

EDN: XWJBRT

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-49-54



Научная статья

УДК 631.331



Селекционная сеялка на базе самоходного шасси с роботизированным кассетным загрузочным устройством

Андрей Сергеевич Чулков,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: andrei.chulkov@mail.ru;
Марсель Марселевич Шайхов,
ведущий специалист,
e-mail: mars.shaihov@yandex.ru;

Арсен Хасанбиевич Текушев,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: kmk3.vim@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Для выполнения технологии посева на втором этапе селекции, сортоиспытания и первичного семеноводства зерновых, зернобобовых и других культур обычно применяют кассетные селекционные сеялки с порционными высевальными аппаратами конусного типа. (*Цель исследования*) Дать обзор известных селекционных сеялок на базе самоходного шасси для второго этапа работ с кассетным загрузочным устройством и предложить усовершенствованный вариант селекционной сеялки на основе роботизации процесса подачи семян зерновых, зернобобовых и других культур к порционному высевальному аппарату. (*Материалы и методы*) Дали краткий обзор кассетных сеялок на базе самоходного шасси. Обосновали конструктивно-технологические параметры и разработали сеялку для второго этапа селекционных работ с роботизированным кассетным загрузочным устройством в соответствии с ГОСТ Р 60.0.0.4-2023/ISO 8373:2021 и ОСТ 46 73-78. Провели лабораторные исследования экспериментального образца сеялки с роботизированным кассетным загрузочным устройством. (*Результаты и обсуждение*) Отметили некоторые конструктивные особенности кассетных селекционных сеялок на базе самоходного шасси, в частности, сеялок СКС-6-10 и СССР-6. Предложили техническое решение в направлении роботизации кассетного устройства для загрузки селекционных сеялок, сокращающее применение ручного труда. Разработали конструкцию устройства, ее особенности в том, что блоки кассет с высевальным материалом расположены на вращающейся платформе, а перемещение кассет к высевальным аппаратам происходит с помощью актуатора. Представили схему и алгоритм работы роботизированного кассетного загрузочного устройства карусельного типа. (*Выводы*) Применение роботизированного кассетного загрузочного устройства карусельного типа взамен кассетного загрузочного устройства на кассетной селекционной сеялке создает предпосылки для повышения производительности выполнения основной операции посева за час сменного времени до 20% и снижения трудоемкости выполнения операции посева.

Ключевые слова: посев зерновых культур, самоходное шасси, селекционная кассетная сеялка, роботизированное кассетное загрузочное устройство.

■ **Для цитирования:** Чулков А.С., Шайхов М.М., Текушев А.Х. Селекционная сеялка на базе самоходного шасси с роботизированным кассетным загрузочным устройством // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №1. С. 49-54. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-49-54. EDN: XWJBRT.

Scientific article

Selection Seeder with a Robotic Cassette Loading Device Mounted on Self-Propelled Chassis

Andrey S. Chulkov,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: andrei.chulkov@mail.ru;
Marsel' M. Shaykhov,
leading specialist, e-mail: mars.shaihov@yandex.ru;

Arsen Kh. Tekushev,
Ph.D. (Eng.), senior researcher,
e-mail: kmk3.vim@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Cassette-type selection seeders equipped with portion cone-type sowing devices are typically used in sowing technology at the second stage of selection, variety testing, and primary seed production of cereals, grain legumes, and other crops. (*Research*

purpose) To review existing selection seeders mounted on self-propelled chassis used at the second stage of operations with cassette loading devices and to propose an improved selection seeder integrating robotic automation for the precise feeding of cereal, grain legume, and other crop seeds to the batch sowing mechanism. (*Materials and methods*) A brief review of cassette seeders mounted on self-propelled chassis was conducted. The structural and technological parameters were justified, leading to the development of a selection seeder for the second stage of selection trials. This seeder incorporates a robotic cassette loading device and was designed in compliance with GOST R 60.0.0.4-2023/ISO 8373:2021 and OST 46 73-78. Laboratory tests were carried out on an experimental prototype of the seeder equipped with a robotic cassette loading device. (*Results and discussion*) The study identified key structural features of cassette-type selection seeders mounted on self-propelled chassis, particularly the SKS-6-10 and SSSÉ-6 models. A technical solution was proposed to automate the cassette loading process in selection seeders, reducing the need for manual labor. A new device design was developed, incorporating cassette blocks with sowing material arranged on a rotating platform, while cassette movement to the sowing mechanisms is facilitated by an actuator. Additionally a diagram and an operational algorithm for the robotic carousel-type cassette loading device are presented. (*Conclusions*) Replacing the conventional cassette loading device in a cassette-type selection seeder with a robotic carousel-type cassette loading device can increase sowing productivity by up to 20% per hour of shift time and reduce the labor intensity.

