	84	84	84	84	84	83	84	85
	114	30	92	92	92	90	91	92	90	92	90
		50	81	82	84	85	84	84	83	85	85
		70	83	82	84	83	84	84	83	83	83
Стерня озимой пшеницы без обработки Winter wheat stubble without processing	94	30	89	89	92	90	91	90	88	92	90
		50	85	82	85	85	84	84	83	83	85
		70	82	82	82	82	84	84	82	82	82
	104	30	91	92	91	90	90	90	92	90	90
		50	85	83	84	85	84	84	83	82	85
		70	81	82	86	85	81	84	86	82	85
	114	30	89	89	90	91	92	92	92	90	90
		50	85	85	84	85	84	84	85	84	85
		70	84	84	83	85	84	84	84	84	83

Таблица 2
Table 2

СОДЕРЖАНИЕ ФРАКЦИЙ РАЗМЕРОМ МЕНЕЕ 25 ММ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ОРГАНА КУЛЬТИВАТОРА, %
SEAM CRUMBLING QUALITY (THE CONTENT OF FRACTIONS LESS THAN 25 MM IN SIZE) DEPENDING ON THE PARAMETERS OF THE CULTIVATOR WORKING BODY, %

Фон / Background	Угол раствора лапы, град. Paw opening angle, degrees	Угол заточки стойки, град. Rack sharpening angle, degrees		
		30	50	70
Дискованная стерня озимой пшеницы Disc stubble of winter wheat	94	91	84	83
	104	91	83	84
	114	91	84	84
Стерня озимой пшеницы без обработки Winter wheat stubble without processing	94	90	84	82
	104	91	84	84
	114	91	85	84

Таблица 3
Table 3

ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЧАСТИЦ РАЗМЕРОМ <1 ММ В ВЕРХНЕМ СЛОЕ (0-5 СМ) ПОСЛЕ ПРОХОДА РАБОЧИХ ОРГАНОВ, %
CHANGE IN THE CONTENT OF EROSION-HAZARDOUS DUST PARTICLES LESS THAN 1 MM IN SIZE IN THE UPPER LAYER (0-5 CM) AFTER THE PASSAGE OF THE WORKING BODIES, %

Фон / Background	Угол раствора лапы, град. Paw opening angle, degrees	Угол заточки стойки, град. Rack sharpening angle, degrees		
		30	50	70
Дискованная стерня озимой пшеницы (содержание частиц <1 мм – до обработки – 23,8%) Disc stubble of winter wheat (particle content <1 mm – before processing – 23,8%)	94	25,1-26,9	23,8	19,8-20,3
	104	25,1-26,8	23,8	20,8-21,2
	114	26,5-26,7	23,8	19,7-21,4
Стерня озимой пшеницы без обработки (содержание частиц <1 мм – до обработки – 12,6%) Winter wheat stubble without processing (particle content <1 mm – before processing – 12,6%)	94	12,6	12,6	9,8-10,1
	104	12,6	12,6	9,3-10,0
	114	12,6	12,6	9,4-10,0

После прохода рабочих органов количество эрозионно опасных частиц в поверхностном слое почвы изменилось: на дискованной стерне – с 23,8 до 19,7-26,9%; на стерне без обработки – с 12,6 до 9,3-12,9%. Вариативность зависела от углов заточки стойки и раствора лапы. В случае когда стойка заточена на 70°, содержание мелких частиц в верхнем слое (0-5 см) уменьшилось на 2,4-4,0 процентных пункта. Заострение этого угла до 30° повышает данный показатель на 1,3-3,0 п.п., что недопустимо по агротехническим требованиям к мелкой обработке почвы.

В целом рабочие органы соответствуют агротехническим требованиям к мелкой обработке почвы:

- по равномерности глубины обработки: среднеквадратическое отклонение составило $\pm 0,39-2,00$ см от заданной при требуемом не более 2 см;
- по качеству крошения: 81-92% фракций размером <25 мм при требуемом значении не менее 80%;
- по гребнистости: высота гребней и глубина борозд – 3,6-4,0 см при требуемой не более 4 см;
- по сохранению влаги внутри пласта: после прохода рабочих органов вынос влажных слоев на поверхность почвы не наблюдался;
- по качеству подрезания сорных растений: полное при требуемом не менее 100%;
- по количеству эрозионно опасных частиц в верхнем слое почвы: оно не увеличивается при угле заточки стойки 50 и 70°.

Следует отметить несоответствие агротехническим требованиям по количеству эрозионно опасных частиц в верхнем слое почвы вариантов рабочего органа с углом заточки стойки 30°. Он показал наилучшее качество крошения пласта, но при этом распылял почву, что недопустимо.

Возможно использование рабочих органов с углом заточки стойки 50 и 70° и углом раствора лапы 94; 104 и 114° в качестве противоэрозионных в составе комбинированных агрегатов, оборудованных приспособлением для мульчирования поверхностного слоя почвы на стерневых фонах без предварительной обработки.

Выводы. Разработанные в АНЦ «Донской» рабочие органы соответствуют агротехническим требованиям, предъявляемым к показателям технологического процесса мелкой обработки почвы по качеству крошения пласта: содержание фракций размером <25 мм в обработанном слое составляет 81-92%.

Рабочие органы с углом заточки стойки 50 и 70° и углом раствора лапы 94; 104 и 114° соответствуют агротехническим требованиям по всем качественным показателями технологического процесса мелкой обработки почвы и могут быть использованы в качестве противоэрозионных в составе комбинированных агрегатов, оборудованных приспособлением для мульчирования поверхностного слоя почвы на стерневых фонах без предварительной обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sándor Zs., Tállai M., Kincses I., László Z., Kátai J., Vágó I. Effect of various soil cultivation methods on some microbial soil properties. *DRC Sustainable Future*. 2020. 1(1). 14-20.
2. Василенко В.В., Василенко С.В., Борзило В.С. Зона рыхления почвы культиваторной лапой // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N4. 48-52.
3. Абдулхаев Х.Г., Халилов М.М. Обоснование параметров ножей выравнивателя-рыхлителя // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N3. С. 44-47.
4. Bluett C., Tullberg J.N., McPhee J.E., Antille D.L. Soil and Tillage Research: Why still focus on soil compaction? *Soil and Tillage Research*. 2019. 194. 104282.
5. Пархоменко Г.Г., Пархоменко С.Г. Снижение уплотнения почвы при производстве зерна // *Хранение и переработка зерна*. 2017. N2(210). С. 20-24.
6. Савельев Ю.А., Кухарев О.Н., Ларюшин Н.П., Ишкин П.А., Добрынин Ю.М. Снижение потерь почвенной влаги на испарение // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N1. С. 42-47.
7. Colombiabc T., Torresd L.C., Walterc A., Keller T. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – a vicious circle. *Science of The Total Environment*. 2018. 626(1). 1026-1035.
8. Niu G., Shao. L.-T., Sun D.A., Guo X. A simplified directly determination of soil-water retention curve from pore size distribution. *Geomechanics and Engineering*. 2020. 20(5). 411-420.
9. Couvreur V., Vanderborght J., Draye X., Javaux M. Dynamic aspects of soil water availability for isohydric plants: Focus on root hydraulic resistances. *Water Resources Research*. 2014. 50(11). 8891-8906.
10. Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., Meusburger K., Modugno S., Schütt V., Ferro V., Bagarello V., Oost K.V., Montanarella L., Panagos P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature communications*. 2013. 8.
11. Пархоменко Г.Г., Пархоменко С.Г. Экологически безопасная эксплуатация технических средств в условиях физической деградации почвы // *Технический сервис машин*. 2019. N2(135). С. 40-46.
12. Amundson R., Berhe A.A., Hopmans J.W., Olson C., Szein A.E., Sparks D.L. Soil and human security in the 21st century. *Soil science*. 2015. 348. 6235.
13. Boardman J. Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *Catena*. 2006. 68. 73-86.
14. Lugato E., Paustian K., Panagos P., Jones A., Borrelli P. Quantifying the erosion effect on current carbon budget of European agricultural soils at high spatial resolution. *Global Change Biology*. 2016. 22. 1976-1984.
15. Panagos P., Borrelli P., Poesen J., Ballabio C., Lugato E., Meusburger K., Montanarella L., Alewell C. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*. 2015. 54. 438-447.
16. Borrelli P., Paustian K., Panagos P., Jones A., Schütt B., Lugato E. Effect of Good Agricultural and Environmental Conditions on erosion and soil organic carbon balance: A national case study. *Land Use Policy*. 2016. 50. 408-421.
17. Kutra I., Gross A., Swet N., Tanner S., Krasnov H., Angert A. Substantial dust loss of bioavailable phosphorus from agricultural soils. *Scientific reports*. 2016. 6. 24736.
18. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Alewell C., Lugato E., Montanarella L. Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy*. 2015. 48. 38-50.
19. Chappell A., Webb N.P. Using albedo to reform wind erosion modelling, mapping and Monitoring. *Aeolian Research*. 2016. 23. 63-78.
20. 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. Sándor Zs.; Tállai M.; Kincses I.; László Z.; Kátai J.; Vágó I. Effect of various soil cultivation methods on some microbial soil properties. *DRC Sustainable Future*. 2020. 1(1). 14-20 (In English).
2. Vasilenko V.V., Vasilenko S.V., Borzilo V.S. Zona rykhleniya pochvy kul'tivatornoy lapoy [Zone of soil loosening with cultivator sweeps]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. 12(4). 48-52 (In Russian).
3. Abdulkhaev K.G., Khalilov M.M. Obosnovanie parametrov nozhey vyravnivatelya-rykhlytelya [Determining the parameters of leveler-ripper shanks]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. 13(3). 44-47 (In Russian).
4. Bluett C., Tullberg J.N., McPhee J.E., Antille D.L. Soil and Tillage Research: Why still focus on soil compaction? *Soil and Tillage Research*. 2019. 194. 104282 (In English).
5. Parkhomenko G.G., Parkhomenko S.G. Snizhenie uplotneniya pochvy pri proizvodstve zerna [Reduced soil compaction in the production of grain]. *Khranenie i pererabotka zerna*. 2017. N2(210). 20-24 (In Russian).
6. Savel'ev Yu.A., Kukharev O.N., Laryushin N.P., Ishkin P.A., Dobrynin Yu.M. Snizhenie poter' pochvennoy vlagi na isparenie [Soil moisture loss reduction owing to evaporation]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. 12(1). 42-47 (In Russian).
7. Colombiabc T., Torresd L.C., Walterc A., Keller T. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – a vicious circle. *Science of the Total Environment*. 2018. 626(1). 1026-1035 (In English).
8. Niu G., Shao L.-T., Sun D.A., Guo X. A simplified directly

- determination of soil-water retention curve from pore size distribution. *Geomechanics and Engineering*. 2020. 20(5). 411-420 (In English).
9. Couvreur V., Vanderborght J., Draye X., Javaux M. Dynamic aspects of soil water availability for isohydric plants: Focus on root hydraulic resistances. *Water Resources Research*. 2014. 50(11). 8891-8906 (In English).
 10. Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., Meusburger K., Modugno S., Schütt V., Ferro V., Bagarello V., Oost K.V., Montanarella L., Panagos P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature communications*. 2013. 8 (In English).
 11. Parkhomenko G.G., Parkhomenko S.G. Ekologicheski bezopasnaya ekspluatatsiya tekhnicheskikh sredstv v usloviyakh fizicheskoy degradatsii pochvy [Environmentally safe operation of technical equipment under conditions of physical soil degradation]. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2019. 2(135). 40-46 (In Russian).
 12. Amundson R., Berhe A.A., Hopmans J.W., Olson C., Sztein A.E., Sparks D.L. Soil and human security in the 21st century. *Soil science*. 2015. 348. 6235 (In English).
 13. Boardman J. Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *Catena*. 2006. 68. 73-86 (In English).
 14. Lugato, E., Paustian, K., Panagos, P., Jones, A., Borrelli, P. Quantifying the erosion effect on current carbon budget of European agricultural soils at high spatial resolution. *Global Change Biology*. 2016. 22. 1976-1984 (In English).
 15. Panagos P., Borrelli P., Poesen J., Ballabio C., Lugato E., Meusburger K., Montanarella L., Alewell C. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*. 2015. 54. 438-447 (In English).
 16. Borrelli P., Paustian K., Panagos P., Jones A., Schütt B., Lugato E. Effect of Good Agricultural and Environmental Conditions on erosion and soil organic carbon balance: A national case study. *Land Use Policy*. 2016. 50:408-421 (In English).
 17. Katra I., Gross A., Swet N., Tanner S., Krasnov H., Angert A. Substantial dust loss of bioavailable phosphorus from agricultural soils. *Scientific reports*. 2016. 6. 24736 (In English).
 18. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Alewell C., Lugato E., Montanarella L. Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy*. 2015. 48. 38-50 (In English).
 19. Chappell A., Webb N.P. Using albedo to reform wind erosion modelling, mapping and Monitoring. *Aeolian Research*. 2016. 23. 63-78 (In English).
 20. 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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Камбулов С.И. – научное руководство, постановка задачи, критический анализ и доработка решения.
 Пархоменко Г.Г. – определение методологии исследования, сбор и анализ аналитических и практических материалов по теме исследования, формирование общих выводов, критический анализ и доработка решения.
 Бабенко О.С. – проведение экспериментальных исследований, обработка результатов исследований.
 Божко И.В. – анализ научных источников по теме исследования, обработка результатов исследований, анализ и доработка текста.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Kambulov S.I. – scientific guidance, problem statement, critical analysis and finalizing the solution.
 Parkhomenko G.G. – research methodology development, data collection and analysis, drawing general conclusions, critical analysis and finalizing the solution.
 Babenko O.S. – experimental research, research results processing.
 Bozhko I.V. – analysis of scientific sources on the research topic, research results processing, manuscript analysis and revision.
 The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
 Статья принята к публикации

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

03.02.2022
 10.03.2022

Плужный корпус для прецизионной обработки почвы

Сергей Иванович Старовойтов¹,
доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: starovoitov.si@mail.ru;

Александр Михайлович Гринь²,
доцент,
e-mail: grin-970@mail.ru

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

²Брянский Государственный аграрный университет, Брянская область, Российская Федерация

Реферат. Показали, что оборот пласта в пределах борозды – важное условие прецизионной обработки почвы. Выявили возможность создать шлейф комбинированных машин, способных за один проход готовить почву к посеву или посадке. Отметили, что цилиндрический плужный корпус при действии сил инерции способен удерживать на своей поверхности пласт с дерниной и без нее. В предварительных испытаниях этого рабочего органа выявили нарушения беспрепятственного прохождения почвенного пласта. Предположили, что повысить технологическую надежность плужного корпуса можно, если разместить на направляющей доске крыло, которое создаст дополнительный закручивающий эффект. (*Цель исследования*) Обосновать длину крыла плужного корпуса и угол его установки ко дну борозды. (*Материалы и методы*) На основе законов теоретической механики составили дифференциальное уравнение вращения сегмента почвенного пласта, где почва как объект обработки характеризуется коэффициентами динамической вязкости, трения скольжения, а также плотностью. (*Результаты и обсуждение*) Определили, что величина обозначенных коэффициентов зависит от абсолютной влажности обрабатываемого пласта. К основным критериям, влияющим на оборот пласта, отнесли абсолютную влажность почвы, скорость движения плужного корпуса, длину крыла отвала, угол установки крыла, толщину взаимодействующего пограничного слоя деформируемого сечения. В результате моделирования установили, что определяющее влияние на угол поворота сегмента почвенного пласта оказывают скорость движения плужного корпуса и угол установки крыла отвала. (*Выводы*) Угол поворота сегмента почвенного пласта, равный 90 градусам, достигим, если длина крыла отвала составляет 0,1 метра, а угол его установки равен 23 градусам.

Ключевые слова: почвенный сегмент, обработка почвы, плужный корпус, оборот почвенного пласта, коэффициент динамической вязкости, коэффициент трения скольжения.

Для цитирования: Старовойтов С.И., Гринь А.М. Плужный корпус для прецизионной обработки почвы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №1. С. 47-52. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-47-52.

Working Tool for Precision Tillage

Sergey I. Starovoytov¹,
Dr.Sc.(Eng.), leading researcher,
e-mail: starovoitov.si@mail.ru;

Alexander M. Grin²,
associate professor,
e-mail: grin-970@mail.ru

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

²Bryansk State Agrarian University, Bryansk Region, Russian Federation

Abstract. It was shown that the soil formation turnover within the furrow is an important condition for precision tillage. The authors identified the possibility of creating a train of combined machines capable of preparing the soil for sowing or planting in one pass. It was noted that due to inertia forces, the cylindrical plow body is able to hold a layer with and without turf. The preliminary tests of this working body revealed some barriers to the unhindered passage of the soil layer. It was assumed that it is possible to increase the technological reliability of the plow body by placing a wing on the guide board, which operation will create an additional twisting effect. (*Research purpose*) To substantiate the length of the plow body wing and its angle to the bottom of the furrow. (*Materials and methods*) Based on the laws of theoretical mechanics, a differential equation for the soil layer segment rotation was obtained, where the soil, as a tillage object, is presented by the coefficients of dynamic viscosity, sliding friction, and density. (*Results and discussion*) It was determined that the value of the dynamic viscosity coefficient and sliding friction depend

on the absolute moisture content of the formation being treated. The main criteria influencing the soil formation turnover included the absolute soil moisture content, the plow body speed, the dump wing length, the angle of the wing installation, the thickness of the interacting boundary layer of the deformable section. As a result of the simulation, it was found out that the angle of the soil layer segment rotation predominantly depends on the plow body speed and the angle of the dump wing installation. (*Conclusions*) A 90-degree angle of the soil layer segment rotation can be achieved if the dump wing length is 0.1 meter, and the angle of its installation is 23 degrees.

Keywords: soil segment, tillage, plow body, soil formation turnover, dynamic viscosity coefficient, sliding friction coefficient.

For citation: Starovoytov S.I., Grin' A.M. Pluzhnyy korpus dlya pretsizionnoy obrabotki pochvy [Working tool for precision tillage]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N1. 47-52 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-47-52.

Основная и предпосевная обработка почвы считаются важнейшими составляющими в системе машин для комплексной механизации сельского хозяйства [1, 2]. Сельскохозяйственное производство потребляет значительное количество энергии, до 80% которой расходуется в растениеводстве при выполнении работ, связанных с обработкой почвы [3-5].

Техническую модернизацию агропромышленного комплекса следует проводить с учетом современных достижений науки и технического прогресса, направленных на энерго- и ресурсосбережение [6].

В последние годы во многих регионах нашей страны ученые ведут активные исследования по определению возможности сокращения интенсивности основной обработки почвы [7-9].

В качестве универсального технического средства для борьбы с трудновыводимыми сорняками плуг до сих пор остается постоянно востребованным инструментом для обработки почвы [10]. По прогнозам мировой сельскохозяйственной науки, отвальная вспашка еще на долгие годы останется преобладающим способом обработки в почвенно климатических зонах с выпадением осадков более 500 мм в год [11].

На качество агротехнических показателей, таких как крошение и оборот почвенного пласта, заделка растительных остатков, влияют геометрические параметры, заложенные в конструкции рабочих органов, осуществляющих подрезание и перенос почвенного пласта по рабочей поверхности плужного корпуса [12].

Известны рабочие органы, которые в процессе вспашки укладывают пласт на сторону или в собственную борозду (*Пат. РФ 188560 А01В 49/02, 2019*) [13-15]. Гладкая вспашка, при которой пласт укладывается в свою борозду, способствует образованию поверхности без свальных гребней и развальных борозд [16-17].

Первым известным орудием для гладкой вспашки был конный плуг. Функцию отвала выполнял кожух в виде вырезной цилиндрической трубы. Передняя часть трубы имела горизонтальную режущую кромку, а верхняя – развитое крыло, перпендикуляр-

ное движущемуся почвенному потоку. К днищу под углом прикреплена полоса, которая должна давить на боковую грань пласта, заставляя его двигаться по трубе и укладываться обернутым в собственную борозду.

В 1962 г. в США предложен однопластовый тракторный плуг. Его рабочий орган выполнен в виде скрученного на 180° коробчатого лотка с двумя криволинейными стенками и днищем. Через отверстия в боковинах предусматривалось подавать сжатый воздух для уменьшения сил трения.

Первый работоспособный плуг, осуществляющий оборот пласта в собственной борозде, изготовлен в 1972 г. фирмой «Аллис Чалмерс». Этот симметричный фронтальный рабочий орган спроектировали американские инженеры Л. Кауфман и Д. Тоттен [18].

Однако существующие конструкции фронтальных (полнооборотных плугов) энергоемки и не обеспечивают беспрепятственное прохождение почвы через рабочие органы, поскольку оборот пласта происходит при его перемещении по дну борозды в условиях повышенного трения [19].

Известен полнооборотный модульный плуг Андриксона А.Н., содержащий лемешно-отвальную поверхность и направляющую доску (*Пат. РФ № 2683234, МПК А01В 15/08, 2018*). К недостаткам устройства можно отнести большую энергоемкость процесса.

Позднее создан рабочий орган в виде усеченного цилиндрического отвала, снабженный направляющей доской переменного сечения. Она связывает крайнюю левую точку горизонтального диаметра передней части и нижнюю точку бороздного обреза цилиндрического отвала, жестко закрепленного на отвале (*Пат. РФ № 2714243 МПК А01В 49/00, 2020*). Предварительные испытания выявили нарушения беспрепятственного прохождения почвенного пласта.

Повысить технологическую надежность плужного корпуса можно путем дополнительного размещения на направляющей доске крыла, которое создает дополнительный закручивающий эффект (*рис. 1*).

Усеченный цилиндрический отвал расположен под углом 3-4° ко дну борозды.

В процессе вспашки передняя часть цилиндриче-

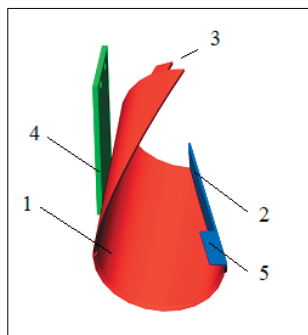


Рис. 1. Схема рабочего органа для прецизионной обработки почвы: 1 – усеченный цилиндрический отвал; 2 – направляющая доска; 3 – сталкиватель; 4 – стойка; 5 – крыло

Fig. 1. Scheme of the working body for precision tillage: 1 – truncated cylindrical dump; 2 – guide board; 3 – pusher; 4 – rack; 5 – wing

ского отвала отрезает пласт почвы в форме полукруга. Крыло дополнительно закручивает его. Далее пласт движется по внутренней поверхности цилиндрического отвала, а перемещения пласта по почве исключены. Тем самым можно снизить силы трения при обработке, повысить скорость движения, уменьшить энергоёмкость.

Контакт пласта почвы с направляющей переменной сечения цилиндрического отвала обеспечит его оборот против часовой стрелки. Энергоёмкость оборота пласта с сечением в виде полукруга меньше, чем при прямоугольном сечении. Пласт практически не поднимается над дном борозды. На момент окончания взаимодействия с цилиндрическим отвалом пласт принимает вертикальное положение и под действием сталкивателя укладывается в свою борозду.

Цель исследования – обоснование длины крыла и угла его установки ко дну борозды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Рассмотрим дифференциальное уравнение вращения сегмента почвенного пласта (Пат. РФ №2757937 МПК A01B15/08, 2021):

$$I \cdot \ddot{\phi} + M_{\text{вс}} \cdot \dot{\phi} + M_t \cdot \phi = A_{\text{внеш}}, \quad (1)$$

где I – момент инерции сегмента почвенного пласта, кг·м²;

$\ddot{\phi}$ – угловое ускорение сегмента почвенного пласта, с⁻²;

$M_{\text{вс}}$ – момент сил вязкостного сопротивления, Н·м·с;

$\dot{\phi}$ – угловая скорость вращения сегмента почвенного пласта, с⁻¹;

M_t – момент сил трения почвы, Н·м;

ϕ – угол поворота сегмента почвенного пласта, рад;

$A_{\text{внеш}}$ – работа внешних сил, Дж.

Момент инерции сегмента почвенного пласта равен:

$$I = \frac{m d^2}{16}, \quad (2)$$

где m – масса почвенного сегмента, кг;

d – длина хорды сегмента, м.

Выразим момент сил вязкостного сопротивления:

$$M_{\text{вс}} = \eta \cdot F \cdot t_{\text{пс}}, \quad (3)$$

где η – коэффициент динамической вязкости, Па·с;
 F – площадь сечения сегмента почвенного пласта, м²;

$t_{\text{пс}}$ – толщина деформируемого слоя почвенного сегмента, м.

Момент сил трения почвы о поверхность плужного корпуса находим по формуле:

$$M_t = g \cdot \frac{\pi \cdot d^3}{16} \cdot l_k \cdot \rho \cdot f, \quad (4)$$

где l_k – длина крыла плужного корпуса, м;

ρ – плотность почвы, кг/м³;

f – коэффициент трения скольжения почвенного пласта о крыло отвала.

Работа внешних сил равна:

$$A_{\text{внеш}} = \frac{\pi r^2}{2} \cdot l_k \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \sin \alpha, \quad (5)$$

где r – радиус сегмента почвенного пласта, м;

v – скорость движения плужного корпуса, м/с.

α – угол наклона крыла плужного корпуса, рад.

Таким образом, угол закручивания почвенного сегмента будет определяться из следующего выражения:

$$\phi = \frac{\omega_0 \cdot M_t + A_{\text{внеш}} \cdot k_1}{k_1 \cdot M_t \cdot \left(\frac{k_2}{k_1} - 1 \right)} \cdot (e^{k_2 \cdot t} - e^{k_1 \cdot t}) + \frac{A_{\text{внеш}}}{M_t}, \quad (6)$$

где k_1, k_2 – корни квадратного уравнения;

ω_0 – начальная угловая скорость вращения почвенного сегмента, рад/с;

Найдем корни квадратного уравнения:

$$k_1 = -n + \sqrt{n^2 - \omega^2}; \quad k_2 = -n - \sqrt{n^2 - \omega^2},$$

где n – коэффициент, учитывающий отношение момента сил вязкостного сопротивления и момента инерции сегмента почвенного пласта, с⁻¹;

ω – коэффициент, учитывающий отношение момента сил трения и момента инерции сегмента почвенного пласта, с⁻¹.

В свою очередь:

$$n = \frac{M_{\text{вс}}}{2 \cdot I}, \quad (7)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{M_t}{I}}. \quad (8)$$

Угловая скорость вращения сегмента почвенного пласта будет равна:

$$\dot{\phi} = \frac{\omega_0 \cdot M_t + A_{\text{внеш}} \cdot k_1}{k_1 \cdot M_t \cdot \left(\frac{k_2}{k_1} - 1 \right)} \cdot (k_2 \cdot e^{k_2 \cdot t} - k_1 \cdot e^{k_1 \cdot t}). \quad (9)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. К основным критериям, влияющим на оборот пласта, можно отнести:

- абсолютную влажность почвы;

- скорость движения плужного корпуса;
- длину крыла отвала;
- угол установки крыла;
- толщину взаимодействующего пограничного слоя деформируемого сечения.

Первоначально рассмотрим влияние скорости движения плужного корпуса на угол оборота пласта при следующих начальных условиях: $\omega = 20\%$, $l_k = 0,2$ м, $\alpha = 13^\circ$, $t_{nc} = 0,001$ м (рис. 2).