Keywords: cereal crop sowing, self-propelled chassis, selection cassette seeder, robotic cassette loading device.

■ **For citation:** Chulkov A.S., Shaykhov M.M., Tekushev A.Kh. Selection seeder with a robotic cassette loading device mounted on self-propelled chassis. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025.Vol. 19. N1. 49-54 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-49-54. EDN: XWJBRT.

Разработка и применение новых селекционных сеялок с электроприводом рабочих органов и элементами автоматизации и роботизации технологического процесса должны служить более качественному выполнению посева зерновых и других культур в селекционных и семеноводческих питомниках, содействовать уменьшению трудоемкости, и росту производительности труда на посевах делянок и повышению их продуктивности [1-3].

Для выполнения технологии посева на втором этапе селекции, сортоиспытания и первичного семеноводства зерновых, зернобобовых и других культур обычно применяют кассетные селекционные сеялки с порционными высевальными аппаратами конусного типа и кассетные загрузочные устройства (КЗУ) [4-6].

Цель исследования: обзор известных селекционных сеялок на базе самоходного шасси для второго этапа работ с кассетным загрузочным устройством и усовершенствование варианта селекционной сеялки на базе самоходного шасси, содержащий элементы роботизации процесса подачи семян к порционному высевальному аппарату.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Дан краткий обзор кассетных сеялок на базе самоходного шасси. Дано обоснование конструктивно-технологических параметров и разработана сеялка для второго этапа селекционных работ с роботизированным кассетным загрузочным устройством (РКЗУ) в соответствии с ГОСТ Р 60.0.0.4-2023/ИСО 8373:2021 «Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения» и OST 46 73-78 «Параметры опытного поля, схемы посева и требования к типу посевных и уборочных машин в селекции, сортоиспытании и первичном семеноводстве зерновых

и зернобобовых культур. Параметры элементов опытного поля по этапам работ». Согласно OST 46 73-78 на втором этапе селекции на одной делянке длиной от 1 до 5 м должен производиться посев до 500 семян зерновых или до 300 семян зернобобовых культур. Проведены лабораторные исследования экспериментального образца сеялки с роботизированным кассетным загрузочным устройством с использованием разработанной методики.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Представим некоторые конструктивные особенности селекционных сеялок на базе самоходного шасси, оборудованных кассетным загрузочным устройством.

Сеялка кассетная селекционная СКС-6-10 (рис. 1) оборудовалась порционными высевальными аппаратами двух типов: шестью конусными аппаратами автономного посева с кассетным загрузочным устройством и одним аппаратом центрального распределения [6, 7].



Рис. 1. Сеялка кассетная селекционная СКС-6-10

Fig. 1. Cassette-type selection seeder SKS-6-10

Опытный образец 6-рядной самоходной селекционной сеялки СССэ-6 (рис. 2) на базе самоходного шасси, разработанный ранее в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, имел несущую раму и привод высевающих аппаратов, адаптированные для работы с узлами сеялки Rowseed S фирмы Wintersteiger AG (Австрия) [8, 9].



Рис. 2. Сеялка селекционная самоходная СССэ-6
Fig. 2. Self-propelled selection seeder SSSé-6

Загрузка конусных высевающих аппаратов с обводной лентой происходит с помощью кассетного загрузочного устройства (КЗУ), которое обеспечивает подачу кассет с семенным материалом к высевающим аппаратам в автоматическом режиме. Работа порционных высевающих аппаратов синхронизирована с работой механизма перемещения кассет (патент RU 2789549 «Устройство для автоматизации процесса высева семян», 2023 г.).

В рассмотренных кассетных селекционных сеялках с КЗУ вспомогательные операции начальной установки блока кассет с семенами на рабочем столе, снятия со стола освобожденных от кассет пластин, а также последующего размещения сменных блоков кассет с семенами на кассетном столе в циклическом процессе работы сеялки выполняются вручную оператором.

Для загрузки порционных высевающих аппаратов конусного типа семенами предложено применять роботизированное кассетное загрузочное устройство, что позволит повысить производительность и снизить трудоемкость по сравнению с ранее применявшимися кассетными загрузочными устройствами [10, 11].

В ФГБНУ ФНАЦ ВИМ было разработано роботизированное кассетное загрузочное устройство карусельного типа [7, 12, 13].