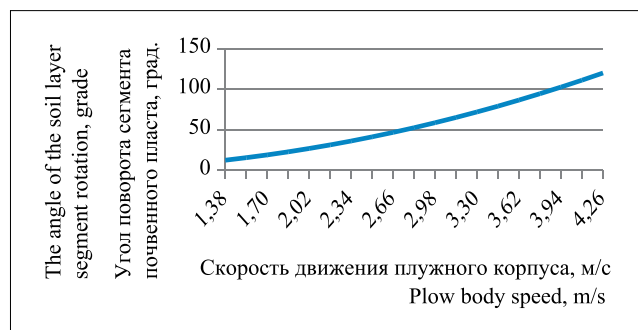


Рис. 2. Зависимость угла поворота сегмента почвенного пласта от скорости движения плужного корпуса

Fig. 2. The dependence of the angle of the soil layer segment rotation on the plow body speed

Отмечается тенденция увеличения угла поворота сегмента почвенного пласта при повышении скорости движения плужного корпуса. Тем не менее с учетом представленных выше начальных условий угол поворота в 90° будет достигнут только при скорости движения 3,78 м/с.

Определим зависимость угла поворота сегмента почвенного пласта от угла поворота крыла отвала при следующих начальных условиях: $\omega = 20\%$, $l_k = 0,2$ м, $v = 2,7$ м/с, $t_{nc} = 0,001$ м (рис. 3).

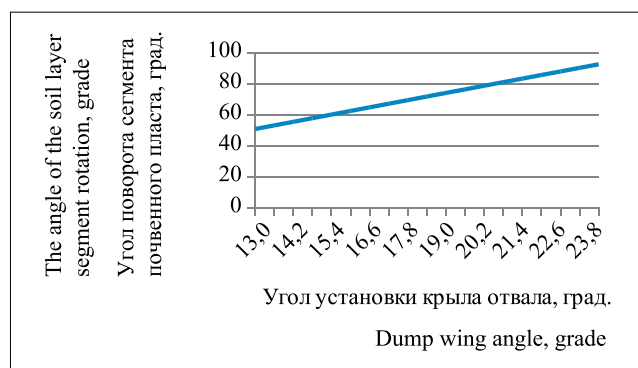


Рис. 3. Зависимость угла поворота сегмента почвенного пласта от угла поворота крыла отвала

Fig. 3. The dependence of the angle of the soil layer segment rotation on the angle of the dump wing rotation

Чем шире угол установки крыла отвала, тем больше угол поворота сегмента почвенного пласта, который составит 90° , если первый показатель равен $23,2^\circ$.

Выявили нелинейную зависимость угла поворота

сегмента почвенного пласта от абсолютной влажности суглинистой почвы (рис. 4).

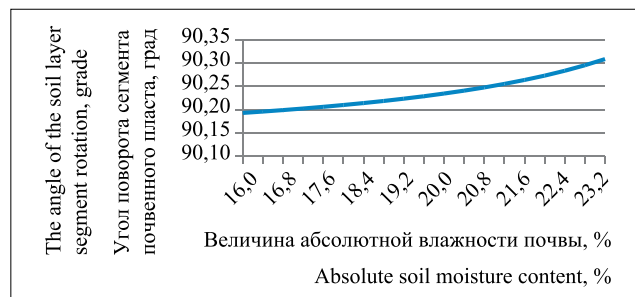


Рис. 4. Зависимость угла поворота сегмента почвенного пласта от абсолютной влажности суглинистой почвы

Fig. 4. The dependence of the angle of the soil layer segment rotation on the absolute loamy soil moisture content

Точки экстремума отсутствуют. Изменение абсолютной влажности в интервале от 16 до 23% увеличивает угол поворота всего лишь на $0,1^\circ$. Таким образом, можно признать незначительным влияние величины абсолютной влажности на угол поворота почвенного сегмента.

Зависимость угла поворота сегмента почвенного пласта от длины крыла плужного корпуса имеет прямо пропорциональный характер без точек экстремума (рис. 5). Чем длиннее крыло отвала, тем шире угол поворота сегмента почвенного пласта. В то же время изменение длины крыла от 0,10 до 0,28 м вызывает увеличение угла поворота всего лишь на $0,12^\circ$, что можно признать незначительным.



Рис. 5. Зависимость угла поворота сегмента почвенного пласта от длины крыла плужного корпуса

Fig. 5. The dependence of the angle of the soil layer segment rotation on the plow body wing length

Угол поворота сегмента почвенного пласта нелинейно зависит от толщины деформируемого слоя почвенного сегмента (рис. 6).

Причем в интервале толщины слоя от 0,001 до 0,0125 угол поворота уменьшается прямо пропорционально, а в интервале 0,0125-0,2080 он остается практически постоянным и составляет $90,11^\circ$. В целом можно сказать, что толщина почвенного сегмента не влия-

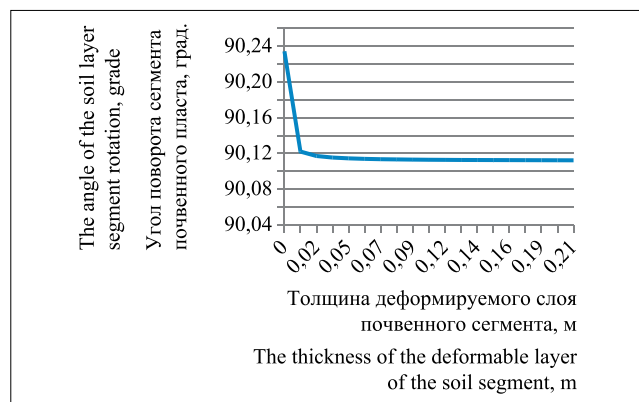


Рис. 6. Зависимость угла поворота сегмента почвенного пласта от толщины деформируемого слоя почвенного сегмента
Fig. 6. The dependence of the angle of the soil layer segment rotation on the thickness of the deformable layer of the soil segment

яет на его угол поворота.

Таким образом, определяющее воздействие на угол поворота сегмента почвенного пласта оказывают скорость движения и угол установки крыла отвала. При скорости движения 2,77 м/с угол поворота крыла отвала должен составлять 23,2°.

Выводы. Получили выражение для определения угла закручивания почвенного сегмента, образовавшегося при воздействии цилиндрического плужного корпуса, где почва как объект обработки выражена через коэффициенты динамической вязкости, трения скольжения, а также плотность. Угол поворота сегмента почвенного пласта, равный 90°, достигим при угле установки крыла отвала 23° и длине 0,1 м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С., Бейлис В.М. Создание и развитие машин и технологий для комплексной механизации технологических процессов в растениеводстве // *История науки и техники*. 2019. N12. С. 47-54.
- Сизов И.В., Блинов Ф.Л., Морозов П.В. Использование комбинированных рабочих органов и агрегатов при возделывании льна-долгунца // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N3. С. 35-39.
- Ляхов А.П., Кошля Г.И. К определению энергоемкости механизированных тракторных работ // *Агропанорама*. 2017. N4. С. 20-22.
- Лобачевский Я.П., Комогорцев В.Ф., Старовойтов С.И., Храмовский К.А. Анализ тягового сопротивления элементов цилиндрического плужного корпуса // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. Т. 10. N2. С. 11-15.
- Алдошин Н.В., Маматов Ф.М., Исмаилов Н.И. Средства механизации для обработки почвы в бахчеводстве // *Техника и оборудование для села*. 2021. N2. С. 12-15.
- Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Мазитов Н.К. Почвообрабатывающая техника: пути импортозамещения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. Т. 11. N2. С. 37-42.
- Дридигер В.К., Невечеря А.Ф., Токарев И.Д., Вайцеховская С.С. Экономическая эффективность технологии No-till в засушливой зоне Ставропольского края // *Земледелие*. 2017. N3. С. 16.
- Дрепа Е.Б., Власова О.И., Голубь А.С., Донец И.А. Влияние технологии возделывания на агрофизические свойства черноземов выщелоченных и урожайность подсолнечника // *Земледелие*. 2020. N3. С. 18-20.
- Ахалая Б.Х., Старовойтов С.И., Ценч Ю.С., Шогенов Ю.Х., Адамия Л.С. Комбинированный агрегат с универсальным рабочим органом для поверхностной обработки почвы // *Техника и оборудование для села*. 2020. N8. С. 8-11.
- Сенке Ш. Плуг Kongskilde HRWT 51080 с корпусом XLD. *Agroreport*. 2017. 4. 60.
- Василенко В.В., Василенко С.В., Рыльков И.В. Результаты производственных испытаний оборотного плуга. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2013. N4. С. 99-101.
- Сидоров С.А., Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Золотарев А.С. Влияние геометрических и установочных параметров плужных рабочих органов на агротехнические и силовые характеристики // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N2. С. 10-15.
- Лобачевский Я.П., Сизов О.А., Золотарев С.А., Смирнова Л.А. Использование плугов для гладкой вспашки на различных типах почв и сельхозугодий: Рекомендации. М.: Росинформагротех. 2009. 36 с.
- Mamatov F., Aldoshin N., Mirzaev B., Ravshanov H., Kurbanov Sh., Rashidov N. Development of a frontal plow for smooth, furless plowing with cutoffs. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1030. 012135.
- Mamatov F., Mirzaev B., Mirzahodzhaev Sh., Uzakov Z., Choriyeva D. Development of a front plow with active and passive working bodies. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1030. 012164.
- Mamatov F., Ergashev I., Mirzaev B., Pardaev X., Choriyeva D. Research of the Penetration Process of the Frontal Plow. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. 1779. 012002.
- Mamatov F., Mirzaev B., Tursunov O. A Justification of Broach-Plow's Parameters of the Ridge-Stepped Ploughing. *E3S Web of Conferences*. 2019. 97. 05035.
- Kaufman L.C., Totten D.C. Development of the inverting moldboard plow. *Transactions of the ASAE*. 1972. N1. 55-60.
- Маматов Ф.М., Эргашев И.Т., Мирзаев Б.М., Мирзаходжаев Ш. Комбинированный фронтальный плуг // *Сельский механизатор*. 2011. N10. С. 10-11.

REFERENCES

- Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S., Beylis V.M. Sozдание i razvitie mashin i tekhnologiy dlya kompleksnoy mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov v rastenievodstve [Creation and development of systems for machines and technol-

- ogies for the complex mechanization of technological processes in crop production]. *Istoriya nauki i tekhniki*. 2019. N12. 47-54 (In Russian).
2. Sizov I.V., Blinov F.L., Morozov P.V. Ispolzovanie kombinirovannykh rabochikh organov i agregatov pri vozdeystvii l'na-dolguntsa [The use of combined working bodies and units for fiber flax cultivation]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N3. 35-39 (In Russian).
 3. Lyakhov A.P., Koshlya G.I. K opredeleniyu energoemkosti mekhanizirovannykh traktornykh rabot [Determining the energy intensity of mechanized tractor work]. *Agropanorama*. 2017. N4. 20-22 (In Russian).
 4. Lobachevskiy Ya.P., Komogortsev V.F., Starovoytov S.I., Khramovskiy K.A. Analiz tyagovogo soprotivleniya elementov tsilindroidalnogo pluzhnogo korpusa [Analysis of tractive resistance of general plow body elements]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2016. Vol. 10. N2. 11-15 (In Russian).
 5. Aldoshin N.V., Mamatov F.M., Ismailov N.I. Sredstva mekhanizatsii dlya obrabotki pochvy v bakhchevodstve [Mechanization means for tillage in melon growing]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2021. N2. 12-15 (In Russian).
 6. Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Mazitov N.K. Pochvoobrabatyvayushchaya tekhnika: puti importozameshcheniya [Soil-cultivating machinery: ways of import substitution]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2017. Vol. 11. N2. 37-42 (In Russian).
 7. Dridiger V.K., Nevecherya A.F., Tokarev I.D., Vaytsekhovskaya S.S. Ekonomicheskaya effektivnost' tekhnologii No-till v zasushlivoy zone Stavropol'skogo kraia [Efficiency of No-Till Technology in the Droughty Zone of Stavropol Krai]. *Zemledelie*. 2017. N3. 16 (In Russian).
 8. Drepa E.B., Vlasova O.I., Golub' A.S., Donets I.A. Vliyanie tekhnologii vozdeystviya na agrofizicheskie svoystva chernozemov vyshchelochennykh i urozhaynost' podsolnechnika [Influence of cultivation technology on the agrophysical properties of leached chernozems and sunflower yield]. *Zemledelie*. 2020. N3. 18-20 (In Russian).
 9. Akhalaya B.H., Starovoytov S.I., Tsench Yu.S., Shogenov Yu.Kh., Adamia L.S. Kombinirovannyi agregat s universal'nym rabochim organom dlya poverkhnostnoy obrabotki pochvy [A combined unit fitted with a versatile working body for surface tillage]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2020. N8. 8-11 (In Russian).
 10. Senke Sh. Plug Kongskilde HRWT 51080 s korpusom XLD [Kongskilde HRWT 51080 plough with XLD body]. *Agroreport*. 2017. 4. 60 (In Russian).
 11. Vasilenko V.V., Vasilenko S.V., Rylkov I.V. Rezultaty proizvodstvennykh ispytaniy oborotnogo pluga [Results of one-way plough field tests]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2013. N4. 99-101 (In Russian).
 12. Sidorov S.A., Lobachevskiy Ya.P., Mironov D.A., Zolotarev A.S. Vliyanie geometricheskikh i ustanovochnykh parametrov pluzhnykh rabochikh organov na agrotekhnicheskie i silovye kharakteristiki [Influence of geometric and setup parameters of the arrangement of working tools on agrotechnical and power characteristics]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N2. 10-15 (In Russian).
 13. Lobachevskiy Ya.P., Sizov O.A., Zolotarev S.A., Smirnova L.A. Ispolzovanie plugov dlya gladoy vspashki na razlichnykh tipakh pochvy i sel'khozogodiy: Rekomendatsii [The use of ploughs for smooth tillage on various types of soil and farmland: Recommendations.]. Moscow: Rosinformagrotekh. 2009. 36 (In Russian).
 14. Mamatov F., Aldoshin N., Mirzaev B., Ravshanov H., Kurbanov Sh., Rashidov N. Development of a frontal plow for smooth, furless plowing with cutoffs. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1030. 012135 (In English).
 15. Mamatov F., Mirzaev B., Mirzakhodzhaev Sh., Uzakov Z., Choriyeva D. Development of a front plow with active and passive working bodies. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1030. 012164 (In English).
 16. Mamatov F., Ergashev I., Mirzaev B., Pardaev X., Chorieva D. Research of the Penetration Process of the Frontal Plow. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. 1779. 012002 (In English).
 17. Mamatov F., Mirzaev B., Tursunov O. A Justification of Broach-Plow's Parameters of the Ridge-Stepped Ploughing. *E3S Web of Conferences*. 2019. 97. 05035 (In English).
 18. Kaufman L.C., Totten D.C. Development of the inverting moldboard plow. *Transactions of the ASAE*. 1972. N1. 55-60 (In English).
 19. Mamatov F.M., Ergashev I.T., Mirzaev B.M., Mirzakhodzhaev Sh. Kombinirovannyi frontalnyy plug [The combined frontal plough with passive and active working parts]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2011. N10. 10-11 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Старовойтов С.И. – разработка теоретических предпосылок;
Гринь А.М. – литературный анализ, доработка текста, формирование общих выводов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Starovoytov S.I. – development of theoretical premises
Grin' A.M. – literature review, finalizing the manuscript, drawing general 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

12.01.2022

25.02.2022

Себестоимость применения беспилотной авиационной системы для внесения пестицидов и удобрений

Леонид Анатольевич Марченко,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: marchenko1312@mail.ru;
Игорь Геннадьевич Смирнов,
доктор технических наук, ученый секретарь,
e-mail: rashn-smirnov@yandex.ru;

Рашид Курбанович Курбанов,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник;
Артем Юрьевич Спиридонов,
младший научный сотрудник,
e-mail: artyom-spiridonov@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметили необходимость расчета себестоимости применения воздушных судов для экономической оценки целесообразности их эксплуатации, в том числе в сельском хозяйстве, приобретения новых, а также обоснования тарифов на авиационные перевозки. (*Цель исследования*) Обосновать методику и определить себестоимость применения беспилотной авиационной системы БАС-137 ВИМ для внесения пестицидов, удобрений и других агрохимикатов. (*Материалы и методы*) При разработке методики расчета себестоимости применения беспилотной авиационной системы для внесения пестицидов и удобрений использовали Методические рекомендации по определению себестоимости внутренних и международных рейсов для российских авиакомпаний. (*Результаты и обсуждение*) Получили основные зависимости себестоимости применения БАС-137 ВИМ для внесения рабочих жидкостей: от нормы внесения, длины гона, расстояния полета к месту заправки, рабочей скорости полета. (*Выводы*) Разработали методику расчета себестоимости применения беспилотной авиационной системы для внесения пестицидов и удобрений, включающую эксплуатационные расходы по статьям прямых и косвенных затрат. Установили, что при нормах внесения рабочей жидкости 5-100 литров на гектар диапазон изменения себестоимости применения БАС-137 ВИМ находится в пределах от 280,9 до 1315,5 рубля на гектар. При норме внесения 10 литров на гектар в пределах длины гона 0,3-2,0 километра себестоимость применения составляет 307,1-529,5 рубля на гектар. Определили, что при нормах внесения 5-20 литров на гектар и длине гона 0,6-1,0 километра себестоимость будет наименьшей – 264-369 рублей на гектар при рабочей скорости полета 60 километров в час и 482-587 рублей на гектар при скорости полета 30 километров в час. Показали, что с увеличением рабочей скорости полета БАС-137 ВИМ в 2 раза себестоимость уменьшается в 1,2-1,5 раза.

Ключевые слова: беспилотная авиационная система, внесение пестицидов и удобрений, себестоимость применения, прямые и косвенные затраты.

Для цитирования: Марченко Л.А., Смирнов И.Г., Курбанов Р.К., Спиридонов А.Ю. Себестоимость применения беспилотной авиационной системы для внесения пестицидов и удобрений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №1. С. 53-62. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-53-62.

Operational Costs of Unmanned Aircraft System for Applying Pesticides and Fertilizers

Leonid A. Marchenko,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: marchenko1312@mail.ru;
Igor G. Smirnov,
Dr.Sc.(Eng.), scientific secretary,
e-mail: rashn-smirnov@yandex.ru;

Rashid K. Kurbanov,
Ph.D.(Eng.), leading researcher;
Artem Yu. Spiridonov,
junior researcher,
e-mail: artyom-spiridonov@yandex.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The calculation of aircraft cost is stated necessary to assess the economic feasibility of their operation, as well as in agriculture, the possibility of acquiring new ones, and to justify air transportation tariffs. (*Research purpose*) The research purpose is to substantiate the methodology and calculate the prime cost of using BAS-137 VIM unmanned aerial system for the application

of pesticides, fertilizers and other agrochemicals. (*Materials and methods*) When developing the methodology for calculating the prime cost of using an unmanned aerial system for applying pesticides and fertilizers, the Guidelines for determining the cost of domestic and international flights for Russian airlines were used. (*Results and discussion*) We have obtained the main dependences of the prime cost of using BAS-137 VIM for the introduction of working fluids: on the application rate, the field rut length, the distance of approach to the refueling place, and the operating flight speed. (*Conclusions*) The authors developed a methodology for calculating the prime cost of using an unmanned aerial system for applying pesticides and fertilizers, including direct and indirect operating costs. It was found out that at the working fluid application rates of 5-100 liters per hectare, the changes in the cost of using BAS-137 VIM are within the range from 280.9 to 1315.5 rubles per hectare. At an application rate of 10 liters per hectare within the rut length of 0.3-2.0 kilometers, the application prime cost is 307.1-529.5 rubles per hectare. It was obtained that at the application rates of 5-20 liters per hectare and the rut length of 0.6-1.0 kilometers, the prime cost will be the lowest, within the range of 264-369 rubles per hectare at an operating flight speed of 60 kilometers per hour and within the range of 482-587 rubles per hectare at a flying speed of 30 kilometers per hour. It was shown that with a twofold increase in BAS-137 VIM operating speed, the prime cost decreases by 1.2-1.5 times.

Keywords: unmanned aerial system, application of pesticides and fertilizers, cost of application, direct and indirect costs.

For citation: Marchenko L.A., Smirnov I.G., Kurbanov R.K., Spiridonov A.Yu. Sebestoimost' primeneniya bespilotnoy aviatsionnoy sistemy dlya vneseniya pestitsidov i udobreniy [Operational costs of unmanned aircraft system for applying pesticides and fertilizers]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol.16. N1. 53-62 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-53-62.

Применение беспилотных авиационных систем в аграрном производстве все более набирает популярность и требует создания специальных сельскохозяйственных беспилотных летательных аппаратов [1-3].

Разработана технология дифференцированного внесения пестицидов, удобрений и других агрохимикатов, включающая беспилотную авиационную систему (БАС) для последовательного выполнения информационных и технологических операций. Ее основу составляет беспилотный авиационный комплекс (БАК), который включает [4]:

- беспилотные летательные аппараты (БЛА) для мониторинга сельскохозяйственных угодий;
- беспилотные воздушные суда (БВС) для внесения пестицидов, удобрений и других агрохимикатов;
- технические средства для транспортировки к полю, заправки рабочими жидкостями пестицидов, минеральными удобрениями, топливом;
- устройства управления полетом и связи, программное обеспечение.

Для реализации технологии разработано беспилотное воздушное судно вертолетного типа БВС-137 ВИМ для внесения пестицидов и удобрений [5].

Мобильный транспортировщик-заправщик (МТЗ) обеспечивает БВС рабочими жидкостями пестицидов, удобрений и топливом на базе автомобиля ГАЗ 33106 «Валдай» с манипулятором КМУ UNICURV374.

На основании анализа отечественного и зарубежного опыта оценки экономических параметров сельскохозяйственного производства разработана методика расчета экономической эффективности применения беспилотных аэрофотосъемочных комплексов с использованием беспилотных летательных аппаратов [6-40].

Для экономической оценки целесообразности эксплуатации воздушных судов (ВС), приобретения новых, а также обоснования тарифов на авиационные перевозки необходимо знать себестоимость. Ее рассчитывают в соответствии с методическими рекомендациями, утвержденными руководящими органами гражданской авиации России. В них акцентируется внимание на определении себестоимости внутренних и международных рейсов. Этот показатель взят за основу при разработке методики расчета себестоимости применения БАС-137 ВИМ.

Цель исследования – обосновать методику и определить себестоимость применения беспилотной авиационной системы БАС-137 ВИМ для внесения пестицидов, удобрений и других агрохимикатов.

Материалы и методы. БАС-137 ВИМ включает: беспилотное воздушное судно БВС-137 ВИМ с модулем для внесения рабочей жидкости пестицидов, удобрений и других агрохимикатов, мобильный транспортировщик-заправщик рабочей жидкостью и топливом (МТЗ ВИМ) с наземным комплексом контроля полетом БВС-137 ВИМ. Соответственно, ее себестоимость состоит из затрат при их использовании.

Себестоимость внесения агрохимикатов с помощью БВС в пересчете на 1 га сельскохозяйственного поля зависит от типа и часовой производительности судна:

$$C_{\text{га}} = \frac{C_{\text{р.ч}}}{W_{\text{р.ч}}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{га}}$ – себестоимость обработки 1 га сельскохозяйственного поля, руб./га;

$C_{\text{р.ч}}$ – себестоимость рабочего часа, руб./р.ч;

$W_{\text{р.ч}}$ – производительность в рабочий час, га/р.ч.

Производительность в рабочий час зависит от времени, затраченного на один производственный полет

и его обслуживание (загрузка рабочей жидкости пестицида, минерального удобрения, заправка топливом и т.д.) и определяется по формуле:

$$W_{p.ч} = \frac{60 Q_{\phi}}{HT_{ц}}, \quad (2)$$

где $W_{p.ч}$ – производительность БВС-137 ВИМ в рабочий час, га /р.ч;

Q_{ϕ} – фактическая разовая загрузка рабочей жидкостью пестицидов, удобрений, кг;

H – норма внесения рабочей жидкости, л/га;

$T_{ц}$ – рабочее время одного производственного цикла, мин.

Последний показатель состоит из продолжительности одного производственного полета и времени на разовую загрузку БВС рабочей жидкостью пестицидов, удобрений:

$$T_{ц} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 = \frac{600 Q_{\phi}}{HB_p} + \frac{10 Q_{\phi} T_p}{HLV} + \frac{120 R}{V} + T_4 + T_5 + T_6, \quad (3)$$

где T_1 – время основной работы (распыливания рабочей жидкости над обрабатываемым участком), мин;

T_2 – время на развороты для захода на очередной гон, мин;

T_3 – время полета от места заправки до начальной точки обработки поля, мин;

T_4 – время на взлет и посадку, мин (по установленным нормативам);

T_5 – время заправки рабочей жидкостью бака модуля опрыскивателя ВС, мин;

T_6 – время заправки топливом, мин;

T_p – время одного разворота, мин (по установленным нормативам);

R – расстояние от места заправки до начальной точки обрабатываемого участка, км;

B_p – ширина рабочего захвата при внесении рабочей жидкости, м;

L – длина обрабатываемого участка (длина гона сельскохозяйственного поля), км;

V – рабочая скорость над обрабатываемым участком, км/ч.

Фактическая площадь обработанных сельскохозяйственных угодий за один производственный полет зависит от полезной нагрузки БВС, определяющей фактическую разовую загрузку рабочей жидкости пестицидов, удобрений и нормы их внесения на каждом элементарном участке обрабатываемого сельскохозяйственного поля:

$$S = \frac{Q_{\phi}}{H}, \quad (4)$$

где S – площадь, обработанная за один полет, га.

Себестоимость рабочего часа БВС представлена прямыми и косвенными затратами:

$$C_{p.ч} = \mathcal{E}_{пр} + \mathcal{E}_{кос}, \quad (5)$$

где $C_{p.ч}$ – себестоимость рабочего часа, руб./р.ч;

$\mathcal{E}_{пр}$ – прямые расходы, руб./р.ч.;

$\mathcal{E}_{кос}$ – косвенные расходы, руб./р.ч.

Косвенные расходы – наземные, включают затраты на аэродромное обслуживание и аэронавигационное обеспечение. При расчете себестоимости рабочего часа БВС-137 ВИМ их не включаем в перечень затрат.

Прямые расходы определяют по формуле:

$$\mathcal{E}_{пр} = \mathcal{E}_{гсм} + \mathcal{E}_{ам} + \mathcal{E}_{то} + \mathcal{E}_{зп} + \mathcal{E}_{сс}, \quad (6)$$

где $\mathcal{E}_{гсм}$ – расходы на горюче-смазочные материалы, руб./р.ч;

$\mathcal{E}_{ам}$ – амортизационные отчисления по плану с оборудованием и двигателями, руб./р.ч;

$\mathcal{E}_{то}$ – расходы на техническое обслуживание и текущий ремонт БВС, руб./р.ч;

$\mathcal{E}_{зп}$ – расходы по заработной плате обслуживающего БВС персонала, руб./р.ч;

$\mathcal{E}_{сс}$ – прочие прямые летные расходы, включающие расходы на страхование БВС, руб./р.ч.

Расходы на горюче-смазочные материалы зависят от среднечасового расхода топлива, марки и сорта топлива, оптовой цены 1 т топлива:

$$\mathcal{E}_{гсм} = g_{топ} \cdot (C_{т} + K_{см} \cdot C_{см}), \quad (7)$$

где $g_{топ}$ – нормативный расход топлива, кг/ч (л/ч);

$C_{т}$ – стоимость топлива с учетом его цены, доставки и хранения, руб./кг (руб./л);

$K_{см}$ – коэффициент, учитывающий расход масла в зависимости от расхода топлива ($K_{см} = 0,05$);

$C_{см}$ – стоимость смазочных материалов, руб./кг (руб./л).

Нормативный расход топлива БВС-137 ВИМ составляет $g_{топ} = 17$ л/ч. Стоимость топлива (бензин марки А-92) $C_{т} = 45$ руб./л, смазочных материалов – $C_{см} = 46,65$ руб./л. Тогда:

$$\mathcal{E}_{гсм} = g_{топ} \cdot (C_{т} + K_{см} \cdot C_{см}) = 17 \cdot (45 + 0,05 \cdot 46,65) = 804,65 \text{ руб./р.ч.} \quad (8)$$

Расходы на ГСМ на единицу обрабатываемой площади равны:

$$\mathcal{E}_{гсмга} = \frac{\mathcal{E}_{гсм}}{W_{p.ч}}, \quad (9)$$

Расходы на амортизацию БВС рассчитываются исходя из стоимости планера и двигателей БВС, норм амортизации на полное восстановление (реновацию) и годового производственного налета часов на авиационных работах:

$$\mathcal{E}_a = \frac{a_{п} \cdot C_{п} + a_{д} \cdot C_{д}}{100 \cdot T_{гапр}}, \quad (10)$$

где $a_{п}$, $a_{д}$ – нормы амортизационных отчислений на полное восстановление соответственно по плану и двигателю, % от балансовой (первоначальной) стоимости;

$C_{п}$, $C_{д}$ – первоначальная стоимость планера и дви-

гателя соответственно, руб.;

$T_{\text{гарх}}$ – годовой производственный налет часов БВС на авиационных работах, ч.

Начисление амортизации по планеру и авиационным двигателям БВС, сданным в аренду, проводится арендодателем. По планеру и авиадвигателю БВС-137 ВИМ АО «Камов» установлен амортизационный срок службы 20 лет, нормы амортизационных отчислений на полное восстановление – 5%.

Амортизационные затраты на один гектар обработки сельскохозяйственных угодий составляют:

$$\mathcal{E}_{\text{ага}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{ага}}}{W_{\text{р.ч}}}, \quad (11)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ага}}$ – амортизационные затраты на один гектар, руб./га.

Отчисления в ремонтный фонд предусмотрены для погашения за счет этого фонда расходов по капитальному ремонту. По планеру и двигателю БВС-137 ВИМ они пропорциональны налету часов, с учетом количества капитальных ремонтов планеров и двигателя за амортизационный срок их службы в летных часах и стоимости их капитальных ремонтов:

$$\mathcal{E}_{\text{кр}} = \frac{\frac{n_{\text{кр.пл}} \cdot C_{\text{кр.пл}}}{T_{\text{а.пл}}} + \frac{n_{\text{кр.дв}} \cdot C_{\text{кр.дв}} \cdot f}{T_{\text{а.дв}}}}{T_{\text{г}}}, \quad (12)$$

где $\mathcal{E}_{\text{кр}}$ – затраты на капитальный ремонт, руб./ч;

$C_{\text{кр.пл}}$, $C_{\text{кр.дв}}$ – стоимость капитальных ремонтов планера и двигателей соответственно, руб.;

$n_{\text{кр.пл}}$, $n_{\text{кр.дв}}$ – количество капитальных ремонтов планера и двигателей соответственно;

$T_{\text{а.пл}}$ – амортизационный срок службы планера, ч;

$T_{\text{а.дв}}$ – амортизационный срок службы двигателей, ч;

f – коэффициент, учитывающий работу двигателя на земле ($f > 1$);

$T_{\text{г}}$ – годовой производственный налет часов на БВС, ч.

Количество капитальных ремонтов планера и двигателя определяется из выражения:

$$n_{\text{кр}} = \frac{T_{\text{мр.пл.дв}}}{T_{\text{ам.пл.дв}}}, \quad (13)$$

где $n_{\text{кр}}$ – количество капитальных ремонтов, ед.;

$T_{\text{мр.пл.дв}}$ – межремонтный ресурс планера (двигателя), ч;

$T_{\text{ам.пл.дв}}$ – амортизационный срок службы планера (двигателя), ч.

Количество капитальных ремонтов планера и двигателя также может быть определено по формулам:

$$n_{\text{кр.пл}} = \frac{T_{\text{а.пл.}}}{T_{\text{мр.пл.}}} - 1, \quad (14)$$

$$n_{\text{кр.дв}} = \frac{T_{\text{а.дв.}}}{T_{\text{мр.дв.}}} - 1. \quad (15)$$

Затраты на капитальный ремонт на единицу обрабатываемой площади равны, руб./га:

$$\mathcal{E}_{\text{крга}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{кпр}}}{W_{\text{р.ч}}}, \quad (16)$$

где $\mathcal{E}_{\text{крга}}$ – затраты на капитальный ремонт на единицу обрабатываемой площади, руб./га;

$\mathcal{E}_{\text{кпр}}$ – затраты на капитальный ремонт, руб./ч.

Затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт БВС рассчитываются прямым счетом (учетом). Если этого нет, то расчеты ведут на основе объема работ в приведенных единицах на техническое обслуживание (ТО) и фактической себестоимости приведенной единицы ТО в части материальных затрат:

$$\mathcal{E}_{\text{то}} = n_{\text{то}} \cdot C_{\text{то}}, \quad (17)$$

где $\mathcal{E}_{\text{то}}$ – затраты на техническое обслуживание БВС, руб./р.ч;

$n_{\text{то}}$ – количество приведенных единиц технического обслуживания, приходящихся на летный час, прив. ед./ч;

$C_{\text{то}}$ – себестоимость приведенной единицы технического обслуживания в части материальных затрат, руб./р.ч.

Количество приведенных единиц ТО, приходящихся на рабочий час, по типам ВС можно вычислять расчетным путем в соответствии с действующей системой переводных коэффициентов на техобслуживание или отчетными данными организации эксплуатанта. Себестоимость приведенной единицы ТО в части материальных затрат следует дифференцировать по типам ВС путем анализа оценки ТО эксплуатантов БВС.

Расходы на техническое обслуживание и текущий ремонт можно также определить укрупненно, в размере 30-50% от амортизационных отчислений на один рабочий час:

$$\mathcal{E}_{\text{то}} = (0,3-0,5) \cdot \mathcal{E}_{\text{а}}. \quad (18)$$

Расходы на ремонт и ТО на единицу обрабатываемой площади БВС-137 ВИМ определяем по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{то.га}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{то}}}{W_{\text{р.ч}}}. \quad (19)$$

Расходы на страхование составляют процентное значение страхового тарифа от стоимости БВС-137 ВИМ. В данном случае он принят равным 0,046%.

$$\mathcal{E}_{\text{с}} = \frac{C_{\text{БВС}} \cdot K_{\text{с}}}{100 \cdot T_{\text{г}}}, \quad (20)$$

где $\mathcal{E}_{\text{с}}$ – расходы на страхование, руб./ч;

$C_{\text{БВС}}$ – стоимость БВС, руб.;

$K_{\text{с}}$ – страховой тариф, %;

$T_{\text{г}}$ – годовая загрузка, ч.

Расходы на страхование на единицу обрабатываемой площади поля определяются по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{с}} = \frac{C_{\text{БВС}} \cdot K_{\text{с}}}{100 \cdot T_{\text{гарх}} \cdot W_{\text{р.ч}}}, \quad (21)$$

где $W_{\text{р.ч.}}$ – производительность БВС в рабочий час, га/р.ч.

Прямые эксплуатационные затраты денежных

средств на единицу наработки МТЗ представляют собой сумму денежных средств, формируемых при выполнении технологических операций по транспортировке БВС к сельскохозяйственному полю и обратно к месту базирования, разгрузке и погрузке БВС, снятию и установке посадочной платформы для БВС, заправке БВС рабочей жидкостью, топливом.

Прямые эксплуатационные затраты определяют в соответствии с ГОСТ 53056-2008:

$$ПЭ = 3 + Г + Р + А + Ф, \quad (22)$$

где $ПЭ$ – прямые эксплуатационные затраты денежных средств на единицу наработки, руб./га, руб./ч;

3 – затраты на оплату труда обслуживающего персонала, руб./ед. наработки (руб./га, руб./ч);

$Г$ – затраты на горюче-смазочные материалы, руб./ед. наработки (руб./га, руб./ч);

$Р$ – затраты на ремонт и техническое обслуживание, руб./ед. наработки (руб./га, руб./ч);

$А$ – затраты на амортизацию, руб./ед. наработки (руб./га, руб./ч);

$Ф$ – прочие прямые затраты на основные и вспомогательные материалы, руб./ед. наработки (руб./га, руб./ч).

Установили исходные данные для расчета (таблица).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. На основании разработанной методики расчета себестоимости применения беспилотной авиационной системы для внесения пестицидов, удобрений и других агрохимикатов проведены расчеты себестоимости применения БАС-137 ВИМ с полезной нагрузкой 100 кг при переменных значениях: нормы внесения $H = 5-100$ л/га; длины гона $L = 0,3-2,0$ км; расстояния от места заправки до начальной точки обрабатываемого участка $R = 0,2-1,0$ км; рабочей скорости полета $V = 30-60$ км/ч (рис. 1-4).

При нормах внесения от 5 до 100 л/га диапазон изменения себестоимости находится в пределах от 280,9 руб./га (при $V = 60$ км/ч, $H = 5$ л/га) до 1315,5 руб./га (при $V = 30$ км/ч, $H = 100$ л/га). При норме внесения 10 л/га в пределах длины гона 0,3-2,0 км себестоимость применения БАС-137 ВИМ составляет 307,1-529,5 руб./га.

Получены основные зависимости себестоимости применения БАС-137 ВИМ при нормах внесения рабочих жидкостей пестицидов 10-20 л/га и азотного удобрения – 30-100 л/га. С увеличением нормы внесения рабочей жидкости себестоимость резко возрастает, независимо от рабочей скорости полета БАС-137 ВИМ (рис. 1). Из расчета наименьшей себестоимости рациональное значение норм внесения рабочей жидкости пестицидов составляет 10-20 л/га при рабочей скорости полета 30-60 км/ч. Нормы внесения 30-100 л/га характерны для некорневой подкормки растений жидкими азотными удобрениями.

Себестоимость применения в зависимости от длины гона и расстояния подлета на заправку изменяет-

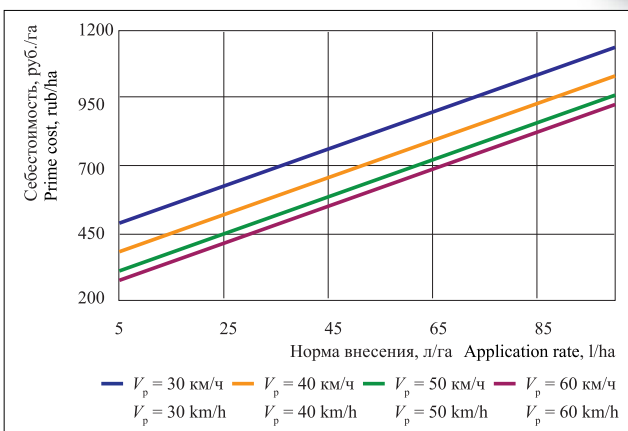


Рис. 1. Зависимость себестоимости применения БАС-137 ВИМ от нормы внесения агрохимикатов и рабочей скорости полета при длине гона обрабатываемого поля 1 км

Fig. 1. The dependence of BAS-137 VIM using cost on the agrochemical application rate of and the operating flight speed at the length of the cultivated field rut of 1 km

ся незначительно при нормах внесения 5-20 л/га (рис. 2, 3). При нормах внесения 5-20 л/га, длине гона 0,6-1,0 км себестоимость наименьшая – 264-369 руб./га при рабочей скорости полета 60 км/ч и 482-587 руб./га скорости 30 км/ч.

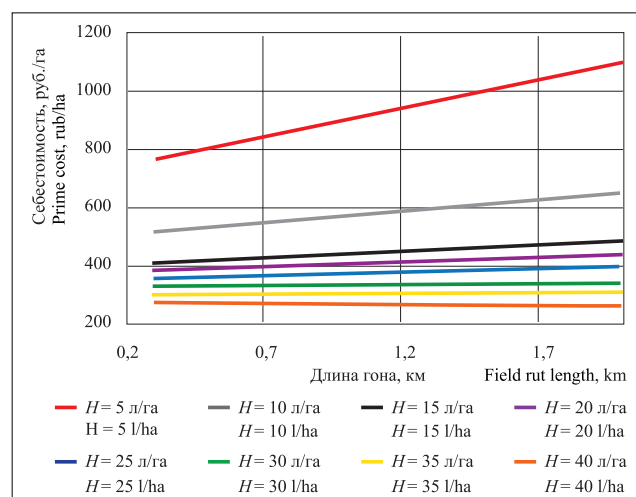


Рис. 2. Зависимость себестоимости применения БАС-137 ВИМ от длины гона и нормы внесения агрохимикатов при рабочей скорости полета 60 км/ч

Fig. 2. The dependence of BAS-137 VIM using cost on the field rut length and the agrochemical application rate of at the operating flight speed of 60 km/h

Влияние длины гона и расстояния подлета на заправку БВС рабочей жидкостью и топливом сказывается при нормах внесения 30-100 л/га.

С увеличением рабочей скорости полета в 2 раза – с 30 до 60 км/ч – себестоимость уменьшается примерно в 1,2-1,5 раза (рис. 4).

Выводы. Разработали методику расчета себестоимости применения беспилотной авиационной систе-

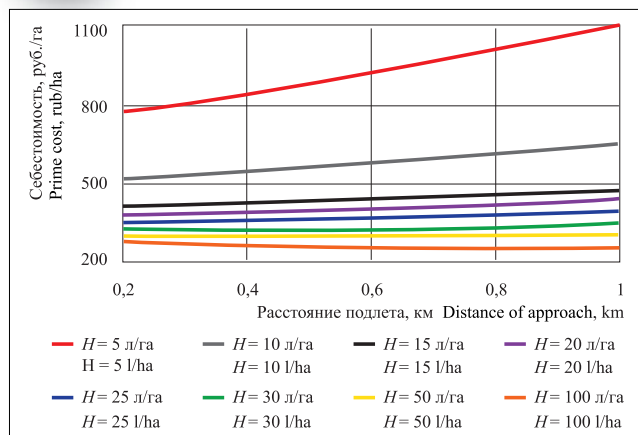


Рис. 3. Зависимость себестоимости применения БАС-137 ВИМ от расстояния подлета к месту заправки и нормы внесения агрохимикатов

Рис. 3. The dependence of BAS-137 VIM using cost on the distance of approach to the refueling place and the agrochemical application rate

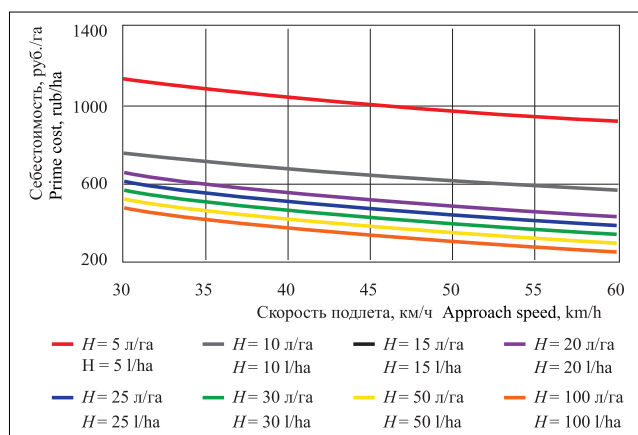


Рис. 4. Зависимость себестоимости применения БАС-137 ВИМ от рабочей скорости полета и нормы внесения агрохимикатов

Fig. 4. The dependence of BAS-137 VIM using cost on the operating flight speed and the agrochemical application rate

мы для внесения пестицидов и удобрений, включающую эксплуатационные расходы по статьям прямых и косвенных затрат. Установили, что при нормах внесения рабочей жидкости 5-100 л/га диапазон изменения себестоимости применения БАС-137 ВИМ находится в пределах от 280,9 руб./га (при $V = 60$ км/ч, $H = 5$ л/га) до 1315,5 руб./га (при $V = 30$ км/ч, $H = 100$ л/га). При норме внесения 10 л/га в пределах длины гона 0,3-2,0 км себестоимость составляет 307,1-529,5 руб./га.

Определили, что при нормах внесения 5-20 л/га и длине гона 0,6-1,0 км себестоимость будет наименьшей – 264-369 руб./га при рабочей скорости полета 60 км/ч и 482-587 руб./га скорости 30 км/ч.

Показали, что влияние длины гона и расстояния подлета на заправку БВС рабочей жидкостью и топливом значительно сказывается при нормах внесения 30-100 л/га, с увеличением рабочей скорости полета БАС-137ВИМ в 2 раза – с 30 до 60 км/ч – себестоимость уменьшается примерно в 1,2-1,5 раза.

Показатели / Indicators	Значение Value
Взлетная мощность двигателя, л.с. Takeoff engine power, hp	60
Взлетная масса, кг / Takeoff weight, kg	280
Масса полезной нагрузки, кг / Payload weight, kg	50-100
Рабочая скорость полета, км/ч Operating flight speed, km/h	40-60
Скорость при перелетах, км/ч / Flight speed, km/h	60
Время на взлет и посадку БВС, мин UAV takeoff and landing time, min	1
Время разворота летательного аппарата для захода на очередной гон, с Aircraft turn time to enter the next rut, s	5
Рабочая ширина захвата, м / Working width, m	5
Разовая загрузка летательного аппарата рабочей жидкости, кг One-time loading of the aircraft of the working fluid, kg	100
Первоначальная стоимость планера, тыс. руб. Airframe initial cost, thousand rubles	2965
Первоначальная стоимость двигателя, тыс. руб. Engine initial cost, thousand rubles.	163
Стоимость БВС, тыс. руб. / UAV cost, thousand rubles	1804
Среднечасовой расход авиационного топлива, л/ч Average hourly consumption of aviation fuel, l/h	17
Оптовая цена 1 т топлива, тыс. руб./т Wholesale price of 1 ton of fuel, thousand rubles/ton	45
Коэффициент, учитывающий расход масла в зависимости от расхода топлива Coefficient taking into account oil consumption depending on the consumption fuel	0,05
Стоимость смазочных материалов, руб./л Lubricant cost, rub./l	40,65
Годовой налет БВС, ч / Annual flight time UAV, h	4000
Годовой налет БВС на авиационно-химических полетах, ч UAVs' annual flying hours of aviation-chemical flights, h	550
Нормы амортизационных отчислений на восстановление соответственно по планеру и двигателю, % от балансовой (первоначальной) стоимости Restoration depreciation rates for the airframe and engine, respectively, % of the book (initial) cost	5
Отчисление на социальное страхование от всех видов заработной платы за один производственный час полета, % Social insurance contribution from all types of wages for one production flight hour, %	30,2
Расстояние от места заправки рабочей жидкостью до обрабатываемого участка, км Distance from the place of working fluid filling to the treated area, km	0,2-1,0
Длина гона сельскохозяйственного поля, км The length of the agricultural field rut, km	0,3-2,0
Норма внесения рабочей жидкости Н, л/га: Application rate of N working fluid, l/ha: для пестицидов / for pesticides для жидких азотных удобрений for liquid nitrogen fertilizers	10-20 30-100

Удельный расход топлива, л/100 км Specific fuel consumption, l/100 km	12
Стоимость МТЗ ВИМ с комплектом технологического оборудования, тыс. руб. The cost of MTZ VIM with a set of technological equipment, thousand rubles	2855,68
Годовая загрузка МТЗ ВИМ, ч Annual loading of MTZ VIM, h	550
Расстояние переезда МТЗ ВИМ к месту работы, км Distance of moving MTZ VIM to the place of work, km	10
Скорость движения МТЗ ВИМ к месту работы, км/ч Speed of MTZ VIM movement to the place of work, km/h	60
Время разгрузки БВС-137 ВИМ с платформы МТЗ ВИМ, ч BVS-137 VIM unloading time from the MTZ VIM platform, h	0,067
Время на установку взлетно-посадочной платформы МТЗ ВИМ и установку на ней БВС-137 ВИМ, ч Time to install the MTZ VIM take-off and landing platform and install BVS-137 VIM on it, h	0,1
Расход топлива двигателем МТЗ ВИМ на холостом ходу, л/ч. Fuel consumption of the MTZ VIM engine at idle, l/h	2
Расход топлива при работе крана манипулятора, л/мото-ч. Fuel consumption during the manipulator crane operation, l/moto-h.	5
Цена дизельного топлива, руб./л / Diesel fuel price, rub./l	36
Производительность насоса для заправки рабочей жидкостью БВС-137 ВИМ, л/мин The performance of the pump for filling BVS-137 VIM working fluid, l/min	109
Напряжение питания топливного насоса от генератора двигателя МТЗ ВИМ, В Voltage of fuel pump supply from MTZ VIM engine generator, V	12

Производительность топливного насоса для заправки топливного бака БВС-137 ВИМ, л/мин Fuel pump performance for BVS-137 VIM fuel tank filling, l/min	50
Расход топлива насоса для заправки топливом БВС-137 ВИМ, л/(кВт·ч) Fuel consumption of the pump for refueling BVS-137 VIM, l/(kWh)	0,459
Стоимость топлива марки АИ-92, руб./л AI-92 fuel cost, rub/l	46
Время заполнения рабочей жидкостью бака модуля опрыскивателя, мин Time to fill the tank of the sprayer module with the working fluid, min	0,92
Средняя зарплата водителя транспортировщика-заправщика, тыс. руб. Average salary of a transporter-refueling driver, thousand rubles	50
Средняя зарплата программиста, тыс. руб. Average salary of a programmer, thousand rubles	80
Средняя зарплата агронома по защите растений, тыс. руб. Average salary of a plant protection agronomist, thousand rubles	34
Коэффициент доплат за вредные условия труда при работе с пестицидами Coefficient of additional payments for harmful working conditions when working with pesticides	1,25
Коэффициент отчислений на ремонт и техническое обслуживание МТЗ ВИМ Factor of deductions for MTZ VIM repairs and maintenance	0,23

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Журавлев В.Н., Журавлев П.В. Применение беспилотных летательных аппаратов в отраслях экономики: состояние и перспективы // *Научный Вестник МГТУ*. 2016. Т. 19. N4. С. 156-164.
- Марченко Л.А., Мочкова Т.В., Курбанов Р.К., Краснобо-родько В.В. Основные требования к беспилотным летательным аппаратам для внесения удобрений и пестицидов // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N4(33). С. 107-112.
- Артюшин А.А., Курбанов Р.К., Марченко Л.А., Захарова О.М. Выбор типоразмерного ряда беспилотных летательных аппаратов и полезной нагрузки для мониторинга сельскохозяйственных полей // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N4(37). С. 36-43.
- Марченко Л.А., Артюшин А.А., Смирнов И.Г., Мочкова Т.В., Спиридонов А.Ю., Курбанов Р.К. Технология внесения пестицидов и удобрений беспилотными летательными аппаратами в цифровом сельском хозяйстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N5. С. 38-45.
- Марченко Л.А., Мызин М.В., Кузнецов И.В., Мочкова Т.В., Спиридонов А.Ю. Беспилотное воздушное судно вертолетного типа для внесения пестицидов и удобрений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N1. С. 61-68.
- Никитин В.Н., Раков Д.Н. Оценка экономической эффективности использования беспилотных аэрофотосъемочных комплексов // *Вестник СГУГиТ*. 2013. N4(24). С. 48-46.
- Zakharova R.V., Gainutdinov I.G. The use of an unmanned aerial vehicle for desiccation of oilseeds. *Vector of Economics*. 2018. N11(29). 118.
- Semenova L.L. Modern navigation methods for unmanned aerial vehicles. *Science and Education Today*. 2018. N4(27). 6-8.
- Старцев А.В., Гузенко А.С., Васильев М.А. и др. Перспективы использования авиации в сельском хозяйстве // *АПК России*. 2021. Т. 28. N2. С. 258-263.
- Фарков А.Г. Проблемы и перспективы развития сельскохозяйственной авиации в России // *Логистические системы в глобальной экономике*. 2018. N8. С. 247-251.
- Sozzi M., Kayad A., Gobbo S., Cogato A., Sartori L., Marinello F. Economic Comparison of Satellite, Plane and UAV-Acquired NDVI Images for Site-Specific Nitrogen Application: Observations from Italy. *Agronomy*. 2021. N11. 2098.
- Елисеев А.Н., Федоров Д.М., Кондратьев Р.Ю. Оценка экономической эффективности применения БПЛА // *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы*. 2018. Т. 1. С. 252-253.
- Артеменко И.В., Олешко В.С. Оценка экономической эф-

- фективности НИОКР по перспективным БПЛА // *Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России*. 2020. N1(145). С. 54-58.
14. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И., Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С. Цифровые технологии в почвообработке // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2019. N1(30). С. 191-197.
 15. Шевченко А.В., Мигачев А.Н. Обзор состояния мирового рынка беспилотных летательных аппаратов и их применения в сельском хозяйстве // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2019. Т. 7. N3. С. 183-195.
 16. Wang L. Applications and Prospects of Agricultural Unmanned Aerial Vehicle Obstacle Avoidance Technology in China. *Sensors (Basel)*. 2019. Vol. 19. N3. 642.
 17. Mogili U.R., Deepak B.B.V.L. Review on Application of Drone Systems in Precision Agriculture. *Procedia Computer Science*. 2018. N133. 502-509.
 18. Эфендиева А.А., Загазежева О.З. Перспективы использования беспилотных устройств в решении прикладных задач в сельскохозяйственной отрасли // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2019. N4(90). С. 54-59.
 19. Линков С.А., Акинчин А.В., Мелентьев А.А. и др. Применение ГИС-технологий в сельскохозяйственном производстве // *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2018. N1(17). С. 118-126.
 20. Балабанов В.И., Елесеев В.В., Солдатов П.Д. и др. Беспилотные машины и их применение в сельском хозяйстве // *Наука в центральной России*. 2020. N3(45). С. 31-40.
 21. Дудин М.Н., Шкодинский С.В., Анищенко А.Н. Цифровизация роста: будущее сельского хозяйства России в индустрии 4.0 // *АПК: Экономика, управление*. 2021. N5. С. 25-37.
 22. Миронова Н.А. Цифровая экономика и цифровые платформы в АПК // *Московский экономический журнал*. 2019. N7. С. 19.
 23. Астахова Т.Н., Колбанев М.О., Романова А.А., Шамин А.А. Модель цифрового сельского хозяйства // *International Journal of Open Information Technologies*. 2019. Т. 7. N12. С. 63-69.
 24. Лобачевский Я.П., Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Аспекты цифровизации системы технологий и машин // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N3(36). С. 40-45.
 25. Комкина Т.А., Никонова М.А., Дубинина М.Г. Техно-экономический анализ отдельных видов сервисных роботов // *Экономический анализ: теория и практика*. 2020. Т. 19. N10(505). С. 1965-1986.
 26. Макарова Ю.А., Дубинина М.Г. Анализ технико-экономических показателей беспилотных транспортных средств // *Концепции*. 2018. N1(37). С. 28-44.
 27. Абдуллаев А.А. Тенденция развития беспилотных летательных аппаратов конвертопланового типа // *Тенденции развития науки и образования*. 2020. N63-1. С. 84-90.
 28. Дубинина М.Г. Анализ технико-экономических показателей профессиональных квадрокоптеров // *Концепции*. 2019. N1(38). С. 27-35.
 29. Зубарев Ю.Н., Фомин Д.С. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // *Исследования: теория и эксперимент*. 2019. N1. С. 48-50.
 30. Романенкова М.С., Балабанов В.И. Применение цифровых технологий в растениеводстве // *Наука в центральной России*. 2020. N2(44). С. 74-82.
 31. Коноплин Н.А., Морозов А.В., Попов А.И. Анализ физических параметров энергоэффективности агроинженерных систем // *Международный технико-экономический журнал*. 2018. N2. С. 47-53.
 32. Пашута А.О. Научные основы повышения эффективности земельных отношений в сельском хозяйстве // *Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве*. 2018. N3(36). С. 36-43.
 33. Utepaliyeva K.M., Sabirova R.K., Dingazieva M.D., Tazhidanova A.R. Improvement of the economic efficiency of vegetable production in the agrarian sector. *Bulletin of Karaganda University. Economy Series*. 2019. Vol. 96. N4. 93-98.
 34. Нургалиева А.А., Ахметова Д., Бейсембина А. и др. Пути повышения экономической эффективности развития сельского хозяйства // *Велес*. 2020. N1-1(79). С. 47-51.
 35. Дадобоев А.Т. Некоторые аспекты совершенствования экономического механизма повышения эффективности сельского хозяйства // *Вестник Таджикского государственного университета права, бизнеса и политики. Серия общественных наук*. 2018. N4(77). С. 68-75.
 36. Китиева М.И., Богатырева А.И. Факторы повышения экономической эффективности производства в сельском хозяйстве // *Заметки ученого*. 2021. N3-1. С. 180-183.
 37. Бабаева З.Ш. Вопросы повышения эффективности использования экономических ресурсов в ходе производственного процесса в сельском хозяйстве // *Экономика и предпринимательство*. 2019. N12(113). С. 949-956.
 38. Край К.Ф., Хаджиева М.И. Экономическая эффективность внедрения инновационных технологий в сельское хозяйство в эпоху сквозной цифровизации // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2020. N6(98). С. 155-164.
 49. Gandorfer M., Meyer-Aurich A. Economic Potential of Site-Specific Fertiliser Application and Harvest Management. *Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives*. 2017. 79-92.
 40. Ørum J.E., Kudsk P., Jensen P.K. Economics of Site-Specific And Variable-Dose Herbicide Application. *Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives*. 2017. 93-110.