Схема устройства (патент RU 2806909 «Роботизированное кассетное загрузочное устройство карусельного типа селекционной сеялки», 2023 г.) представлена на рисунке 3.

РКЗУ работает в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 4.

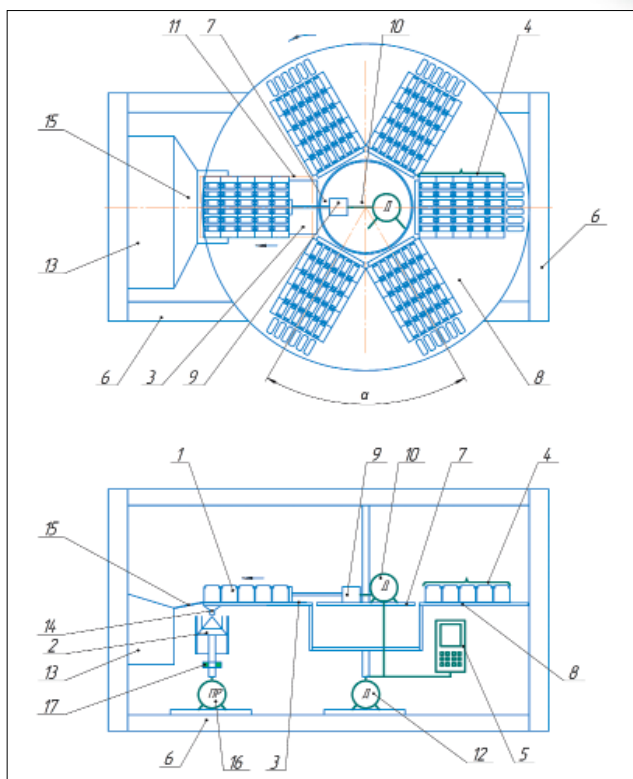


Рис. 3. Схема РКЗУ карусельного типа (вид сверху и сбоку): 1 – кассета с ячейками для высеваемого материала; 2 – высевающий аппарат; 3 – направляющая пластина; 4 – кассетный блок; 5 – блок управления; 6 – рама; 7 – центральная неподвижная платформа; 8 – внешняя подвижная платформа; 9 – актуатор; 10 – электродвигатель привода актуатора; 11 – рабочая зона перемещения кассет; 12 – шаговый электродвигатель привода внешней подвижной платформы; 13 – контейнер для сбора пустых кассет; 14 – рабочий стол с отверстиями для выгрузки семян из ячеек кассеты; 15 – наклонный лоток для спуска пустых кассет; 16 – шаговый электродвигатель привода высевающего аппарата; 17 – датчик вращения конусных высевающих аппаратов

Fig. 3. Diagram of carousel-type robotic cassette loading device (RCLD, top and side views): 1 – cassette with cells for the material to be sown; 2 – sowing device; 3 – guide plate; 4 – cassette block; 5 – control unit; 6 – frame; 7 – central stationary platform; 8 – outer movable platform; 9 – actuator; 10 – actuator drive electric motor; 11 – working area for cassette movement; 12 – stepper motor for the outer movable platform drive; 13 – container for collecting empty cassettes; 14 – work table with holes for unloading seeds from cassette cells; 15 – inclined chute for empty cassette discharge; 16 – stepper electric motor for the sowing unit drive; 17 – rotation sensor for conical sowing devices

РКЗУ для подачи материала к порционным высевающим аппаратам может быть установлено как на отечественных сеялках (типа СКС-6-10, СКС-6А, СССэ-6 и др.) [6-8], так и на селекционных сеялках зарубежных компаний [14].