REFERENCES

1. Zhuravlev V.N., Zhuravlev P.V. Primenenie bespilotnykh letatel'nykh apparatov v otraslyakh ekonomiki: sostoyanie i perspektivy [The use of unmanned aerial vehicles in economic sectors: current situation and prospects]. *Nauchnyy Vestnik MGTU*. 2016. Vol. 19. N4. 156-164 (In Russian).
2. Marchenko L.A., Mochkova T.V., Kurbanov R.K., Krasnob-

- orod'ko V.V. Osnovnye trebovaniya k bespilotnym letatel'nyim apparatam dlya vneseniya udobreniy i pestitsidov [Basic requirements for unmanned aerial vehicles for fertilizer and pesticides]. *Vestnik VIESKH*. 2018. N4(33). 107-112 (In Russian).
3. Artyushin A.A., Kurbanov R.K., Marchenko L.A., Zakharova O.M. Vybory tiporazmernogo ryada bespilotnykh letatel'nykh apparatov i poleznoy nagruzki dlya monitoringa sel'skokhozyaystvennykh poley [The choice of a standard series of unmanned aerial vehicles and payload for monitoring agricultural fields]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N4(37). 36-43 (In Russian).
 4. Marchenko L.A., Artyushin A.A., Smirnov I.G., Mochkova T.V., Spiridonov A.Yu., Kurbanov R.K. Tekhnologiya vneseniya pestitsidov i udobreniy bespilotnymi letatel'nyimi apparatami v tsifrovom sel'skom khozyaystve [Technology of pesticides and fertilizers application with unmanned aerial vehicles in digital agriculture]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N5. 38-45 (In Russian).
 5. Marchenko L.A., Myzin M.V., Kuznetsov I.V., Mochkova T.V., Spiridonov A.Yu. Bespilotnoe vozdušnoye sudno vertoletnogo tipa dlya vneseniya pestitsidov i udobreniy [Unmanned helicopter type aircraft for the pesticides and fertilizers application]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N1. 61-68 (In Russian).
 6. Nikitin V.N., Rakov D.N. Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti ispol'zovaniya bespilotnykh aerofotosemochnykh kompleksov [Unmanned aerial photography complexes application: cost-effectiveness assessment]. *Vestnik SGUGiT*. 2013. N4(24). 48-46 (In Russian).
 7. Zakharova R.V., Gainutdinov I.G. The use of an unmanned aerial vehicle for desiccation of oilseeds. *Vector of Economics*. 2018. N11(29). 118 (In English).
 8. Semenova L.L. Modern navigation methods for unmanned aerial vehicles. *Science and Education Today*. 2018. N4(27). 6-8 (In English).
 9. Startsev A.V., Guzenko A.S., Vasil'ev M.A., et al. Perspektivy ispol'zovaniya aviatsii v sel'skom khozyaystve [Prospects for using aviation in agriculture]. *APK Rossii*. 2021. Vol. 28. N2. 258-263 (In Russian).
 10. Farkov A.G. Problemy i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennoy aviatsii v Rossii [The problems and perspectives of agricultural aviation]. *Logisticheskie sistemy v global'noy ekonomike*. 2018. N8. 247-251 (In Russian).
 11. Sozzi M., Kayad A., Gobbo S., Cogato A., Sartori L., Marinello F. Economic Comparison of Satellite, Plane and UAV-Acquired NDVI Images for Site-Specific Nitrogen Application: Observations from Italy. *Agronomy*. 2021. N11. 2098 (In English).
 12. Eliseev A.N., Fedorov D.M., Kondrat'ev R.Yu. Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti primeneniya BPLA [Evaluation of UAVs' economic efficiency]. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy*. 2018. Vol. 1. 252-253 (In Russian).
 13. Artemenko I.V., Oleshko V.S. Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti NIOKR po perspektivnym BPLA [Assessment of the economic efficiency of r&d about promising UAVs]. *Oboronnyy kompleks – nauchno-tekhnicheskoyu progressu Rossii*. 2020. N1(145). 54-58 (In Russian).
 14. Lobachevskiy Ya.P., Starovoytov S.I., Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S. Tsifrovyye tekhnologii v pochvoobrabotke [Digital technologies in tillage]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2019. N1(30). 191-197 (In Russian).
 15. Shevchenko A.V., Migachev A.N. Obzor sostoyaniya mirovogo rynka bespilotnykh letatel'nykh apparatov i ikh primeneniya v sel'skom khozyaystve [Review of the state of the world market of drones and their application for agriculture]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*. 2019. Vol. 7. N3. 183-195 (In Russian).
 16. Wang L. Applications and Prospects of Agricultural Unmanned Aerial Vehicle Obstacle Avoidance Technology in China. *Sensors (Basel)*. 2019. Vol. 19. N3. 642 (In English).
 17. Mogili U.R., Deepak B.B.V.L. Review on Application of Drone Systems in Precision Agriculture. *Procedia Computer Science*. 2018. N133. 502-509 (In English).
 18. Efendieva A.A., Zagazheva O.Z. Perspektivy ispol'zovaniya bespilotnykh ustroystv v reshenii prikladnykh zadach v sel'skokhozyaystvennoy otrasli [Prospects for the use of unmanned devices in solving applied problems in the agricultural industry]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchno tsentra RAN*. 2019. N4(90). 54-59 (In Russian).
 19. Linkov S.A., Akinchin A.V., Melent'ev A.A., et al. Primenenie GIS-tekhnologiy v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [The application of GIS technologies in agricultural production]. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy*. 2018. N1(17). 118-126 (In Russian).
 20. Balabanov V.I., Eleseev V.V., Soldatov P.D., et al. Bespilotnye mashiny i ikh primenenie v sel'skom khozyaystve [Unmanned vehicles and their application in agriculture]. *Nauka v tsentral'noy Rossii*. 2020. N3(45). 31-40 (In Russian).
 21. Dudin M.N., Shkodinskiy S.V., Anishchenko A.N. Tsifrovizatsiya rosta: budushchee sel'skogo khozyaystva Rossii v industrii 4.0 [Digitalization of growth: the future of Russian agriculture in industry 4.0]. *APK: Ekonomika, upravlenie*. 2021. N5. 25-37 (In Russian).
 22. Mironova N.A. Tsifrovaya ekonomika i tsifrovyye platformy v APK [The digital economics and the digital platforms in the agriculture]. *Moskovskiy ekonomicheskyy zhurnal*. 2019. N7. 19 (In Russian).
 23. Astakhova T.N., Kolbanov M.O., Romanova A.A., Shamin A.A. Model' tsifrovogo sel'skogo khozyaystva [Model of digital agriculture]. *International Journal of Open Information Technologies*. 2019. Vol. 7. N12. 63-69 (In Russian).
 24. Lobachevskiy Ya.P., Beylis V.M., Tsench Yu.S. Aspekty tsifrovizatsii sistemy tekhnologiy i mashin [Aspects of digitalization of the system of technologies and machines]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N3(36). 40-45 (In Russian).
 25. Komkina T.A., Nikonova M.A., Dubinina M.G. Tekhniko-ekonomicheskyy analiz otdel'nykh vidov servisnykh robotov [Technical and economic analysis of certain types of service robots]. *Ekonomicheskyy analiz: teoriya i praktika*. 2020. Vol. 19. N10(505). 1965-1986 (In Russian).
 26. Makarova Yu.A., Dubinina M.G. Analiz tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley bespilotnykh transportnykh sredstv

- [Analysis of technical and economic indicators of unmanned vehicles]. *Konceptsiy*. 2018. N1(37). 28-44 (In Russian).
27. Abdullaev A.A. Tendentsiya razvitiya bespilotnykh letatel'nykh apparatov konvertoplanovogo tipa [The development trend of tiltrotor unmanned aerial vehicles]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2020. N63-1. 84-90 (In Russian).
 28. Dubinina M.G. Analiz tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley professional'nykh kvadrokoptero [Analysis of technical and economic indicators of professional quadcopters]. *Konceptsiy*. 2019. N1(38). 27-35 (In Russian).
 29. Zubarev Yu.N., Fomin D.S. Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov v sel'skom khozyaystve [Use of uncleaned aircraft in agriculture]. *Issledovaniya: teoriya i eksperiment*. 2019. N1. 48-50 (In Russian).
 30. Romanenkova M.S., Balabanov V.I. Primenenie tsifrovyykh tekhnologiy v rasteniyevodstve [Application of digital technologies in plant crops]. *Nauka v tsentral'noy Rossii*. 2020. N2(44). 74-82 (In Russian).
 31. Konoplin N.A., Morozov A.V., Popov A.I. Analiz fizicheskikh parametrov energoefektivnosti agroinzhenernykh sistem [Analysis of the physical parameters of energy efficiency of engineering systems]. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal*. 2018. N2. 47-53 (In Russian).
 32. Pashuta A.O. Nauchnye osnovy povysheniya effektivnosti zemel'nykh otnosheniy v sel'skom khozyaystve [Scientific basis for improving the efficiency of land relations in agriculture]. *Ekonomika, trud, upravlenie v sel'skom khozyaystve*. 2018. N3(36). 36-43 (In Russian).
 33. Utepkaliyeva K.M., Sabirova R.K., Dingazieva M.D., Tazhidanova A.R. Improvement of the economic efficiency of vegetable production in the agrarian sector. *Bulletin of Karaganda University. Economy Series*. 2019. Vol. 96. N4. 93-98 (In English).
 34. Nurgalieva A.A., Akhmetova D., Beysembina A., et al. Puti povysheniya ekonomicheskoy effektivnosti razvitiya sel'skogo khozyaystva [Ways to improve the economic efficiency of agricultural development]. *Veles*. 2020. N1-1(79). 47-51 (In Russian).
 35. Dadoboev A.T. Nekotorye aspekty sovershenstvovaniya ekonomicheskogo mekhanizma povysheniya effektivnosti sel'skogo khozyaystva [Some aspects of improvement concerned with economic mechanism serving elevation of agriculture effectiveness]. *Vestnik Tadzhikskogo gosudarstvennogo universiteta prava, biznesa i politiki. Seriya obshchestvennykh nauk*. 2018. N4(77). 68-75 (In Russian).
 36. Kitieva M.I., Bogatyreva A.I. Faktory povysheniya ekonomicheskoy effektivnosti proizvodstva v sel'skom khozyaystve [Factors for increasing the economic efficiency of production in agriculture]. *Zametki uchenogo*. 2021. N3-1. 180-183 (In Russian).
 37. Babaeva Z.Sh. Voprosy povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya ekonomicheskikh resursov v khode vosproizvodstvennogo protsessa v sel'skom khozyaystve [Issues of increasing the efficiency of using economic resources during the reproduction process in agriculture]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo*. 2019. N12(113). 949-956 (In Russian).
 38. Kray K.F., Khadzhieva M.I. Ekonomicheskaya effektivnost' vnedreniya innovatsionnykh tekhnologiy v sel'skoye khozyaystvo v epokhu skvoznoy tsifrovizatsii [Cost-effectiveness of the introduction of innovative technologies in agriculture in the era of end-to-end digitalization]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2020. N6(98). 155-164 (In Russian).
 39. Gandorfer M., Meyer-Aurich A. Economic Potential of Site-Specific Fertiliser Application and Harvest Management. *Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives*. 2017. 79-92 (In English).
 40. Ørum J.E., Kudsk P., Jensen P.K. Economics of Site-Specific And Variable-Dose Herbicide Application. *Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives*. 2017. 93-110 (In English).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Марченко Л.А. – общее научное руководство, формирование схемы расчетных исследований, анализ основных технико-экономических показателей, подготовка и доработка текста.

Смирнов И.Г. – анализ исследований по теме, оперативный анализ и графическое представление полученных результатов.

Курбанов Р.К. – работа с графическим материалом, анализ и обобщение данных литературы.

Спиридонов А.Ю. – уточнение методики расчетов, сравнительный анализ технико-экономических показателей, формирование общих выводов и редактирование.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Marchenko L.A. – general scientific guidance, computational scheme design, analysis of the main technical and economic indicators, manuscript preparation and revision.

Smirnov I.G. – analysis of the existing literature on the topic, operational analysis and graphical presentation of the results.

Kurbanov R.K. – work with graphic material, literature analysis.

Spiridonov A.Yu. – methodology refinement calculation, comparative analysis of technical and economic indicators, general conclusions and manuscript draft editing.

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

17.01.2022
02.03.2022

Технологические и физико-механические свойства задерненных почв

Анастасия Владимировна Миронова,

научный сотрудник,

e-mail: timchenko-anastasia93@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что деградация неиспользуемых сельскохозяйственных угодий наносит существенный ущерб аграрному производству: участки зарастают сорными растениями, образуется поверхностный задерненный слой, нарушается сложившийся микрорельеф, происходят самоуплотнение и закисление почвы, ухудшаются ее инфильтрационные свойства, проявляется водная эрозия. (*Цель исследования*) Определить технологические и физико-механические свойства задерненных почв Рязанской области, выбывших из активного землепользования в течение 2-6 лет (*Материалы и методы*) Исследовали параметры различных неиспользуемых почвенных участков Рязанской области: состав травостоя, толщину задерненного слоя почвы, степень ее задернения, плотность и влажность, инфильтрационные свойства. (*Результаты и обсуждение*) Установили, что с увеличением периода зарастания на неиспользуемом участке в течение 6 лет возрастает количество сорной растительности с преобладанием пырея собачьего (13 процентов) бодяка полевого (11 процентов), пырея ползучего (10 процентов), полевицы побегообразующей (9 процентов). Определили, что с увеличением периода зарастания участков от 2 до 6 лет происходит переуплотнение почвы, ее плотность возрастает с 1,32 до 1,56 грамма на кубический сантиметр, задерненный слой утолщается с 3 до 11 сантиметров, степень задернения возрастает с 13 до 44 граммов на кубический дециметр. Выявили, что коэффициент вариации степени задернения снижается с 21,0 до 5,1 процента, а коэффициент вариации толщины задерненного слоя – с 25,3 до 6,6 процента. (*Выводы*) Установили зависимость интенсивности инфильтрации почвы от степени ее задернения: даже при сильном увлажнении верхнего задерненного слоя (0-10 сантиметров), когда абсолютная влажность равна 45 процентам, в нижнем слое (20-30 сантиметров) этот показатель остается в пределах 20-25 процентов.

Ключевые слова: неиспользуемые почвенные участки, задерненность почвы, плотность почвы, степень задернения, влажность почвы.

Для цитирования: Миронова А.В. Технологические и физико-механические свойства задерненных почв // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №1. С. 63-68. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-63-68.

Technological and Physico-Mechanical Properties of Blackened Soils

Anastasiya V. Mironova,

researcher,

e-mail: timchenko-anastasia93@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The degradation of unused agricultural lands is noted to cause significant damage to agricultural production such as plot overgrowing with weeds, blackened surface layer emergence, the existing microrelief disturbance, soil self-compaction and acidification, soil infiltration properties deterioration, and water erosion. (*Research purpose*) The research aims to determine the technological and physical and mechanical properties of the blackened soils in the Ryazan region, being out of active use for 2-6 years. (*Materials and methods*) The parameters of various unused soil plots were studied in the Ryazan region: in particular, the composition of the herbage, the thickness of the blackened soil layer, the degree of soil blackening, its density and moisture, and infiltration properties. (*Results and discussion*) It was found that a 6-year increase in the period of overgrowth in an unused site leads to an increase in the amount of weeds. The most common species of many-year-old weeds are dog grass (*Elymus caninus* L.) with the occurrence of 13 percent, field grass (*Cirsium arvense* L.) with the occurrence of 11 percent, creeping wheatgrass (*Elitrigia repens* L.) with the occurrence of 10 percent, shoot-forming vole (*Agrostis stolonifera* L.) with the occurrence of 9 percent. It was determined that an increase in the period of plot overgrowing from 2 to 6 years results in the soil recompaction, an increase in its density from 1.32 to 1.56 grams per cubic centimeter, the blackened soil layer thickening from 3 to 11 centimeters,

an increase in the soil blackening degree from 13 to 44 grams per cubic decimetre. It was found that the coefficient of variation in the soil blackening degree decreases from 21.0 to 5.1 percent, and the coefficient of variation in the blackened soil layer thickness declines from 25.3 to 6.6 percent. (*Conclusions*) The dependence between the soil infiltration intensity and its blackening degree was established: even being waterlogged in the blackened upper layer (0-10 centimeters), with the absolute moisture of 45 percent, this indicator remains within 20-25 percent in the lower layer (20-30 centimeters).

Keywords: unused soil areas, soil blackening, soil density, soil blackening degree, soil moisture.

For citation: Mironova A.V. Tekhnologicheskie i fiziko-mekhanicheskie svoystva zadernennykh pochv [Technological and physico-mechanical properties of blackened soils]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N1. 63-68 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-63-68.

В сельском хозяйстве России имеется огромный потенциал земельных ресурсов, который с середины 90-х годов XX столетия используется недостаточно эффективно. Деградация неиспользуемых сельхозугодий стала одной из важнейших социально-экономических проблем, она наносит огромный ущерб продуктивному потенциалу земельного фонда России и создает угрозу экологической, экономической, продовольственной безопасности страны [1]. С течением времени на неиспользуемых почвенных участках проявляются различные негативные процессы. Они зарастают сорными растениями, образуется поверхностный задерненный слой, происходит самоуплотнение почвы, ухудшаются ее инфильтрационные свойства, проявляются процессы водной эрозии. Такие последствия наступают в результате естественных причин и хозяйственной деятельности человека. Вследствие физико-химической деградации почв отмечаются неблагоприятные изменения окислительно-восстановительного потенциала и кислотно-щелочного баланса, ухудшается содержание макро- и микроэлементов, происходит закисление почв. На неиспользуемых почвенных участках нарушается сложившийся микрорельеф, образуются кочки, количество и высота которых постепенно увеличиваются. Кочки преимущественно появляются весной, в результате перепада температур на локальных насыщенных влагой участках почвы [2-4].

Инфильтрация почвы зависит от ее гранулометрического состава, структурности, плотности, содержания органического вещества и задерненности. В тяжелых низкогумусированных почвах повышено содержание глинистых частиц с мелкими порами, что затрудняет инфильтрацию. Задерненные почвы с течением времени переуплотняются, инфильтрация в них ухудшается [5, 6].

Из утраченных 32,7 млн га продуктивных земель возможно вернуть в севообороты 12-15 млн га [7, 8]. Рекультивация остальных земель и возвращение их в активное землепользование экономически нецелесообразны, так как требуют огромных вложений. Неиспользуемые запущенные угодья характеризуются высокой засоренностью, задерненностью и плотностью почвы, затрудняющими работу традиционных

почвообрабатывающих машин. Для восстановления угодий в первую очередь необходимо измельчить дернину и обеспечить условия для ее разложения [9-12].

Для определения тактики обработки задерненных участков, выбора параметров рабочих органов необходимо знать физико-механические свойства почв [13]. В Рязанской области такие данные отсутствуют.

Цель исследования – определить технологические и физико-механические свойства задерненных почв Рязанской области, выбывших из активного землепользования в течение 2-6 лет.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. В 2019-2020 гг. были изучены изменения плотности, толщины задерненного слоя, степени задернения, инфильтрационных свойств почвы на четырех земельных участках Института семеноводства и агротехнологий – филиала ФНАЦ ВИМ (Рязанская обл.):

- A – пашня;
- B – земли, не используемые 2 года;
- C – земли, не используемые 4 года;
- D – земли, не используемые 6 лет.

Площадь каждого участка составляет 15 га, вид угодий – зарастающая пашня, рельеф имеет преимущественно равнинный характер, микрорельеф волнистый, почвы – дерново-подзолистые, среднесуглинистые, последняя возделываемая культура – озимая пшеница (2019 г.).

Изучали показатели технологических и физико-механических свойств неиспользуемых участков: среднее значение высоты травянистых растений, состав травостоя, плотность и влажность почвы, наличие и высоту кочек, толщину задерненного слоя и степень задернения, инфильтрационные свойства почв.

Для определения высоты травянистых растений использовали металлическую линейку и рулетку. Для измерения плотности почвы отбирали 30 почвенных образцов в соответствии с ГОСТ 20915-2011.

При исследовании процесса инфильтрации определяли абсолютную влажность (W_a) почвы в трех слоях: 0-10 см, 10-20 см, 20-30 см. Везде этот показатель был менее 10%. Впоследствии верхние слои почвы последовательно увлажняли методом искусственного дождевания до значений $W_a = 45\%$ [13]. Методика определения влажности почвенных слоев позволила

с моделировать условия осенней зяблевой вспашки, при которой атмосферная влага перемещается из верхних слоев почвы к нижним [14–17].

Для определения абсолютной влажности, которая характеризует общее содержание влаги в почве, использовали формулу:

$$\omega = \frac{m_{\text{в}}}{m_{\text{асп}}} \times 100\%, \quad (1)$$

где ω – абсолютная влажность почвы, %;

$m_{\text{в}}$ – масса почвы в естественном состоянии с наличием влаги, г;

$m_{\text{асп}}$ – масса абсолютно сухой почвы, г.

Задерненность почвы влияет на ее прочностные, деформационные, инфильтрационные, несущие свойства. Степень задернения определяли по ГОСТ 20915-2011 – как массу подземной части растений в единице объема почвы. На каждом массиве из пахотного горизонта брали 30 образцов задерненной почвы методом случайных выборок. Для этого образцы вырезали в виде куба с размером ребра 100 мм. Для снижения затрат времени на отделение подземной части растений от почвы каждый образец на несколько часов помещали в полиэтиленовый мешочек с водой. После отделения от почвы корешки высушивали до воздушно-сухого состояния и взвешивали.

Среднее значение степени задернения рассчитывали по формуле:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n}, \quad (2)$$

где M – среднее значение степени задернения;

l_i – значение степени задернения i -го образца;

n – количество образцов, шт.

Среднее квадратическое отклонение σ , г/дм³:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - M)^2}{n - 1}}, \quad (3)$$

где l_i – значение степени задернения i -го образца;

M – среднее значение степени задернения.

Коэффициент вариации V , %:

$$V = \frac{\sigma}{M} \cdot 100\% \quad (4)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. На землях, не используемых в течение 2 лет, высота травянистых растений в июле достигает 55–65 см, 4 лет – 70–80 см, 6 лет – 80–150 (рис. 1, таблица).

Среди травянистой растительности участка *A* преобладают: пырей ползучий (*Elitrigia repens* L.) – 70%, лебеда раскидистая (*Atriplex patula* L.) – 20%, тимopheевка луговая (*Phleum pratense* L.) – 10%.

На участке *B* наиболее часто встречаются: пырей ползучий – 45%, ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.) – 15%, тимopheевка луговая – 10%, бодяк полевой (*Cirsium arvense* L.) – 10%, полевика побегообразующая (*Agrostis stolonifera* L.) – 10%, клевер полевой (*Trifolium campestre* L.) – 5%, тмин обыкновенный (*Carum carvi* L.) – 5%.



Рис. 1. Растительность на не используемых участках: а – в течение 2 лет; б – в течение 4 лет; с – в течение 6 лет

Fig. 1. Vegetation of uncultivated plots: a – a plot uncultivated for 2 years, b – a plot uncultivated for 4 years and c – a plot uncultivated for 6 years

На участке *C* распространены: пырей ползучий – 27%, бодяк полевой – 16%, клевер полевой – 11%, осот полевой (*Sonchus arvensis* L.) – 10%, тимopheевка луговая – 9%, лебеда раскидистая – 8%, ежа сборная – 7%, полевика побегообразующая – 7%, полевика тонкая (*Agrostis capillaris* L.) – 5%.

На участке *D* видовое разнообразие возрастает: пырей собачий – 13%, бодяк полевой (*Cirsium arvense* L.) – 11%, пырей ползучий – 10%, полевика побегообразующая – 9%, тмин обыкновенный – 8%, полевика тонкая – 6%, хвощ полевой (*Equisetum arvense* L.) – 5%, клен остролистный (*Acer platanoides* L.) – 5%, береза бородавчатая (*Betula pendula* L.) – 5%, лебеда раскидистая – 4%, клевер полевой – 4%, амарант колосистый (*Amaranthus retroflexus* L.) – 4%; осот полевой – 4%, ежа сборная – 3%, тимopheевка луговая – 3%, ромашка лекарственная (*Matricaria chamomilla* L.) – 3%, луговик дернистый (*Deschampsia cespitosa* L.) – 3% (рис. 2).

С течением времени под воздействием осадков, перемещающихся машин, людей, животных неиспользуемые почвенные участки уплотняются. На плотность почвы влияют также гранулометрический состав, структура и содержание органических веществ.

С увеличением периода зарастания участков плотность почвы возрастает с 1,20 г/см³ до 1,56 г/см³, что негативно сказывается на ее пористости, инфильтрационных свойствах, аэрации.

Интенсивность инфильтрации зависит от толщины задерненного слоя почвы и степени ее задернения: чем они больше, тем меньше влаги поступает в нижние пахотные слои. Частично влага остается на поверхности наиболее водостойкого задерненного слоя, а частично проникает в него. Даже при сильном увлажнении верхнего задерненного слоя (0–10 см), когда абсолютная влажность равна 45%, в нижнем слое (20–30 см) этот показатель остается в пределах 20–25% (рис. 2).