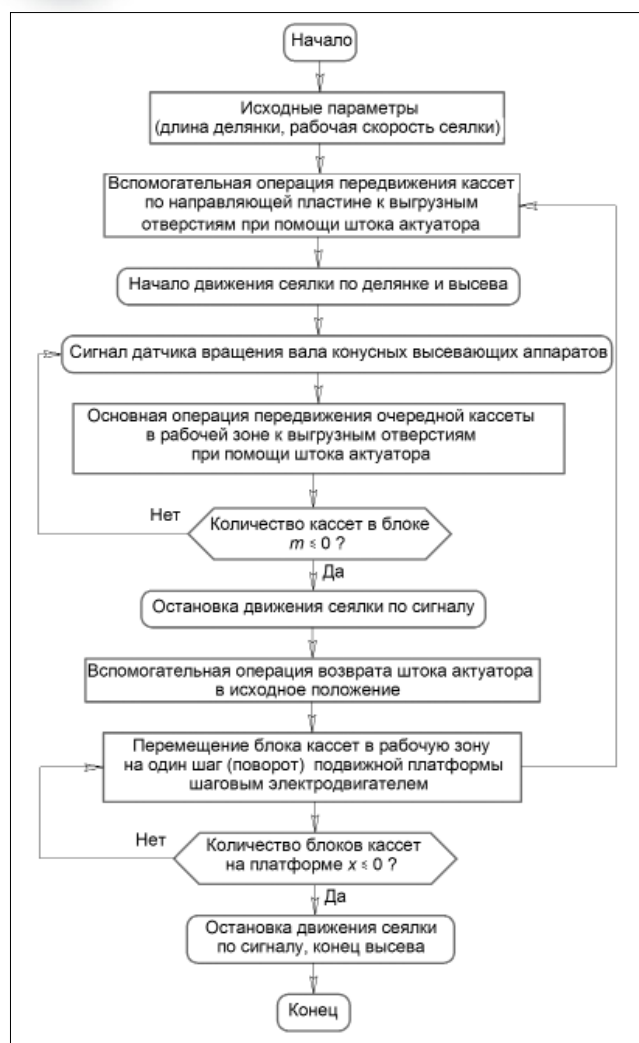


Рис. 4. Алгоритм работы РКЗУ карусельного типа

Fig. 4. Operating algorithm of the carousel-type robotic cassette loading device

Экспериментальный образец сеялки разработан путем интегрирования РКЗУ карусельного типа в селекционную сеялку на базе самоходного шасси типа Т-16. Схема и экспериментальный образец сеялки селекционной самоходной роботизированной для второго этапа работ (СССР-2) представлены на рисунке 5.

Порядок работы сеялки на селекционной делянке

Сеялка с загруженным семенным материалом блоками кассет подается к началу селекционной делянки. Оператор-тракторист включает блок управления, вводит исходные параметры длины делянки и междурядной дорожки, и сеялка начинает работу.

С началом движения сеялки, в соответствии с заданием по засеву делянок, кассеты подаются актуатором в рабочей зоне к выгрузным отверстиям РКЗУ для загрузки высевальных аппаратов конусного типа. Из высевального аппарата семена рав-

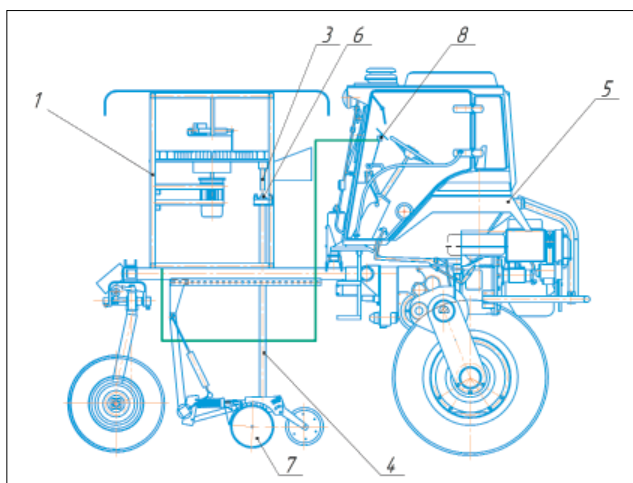


Рис. 5. Схема и экспериментальный образец сеялки селекционной самоходной роботизированной для второго этапа работ (СССР-2): 1 – роботизированное кассетное загрузочное устройство карусельного типа; 2 – самоходное шасси типа Т-16; 3 – высевальный аппарат автономного высева; 4 – двухдисковый сошник; 5 – семяпроводы; 6 – блок управления

Fig. 5. Diagram and experimental prototype of the self-propelled robotic selection seeder for the second stage of operations (SSSR-2): 1 – robotic carousel-type cassette loading device; 2 – self-propelled chassis of the T-16 type; 3 – autonomous sowing unit; 4 – double-disc opener; 5 – seed tubes; 6 – control unit

номерно перемещаются в семяпровод и далее в борозду, образованную двухдисковым сошником. Задельвающие-выравнивающие устройства, выполненные в виде прикатывающих катков, засыпаемые рыхлой почвой посевной материал, подаваемый в борозду, разравнивают поверхность почвы и обеспечивают ее легкое уплотнение.