Инфильтрацию задерненной почвы исследовали в августе 2020 г. по известной методике [14]. Слабозадерненные и рыхлые почвы насыщаются влагой интенсивнее. С повышением влажности поверхностного слоя до $W_a=40\%$ начинает сильнее насыщаться влагой третий слой (20–30 см), что объясняется наличием

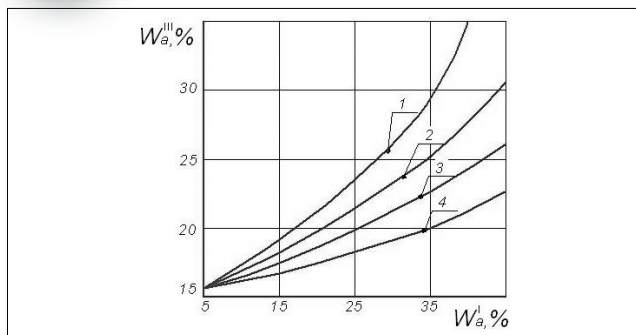


Рис. 2. Зависимость абсолютной влажности W_a^{III} слоя почвы (20-30 см) от W_a^I в верхнем слое (0-10 см):

1 – пахотная; 2 – 2 года без обработки; 3 – 4 года без обработки; 4 – 6 лет без обработки

Fig. 2. Dependence between the absolute moisture contents W_a^{III} of the soil layer (20-30 cm) and W_a^I of the upper layer (0-10 cm): 1 – arable land; 2 – 2 years without cultivation; 3 – 4 years without cultivation; 4 – 6 years without cultivation

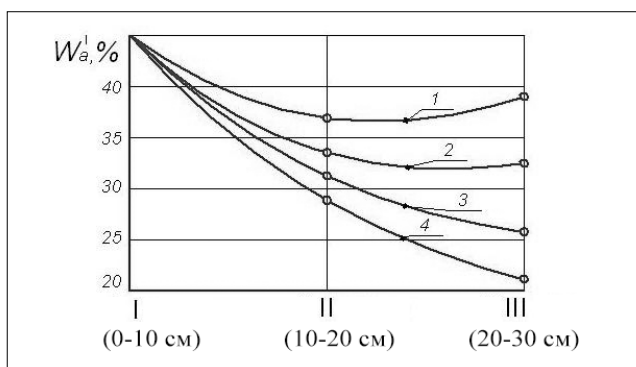


Рис. 3. Изменение влажности почвы по слоям в зависимости от продолжительности периода без обработки:

1 – пахотная; 2 – 2 года; 3 – 4 года; 4 – 6 лет

Fig. 3. Changes in soil moisture by layers dependent on the time period without cultivation: 1 – arable land; 2 – 2 years; 3 – 4 years; 4 – 6 years

ем под ним «подшвы», уплотненного подпахотного горизонта (рис. 3). С этого момента выравнивание значений абсолютной влажности почвы идет сверху



Рис. 4. Определение толщины задерненного слоя

Fig. 4. Measuring the blackened layer thickness

и снизу к середине, от поверхностного и третьего почвенного слоев ко второму. Анализ показывает, что с целью минимизации затрат энергии на трение, вспашку малосвязных и рыхлых тяжелосуглинистых почв рационально проводить при их абсолютной влажности в пределах 10-25%.

На полях, не используемых в течение 2 лет, сте-

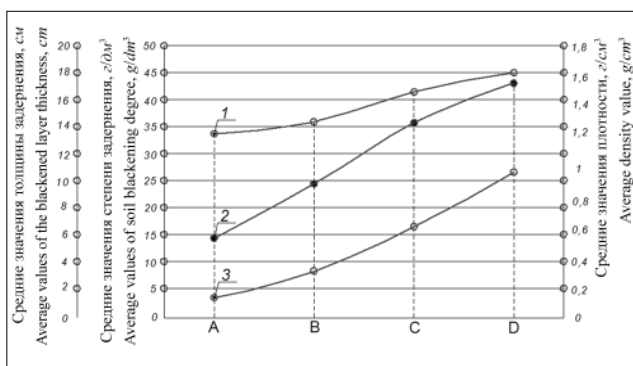


Рис. 5. Взаимосвязь плотности почвы, толщины задерненного слоя и степени задернения: 1 – степень задернения; 2 – плотность почвы; 3 – толщина задерненного слоя

Fig. 5. The interdependence between the average values of the soil density, the blackened layer thickness and the soil blackening degree: 1 – soil blackening degree; 2 – soil density; 3 – blackened layer thickness

пень задернения находится в пределах 12-22 г/дм³ (таблица). Через 4 года она возрастает до 23-42 г/дм³, через 6 лет – до 42-46 г/дм³. Равномерность распределения дернины по поверхности поля также повышается: коэффициент вариации снижается с 21,0 до 5,1%.

Со временем толщина задерненного слоя увеличи-

Таблица	Состояние исследуемых участков / STATE OF SOIL PLOTS				Table
Параметры / Name of the parameter	A*	B*	C*	D*	
Высота травянистых растений, см / Average height of herbaceous plants, cm	15-25	55-65	70-80	80-150	
Разнообразие видов в травостое, шт. / Diversity of species in herbage, pcs.	3	8	10	17	
Плотность почвы, г/см ³ / Soil density, g/cm ³	1,2-1,3	1,3-1,4	1,4-1,5	1,5-1,6	
Влажность почвы, % / Soil moisture, %	27-35	21-25	15-20	12-14	
Наличие кочек, шт./0,01 га / The presence of hummocks, pcs/0.01 ha	1-2	2-5	5-12	13-16	
Высота кочек, см / Height of bumps, cm	10-15	15-20	20-25	25-30	
Толщина задерненного слоя, см / The blackened layer thickness, cm	–	3-4	5-8	8-12	
Степень задернения почвы, г/дм ³ / Degree of soil blackening, g/dm ³	–	12-22	23-42	42-46	
Наличие кустарно-древесной растительности, шт./0,01 га / The presence of shrubs, pcs/0.01 ha	–	–	1-2	3-5	
*A – пахотная; B – 2 года без обработки; C – 4 года без обработки; D – 6 лет без обработки					
*A – arable land; B – a plot uncultivated for 2 years; C – a plot uncultivated for 4 years; D – a plot uncultivated for 6 years					

вается (рис. 4). Если на участке В среднее значение составило 3,4 см, то на участке D этот показатель достигал 10,6 см (таблица). Равномерность распределения толщины задерненного слоя с течением времени повышается: коэффициент вариации снижается с 25,3 до 6,6%.

Плотность почвы и степень задернения – это два взаимосвязанных показателя. С увеличением периода застарания земельных угодий их значения возрастают (рис. 5).

Выводы. С увеличением периода застарания участков от 2 до 6 лет поверхностный слой (0-10 см) среднесуглинистой почвы переуплотняется, плотность возрастает с 1,32 до 1,56 г/см³.

Процесс задернения почвы интенсифицируется. Толщина задерненного слоя увеличивается с 3 до 11 см, степень задернения возрастает с 13 до 44 г/дм³. Равномерность распределения толщины задерненного слоя с течением времени повышается. Коэффициент вариации снижается с 25,3 до 6,6%.

С образованием задерненного слоя почвы нарушается инфильтрационная способность почвенных участков, поэтому в нижние пахотные слои поступает меньше влаги. Даже при сильном увлажнении верхнего задерненного слоя (0-10 см) до абсолютной влажности 45% в нижнем слое (20-30 см) этот показатель остается в пределах 20-25%

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мазитов Н.К., Сорокин Н.Т., Шарафиев Л.З., Новиков Н.Н., Лобачевский Я.П. и др. Основы сохранения и повышения плодородия почвы – техника и технология ее обработки // *Проблемы механизации агрохимического обеспечения сельского хозяйства*. 2017. N11. С. 41-52.
2. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сизов О.А., Ахалая Б.Х. Агротехническое и экологическое обоснование эффективности (целесообразности) использования биоактивных технологических способов обработки почвы в системе машинных технологий для обработки залежей и запущенных угодий // Система технологий и машин для инновационного развития АПК России: Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 145-летию со дня рождения основоположника земледельческой механики академика В.П. Горячкина. Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства. Ч. 1. М.: ВИМ. 2013. С. 127-130.
3. Тоштемиев С.Ж., Раззаков Т.Х. Физико-механические свойства почв полей с неравномерным рельефом // *Молодой ученый*. 2017. N17(151). 86-87.
4. Миронова А.В. Обработка задерненных и деградированных почв // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N2(35). С. 57-62.
5. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат. 1986. 416 с.
6. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сизов О.А. Технологии и технические средства для восстановления и реабилитации неиспользуемых и деградированных сельскохозяйственных угодий // *Техника и оборудование для села*. 2010. N2. С. 12-14.
7. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сизов О.А. Опыт использования биоактивных технологических способов обработки почвы в системе машинных технологий для обработки залежей и запущенных угодий // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2014. N1(99). С. 132-138.
8. Щукин С.В., Голубева А.И., Дорохова В.И., Дугин А.Н. Рекомендации по вовлечению в хозяйственный оборот неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения // *Вестник АПК Верхневолжья*. 2018. N1(41). С. 87-98.
9. Желясков А.Л., Сетуридзе Д.Э. Особенности организации сельскохозяйственных угодий при вовлечении в оборот неиспользуемых и невостребованных земель // *Успехи современной науки и образования*. 2017. N1(5). С. 206-212.
10. Старовойтов С.И., Ахалая Б.Х., Миронова А.В. Конструктивные особенности рабочих органов для уплотнения и выравнивания поверхности почвы // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N4(37). С. 51-56.
11. Ковалев Н.Г., Хайлис Г.А., Ковалев М.М. Сельскохозяйственные материалы (виды, состав, свойства). М.: Родник. 1998. 208 с.
12. Дмитриев С.Ю., Дмитриев Ю.П., Ценч Ю.С. Комплекс машин для обработки залежных земель // *Вестник ВИАХС*. 2018. N2(31). С. 40-47.
13. Лобачевский Я.П. Прочностные и деформационные свойства связных задерненных почв // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2011. N5(3). С. 18-20.
14. Mudarisov S.G., Gabitov I.I., Lobachevsky Y.P., Mazitov N.K., Rakhimov R.S., Khamaletdinov R.R., Rakhimov I.R., Farkhutdinov I.M., Mukhametdinov A.M., Gareev R.T. Modeling the technological process of tillage. *Soil & Tillage Research*. 2019. N190. С. 70-77.
15. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И. Физические аспекты суглинистой почвы. Брянск: Брянский ГАУ. 2015. 92 с.
16. Миронова А.В., Лискин И.В. Основы восстановления плодородия почв целинных и залежных земель // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2019. N4(33). С. 62-69.
17. Коновалова А.А., Хайдапова Д.Д. Оценка структурного состояния почв методами физико-механики // *Вестник Томского государственного университета*. 2011. N1(13). С. 11-18.

REFERENCES

1. Mazitov N.K., Sorokin N.T., Sharafiev L.Z., Novikov N.N., Lobachevskiy Ya.P., et al. Osnovy sokhraneniya i povyshe- niya plodorodiya pochvy – tekhnika i tekhnologiya ee obra- botki [Tillage equipment and techniques as the basis for con- servation and enrichment of soil]. *Problemy mekhanizatsii agrokhimicheskogo obespecheniya sel'skogo khozyaystva*. 2017. N11. 41-52 (In Russian).
2. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Sizov O.A., Akhalaya B.Kh. Agrotekhnicheskoe i ekologicheskoe obosnovanie effektivno- sti (tselesoobraznosti) ispol'zovaniya bioaktivnykh tekhnolog- icheskih sposobov obrabotki pochvy v sisteme mashinnykh tekhnologiy dlya obrabotki zalezhey i zapushchennykh ugo- diy [Agrotechnical and ecological substantiation of the effec- tiveness (feasibility) of using bioactive technological tillage methods of in the system of machine technologies for process- ing fallows and neglected lands]. *Sistema tekhnologiy i mash- in dlya innovatsionnogo razvitiya APK Rossii: Sbornik nauchnykh dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konfer- entsii, posvyashchennoy 145-letiyu so dnya rozhdeniya osnovo- polozhnika zemledel'cheskoy mekhaniki akademika V.P. Go- ryachkina. Part 1. Moscow: VIM. 2013. 127-130 (In Russian).*
3. Toshtemirov S.Zh., Razzakov T.Kh. Fiziko-mekhanicheskie svoystva pochv poley s neravnomernym rel'efom [Physical and mechanical properties of soils in uneven relief fields]. *Molodoy uchenyy*. 2017. N17(151). 86-87 (In Russian).
4. Mironova A.V. Obrabotka zadernelykh i degradirovannykh pochv [Processing of turfed and degraded soils]. *Elektrotekh- nologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N2(35). 57-62 (In Russian).
5. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv [Methods for studying the phys- ical properties of soils]. Moscow: Agropromizdat. 1986. 416 (In Russian).
6. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Sizov O.A. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya vosstanovleniya i reabilitatsii neispol'zuemykh i degradirovannykh sel'khozugodiy [The technological and technique means for recreation and reha- bilitation of idle and degraded agricultural lands]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2010. N2. 12-14 (In Russian).
7. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Sizov O.A. Opyt is- pol'zovaniya bioaktivnykh tekhnologicheskikh sposobov obrabotki pochvy v sisteme mashinnykh tekhnologiy dlya obrabotki zalezhey i zapushchennykh ugodiy [Experience of using bioactive technological methods of soil cultivation in the system of machine technologies for cultivating fallows and neglected lands]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'sk- ogo khozyaystva*. 2014. N1(99). 132-138 (In Russian).
8. Shchukin S.V., Golubeva A.I., Dorokhova V.I., Dugin A.N. Rekomendatsii po вовлечению в khozyaystvennyy oborot neispol'zuemykh zemel' sel'skokhozyaystvennogo nazna- cheniya [Recommendation for involving idle agricultural lands into farm use]. *Vestnik APK Verkhnevolzh'ya*. 2018. N1(41). 87-98 (In Russian).
9. Zhelyaskov A.L., Seturidze D.E. Osobennosti organizatsii sel'skokhozyaystvennykh ugodiy pri вовлечении в oborot neispol'zuemykh i nevostrebovannykh zemel' [Agricultural land arrangement when bringing under cultivation unused and unclaimed lands]. *Uspekhi sovremennoy nauki i obra- zovaniya*. 2017. N1(5). 206-212 (In Russian).
10. Starovoytov S.I., Akhalaya B.Kh., Mironova A.V. Konstruk- tivnye osobennosti rabochikh organov dlya uplotneniya i vyravnivaniya poverkhnosti pochvy [Structural features of working tools for soil surface compaction and levelling]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N4(37). 51-56 (In Russian).
11. Kovalev N.G., Khaylis G.A., Kovalev M.M. Sel'skokhozyay- stvennyye materialy (vidy, sostav, svoystva) [Agricultural ma- terials (types, composition, properties)]. Moscow: Rodnik. 1998. 208 (In Russian).
12. Dmitriev S.Yu., Dmitriev Yu.P., Tsench Yu.S. Kompleks mashin dlya obrabotki zaleznykh zemel' [Complex of ma- chines for processing fallow lands]. *Vestnik VIESKH*. 2018. N2(31). 40-47 (In Russian).
13. Lobachevskiy Ya.P. Prochnostnye i deformatsionnye svoyst- va svyaznykh zadernennykh pochv [Strength and deforma- tion properties of cohesive soddy soils]. *Sel'skokhozyaystven- nye mashiny i tekhnologii*. 2011. N5(3). 18-20 (In Russian).
14. Mudarisov S.G., Gabitov I.I., Lobachevskiy Y.P., et al. Mode- ling the technological process of tillage. *Soil & Tillage Research*. 2019. N190. 70-77 (In English).
15. Lobachevskiy Ya.P., Starovoytov S.I. Fizicheskie aspekty suglinistoy pochvy [Physical aspects of loamy soil]. Bryansk: Bryanskiy GAU. 2015. 92 (In Russian).
16. Mironova A.V., Liskin I.V. Osnovy vosstanovleniya plodoro- diya pochv tselinnykh i zaleznykh zemel' [Bases for resto- ration of fertility soils for virgin and fallow lands]. *Innova- tsii v sel'skom khozyaystve*. 2019. N4(33). 62-69 (In Russian).
17. Konovalova A.A., Khaydapova D.D. Otsenka strukturnogo sostoyaniya pochv metodami fiziko-mekhaniki [Assessment of soil structural state by methods of physical mechanics]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011. N1(13). 11-18. (In Russian).

Конфликт интересов

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

Conflict of interest

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

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

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

14.01.2022
17.02.2022

Методика определения потерь зерна за жаткой и молотилкой комбайна при уборке сои

Александр Васильевич Липкань,
старший научный сотрудник,
e-mail: lav-blg@mail.ru;
Алексей Алексеевич Кувшинов,
кандидат технических наук,
научный сотрудник,
e-mail: pzrk_igla1992@mail.ru;

Вячеслав Сергеевич Усанов,
кандидат сельскохозяйственных наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: usanov-1989@bk.ru;
Наталья Олеговна Смолянинова,
младший научный сотрудник,
e-mail: maximnat2009@mail.ru;
Владимир Александрович Сахаров,
старший научный сотрудник,
e-mail: sakharov.v.a@mail.ru

Федеральный научный центр Всероссийский научно-исследовательский институт сои, г. Благовещенск, Амурская область, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что в условиях переувлажнения почвы не всегда подходят существующие методики оценки прямых потерь зерна при уборке сои с помощью жаток низкого среза. (*Цель исследования*) Усовершенствовать методику оценки потерь зерна сои при уборке урожая в условиях переувлажнения почвы, с возможностью их разделения в процессе отбора проб за жаткой и молотилкой комбайна. (*Материалы и методы*) В основе методического подхода учитывали: влияние неоднородности посевов; принцип достаточной точности определения потерь независимо от почвенных условий при уборке; доступность, простоту и минимальную трудоемкость метода; возможность дифференциации потерь зерна за жаткой для определения основных их источников. Выделили три основные зоны потерь и рассмотрели характеристики источников их возникновения. Представили схему наложения квадратных металлических рамок с длиной стороны 1 метр на посевах и на убранном участке поля после прохода комбайна. Описали последовательность проведения лабораторно-полевой оценки и формулы определения естественных потерь зерна, потерь за жаткой и их составляющих, потерь сои за молотилкой и суммарных потерь за комбайном. (*Результаты и обсуждение*) Разработали методику оценки потерь зерна сои и апробировали ее в ходе испытаний комбайна Case IH AF6140 с жаткой New Holland 740CF-30DD(SF). Установили, что данный комбайн соответствует всем нормам потерь зерна сои при скорости 6 километров в час. Выявили, что наибольшую долю составляют потери за жаткой – свободным зерном. Для дополнительного снижения потерь предложили регулировать число оборотов моточива. (*Выводы*) Разработали методический подход и алгоритм оценки потерь зерна с использованием жестких металлических рамок, который позволяет с высокой достоверностью, оперативностью и с меньшей трудоемкостью учитывать потери и рассчитывать фактические и допустимые (от биологической урожайности) значения по уровню удельных и относительных потерь зерна сои за жаткой и зерноуборочным комбайном в целом.

Ключевые слова: уборка сои, зерноуборочный комбайн, соевая жатка, урожайность, учет потерь зерна, переувлажнение почвы, рамка-пробоотборник.

Для цитирования: Липкань А.В., Кувшинов А.А., Усанов В.С., Смолянинова Н.О., Сахаров В.А. Методика определения потерь зерна за жаткой и молотилкой комбайна при уборке сои // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №1. С. 69-77. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-69-77.

Method for Determining Grain Losses Behind the Combine Header and Thresher During Soybean Harvesting

Alexander V. Lipkan,
senior researcher, e-mail: lav-blg@mail.ru;
Alexey A. Kuvshinov,
Ph.D.(Eng.), researcher, e-mail: pzrk_igla1992@mail.ru;
Vyacheslav S. Usanov,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: usanov-1989@bk.ru;

Natalya O. Smolyaninova,
junior researcher,
e-mail: maximnat2009@mail.ru;
Vladimir A. Sakharov,
senior researcher,
e-mail: sakharov.v.a@mail.ru

Federal Research Center "All-Russian Scientific Research Institute of Soybean", Blagoveshchensk, Russian Federation

Abstract. It was noted that in waterlogged soil conditions, the existing methods for assessing field grain losses when harvesting soybeans using low-cut headers are not always suitable. (*Research purpose*) To improve the methodology for assessing soybean losses during harvesting in the waterlogged soil conditions, using the possibility of sampling them separately behind the header and thresher of the combine. (*Materials and methods*) The methodological approach was based on: the impact of crop heterogeneity; the principle of adequate accuracy in loss assessment, regardless of soil conditions during harvesting; accessibility, simplicity and minimal labor intensity of the method; the possibility of differentiating grain losses behind the header to identify their main sources. Three main loss zones were identified and the characteristics of their sources were considered. The authors presented a scheme for applying square metal frames with a 1-meter side length on crops and on a harvested field area after the passage of the combine. The authors described the sequence of laboratory and field assessment and formulae for determining natural grain losses, losses behind the header and their types, soybean losses behind the thresher and total losses behind the combine. (*Results and discussion*) A methodology for soybean loss assessment was developed and tested during the trial of the Case IH AF6140 combine with a New Holland 740CF-30DD(SF) header. It was found out that this combine meets all the norms for soybean grain losses at a combine speed of 6 kilometers per hour. Loose grains were revealed to be the largest share of losses behind the header. To further mitigate losses, it was proposed to control the number of reel revolutions. (*Conclusions*) We have developed a technical approach and an algorithm for grain loss assessment with the use of rigid metal frames, which ensures high reliability, efficiency and lower labor intensity when considering losses and calculating actual and permissible (from biological yield) values for the specific and relative soybean losses behind a header and combine harvester as a whole.

Keywords: soybean harvesting, combine harvester, soybean header, yield, grain losses, soil waterlogging, sampling frame.

For citation: Lipkan' A.V., Kuvshinov A.A., Usanov V.S., Smolyaninova N.O., Sakharov V.A. Metodika opredeleniya poter' zerna za zhatkoy i molotilkoy kombayna pri uborke soi [Method for determining grain losses behind the combine header and thresher during soybean harvesting]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N1. 69-77 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-69-77.

В основе оценки качества работы зерноуборочных комбайнов, используемых на уборке сои, лежит определение механических (технических) и косвенных потерь зерна. Прямые потери и травмирование урожая могут быть вызваны конструктивными особенностями жатки и молотилки, нарушением режимов их работы и оптимальных регулировок. Настройка зерноуборочных комбайнов и жаток в конкретных условиях уборки сои минимизирует механические потери зерна сои и повышает его качество [1-4].

Необходимость в определении прямых потерь зерна сои из-за морфологических особенностей сорта, связанных в первую очередь с низким расположением бобов на стебле растения, проявляется при испытаниях технологий и техники (жаток низкого среза) на машиноиспытательных станциях, в научно-исследовательских учреждениях, а также в опытных селекционно-семеноводческих центрах, растениеводческих хозяйствах. Совершенствование методов учета и средств дифференцированного определения потерь стало одной из важных задач повышения эффективности уборочного процесса [1].

Параметры потерь за комбайном на уборке сои отличаются от требований ГОСТ 28301-2015 и нормируются относительно биологической урожайности на момент уборки [1]:

- за жаткой несрезанными бобами – не более 1,5%;
- за жаткой свободным зерном, срезанными и опав-

шими бобами – не более 1,5%;

- за молотилкой – не более 1,5%;

- из-за разгерметизации комбайна – не более 0,5%.

Общие потери урожайности за комбайном при уборке сои не должны превышать 5%.

Потери за молотилкой большей частью оптимизированы по параметрам и режимам молотильно-сепарирующего устройства, в том числе при уборке сои, и укладываются в нормативные 1,5% при рекомендуемых рабочих скоростях. А составляющие потерь за жаткой на уборке сои в зависимости от источников их формирования (от работы режущего аппарата или мотовила) изучены мало.

Рядом авторов предложены устройства для учета потерь зерна за зерноуборочным комбайном с высокой достоверностью, при снижении трудоемкости процесса, с возможностью их поэтапного разделения – за жаткой и молотильно-сепарирующим устройством комбайна [5, 6]. Разработан порядок расчета параметров контрольного участка при определении потерь зерна за жаткой и молотилкой, который учитывает конструктивные и кинематические параметры зерноуборочного комбайна [7]. Известен методический подход учета потерь зерна за комбайнами, сглаживающий влияние условий уборки [8]. Полученные результаты позволяют повысить точность прогноза потерь зерна при уборке зерноуборочными комбайнами и обеспечить эффективность их использования в сельскохозяйственном предприятии. Выявлены ос-

новые локации потерь зерна при раздельной уборке и при прямом комбайнировании: жатвенная (35-65%) и молотильная (65-35%) части комбайна. Анализ технологического процесса работы жатвенной части позволил выявить наиболее перспективные пути уменьшения потерь зерна при первичном машинном воздействии [9]. Представлены результаты моделирования потерь зерна пшеницы при комбайновой уборке на основе разработанной компьютерной модели, которая учитывает различные технологии уборки, варианты нагрузки на зерноуборочный комбайн, урожайность зерна и соотношение зерна и соломы [10]. В результате анализа модели для прогнозирования потерь сои за жаткой проведены эксперименты, показывающие, что общее количество потерь зерна во время уборки с использованием соевой жатки, установленной на гусеничном зерноуборочном комбайне, составляет 5,46% [11]. Известны средства, позволяющие значительно сократить время настройки основных регулировок комбайна и оперативно определить потери зерна за комбайнами во время уборки [12]. За рубежом ученые ведут работы по оценке качества механической уборки сои с использованием зерноуборочных комбайнов с различными жатками и на разных скоростях движения с помощью статистического контроля процесса уборки [13-17].

Несмотря на продолжающееся совершенствование средств для отбора проб за комбайном и работу по адаптированию методических подходов, остается нерешенным вопрос об адекватной оценке потерь зерна сои и совершенствовании метода отбора проб за жаткой и комбайном при уборке в условиях непосредственного контакта жатки с поверхностью поля, почва которого переувлажнена.

Наиболее предпочтителен показатель общих потерь за комбайном, определяемый посредством рамки из шпагата по всей ширине захвата жатки (ГОСТ 28301-2015). Он учитывает все потери – за жаткой и молотилкой. Если общие потери находятся в пределах нормы, то другие показатели можно не определять.

В реальных условиях избыточного увлажнения почвы в дальневосточном регионе возникают практические трудности при решении задачи по обеспечению полноты сбора потерь [18]. Невозможно достоверно провести учет по всей ширине захвата жатки из-за следов движителя комбайна. Этому препятствует пробуксовка движителей или наличие свободной воды в колесе.

Методики с применением пробоотборников, устанавливаемых как до прохода комбайна, так и во время работы в ручном или автоматическом режимах, также практически неприменимы при уборке сои жатками низкого среза, режущий аппарат которых копирует через опорные башмаки рельеф поверхности поля [19]. При движении комбайна опирающиеся на почву по всей ширине жатки опорные башмаки приведут

к смещению и деформации пробоотборников, что исключает полноту сбора потерь [20].

В данных методиках по-разному определяется понятие урожайности при оценке массовой доли потерь зерна. Так, в стандартизированной методике по ГОСТ 28301-2015 фактическая урожайность при прямом комбайнировании приравнивается к бункерной по результатам взвешивания бункерного зерна без сорной примеси, но с учетом всех видов потерь зерна за комбайном. Практически она равняется биологической урожайности, вычисляемой по массе зерна, выделенного из снопа. А в методике, рекомендуемой М.Е. Чаплыгиным, массовая доля потерь оценивается по отношению к бункерной урожайности, определяемой без сорной примеси [17].

Таким образом, существующие методики не всегда подходят при уборке сои, осуществляемой с использованием жаток низкого среза и проходящей нередко в условиях переувлажнения почвы, что свойственно регионам Дальнего Востока. Поэтому для оценки потерь зерна необходимо усовершенствовать методику в плане размеров, числа и мест наложения рамок, способа определения урожайности (биологической или бункерной) при оценке массовой доли потерь за жаткой, молотилкой и за комбайном в целом.

Цель исследования – усовершенствовать методику оценки потерь зерна сои, допускаемых зерноуборочными комбайнами в процессе уборки урожая в экстремальных условиях переувлажнения почвы, с возможностью их разделения в ходе отбора проб за жаткой и молотилкой комбайна.

Материалы и методы. Предлагаются следующие исходные методические положения:

- урожайность, как и потери на зачетном участке, необходимо проверять в 3-6 местах – как по ширине захвата жатки, так и по ходу движения комбайна – и усреднять, чтобы учесть влияние на величину потерь неоднородности посевов и, соответственно, подачи зерно-соломистой массы в комбайн;

- исключить влияние неопределенности потерь по следу комбайна на оценку потерь за жаткой и за комбайном в целом, то есть гарантировать достаточную точность независимо от почвенных условий при уборке;

- обеспечить доступность, простоту и минимальную трудоемкость метода;

- выявить возможность дифференциации потерь зерна сои за жаткой для определения основных их источников (режущий аппарат и мотовило) с целью корректировки ее технологических регулировок и рабочей скорости комбайна.

Необходимо отметить важность определения источника потерь за жаткой перед проведением регулировки рабочих органов жатки и молотилки комбайна.

Оценка показателей потерь за комбайном на полосе прохода без учета источников их возникновения (либо по причинам, предшествующим уборке, либо

по техническим недочетам, относящимся к жатке или молотилке) может стать причиной ненужной или неправильной регулировки.

Выделим три основные зоны потерь зерна:

$$\Delta Y_{\text{общ}} = \Delta Y_o + \Delta Y_{\text{ж}} + \Delta Y_{\text{м}}, \quad (1)$$

где $\Delta Y_{\text{общ}}$ – общие потери на поле после прохода комбайна, т/га;

ΔY_o – потери перед уборкой урожая (от самоосыпания), т/га;

$\Delta Y_{\text{ж}}$ – потери за жаткой, т/га;

$\Delta Y_{\text{м}}$ – потери за молотилкой, т/га.

Характеристики потерь зерна сои в зависимости от источников их возникновения:

- потери перед уборкой урожая вызваны естественным осыпанием бобов и зерен сои из-за ветра и других неблагоприятных факторов. Они зависят от сорта, влажности соломы и зерна, срока уборки. Современный комбайн не может собрать это зерно;

- потери зерна сои за жаткой образуются из-за слишком высокого среза (от несреза), осыпания под действием мотвила (очесанными бобами и свободным зерном), среза части боба сои (срезанными, опавшими бобами);

- потери зерна за молотилкой комбайна могут стать следствием разгерметизации комбайна через неплотности, неправильной регулировки молотилки.

В целом уровень общих технических потерь зерна за зерноуборочным комбайном складывается из потерь за жаткой и молотилкой.

Общие потери сои за комбайном допускаются не более 5%, в то время как для зерновых культур по ГОСТ 28301-2015 они равны 3%. Разница объясняется более мягкими требованиями к работе жаток, так как большинство из них не адаптированы к морфологическим особенностям растений сои и к условиям почвенного переувлажнения. Поэтому актуальны испытания и оценка качества работы жаток низкого среза.

В разработанной методике предусмотрена последовательность проведения лабораторно-полевой оценки при испытаниях жаток и комбайнов:

- предварительно обкатать жатку и отрегулировать рабочие органы;

- настроить измельчитель-разбрасыватель комбайна для укладки соломы и половы в валок;

- для сбора и подсчета потерь за жаткой с 1 м² на убранном участке поля применяют жесткие металлические рамки квадратной формы (сторона квадрата 1 м), изготовленные из прутков диаметром 8-10 мм. Их укладывают после прохода комбайна по ширине участка на стерню сои в случайном порядке с обеих сторон комбайна вне ширины колеи, то есть на левой L и правой R полосах, свободных от соломы и половы, а также на центральной полосе C в пределах ширины корпуса молотилки (рисунк);

- по ходу движения комбайна рамки укладывают

в три ряда, то есть в трехкратной повторности. Длина учетной делянки должна быть не менее 50-60 м;

- при заходе комбайна в посев сои по ходу движения комбайна отрезается слева полоса U неубранной сои не менее 3 м шириной вдоль всей длины учетной делянки для определения биологической урожайности и потерь от самоосыпания путем наложения рамки по центру отрезанной в ходе прохода полосы U слева и/или справа, напротив рядов положения рамок для определения потерь на убранном участке поля. Допускается определять биологическую урожайность и потери от самоосыпания в ходе эксплуатационно-технологической оценки только справа от рабочего прохода комбайна, размещая жесткую рамку на расстоянии не менее 1 м от края убранного участка в створе (на одной линии) с рядами определения потерь, то есть в трехкратной повторности;

- для агротехнической оценки после прохода учетной делянки комбайн останавливают в полосе поперечного прокоса на расстоянии не менее 10 м после выхода жатки из соевого массива и промолачивают оставшуюся в комбайне массу в течение 30 с, выгружают зерно из бункера, взвешивая его с погрешностью не более 1%;

- после прохода комбайна с поверхности почвы зерно с каждого ряда рамок собирают отдельно за жаткой, дифференцируя сбор потерь зерна за жаткой в мешочки с бирками на потери от несреза, очесанными мотвилем бобами и свободным зерном, срезанными, опавшими бобами, а также за молотилкой.

- потери зерна за молотилкой рассчитывают, сравнивая массу зерна, собранного с суммарной площади рамок при оценке биологической урожайности на корню, с массой аналогично собранного зерна в центральной полосе C ;

- рамки с отсутствием потерь за жаткой включаются в суммарную площадь рамок;

- потери зерна за жаткой от несреза допускается определять по массе зерна, собранного, в том числе, с площади рамок для оценки потерь за молотилкой комбайна на центральной полосе C после того, как площадь в пределах рамки будет освобождена от соломы;

- потери зерна за комбайном, жаткой и молотилкой рассчитывают по нижеприведенным формулам.

1. Определение потерь от самоосыпания

Эти потери зависят от вида культуры, сорта, влажности соломы и зерна, срока уборки.

Согласно стандартной методике, на поле вдоль прокоса опытного участка выделяют 10 площадок, накладывая рамки так, чтобы ряды растений проходили параллельно сторонам рамки (рисунк).

Естественные потери определяют внутри рамки на каждой площадке методом сбора осыпавшегося зерна на земле (погрешность $\pm 0,1$ г). Дополнительно в пределах площадок измеряют высоту расположения нижнего боба от уровня поверхности почвы (погрешность ± 1 см).

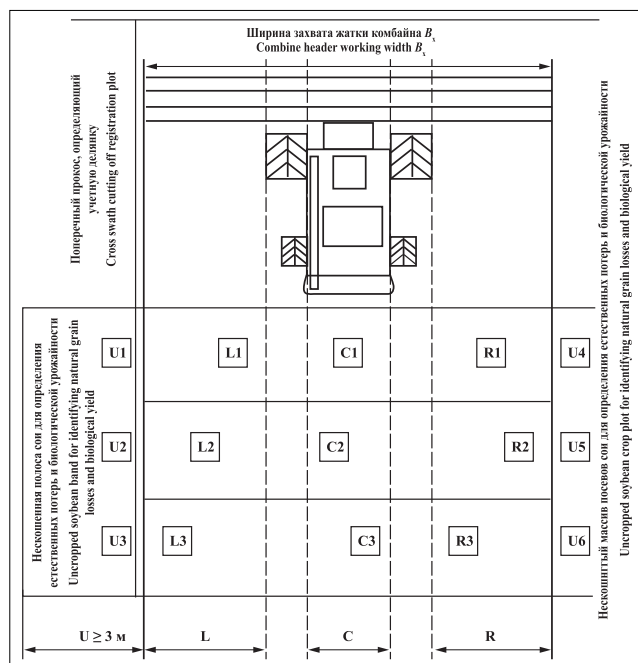


Рис. Схема наложения металлических рамок на посевах сои и на убранном участке поля после прохода комбайна

Fig. The scheme of applying metal frames on soybean crops and on the harvested area of the field after the passage of the combine

Среднее значение удельных естественных потерь зерна сои вычисляют по формуле:

$$q_0 = P_0 / (S_p \cdot n_0) = P_0 / S_0, \quad (2)$$

где q_0 – среднее значение удельных естественных потерь от самоосыпания, г/м²;

S_p – площадь рамки, равная 1 м²;

n_0 – количество рамок на полосе U , шт.;

P_0 – суммарная масса потерь зерна сои от самоосыпания, г;

S_0 – суммарная площадь рамок на полосе U для определения биологической урожайности и потерь от самоосыпания, м².

Массовая доля потерь зерна сои от самоосыпания равна:

$$\Delta q_0 = \frac{q_0}{Y_3 (Y_{пред})^*} \cdot 100, \quad (3)$$

где Δq_0 – массовая доля потерь, %;

Y_3 – бункерная урожайность зерна с зачетного участка, которую определяют в процессе отбора проб для оценки качества работы жатки, молотилки и в целом комбайна по намолоту зерна с зачетного участка, г/м²:

$$Y_3 = \frac{M_3 \cdot Z_m \cdot 10}{L_{уч} \cdot B_{ж}}, \quad (4)$$

где M_3 – масса зернового вороха сои, собранного в бункер, кг;

Z_m – содержание основного зерна сои в бункере комбайна, %;

$L_{уч}$ – длина зачетного участка, м;

$B_{ж}$ – фактическая ширина захвата жатки, м;

$(Y_{пред})^*$ – здесь и далее допускаемый вместо Y_3 альтернативный вариант определения урожайности как

биологической, г/м².

2. Определение потерь зерна за жаткой

Участок поля длиной более 50 м комбайны проходят в установившемся режиме работы молотилки при заданной рабочей скорости и отключенном измельчителе-разбрасывателе, укладывая солому и полову в валок, равный ширине молотилки. На убранном участке поля слева и справа от колеи, где нет соломы и половы, и по центру – между следами движителей – накладывают по три рамки. Вручную с поверхности земли в пределах площадки собирают потери, дифференцируя их на составляющие: потери свободным зерном, несрезанными бобами (от «несреза»), срезанными и опавшими бобами. Дополнительно в пределах каждой площадки в случайном порядке определяют высоту среза – не менее 20 значений.

Вычитая из средних значений суммарных потерь и составляющей потерь свободным зерном (6 площадок) среднее значение потерь от самоосыпания (3-6 площадок), получим потери за жаткой всего и составляющую потерь свободным зерном за жаткой в чистом виде, то есть без потерь от самоосыпания.

Потери несрезанными бобами совместно с данными по средней высоте крепления нижнего боба и средней высоте среза характеризуют потери от «несреза», то есть эффективности работы режущего аппарата жаток низкого среза.

Потери свободным зерном и зерном в срезанных и опавших бобах частично свидетельствуют о работе режущего аппарата жатки, а в основном – об эффективности работы мотвила и оптимизации рабочей скорости.

3. Определение потерь за молотилкой и их составляющих

Суммарные потери зерна за молотилкой находят с помощью трех рамок. При необходимости находят составляющие потерь в функциональных узлах – в ветроочистке и соломотрясе, если потери за молотилкой превышают нормативные 1,5%. Рамки укладывают на одной линии с рамками для учета потерь за жаткой (рисунком).

4. Определение общих потерь зерна за комбайном

Общие потери важно учитывать, если оценивают комбайн в целом, а не только жатку. Если общие потери не превышают норму, то другие показатели потерь можно не определять.

Согласно стандартной методике после прохождения комбайна по зачетному участку по всей ширине захвата жатки гибкой рамкой отмечается полоса $1/B_{ж}$ (например, 170 мм для жатки шириной захвата 6 м или 140 мм – для 7-метровой жатки). Необходимо аккуратно освободить этот участок от соломы и половы и собрать зерно:

- утерянное из необмолоченных бобов в соломе и полове;
- свободное;

- в срезанных и опавших бобах на поверхности почвы;
- в несрезанных бобах.

Для более точного определения потерь можно взять полосу 1 м. Полученные с 1 м² потери нужно разделить на $B_{ж}$. Если из этих потерь вычесть потери от самоосыпания, то станут известны общие потери за комбайном. Но, в данном случае, как и при определении стандартными способами других потерь наложением рамок на всю ширину жатки, особенно в условиях повышенной влажности почвы, практически невозможно точно учесть потери по всей ширине жатки, а конкретно – потери по следам движителей комбайна (колес или гусениц), то есть по колее. В том числе исключена дифференциация потерь за жаткой (свободным зерном, срезанными и опавшими бобами, несрезанными бобами), которая важна при оценке эффективности изменения конструктивных параметров и технологических режимов работы жаток низкого среза.

Предлагаемая методика позволяет решать вышеупомянутые задачи в любых почвенных условиях.

Общие потери зерна сои за комбайном составляют:

$$\Delta q_k = \Delta q_{ж} + \Delta q_m, \quad (5)$$

где Δq_k – общие потери зерна, %;

$\Delta q_{ж}$ – потери за жаткой комбайна, %;

Δq_m – потери за молотилкой комбайна, %;

$$q_{ж} = \frac{\sum q_{ж}^i}{Y_{з} (Y_{пред})^*} \cdot 100 = \frac{q_{ж}^n + q_{ж}^{co} + q_{ж}^c}{Y_{з} (Y_{пред})^*} \cdot 100 = \Delta q_{ж}^n + \Delta q_{ж}^{co} + \Delta q_{ж}^c, \quad (6)$$

где $q_{ж}^i$ – удельные потери сои за жаткой комбайна, дифференцируемые по i -видам потерь, г/м²;

$q_{ж}^n$ – удельные потери сои за жаткой комбайна от несреза, г/м²:

$$q_{ж}^n = \frac{P_{ж}^n}{S_1 + S_2}, \quad (7)$$

где $P_{ж}^n$ – суммарная масса потерь зерна сои за жаткой от несреза, г;

S_1 – суммарная площадь рамок на зачетном участке после прохода комбайна с наружной стороны колес в полосах L и R для определения потерь за жаткой, м²;

S_2 – суммарная площадь рамок в полосе C на валок соломы с половой для определения потерь зерна сои за комбайном и молотилкой, м²;

$q_{ж}^{co}$ – удельные потери сои за жаткой комбайна срезанными и опавшими бобами, г/м²;

$$q_{ж}^{co} = \frac{P_{ж}^{co}}{S_1}, \quad (8)$$

где $P_{ж}^{co}$ – суммарная масса потерь зерна сои за жаткой срезанными и опавшими бобами, г;

$q_{ж}^c$ – удельные потери сои за жаткой комбайна свободным зерном без учета потерь от самоосыпания, г/м²;

$$q_{ж}^c = \frac{P_{ж}^c}{S_1} - \frac{P_0}{S_0} = q_{ж}^c - q_0, \quad (9)$$

где $P_{ж}^c$ – суммарная масса потерь зерна сои за жаткой свободным зерном, г;

P_0 – суммарная масса потерь зерна сои от самоосыпания, собранная в пределах рамок в полосе U , г;

$q_{ж}^{co}$ – удельные потери зерна сои за жаткой свободным зерном с учетом потерь от самоосыпания, г/м².

Потери зерна сои за молотилкой вычисляют по формуле:

$$\Delta q_m = \frac{100 \cdot B_m \cdot \left(\frac{P_m}{S_2} - q_{ж} - q_0 \right)}{B_{ж} \cdot Y_{з} (Y_{пред})^*} = \frac{100 \cdot B_m \cdot q_m}{B_{ж} \cdot Y_{з} (Y_{пред})^*}, \quad (10)$$

где Δq_m – потери зерна за молотилкой, %;

q_m – удельные потери сои в валке соломы и половы за молотилкой без потерь за жаткой и от самоосыпания, г/м²;

B_m – ширина участка за комбайном (валок), равная ширине молотилки (барабана), м;

$B_{ж}$ – фактическая ширина захвата жатки, м;

P_m – суммарная масса потерь зерна сои в валке соломы с половой, собранная в рамках в пределах ширины корпуса молотилки комбайна на полосе C , г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. В соответствии с разработанным алгоритмом оценки для примера апробации методики используем результаты испытаний комбайна *Case IH AF6140* с жаткой *New Holland 740CF-30DD(SF)* в хозяйстве «Казанское» Серышевского района Амурской области на уборке сои сорта Нега 2 в 2016 г.

На длине гона по центру левой отрезанной в ходе прохода комбайна полосы U массива посевов сои накладывали рамки в трехкратной повторности ($U1$, $U2$ и $U3$), в пределах которых на уровне поверхности почвы срезали растения сои, снопы из которых укладывали в крафтовые мешки с этикеткой для определения биологической урожайности сои в лабораторных условиях при ручном обмолоте бобов или на селекционной молотилке.

Затем в пределах трех рамок собирали потери от самоосыпания в виде свободного зерна и зерна из опавших бобов.

На прокосе (зачетном участке) напротив мест с рамками для определения биологической урожайности на корню и потерь от самоосыпания накладывали рамки в трех повторностях в полосах L , R и C (рисунки). В ходе сбора потерь зерна сои за жаткой в пределах рамок их разделяли в отдельные мешочки: несрезанные бобы на стерне; срезанные и опавшие бобы; свободное зерно.

В пределах рамок на полосе C допустимо выделять потери от несреза и учитывать их при расчете удельных потерь за жаткой. Результаты испытаний показали, что в исходном массиве сои сорта Нега 2 суммарная масса потерь зерна сои от самоосыпания составила 0,66 г. Удельные потери зерна сои от само-

осыпания рассчитали по формуле (2):

$$\bar{q}_0 = \frac{0,66}{3,0} = 0,22 \text{ г/м}^2.$$

Биологическая урожайность сои на корню составила $Y_{\text{пред}} = 251 \text{ г/м}^2$, высота прикрепления нижнего бобика на растении сои – 14,1 см.

Урожайность зерна с зачетного участка определяли согласно формуле (4):

$$Y_z = \frac{376 \cdot 99,82 \cdot 10}{164,5 \cdot 9,19} = 248,3 \text{ г/м}^2.$$

По результатам взвешивания массы составляющих потерь зерна сои за жаткой выявили: $P_{\text{ж}}^{\text{н}} = 2,73 \text{ г}$, $P_{\text{ж}}^{\text{с}} = 4,04 \text{ г}$, $P_{\text{ж}}^{\text{с}} = 9,28 \text{ г}$.

Соответствующие удельные потери при

$$S_1 = S_p \cdot (n_L + n_R) = 1,0 \cdot (3+3) = 6,0 \text{ м}^2 \text{ и}$$

$S_2 = S_p \cdot n_C = 1,0 \cdot 3 = 3,0 \text{ м}^2$ рассчитали по формулам (7)-(9):

$$q_{\text{ж}}^{\text{н}} = \frac{2,73}{6,0 + 3,0} = \frac{2,73}{9,0} = 0,30 \text{ г/м}^2;$$

$$q_{\text{ж}}^{\text{с}} = \frac{4,04}{6,0} = 0,67 \text{ г/м}^2;$$

$$q_{\text{ж}}^{\text{с}} = \frac{9,28}{6,0} - \frac{0,66}{3,0} = 1,55 - 0,22 = 1,33 \text{ г/м}^2,$$

где n_L , n_R , n_C – количество рамок на полосах L , R и C на зачетном участке после прохода комбайна, шт., $n_L = 3$ шт., $n_R = 3$ шт. и $n_C = 3$ шт.

Суммарные потери за жаткой комбайна в соответствии с формулой (6) равны:

$$q_{\text{ж}} = \sum q_{\text{ж}}^i = q_{\text{ж}}^{\text{н}} + q_{\text{ж}}^{\text{с}} + q_{\text{ж}}^{\text{с}} = 0,30 + 0,67 + 1,33 = 2,30 \text{ г/м}^2.$$

При этом средняя высота среза растений сои составила 8,8 см.

Вычислим долю составляющих и суммарных потерь зерна сои за жаткой по формуле (6). Здесь и далее альтернативный вариант расчета в скобках (...) * с использованием биологической урожайности, обозначенной в знаменателе как $(251 \text{ г/м}^2)^*$:

$$\Delta q_{\text{ж}}^{\text{н}} = \frac{0,30 \cdot 100}{248,3 (251)^*} = 0,12 (0,12)^* \%,$$

$$\Delta q_{\text{ж}}^{\text{с}} = \frac{0,67 \cdot 100}{248,3 (251)^*} = 0,27 (0,27)^* \%,$$

$$\Delta q_{\text{ж}}^{\text{с}} = \frac{1,33 \cdot 100}{248,3 (251)^*} = 0,53 (0,53)^* \%,$$

$$\Delta q_{\text{ж}} = \frac{2,30 \cdot 100}{248,3 (251)^*} = 0,92 (0,92)^* \%.$$

Для вычисления массы зерна сои, собранного за молотилкой комбайна в полосе C с трех рамок, взвесим отдельно суммарное зерно, собранное на стерне из несрезанных бобиков. Следует учесть, что под молотилку попадают потери от самоосыпания и потери за жаткой. Так, после прохода комбайна *Case IH AF6140* суммарный вес потерь зерна сои в рамках $C1$, $C2$ и $C3$ равен $P_{\text{м}} = 19,2 \text{ г}$.

Определим удельные потери в валке соломы и половы за молотилкой комбайна без потерь за жаткой и

потерь от самоосыпания:

$$q_{\text{м}} = \frac{P_{\text{м}}}{S_2} - q_{\text{ж}} - q_0 = \frac{19,2}{3,0} - 2,3 - 0,22 = 3,88 \text{ г/м}^2.$$

Потери зерна сои за молотилкой определяем по формуле (10):

$$\Delta q_{\text{м}} = \frac{100 \cdot 1,162 \cdot 3,88}{9,19 \cdot 248,3 (251)^*} = 0,20 (0,20)^* \%.$$

Вычисляем общий уровень потерь за комбайном, используя выражение (5):

$$\Delta q_{\text{к}} = \Delta q_{\text{ж}} + \Delta q_{\text{м}} = 0,92 + 0,2 = 1,12 \%.$$

Как видно из расчетов, работа комбайна *Case IH AF6140* с жаткой *New Holland 740CF-30DD(SF)* на скорости в 6 км/ч соответствует всем нормам потерь зерна сои, а наибольшую долю составляют потери за жаткой свободным зерном. Это указывает на необходимость регулировки числа оборотов мотовила – установкой правильного соотношения окружной скорости планок мотовила жатки и рабочей скорости комбайна.

В расчетах массовой доли потерь зерна показано, что отличие при использовании данных методических подходов в определении потерь не превышает 0,05-0,30% при условии, что суммарные потери за комбайном не более 5%. Тогда выбор предпочтительного метода определения урожайности будет зависеть от того, какой из них обеспечивает большую оперативность и минимальную трудоемкость проведения оценки. Например, при определении качества работы комбайна в ходе эксплуатационно-технологической оценки во время сравнительных испытаний, когда комбайны можно не останавливать, более оперативно и с меньшей трудоемкостью лучше определять массовую долю потерь по отношению к биологической урожайности на корню.

Выводы. Использование предложенной и апробированной методики учета потерь с помощью жестких металлических рамок позволяет с высокой достоверностью и оперативностью, при меньшей трудоемкости проводить расчет фактического, удельного и относительного (относительно биологической урожайности) уровней потерь зерна сои за жаткой и зерноуборочным комбайном, а также их допустимых значений.

Методика рекомендуется к применению при изучении качества работы жаток низкого среза и зерноуборочных комбайнов в ходе агротехнической и эксплуатационно-технологической оценок во время испытаний и в ходе рядовой эксплуатации, в том числе в условиях переувлажнения почвы, а также для установки оптимальных регулировок и режимов работы жатки и молотилки комбайна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бумбар И.В. Уборка сои: Монография. Благовещенск: ДальГАУ. 2006. 257 с.
2. Жалнин Э.В. Какой комбайн выбрать? // *Сельский механизатор*. 2015. N4. С. 4-6.
3. Жалнин Э.В. Классификация потерь зерна и их оценка // *Сельский механизатор*. 2014. N9. С. 4-6.
4. Панасюк А.Н., Липкань А.В., Бумбар И.В., Лазарев В.И. Испытания жатки соевой унифицированной ЖСУ-700 в условиях Амурской области // *Техника и оборудование для села*. 2016. N10. С. 26-28.
5. Чаплыгин М.Е., Жалнин Э.В. Определение качества работы зерноуборочных комбайнов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N4. С. 71-76.
6. Федоренко В.Ф., Таркинский В.Е., Трубицын Н.В., Воронин Е.С. Повышение эффективности оценки функциональных характеристик зерноуборочных комбайнов // *Агроинженерия*. 2021. N1(101). С. 15-19.
7. Тронева С.В. Расчет конструктивных параметров измерительных средств определения потерь зерна за зерноуборочным комбайном // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017. N3-4(57). С. 96-102.
8. Ерохин Г.Н., Коновский В.В. Изменение потерь зерна за зерноуборочными комбайнами в процессе эксплуатации // *Наука в центральной России*. 2017. N3(27). С. 10-16.
9. Марченко А.П. Анализ путей снижения потерь зерна в жатвенной части зерноуборочного комбайна // *Научное обозрение*. 2015. N9. С. 14-16.
10. Беренштейн И.Б., Полуэктова Н.Р. Моделирование потерь зерна при комбайновой уборке пшеницы // *Известия сельскохозяйственной науки Тавриды*. 2019. N17(180). С. 86-96.
11. Лонцева И.А., Соболева Н.В. Модель для прогнозирования потерь сои за жаткой // *Дальневосточный аграрный вестник*. 2021. N3(59). С. 93-98.
12. Петухов Д.А., Чаплыгин М.Е. Результаты исследований роторного зерноуборочного комбайна «John Deere S660» в условиях Тамбовской области // *Техника и оборудование для села*. 2013. N11. С. 15-18.
13. Menezes P.C., Rouverson P., Silva R.P., et al. Can combine headers and travel speeds affect the quality of soybean harvesting operations? *Revista brasileira de engenharia Agrícola e ambiental*. 2018. Vol. 22(10). 732-738.
14. Cortez J.W., Syrio M.G., Rodrigues S.A. Types of header, operating speed, and geometry of collection frames on the total losses of soybean harvest. *Engenharia Agrícola*. 2019. Vol. 39(4). 482-489.
15. Silva R.P., et al. Qualitative losses in the soybean seeds mechanized harvesting [Perdas qualitativas na colheita mecanizada de sementes de soja]. *Semina: Ciências Agrárias*. 2013. Vol. 34(2). Iss. 477-484.
16. Lima F.B.F., Silva V.A.F., Silva R.P. Quality of mechanical soybean harvesting at two travel speeds. *Engenharia Agrícola*. 2017. Vol. 37(6). 1171-1182.
17. Cassia M.T., et al. Monitoring of mechanized harvest operation of soybean seeds. *Engenharia Agrícola*. 2015. Vol. 19(12). 1209-1214.
18. Канделя М.В., Земляк В.Л., Назарова В.П. Обоснование необходимости использования гусеничного движителя в схеме зерноуборочных комбайнов в условиях Дальнего Востока // *Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема*. 2019. N4(37). С. 35-40.
19. Чаплыгин М.Е. Определение качества работы зерноуборочных комбайнов при испытаниях с применением резиновых пробоотборников // *Техника и оборудование для села*. 2016. N11. С. 16-19.
20. Ряднов А. И., Чаплыгин М.Е., Тронева С.В., Давыдова С.А. Современные специализированные жатки и адаптеры для уборки сои // *Известия Нижневартковского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2020. N4(60). С. 389-402.

REFERENCES

1. Bumbar I.V. Uborka soi. Monografiya [Soybean harvesting. Monograph]. Blagoveshchensk: Dal'GAU. 2006. 257 (In Russian).
2. Zhalnin E.V. Kakoy kombayn vybrat'? [Which harvester to choose?] *Sel'skiy mekhanizator*. 2015. N4. 4-6 (In Russian).
3. Zhalnin E.V. Klassifikatsiya poter' zerna i ikh otsenka [Grain loss classification and evaluation]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2014. N9. 4-6 (In Russian).
4. Panasyuk A.N., Lipkan' A.V., Bumbar I.V., Lazarev V.I. Ispytaniya zhatki soevoy unifitsirovannoy ZhSU-700 v usloviyakh Amurskoy oblasti [Tests of ZhSU-700 unified soybean header under conditions of Amur Region]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2016. N10. 26-28 (In Russian).
5. Chaplygin M.E., Zhalnin E.V. Opredelenie kachestva raboty zernouborochnykh kombaynov [Determining the performance quality of combine harvesters operating]. *Sel'skookhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N4. 71-76 (In Russian).
6. Fedorenko V.F., Tarkivskiy V.E., Trubitsyn N.V., Voronin E.S. Povyshenie effektivnosti otsenki funktsionalnykh kharakteristik zernouborochnykh kombaynov [Increasing the estimation efficiency of the functional characteristics of grain harvesters]. *Agroinzheneriya*. 2021. N1(101). 15-19 (In Russian).
7. Tronev S.V. Raschet konstruktivnykh parametrov izmeritelnykh sredstv opredeleniya poter' zerna za zernouborochnym kombaynom [Calculation of constructive parameters of measuring facilities for determination of grain losses of grain harvester]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2017. N3-4(57). 96-102 (In Russian).
8. Erokhin G.N., Konovskiy V.V. Izmenenie poter' zerna za zernouborochnymi kombaynami v protsesse ekspluatatsii [Change of loss of grain for grain collective combines in the operation process]. *Nauka v tsentralnoy Rossii*. 2017. N3(27). 10-16 (In Russian).
9. Marchenko A.P. Analiz putey snizheniya poter' zerna v zhatvennoy chasti zernouborochnogo kombayna [Analysis of ways of reducing grain loss in reaping part of combine har-

- vester]. *Nauchnoe obozrenie*. 2015. N9. 14-16 (In Russian).
10. Berenshteyn I.B., Poluektova N.R. Modelirovanie poter' zerna pri kombaynovoy uborke pshenitsy [Modelling of loss in grain harvesting by combine]. *Izvestiya sel'skokhozyaystvennoy nauki Tavriy*. 2019. N17(180). 86-96 (In Russian).
 11. Lontseva I.A., Soboleva N.V. Model' dlya prognozirovaniya poter' soi za zhatkoy [Model for predicting the loss of soybeans behind the header]. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik*. 2021. N3(59). 93-98 (In Russian).
 12. Petukhov D.A., Chaplygin M.E. Rezultaty issledovaniy rotor-nogo zernoubochnogo kombayna «John Deere S660» v usloviyakh Tambovskoy oblasti [Research results of the John Deere S660 rotary combine harvester in Tambov Region]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2013. N11. 15-18 (In Russian).
 13. Menezes P.C., Rouverson P., Silva R.P., et al. Can combine headers and travel speeds affect the quality of soybean harvesting operations? *Revista brasileira de engenharia Agricola e ambiental*. 2018. Vol. 22(10). 732-738 (In English).
 14. Cortez J.W., Syrio M.G., Rodrigues S.A. Types of header, operating speed, and geometry of collection frames on the total losses of soybean harvest. *Engenharia Agricola*. 2019. Vol. 39(4). 482-489 (In English).
 15. Silva R.P., et al. Qualitative losses in the soybean seeds mechanized harvesting [Perdas qualitativas na colheita mecanizada de sementes de soja]. *Semina: Ciencias Agrarias*. 2013. Vol. 34(2). 477-484 (In English).
 16. Lima F.B.F., Silva V.A.F., Silva R.P. Quality of mechanical soybean harvesting at two travel speeds. *Engenharia Agricola*. 2017. Vol. 37(6). 1171-1182 (In English).
 17. Cassia M.T., et al. Monitoring of mechanized harvest operation of soybean seeds. *Engenharia Agricola*. 2015. Vol. 19(12). 1209-1214 (In English).
 18. Kandelya M.V., Zemlyak V.L., Nazarova V.P. Obosnovanie neobkhodimosti ispol'zovaniya gusenichnogo dvizhitelya v skheme zernokormoubochnykh kombaynov v usloviyakh Dal'nego Vostoka [Justification of the need to use a caterpillar mover in the scheme of grain harvesters in the Far East]. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleykhema*. 2019. N4(37). 35-40 (In Russian).
 19. Chaplygin M.E. Opredelenie kachestva raboty zernoubochnykh kombaynov pri ispytaniyakh s primeneniem rezinovykh probotoobornikov [Determination of work quality of grain harvesters when testing with rubber samplers]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2016. N11. 16-19 (In Russian).
 20. Ryadnov A.I., Chaplygin M.E., Tronev S.V., Davydova S.A. Sovremennyye spetsializirovannyye zhatki i adaptery dlya uborki soi [Modern specialized blades and adapters for soybean harvesting]. *Izvestiya Nizhnevarovskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie*. 2020. N4(60). 389-402 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

- Липкань А.В. – научное руководство, формулирование принципов методологического подхода и алгоритма оценки потерь зерна сои за жаткой и комбайном при уборке в условиях переувлажнения почвы, формирование общих выводов.
- Кувшинов А.А. – подготовка статьи, обоснование актуальности совершенствования методики оценки потерь зерна сои за комбайном при уборке в условиях переувлажнения почвы (выявление недостатков существующих методик).
- Усанов В.С. – дизайн статьи, доработка текста и литературный анализ, критический пересмотр в части релевантности содержания, окончательное одобрение варианта статьи для опубликования.
- Смолянинова Н.О. – проведение мониторинга потерь комбайнов по разработанной методике, обработка результатов исследований потерь за жаткой и комбайном.
- Сахаров В.А. – разработка дизайна математического аппарата оценки потерь, обоснование оперативности, снижения трудоемкости и обеспечения достоверности определения массовой доли потерь относительно биологической урожайности.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

- Lipkan' A.V. – scientific guidance, developing the principles of the technical approach and the algorithm for assessing soybean grain losses behind the header and combine harvester during harvesting in the waterlogged soil conditions, drawing general conclusions.
- Kuvshinov A.A. – manuscript preparation, substantiation of the improvement of the methodology for assessing soybean grain losses behind the combine harvester during harvesting in the waterlogged soil conditions (identifying the shortcomings of the existing methods).
- Usanov V.S. – manuscript design and revision, literature review, manuscript critical revision in terms of the content relevance, final approval of the manuscript for publication.
- Smolyaninova N.O. – monitoring of the losses behind the combine harvesters according to the developed methodology, processing the results of monitoring the losses behind the header and combine.
- Sakharov V.A. – development of the mathematical apparatus for assessing losses, justification of efficiency, labor intensity reduction and ensuring the reliability of determining the mass fraction of losses against the biological yield.

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

16.01.2022

18.02.2022

Разработка устройства сопряжения для модульной сельскохозяйственной робототехнической платформы

Константин Дмитриевич Крестовников,
младший научный сотрудник,
e-mail: k.krestovnikov@iias.spb.su;
Алексей Алексеевич Ерашов,
младший научный сотрудник,
e-mail: erashov.a@iias.spb.su;

Юлия Геннадиевна Васюнина,
программист,
e-mail: yuliya.vasunina@gmail.com;
Антон Игоревич Савельев,
старший научный сотрудник,
e-mail: saveliev@iias.spb.su

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Реферат. Показали, что для создания multifunctional робототехнических платформ сельскохозяйственного применения актуально использовать модульный принцип, который позволит устанавливать различное навесное оборудование в зависимости от задач, поставленных перед робототехническим средством. Отметим, что автономная реконфигурация снизит вмешательство человека в эксплуатацию и затраты на обслуживание. (*Цель исследования*) Разработать масштабируемое устройство сопряжения функциональных модулей с базовой сельскохозяйственной робототехнической платформой, которое сможет обеспечить механическую фиксацию, передачу энергии и информационный обмен. (*Материалы и методы*) Провели анализ исследовательских работ в направлении решений для сопряжения модулей в робототехнических комплексах, отметили их достоинства и недостатки. Создали структуру механизма сопряжения для обеспечения корректного взаимного положения и фиксации модуля с базовой платформой при возможности энергетического и информационного обмена. (*Результаты и обсуждение*) Вывели расчетные соотношения для устройства сопряжения, позволяющие вычислять допустимые линейные смещения и допустимое угловое отклонение сопрягаемых элементов механизма. Определили основные размеры прототипа устройства по заданным допустимым линейными отклонениями в диапазоне до 10-13 миллиметров и с допустимым угловым отклонением 20 градусов. Реализовали прототип устройства сопряжения с габаритными размерами: длина – 200 миллиметров, ширина – 130, высота – 58 миллиметров. Провели с ним эксперименты, изменяя линейные и угловые отклонения сопрягаемых элементов. (*Выводы*) Определили, что успешное сопряжение происходит в 98 процентах случаев при соблюдении допустимых расчетных смещений. Заключение, что предложенное устройство сопряжения позволит реализовать автономную замену модулей multifunctional робототехнических платформ.

Ключевые слова: сельскохозяйственная робототехника, модульная робототехническая платформа, модульная робототехника, устройство сопряжения, функциональные модули роботов.

Для цитирования: Крестовников К.Д., Ерашов А.А., Васюнина Ю.Г., Савельев А.И. Разработка устройства сопряжения для модульной сельскохозяйственной робототехнической платформы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №1. С. 78-88. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-78-88.

Development of Interface Device for Modular Agricultural Robotic Platform

Konstantin D. Krestovnikov,
junior researcher,
e-mail: k.krestovnikov@iias.spb.su;
Aleksei A. Erashov,
junior researcher, e-mail: erashov.a@iias.spb.su;

Yuliya G. Vasyunina,
software developer,
e-mail: yuliya.vasunina@gmail.com;
Anton I. Savel'ev,
senior researcher, e-mail: saveliev@iias.spb.su

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. To create multifunctional robotic platforms for agricultural use, it is reasonable to use a modular principle that will allow installing various equipment depending on the tasks assigned to the robotic tool. Providing autonomous reconfiguration capabilities will reduce human interference and maintenance costs. (*Research purpose*) This work is aimed

at developing a scalable device for interfacing functional modules with the agricultural robotic base platform, which can provide mechanical fixation, energy transfer and information exchange. (*Materials and methods*) This article analyzes the previous research into the solutions for interfacing modules in robotic complexes and points out their benefits and drawbacks. Based on the analysis and own research, the interface mechanism structure was developed to ensure the correct mutual position and fixation of the module to the base platform under the assumption of possible energy and information exchange. (*Results and discussion*) In the course of the work, the design ratios for the interface device were derived, making it possible to calculate the permissible linear displacements and permissible angular deviation of the mechanism interfacing elements. Based on the permissible linear deviations up to 10-13 millimeters and a permissible angular deviation of 20 degrees, the main dimensions of the device prototype were obtained. A prototype interface device was operationalized with the dimensional specifications of 200 millimeters in length, 130 millimeters in width, 58 millimeters in height. Several experiments with the device prototype were carried out based on various linear and angular deviations of the interfacing elements. (*Conclusions*) It was found out that successful interfacing occurs in 98 percent of cases subject to admissible calculated displacements. It was concluded that the proposed interface device will allow for the autonomous replacement of modules of multifunctional robotic platforms.

Keywords: agricultural robotics, modular robotic platform, modular robotics, interface device, functional modules of robots.

For citation: Krestovnikov K.D., Erashov A.A., Vasyunina Yu.G., Savel'ev A.I. Razrabotka ustroystva sopryazheniya dlya modul'noy sel'skokhozyastvennoy robototekhnicheskoy platformy [Development of interface device for modular agricultural robotic platform]. *Sel'skokhozyastvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N1. 78-88 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-78-88.

Модульный подход в робототехнике заключается в разделении структуры или архитектуры на функциональные модули. Это дает возможность для использования модулей различного функционала вследствие унификации соединительной части модуля и базовой платформы или базового модуля.

Модульная робототехника активно развивается: разрабатываются новые реконфигурируемые и самореконфигурируемые робототехнические системы (РС) с разным функционалом и многими способами реконфигурации [1-3].

Поскольку выращивание сельскохозяйственных культур на различных этапах требует применения оснастки, значительно отличающейся по конструкции, модульный подход к робототехническим средствам становится практичным и эффективным решением [4, 5]. Применение модульного подхода к построению РС в комплексе с возможностью самореконфигурации позволит создавать автономные многофункциональные платформы, не требующие внимания обслуживающего персонала при смене оснастки. При этом актуальна разработка соединений между базовой платформой и модулями с их автоматической установкой и заменой, с возможностью передавать данные и энергию. Кроме того, внедрение автономной реконфигурации позволит снизить общее вовлечение человека в эксплуатацию и повысить адаптивность системы к условиям функционирования.

Современную сельскохозяйственную технику по степени автоматизации выполняемых задач можно разделить на пилотируемую и беспилотную.

К первому типу относят разработки компании *John Deere*, функциональное оборудование которой сты-

куется с трактором при участии рабочего персонала. Некоторое оборудование характеризуется универсальностью в эксплуатации. Аналогичный список сельхозтехники имеет концерн *Claas*: тракторы со сменным оборудованием, зерноуборочная техника, техника для кормораздачи, опрыскиватели, погрузчики и т.д. Здесь обычно не предусмотрена автономная замена возможных функциональных устройств.

Беспилотная техника представлена такими роботизированными сельскохозяйственными системами, которые содержат несменные и сменные функциональные устройства. К первым можно отнести, например, робототехнические платформы *U-Go* и *Agri.q02* [4, 6]. Выбранная конструкция роботов не позволяет масштабировать и адаптировать РС к различным задачам.

Среди систем со сменными модулями можно выделить автономную агропромышленную платформу *OMNiPOWER*, которая имеет режим автоматической установки и замены функциональных модулей. Стыковочное устройство представляет собой конусовидную направляющую, для фиксации функциональных модулей используются крюки, угловое положение которых изменяется с помощью гидроприводов. Для выполнения различных сельскохозяйственных задач предназначен мобильный робот *Formica 01* [7]. Его минус – узкая специализация, не предполагающая переоборудования или дополнения различными модулями. Тот же недостаток имеют аналогичные сельскохозяйственные платформы [5, 8].

На базе автономной модульной сельскохозяйственной платформы *Thorvald II* можно сформировать различные виды привода и рулевого управления с любым количеством колес и функциональных элемен-

тов [9, 10]. Персонал вручную проводит реконфигурацию и замену модулей [11]. Механизм их сопряжения с базовой платформой не унифицирован.

Помимо робототехнических платформ, предназначенных для применения в агропромышленности, можно отметить потенциально подходящие для выполнения сельскохозяйственных задач мобильные модульные платформы. Например, компания *Fetch Robotics* представила платформы *Fetch* и *Freight* для работы в складских помещениях [12-15]. Шасси платформ имеет одинаковую конструкцию и программно-аппаратное обеспечение. К недостаткам можно отнести невозможность использования базового устройства платформы без других функциональных модулей, так как на ней уже есть навесное оборудование. Преимуществом конструкции модульной РС стала возможность установки модулей в местах, определяемых при сборке робота [16]. Однако данная система не позволяет устанавливать иное функциональное оборудование, как и платформы *Fetch* и *Freight* [15].

У рассмотренных модульных робототехнических платформ отсутствует возможность автономной реконфигурации: зачастую используется способ замены модулей с помощью персонала. Отмеченного недостатка лишены самореконфигурируемые модульные роботы. Так, с помощью модулей *CKBot* квадратной формы можно сформировать различные конфигурации модульной РС [17]. Модули соединяются посредством винтов или постоянных магнитов. Соединения располагаются на нескольких гранях модуля. На каждом модуле *Superbot* есть шесть разъемов для сопряжения с другими модулями и передачи энергии и данных [18]. Используемые разъемы допускают подключение модулей с угловым смещением между ними, кратным 90°. Аналогичным преимуществом обладает устройство сопряжения модуля *PolyBot* [19]. Конструкция с защелками позволяет передавать энергию и данные между модулями.

Возможно функциональное разделение устройства сопряжения на активные и пассивные составляющие [20-22]. В его активной части зачастую используют электродвигатели для создания удерживающего момента. Такие устройства обеспечивают лишь механическое сопряжение, данные могут передаваться беспроводным способом, при этом питание робота может быть автономным [21, 23]. Возможности по масштабированию устройств авторы не обсуждали.

В системе *I-BLOCKS* предусмотрено электрическое и механическое соединение между модулями [24]. В качестве основы самих блоков использованы детали *LEGO Duplo*. Для передачи питания есть отдельный блок. Аналогичным способом электрического соединения модулей пользуются авторы модульной РС *Molecule* [25, 26]. Модули данной РС электрически соединяются между собой посредством штыревого разъема «вилка – розетка» типа *PLS*.

Для сопряжения модулей используют и магниты, что уменьшает габариты конструкции, устраняя необходимость в приводах и других механических элементах [27, 28]. Более того, стыковка с использованием магнитов не требует точного наведения. Однако при существенных нагрузках надежность такого соединения значительно ниже по сравнению с механическим [29]. Оно требует также высокой точности и чистоты обработки поверхностей соединения.

Современная модульная робототехники представлена полностью независимыми модулями. Соединительные механизмы обеспечивают только физическое сопряжение и требуют достаточно высокой точности позиционирования сопрягаемых модулей. Кроме того, при необходимости информационного взаимодействия и передачи энергии зачастую требуется привлечение пользователя или рабочего персонала.

Для передачи энергии и информации между модулями чаще используют решения, основанные на разъемах и контактных парах [26, 30, 31]. Достаточно часто применяют и беспроводные системы передачи информации, особенно если нет необходимости в передаче энергии, однако, как правило, они отличаются большей стоимостью. Разъемы и контактные пары позволяют передавать питание между модулями и использовать любые стандартные шины передачи данных [32, 33]. В случае отдельных контактных пар контакты можно расположить в любом порядке и на произвольном расстоянии друг от друга, что позволит адаптировать и масштабировать такое электрическое соединение под возможности позиционирования модульной РС. Общим недостатком разъемов и контактных пар считается низкая защищенность от воздействия окружающей среды.

Описанные возможности автономного формирования различных структур посредством модулей ограничены отсутствием надежного механического соединения при возможных значительных нагрузках.

Цель исследования – разработать устройство сопряжения, которое позволит с заданной точностью автономно сопрягать модули РС с базовой платформой.

Материалы и методы. Конструктивно-кинематическая схема разработанного электромеханического устройства сопряжения имеет пассивную и активную части (рис. 1а).

Концепция устройства сопряжения основана на принципе фиксации активной частью захватного механизма кинематически не связанной с ним пассивной части с возможностью контактной передачи энергии и данных. Цель сопряжения – такое физическое зацепление пассивной части, при котором система отсчета в точке *P*, привязанная к нижней грани пассивной части, совмещается с системой отсчета в точке *O*, принадлежащей активной части (рис. 1б). Для этого необходимо, чтобы обе составляющие активной ча-

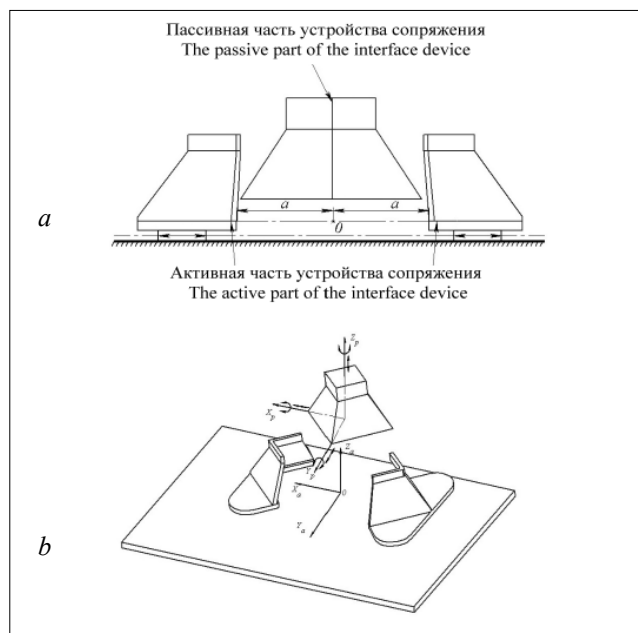


Рис. 1. Устройство сопряжения: а – конструктивно-кинематическая схема; б – привязка систем отсчета к пассивной и активной части

Fig. 1. Interface device: a – structural and kinematic diagram; b – binding the reference systems to the passive and active part

сти устройства сопряжения линейно перемещались на одинаковое расстояние a (рис. 1а). Это позволит зафиксировать пассивную часть с учетом заданных ограничений на начальные смещения. Решение разработано с учетом требований к ограниченной точности позиционирования РС.

Выбор представленных форм активной и пассивной частей обусловлен необходимостью дополнительных сил и моментов, которые направили бы пассивную часть к точке O . При этом допускается, что пассивная часть относительно системы координат активной части в точке O до начала процесса сопряжения может иметь определенные линейные и угловые отклонения по положению и ориентации, то есть пассивная часть имеет 6 степеней свободы относительно активной части. Для сопряжения необходимо определить ограничения на эти параметры.

Рассмотрим две проекции предлагаемого устройства сопряжения в системе координат с центром в точке O (рис. 2).

Допустимое линейное отклонение при сопряжении d_x вдоль оси X соответствует граничному положению при $z_{\max}$, которое определяется высотой губок: $z_{\max} = h$. В процессе сопряжения при $z_{\max}$ для успешного сопряжения d_x будет наименьшим. При этом чем меньше расстояние между активной и пассивной частью захвата по оси Z , тем больше может быть d_x . Под успешным сопряжением подразумевается возможность достижения конечного положения, соответствующее достижению точки O пассивной частью устройства (рис. 2).

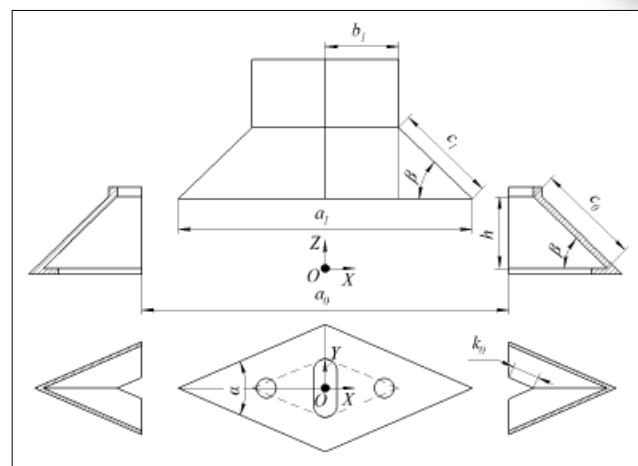


Рис. 2. Проекция элементов устройства сопряжения: a_0 – максимальное расстояние, на которое могут быть разведены губки активной части устройства сопряжения; a_1 – длина большей диагонали основания пассивной части устройства; b_1 – размер крепежной площадки для крепления пассивной части устройства сопряжения к модулю системы; c_0 – размер ребра губки активной части устройства; c_1 – длина ребра пассивной части устройства; k_0 – длина стороны угла верхней части губок, с которой пассивная часть контактирует при сопряжении; h – высота губок; α – угол между ребрами как пассивной, так и активной части устройства; β – угол наклона ребра пассивной части и губки активной части

Fig. 2. Projections of the interface device elements: a_0 – the maximum distance to which the jaws of the active part of the interface device can be spread; a_1 – the length of the larger diagonal of the device passive part base; b_1 – the size of the mounting platform for attaching the passive part of the interface device to the system module; c_0 – the size of the jaw edge in the active part of the device; c_1 – length of the edge in the device passive part; k_0 – the length of the jaw angle side in the upper part where the passive part interfaces; h – the height of the jaws; α – the angle between the edges of both the passive and active parts of the device; β – the tilt angle of the passive part edge and the active part jaw

Тогда допустимое линейное отклонение d_x вдоль оси X , исходящей из системы координат в точке O , должно удовлетворять условие (1):

$$\begin{cases} -\frac{a_0 - a_1}{2} < d_x < \frac{a_0 - a_1}{2}, \\ a_0 > a_1 \end{cases}, \quad (1)$$

где a_0 – максимальное расстояние, на которое могут быть разведены губки активной части устройства сопряжения, мм;

a_1 – длина большей диагонали основания пассивной части устройства, мм;

d_x – допустимое линейное отклонение, мм.

При проектировании устройства сопряжения параметр a_1 его пассивной части зависит от угла наклона губки активной части устройства β (рис. 2). Изменяя этот угол, можно уменьшать или увеличивать параметр a_1 :

$$a_1 = 2 \cdot (c_1 \cos \beta + b_1), \quad (2)$$

где c_1 – длина ребра пассивной части устройства, мм;

b_1 – размер крепежной площадки, мм;

β – угол наклона ребра пассивной части и губки активной части, град.

Полученное значение входит в расчет отклонения в условии (1), поэтому, подставив выражение (2) в (1), можно определить диапазон допустимых отклонений вдоль оси X , варьируя параметр β . В соответствии с этим условие (1) приобретает следующий вид:

$$-\frac{a_0 - 2 \cdot (c_1 \cos \beta + b_1)}{2} < d_x < \frac{a_0 - 2 \cdot (c_1 \cos \beta + b_1)}{2}. \quad (3)$$

Для успешного сопряжения необходимо, чтобы линейное отклонение вдоль оси X находилось в диапазоне допустимых отклонений в соответствии с (3).

Допустимое линейное отклонение при сопряжении d_y вдоль оси Y относительно центра O также определяется при $z_{\max} = h$. Диапазон данных линейных отклонений можно вычислить в соответствии с неравенством (4):

$$- \left| k_0 \sin \frac{\alpha}{2} \right| < d_y < \left| k_0 \sin \frac{\alpha}{2} \right|, \quad (4)$$

где k_0 – длина стороны угла верхней части губок, с которой пассивная часть контактирует при сопряжении, мм;

α – угол между ребрами как пассивной, так и активной части устройства, град.;

d_y – линейное отклонение вдоль оси Y , мм.

Для успешного сопряжения необходимо, чтобы линейное отклонение d_y вдоль оси Y находилось между расчетными значениями в (4). Теоретически угол α может иметь значения в диапазоне $(0^\circ; 180^\circ)$, однако практически рекомендуется выбирать значения из диапазона $(45^\circ; 90^\circ)$. Это обусловлено тем, что при больших значениях угла может ухудшиться свойство центрирования сопряжения, что снизит точность конечного положения активной и пассивной частей, а также потребует прикладывать значительную силу к губкам активной части устройства сопряжения.

Если выбирать значения угла меньше 45° , то это потребует большей точности позиционирования между активной и пассивной частями устройства для успешного сопряжения. Аналогичными причинами можно обосновать рекомендуемый диапазон значений угла $\beta \in (25^\circ; 70^\circ)$, теоретический диапазон которого $(0^\circ; 180^\circ)$.

Допустимое линейное отклонение d_z вдоль оси Z рассматривается с учетом отклонений d_x и d_y , при которых пассивная часть устройства сопряжения находится на такой высоте вдоль оси Z , чтобы активная часть устройства вошла в контакт с ней для дальнейшего сопряжения. Отклонение d_z зависит от угла β и длины c_1 и для успешного сопряжения необходимо, чтобы выполнялось неравенство:

$$0 \leq d_z < c_0 \cos \beta, \quad (5)$$

где d_z – допустимое линейное отклонение вдоль оси Z , мм.

Допустимый диапазон углового отклонения относительно оси Z при сопряжении определяется при $z_{\max}$, что обусловлено необходимостью контакта ребра пассивной части устройства сопряжения с ребрами губок активной части:

$$- \left| \operatorname{atan} \left(\frac{2 \left(k_0 \sin \frac{\alpha}{2} - d_y \right)}{a_1} \right) \right| < \theta_z < \left| \operatorname{atan} \left(\frac{2 \left(k_0 \sin \frac{\alpha}{2} - d_y \right)}{a_1} \right) \right|, \quad (6)$$

где θ_z – угловое отклонение относительно оси Z , град.

Таким образом, для успешного сопряжения необходимо, чтобы поворот пассивной и активной частей устройства сопряжения относительно друг друга вдоль оси Z находился в расчетном диапазоне (6).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для апробации предложенной методики расчета были заданы исходные требования по допустимым отклонениям при сопряжении и необходимые размеры для будущего прототипа: $a_1 = 57$ мм; $b_1 = 14$ мм; $\beta = 60$ град.; $d_x = 10$ мм; $d_y = 11$ мм; $d_z = 13$ мм; $\theta_z = 20$ град. Это предельно допустимые значения для успешного сопряжения.

С учетом исходных размеров и принятых допустимых отклонений необходимо выразить линейные размеры a_0 , c_0 и k_0 . Поскольку устройство сопряжения симметрично относительно точки O , то далее рассматриваются только неотрицательные отклонения d_x , d_y , d_z и θ_z .

Из (1) с учетом вышесказанного получается следующее неравенство:

$$a_0 > a_1 + 2d_x. \quad (7)$$

Подставив в (7) исходные данные, найдем, что $a_0 > 77$ мм. Далее приняли, что $a_0 = 78$ мм.

Ограничение величины c_0 выражается из (5):

$$\begin{cases} c_0 > \frac{d_z}{\cos \beta} \\ 25^\circ < \beta < 70^\circ. \end{cases} \quad (8)$$

Подставим исходные данные в (8), тогда $c_0 > 26$ мм. Приняли, что $c_0 = 27$ мм.

В соответствии с практической рекомендацией на ограничение угла α выбрали значение $\alpha = 85^\circ$. Тогда из неравенства (4) можно получить ограничение для k_0 :

$$k_0 > \frac{d_y}{\sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (9)$$

В соответствии с (9) нашли, что $k_0 > 16$ мм, выбрали $k_0 = 17$ мм.

С учетом принятых в соответствии с (7)–(9) значениями и заданными параметрами в САПР определили новые размеры и реализовали модель электромеханического устройства сопряжения. Далее на модели визуализировали рассчитанные значения допустимых отклонений при сопряжении (рис. 3) и взаимное расположение пассивной и активной частей.

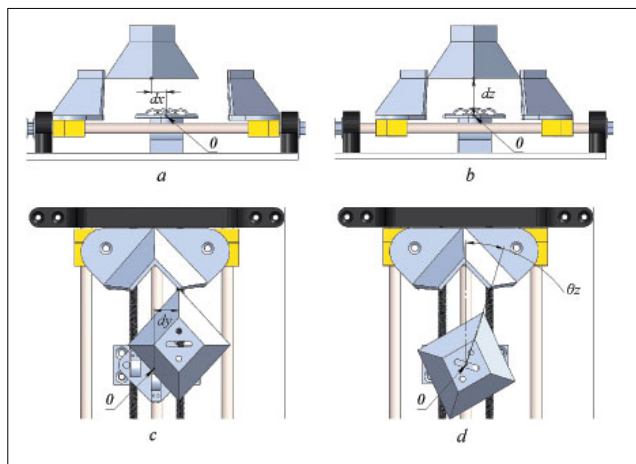


Рис. 3. Взаимное расположение пассивной и активной частей устройства сопряжения при максимально допустимых отклонениях: а – вдоль оси X ; б – вдоль оси Z ; с – вдоль оси Y ; д – угловое отклонение относительно оси Z

Fig. 3. The mutual position of the passive and active parts on the interface device model with the maximum permissible deviations: а – dx deviation (along the X -axis); б – dz deviation (along the Z -axis); с – dy deviation (along the Y -axis); д – θ_z deviation (angular deviation relative to the Z -axis)

При отклонениях, заданных при расчете, сопряжение потенциально должно пройти успешно. Использование граничных значений расчетных размеров и углов в деталях устройства сопряжения в совокупности с неточностями изготовления может снизить вероятность успешного сопряжения в реальном устройстве.

В соответствии с расчетными соотношениями предложенной структуры электромеханического устройства сопряжения был реализован экспериментальный прототип (рис. 4 и 5).

Сопряжение частей устройства осуществляется путем сведения губок захватного механизма.

Размеры устройства сопряжения зависят от необходимых значений подключаемых модулей и геометрических параметров платформы. Габаритные размеры прототипа составляют $200 \times 130 \times 58$ мм.

В экспериментах оценивали успешность сопряжения в зависимости от углового и линейных отклонений. Сопряжение считалось успешным, если пассивная часть устройства расположена по центру и зафиксирована в активной части, а также установлен электрический контакт для передачи питания и информации. Для подтверждения электрического контакта использовали световую индикацию.

Эксперименты по сопряжению (демонстрация работы устройства сопряжения модулей РТК: https://www.youtube.com/watch?v=i3kNkYfoLGE&ab_channel=LaboratoryofAutonomousRoboticSystems) проводились отдельно по каждому отклонению с разделением на две группы. Первая группа экспериментов заключалась в изменении одного параметра в рамках допу-

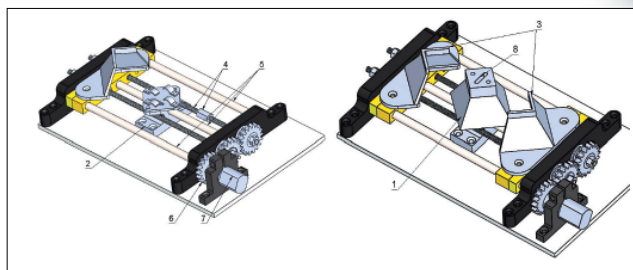


Рис. 4. 3D-модель прототипа устройства сопряжения: 1 – пассивная часть; 2 – основание активной части; 3 – захватные губки активной части механизма; 4 – передача «винт – гайка»; 5 – направляющие валы передачи «винт – гайка»; 6 – шестерни; 7 – электродвигатель; 8 – отверстие под контакты

Fig. 4. 3D model of the interface device prototype: 1 – passive part; 2 – the active part's base; 3 – gripping jaws of the mechanism's active part; 4 – "screw-nut" transmission; 5 – guide shafts of the "screw-nut" transmission; 6 – gears; 7 – electric motor; 8 – hole for contacts

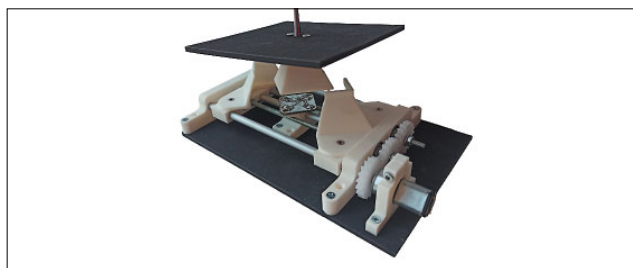


Рис. 5. Экспериментальный прототип устройства сопряжения

Fig. 5. An experimental prototype of the interface device

стимого диапазона, при этом остальные отклонения принимали равными 90% от максимально допустимого значения. Во второй группе изменяли одновременно три отклонения при фиксированном значении одного. Диапазон значений отклонений выбран близким к максимально допустимым, а для всех значений в выбранном диапазоне проводили по 10 экспериментов. При этом использовали оборудование, позволяющее устанавливать линейные отклонения с погрешностью 0,3 мм и угловое отклонение с погрешностью 0,5°.

Для оценки успешности сопряжения выбрали значения в диапазоне линейных отклонений вдоль оси X от 5 до 10 мм с шагом 1 мм (табл. 1).

При приближении отклонения к максимально допустимому значению снижается вероятность успешного сопряжения. Так, при смещении по оси X на 10 мм количество успешных сопряжений составило 90%. Ожидался более низкий показатель успешных сопряжений, однако выбор параметров в соответствии с неравенствами (7)-(9) позволил получить более широкий реальный диапазон допустимых отклонений (3)-(6). При изменении трех других отклонений и фиксированном d_x успешность сопряжения уменьшилась

Результаты экспериментов с отклонениями по оси X THE RESULTS OF EXPERIMENTS BASED ON DEVIATIONS ALONG THE X-AXIS													
Параметры / Parameters	Значение / Value												
Линейные отклонения по осям, мм: Linear deviations along the axes, mm: X	5	6	7	8	9	10	9						
Y	11						6	7	8	9	10	11	12
Z	12						7	8	9	10	11	12	13
Угловое отклонение, град. Angular deviation, degree	18						8	10	12	14	16	18	20
Успешность сопряжения, % Interfacing success, %	100	100	100	100	100	90	100	100	100	100	100	100	80

на 20%. Это можно объяснить тем, что с увеличением d_y диапазон допустимого углового смещения θ_z сужается.

Для оценки успешности сопряжения был выбран диапазон линейных отклонений вдоль оси Y от 3 до 11 мм с шагом 2 мм (табл. 2).

При отклонениях относительно оси Y, достигающих заданного допустимого значения, возможность успешного сопряжения может составить примерно 90%.

значение соответствует среднему по двум группам экспериментов.

При изучении углового отклонения относительно оси Z между пассивной и активной составляющими устройства сопряжения был принят диапазон от 4 до 20° с шагом 4° (табл. 4).

При $\theta_z = 20^\circ$ все 10 сопряжений выполнены успешно. При этом 80% удачных попыток попыток зафиксированы, когда отклонения d_x , d_y и d_z равны заданным допустимым значениям. Устройство сопряже-

Результаты экспериментов с отклонениями по оси Y THE RESULTS OF EXPERIMENTS BASED ON DEVIATIONS ALONG THE Y-AXIS													
Параметры / Parameters	Значение / Value												
Линейные отклонения по осям, мм: Linear deviations along the axes, mm: Y	3	5	7	9	11	11							
X	9						5	6	7	8	9	10	
Z	12						8	9	10	11	12	13	
Угловое отклонение, град. Angular deviation, degree	18						10	12	14	16	18	20	
Успешность сопряжения, % Interfacing success, %	100	100	100	100	90		100	100	100	100	100	90	

Отклонения между активной и пассивной составляющими прототипа устройства вдоль оси Z выбраны в диапазоне от 5 до 13 мм с шагом 2 мм (табл. 3).

При отклонениях $d_z = 13$ мм доля успешных сопряжений может составить приблизительно 90%. Это

спроектировано так, чтобы параметр d_x не сказывался на допустимом угловом смещении, которое должно оставаться в установленных пределах. Связь параметра θ_z с отклонением d_y приведена в формуле (6).

Результаты экспериментов с отклонениями вдоль оси Z THE RESULTS OF EXPERIMENTS BASED ON DEVIATIONS ALONG THE Z-AXIS													
Параметры / Parameters	Значение / Value												
Линейные отклонения по осям, мм: Linear deviations along the axes, mm: Z	5	7	9	11	13	12							
X	9						5	6	7	8	9	10	
Y	10						6	7	8	9	10	11	
Угловое отклонение, град. Angular deviation, degree	18						10	12	14	16	18	20	
Успешность сопряжения, % Interfacing success, %	100	100	100	100	90		100	100	100	100	100	90	

Таблица 4

Table 4

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С УГЛОВЫМИ ОТКЛОНЕНИЯМИ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ Z
THE RESULTS OF EXPERIMENTS BASED ON ANGULAR DEVIATIONS ALONG THE Z-AXIS

Параметры / Parameters	Значение / Value									
Угловое отклонение, град. Angular deviation, degree	4	8	12	16	20	18				
Линейные отклонения по осям, мм: Linear deviations along the axes, mm: X	9					5	6	7	8	10
Y	10					6	7	8	9	11
Z	12					3	5	7	9	13
Успешность сопряжения, % Interfacing success, %	100	100	100	100	100	100	100	100	100	80

В работе неявным образом описано влияние параметра d_z на θ_z , который был выведен из соображений протекания процесса сопряжения в начальные моменты времени. Особенности геометрических форм активной и пассивной частей устройства сопряжения обуславливают следующую закономерность: чем меньше d_z , тем больше допустимый диапазон для θ_z . Однако в целях практического применения рекомендуется выбирать расчетный диапазон (6), при котором сопряжение будет потенциально успешным, что подтверждается результатами экспериментов.

Применение разработанного устройства сопряжения позволит создавать мобильные многофункциональные робототехнические платформы различного назначения, в том числе сельскохозяйственного, с возможностью автономной реконфигурации. Это даст возможность снизить вовлечение человека в эксплуатацию РС. Предложенное решение поможет расширить функционал базовой робототехнической платформы на произвольное число модулей и разместить их в практически любых местах платформы. Кроме того, свойство масштабирования устройства сопряжения позволит использовать модули с различными массогабаритными параметрами.

Представленная в данной работе структура устройства помогает реализовать обмен электрическими сигналами, что важно при информационном взаимодействии в распределенных системах управления РС модульной архитектуры [34-35].

Выводы. Создали прототип устройства сопряжения посредством формирования его структуры и определения расчетных соотношений. Выявили, что с помощью разработанного устройства возможно сопряжение модуля и базовой платформы при ограниченной точности взаимного позиционирования. При соблюдении заданных диапазонов допустимых осевых линейных отклонений и отклонений по углу между пассивной и активной частями устройства сопряжение проходит успешно в 98% и более случаев.

Дальнейшие исследования будут направлены на решение задач, связанных с конечным позиционированием базовой платформы относительно модуля и разработкой алгоритмов для оценки вероятности успешного сопряжения на основе сенсорной системы РС.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда: РНФ № 20-79-10325.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Chen I.-M., Yim M. Modular Robots. Springer Handbook of Robotics. 2016. 531-542.
- Yim M., Shirmohammadi B., Sastra J., Park M., Dugan M., Taylor C. J. Towards robotic self-reassembly after explosion. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2007. 2767-2772.
- Yim M., Shen W.M., Salemi B., Rus D., Moll M., Lipson H., Chirikjian G.S. Modular self-reconfigurable robot systems [grand challenges of robotics]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 2007. N14(1). 43-52.
- Cantelli L., Bonaccorso F., Longo D., Melita C.D., Schillaci G., Muscato G. A small versatile electrical robot for autonomous spraying in agriculture. *AgriEngineering*. 2019. N1(3) 391-402.
- Tabile R.A., Godoy E.P., Pereira R.R., Tangerino G.T., Porto A.J., Inamasu R.Y. Projeto e desenvolvimento da arquitetura de um robô agrícola móvel. *Engenharia Agrícola*. 2011. N31(1). 130-142.
- Quaglia G., Visconte C., Scimmi L. S., Melchiorre M., Cavallone P., Pastorelli S. Robot arm and control architecture integration on a UGV for precision agriculture. *Advances in Mechanism and Machine Science*. 2019. 2339-2348.

7. Pecka A., Osadcuks V. Conceptual Design of Modular Multi Functional Agricultural Mobile Robot. *Research for rural development*. 2018. N1. 202-206.
8. Bawden O., Kulk J., Russell R., McCool C., English A., Dayoub F., Perez T. Robot for weed species plant-specific management. *Journal of Field Robotics*. 2017. N34(6). 1179-1199.
9. Grimstad L., From P.J. Software components of the Thorvald II modular robot. *Modeling, Identification and Control*. 2018. N3. 157-165.
10. Grimstad L., From P.J. Thorvald II – a Modular and Re-configurable Agricultural Robot. *IFAC-PapersOnLine*. 2017. N50(1). 4588-4593.
11. Grimstad L., From P.J. The Thorvald II agricultural robotic system. *Robotics*. 2017. N6(4). 24.
12. Lee H.-Y., Murray C.C. Robotics in order picking: evaluating warehouse layouts for pick, place, and transport vehicle routing systems. *International Journal of Production Research*. 2018. N57(18). 5821-5841.
13. Schulz T., Holthaus P., Amirabdollahian F., Koay K. L. Humans' perception of a robot moving using a slow in and slow out velocity profile. *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*. 2019. 594-595.
14. Chen Y., Leighton B., Zhu H., Ke X., Liu S., Zhao L. Sub-map-based indoor navigation system for the Fetch robot. *IEEE Access*. 2020. N8. 81479-81491.
15. Wise M., Ferguson M., King D., Diehr E., Dymesich D. Fetch and freight: Standard platforms for service robot applications. *Workshop on autonomous mobile service robots*. 2016.
16. Andreev V., Kim V. Control System and Design of the Motion Module of a Heterogeneous Modular Mobile Robot. *Annals of DAAAM & Proceedings*. 2016. N27. 0586-0594.
17. Yim M., Shirmohammadi B., Sastra J., Park M., Dugan M., Taylor C. J. Towards robotic self-reassembly after explosion. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2007. 2767-2772.
18. Salemi B., Moll M., Shen W.M. SUPERBOT: A deployable, multi-functional, and modular self-reconfigurable robotic system. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2006. 3636-3641.
19. Yim M., Roufas K., Duff D., Zhang Y., Eldershaw C., Homans S. Modular reconfigurable robots in space applications. *Auton Robot*. 2003. N14. 225-237.
20. Zhang T., Zhang W., Gupta M.M. An underactuated self-reconfigurable robot and the reconfiguration evolution. *Mechanism and Machine Theory*. 2018. N124. 248-258.
21. Liu Y., Wei R., Dong H., Zhu Y., Zhao J. A Designation of Modular Mobile Reconfigurable Platform System. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*. 2020. N20(09). 2040006.
22. Sprowewitz A., Asadpour M., Bourquin Y., Ijspeert A.J. An active connection mechanism for modular self-reconfigurable robotic systems based on physical latching. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2008. 3508-3513.
23. Sprowewitz A., Asadpour M., Billard A., Dillenbourg P., Ijspeert A. Roombots – modular robots for adaptive furniture. *IROS Workshop on Self-Reconfigurable Robots, Systems and Applications*. 2008.
24. Nielsen J., Lund H.H. Modular robotics as a tool for education and entertainment. *Computers in Human Behavior*. 2008. N24(2). 234-248.
25. Zykov V., Chan A., Lipson H. Molecubes: An open-source modular robotics kit. *IROS Self-Reconfigurable Robotics Workshop*. 2007. 3-6.
26. Zykov V., Phelps W., Lassabe N., Lipson H. Molecubes extended: Diversifying capabilities of open-source modular robotics. *IROS Self-Reconfigurable Robotics Workshop*. 2008. 22-26.
27. Zykov V., Mytilinaios E., Desnoyer M., Lipson H. Evolved and designed self-reproducing modular robotics. *IEEE Transactions on robotics*. 2007. N23(2). 308-319.
28. Romanishin J.W., Gilpin K., Rus D. M-Blocks: Momentum-Driven, Magnetic Modular Robots. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2013. 4288-4295.
29. Lyder A., Stoy K., García R. F. M., Larsen J. C., Hermansen P. On sub-modularization and morphological heterogeneity in modular robotics. *Intelligent Autonomous Systems*. 2012. 649-661.
30. Lyder A., Garcia R.F.M., Stoy K. Mechanical design of Odin, an extendable heterogeneous deformable modular robot. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2008. 883-888.
31. Parrott C., Dodd T.J., Groß R. HiGen: A high-speed genderless mechanical connection mechanism with single-sided disconnect for self-reconfigurable modular robots. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2014. 3926-3932.
32. Jensen K., Nielsen S. H., Joergensen R. N., Boegild A., Jacobsen N. J., Joergensen O. J., Jaeger-Hansen C. L. A low cost, modular robotics tool carrier for precision agriculture research. *Proceedings of the 11th International Conference on Precision Agriculture*. 2012.
33. White P.J., Kopanski K., Lipson H. Stochastic self-reconfigurable cellular robotics. *IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings*. 2004. N3. 2888-2893.
34. Андреев В.П., Плетенев П.Ф. Метод информационного взаимодействия для систем распределенного управления в роботах с модульной архитектурой // *Труды СПИИРАН*. 2018. N57(2). С. 134-160.
35. Косенко В.В., Шаров В.В., Ценч Ю.С. Главные конструкторы Волгоградских тракторов. К 90-летию СТЗ-ВГТЗ // *История науки и техники*. 2020. N8. С. 85-97.



REFERENCES

- Chen I.-M., Yim M. Modular Robots. Springer Handbook of Robotics. 2016. 531-542 (In English).
- Yim M., Shirmohammadi B., Sastra J., Park M., Dugan M., Taylor C. J. Towards robotic self-reassembly after explosion. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2007. 2767-2772 (In English).
- Yim M., Shen W. M., Salemi B., Rus D., Moll M., Lipson H., Chirikjian G. S. Modular self-reconfigurable robot systems [grand challenges of robotics]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 2007. N14(1). 43-52 (In English).
- Cantelli L., Bonaccorso F., Longo D., Melita C. D., Schil-laci G., Muscato G. A small versatile electrical robot for au-tonomous spraying in agriculture. *AgriEngineering*. 2019. N1(3) 391-402 (In English).
- Tabile R.A., Godoy E.P., Pereira R.R., Tangerino G.T., Por-to A.J., Inamasu R.Y. Projeto e desenvolvimento da arquite-tura de um robô agrícola móvel. *Engenharia Agrícola*. 2011. N31(1). 130-142 (In Spanish).
- Quaglia G., Visconte C., Scimmi L.S., Melchiorre M., Ca-vallone P., Pastorelli S. Robot arm and control architecture integration on a UGV for precision agriculture. *Advances in Mechanism and Machine Science*. 2019. 2339-2348 (In En-glish).
- Pecka A., Osadcuks V. Conceptual Design of Modular Multi Functional Agricultural Mobile Robot. *Research for rural development*. 2018. N1. 202-206 (In English).
- Bawden O., Kulk J., Russell R., McCool C., English A., Day-oub F., Perez T. Robot for weed species plant-specific man-agement. *Journal of Field Robotics*. 2017. N34(6). 1179-1199 (In English).
- Grimstad L., From P.J. Software components of the Thor-vald II modular robot. *Modeling, Identification and Control*. 2018. N3. 157-165 (In English).
- Grimstad L., From P.J. Thorvald II – a Modular and Re-con-figurable Agricultural Robot. *IFAC-PapersOnLine*. 2017. N50(1). 4588-4593 (In English).
- Grimstad L., From P.J. The Thorvald II agricultural robotic system. *Robotics*. 2017. N6(4). 24 (In English).
- Lee H.-Y., Murray C.C. Robotics in order picking: evaluat-ing warehouse layouts for pick, place, and transport vehicle routing systems. *International Journal of Production Research*. 2018. N57(18). 5821-5841 (In English).
- Schulz T., Holthaus P., Amirabdollahian F., Koay K.L. Hu-mans' perception of a robot moving using a slow in and slow out velocity profile. *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*. 2019. 594-595 (In English).
- Chen Y., Leighton B., Zhu H., Ke X., Liu S., Zhao L. Sub-map-based indoor navigation system for the Fetch robot. *IEEE Access*. 2020. N8. 81479-81491 (In English).
- Wise M., Ferguson M., King D., Diehr E., Dymesich D. Fetch and freight: Standard platforms for service robot applica-tions. *Workshop on autonomous mobile service robots*. 2016 (In English).
- Andreev V., Kim V. Control System and Design of the Mo-tion Module of a Heterogeneous Modular Mobile Robot. *An-nals of DAAAM & Proceedings*. 2016. N27. 0586-0594 (In English).
- Yim M., Shirmohammadi B., Sastra J., Park M., Dugan M., Taylor C.J. Towards robotic self-reassembly after explosion. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2007. 2767-2772 (In English).
- Salemi B., Moll M., Shen W.M. SUPERBOT: A deployable, multi-functional, and modular self-reconfigurable robotic system. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2006. 3636-3641 (In English).
- Yim M., Roufas K., Duff D., Zhang Y., Eldershaw C., Ho-mans S. Modular reconfigurable robots in space applications. *Auton Robot*. 2003. N14. 225-237 (In English).
- Zhang T., Zhang W., Gupta M.M. An underactuated self-re-configurable robot and the reconfiguration evolution. *Mech-anism and Machine Theory*. 2018. N124. 248-258 (In En-glish).
- Liu Y., Wei R., Dong H., Zhu Y., Zhao J. A Designation of Modular Mobile Reconfigurable Platform System. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*. 2020. N20(09). 2040006 (In English).
- Sproewitz A., Asadpour M., Bourquin Y., Ijspeert A.J. An active connection mechanism for modular self-reconfigu-rable robotic systems based on physical latching. *IEEE In-ternational Conference on Robotics and Automation*. 2008. 3508-3513 (In English).
- Sproewitz A., Asadpour M., Billard A., Dillenbourg P., Ij-speert A. Roombots – modular robots for adaptive furniture. *IROS Workshop on Self-Reconfigurable Robots, Systems and Applications*. 2008 (In English).
- Nielsen J., Lund H.H. Modular robotics as a tool for educa-tion and entertainment. *Computers in Human Behavior*. 2008. N24(2). 234-248 (In English).
- Zykov V., Chan A., Lipson H. Molecubes: An open-source modular robotics kit. *IROS Self-Reconfigurable Robotics Workshop*. 2007. 3-6 (In English).
- Zykov V., Phelps W., Lassabe N., Lipson H. Molecubes ex-tended: Diversifying capabilities of open-source modular ro-botics. *IROS Self-Reconfigurable Robotics Workshop*. 2008. 22-26 (In English).
- Zykov V., Mytilinaios E., Desnoyer M., Lipson H. Evolved and designed self-reproducing modular robotics. *IEEE Trans-actions on robotics*. 2007. N23(2). 308-319 (In English).
- Romanishin J.W., Gilpin K., Rus D. M-Blocks: Momen-tum-Driven, Magnetic Modular Robots. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2013. 4288-4295 (In English).
- Lyder A., Stoy K., García R. F. M., Larsen J. C., Herman-sen P. On sub-modularization and morphological heteroge-neity in modular robotics. *Intelligent Autonomous Systems*. 2012. 649-661 (In English).
- Lyder A., Garcia R.F.M., Stoy K. Mechanical design of Odin, an extendable heterogeneous deformable modular robot. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2008. 883-888 (In English).

31. Parrott C., Dodd T.J., Groß R. HiGen: A high-speed genderless mechanical connection mechanism with single-sided disconnect for self-reconfigurable modular robots. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2014. 3926-3932 (In English).
32. Jensen K., Nielsen S. H., Joergensen R. N., Boegild A., Jacobsen N. J., Joergensen O. J., Jaeger-Hansen C. L. A low cost, modular robotics tool carrier for precision agriculture research. *Proceedings of the 11th International Conference on Precision Agriculture*. 2012 (In English).
33. White P.J., Kopanski K., Lipson H. Stochastic self-reconfigurable cellular robotics. *IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings*. 2004. N3. 2888-2893 (In English).
34. Andreev V.P., Pletenev P.F. Metod informatsionnogo vzaimodeystviya dlya sistem raspredelenного upravleniya v robotakh s modul'noy arkhitekturoy [Method of information interaction for distributed control systems of robots with modular architecture]. *Trudy SPIIRAN*. 2018. N57(2). 134-160 (In Russian).
35. Kosenko V.V., Sharov V.V., Tsench Yu.S. Glavnye konstruktory Volgogradskikh traktorov. K 90-letiyu STZ-VGTZ [Chief designers of Volgograd tractors. To the 90th anniversary of STZ-VGTZ]. *Istoriya nauki i tekhniki*. 2020. N8. C. 85-97 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Крестовников К.Д. – разработка конструктивно-кинематической схемы устройства, формирование общих выводов, проведение экспериментов.
Ерашов А.А. – разработка расчетных соотношений, литературный анализ, обработка результатов экспериментов.
Васюнина Ю.Г. – разработка конструктивно-кинематической схемы устройства, проектирование и реализация прототипа.
Савельев А.И. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, доработка текста.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Krestovnikov K.D. – development of the device constructive-kinematic diagram, drawing general conclusions, conducting experiments.
Erashov A.A. – design ratios development, literature review, experiment results processing.
Vasyunina Yu.G. – the device constructive-kinematic diagram development, the prototype design and implementation.
Savel'ev A.I. – scientific supervision, overall research direction and planning, manuscript revision.
The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

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

01.02.2022
02.03.2022

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.

Журнал включен в систему Российского индекса цитирования и в Международную информационную систему по сельскому хозяйству *AGRIS*. Электронные версии журнала размещаются на сайте Российской универсальной научной электронной библиотеки.

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 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,
а также в редакции журнала.

Индекс издания **35825**

КОНТАКТЫ:

Тел.: 8 (499) 174-88-11, 8 (499) 174-89-01
www.vimsmit.com e-mail: smit@vim.ru