После схода всех кассет кассетного блока с направляющей пластины в рабочую зону подается очередной блок кассет с семенами посредством поворота на расчетный угол платформы РКЗУ, и процесс подачи кассет к выгрузным отверстиям для загрузки высевальных аппаратов сеялки повторяется.

С использованием программы и методики были проведены лабораторные исследования экспериментального образца сеялки для второго этапа селекционных работ с роботизированным кассетным загрузочным устройством.

По оценке показателей времени цикла работы исследуемых сеялок, посев сеялкой СССР-2 с РКЗУ выполняется быстрее на 11%, в сравнении с сеялкой СССР-6 с КЗУ.

Оценка производительности селекционной сеялки с РКЗУ за час сменного времени

Приведем сравнительный расчет производительностей на втором этапе селекционных работ сеялки СССР-6, оборудованной КЗУ, и сеялки СССР-2 с интегрированным в нее РКЗУ карусельного типа.

Производительность сеялки за час сменного времени:

$$W_{\text{ч}} = 0,1 B_{\text{р}} \cdot v_{\text{с}} \cdot K_{\text{см}}, \text{ га/ч,}$$

где $B_{\text{р}}$ – рабочая ширина захвата сеялки СССР-6, м; $B_{\text{р}} = 0,9$ м; $v_{\text{с}}$ – рабочая скорость движения сеялки, км/ч; $K_{\text{см}}$ – коэффициент использования времени смены.

Для 2-го этапа селекционных работ максимальная скорость для сеялки СССР-6 с КЗУ $v_{\text{с}} = 3,0$ км/ч, для сеялки СССР-2 с РКЗУ – $v_{\text{с}} = 3,6$ км/ч.

Коэффициент использования времени смены:

$$K_{\text{см}} = T_{\text{р}} / T_{\text{см}},$$

где $T_{\text{см}}$ – количество часов в смене, ч; $T_{\text{р}}$ – чистое рабочее время в течение смены, ч.

При пятидневной рабочей неделе $T_{\text{см}} = 8$ ч и $T_{\text{р}} = 5$ ч (расчетное значение);

$$K_{\text{см}} = 5/8 = 0,625.$$

Производительность:

• сеялки СССР-6 с КЗУ

$$W_{\text{чКЗУ}} = 0,1 \cdot 0,9 \cdot 3,0 \cdot 0,625 = 0,169 \text{ га/ч;}$$

• сеялки СССР-2 с РКЗУ карусельного типа

$$W_{\text{чРКЗУ}} = 0,1 \cdot 0,9 \cdot 3,6 \cdot 0,625 = 0,203 \text{ га/ч.}$$

Из результатов расчета следует, что применение РКЗУ карусельного типа взамен КЗУ на селекционной сеялке типа СССР-6 позволит увеличить до 20% производительность сеялки за час сменного времени.

Выводы. Применение роботизированного кассетного загрузочного устройства карусельного типа взамен кассетного загрузочного устройства на кассетной селекционной сеялке создает предпосылки для повышения производительности выполнения основной операции посева за час сменного времени до 20% и снижения количества обслуживающего персонала до одного человека.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Измайлов А.Ю. Интеллектуальные технологии и роботизированные средства в сельскохозяйственном производстве // *Вестник Российской академии наук*. 2019. Т. 89. N5. С. 536-538. DOI: 10.31857/S0869-5873895536-538.
- 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. EDN: YTHPID.
- Жалнин Э.В. Возродим селекцию и семеноводство // *Сельский механизатор*. 2014. N7. С. 4-5. EDN: SVKVRN.
- Ценч Ю.С., Несмиян А.Ю., Хомутова Н.С. История развития конструкции высевальных аппаратов зерновых сеялок // *Вопросы истории естествознания и техники*. 2020. Т. 41. N1. С. 102-117. DOI: 10.31857/S020596060008429-3.
- Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. и др. Научно-технические достижения агроинженерных научных учреждений для производства основных групп сельскохозяйственной продукции // *Техника и оборудование для села*. 2021. N4(286). С. 2-11. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-4-2-11.
- Чулков А.С., Шайхов М.М., Чаплыгин М.Е., Текушев А.Х. Кассетные загрузочные устройства для высевальных аппаратов селекционных сеялок // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2023. Т. 70. N2(51). С. 74-81. DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-2-74-81.
- Чулков А.С., Шибряева Л.С. Параметры кассеты для роботизированного загрузочного устройства селекционной сеялки // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N2. С. 92-97. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-92-97.
- Лавров А.В. К вопросу разработки интеллектуальной технологии высева семенного материала // *Инженерный вестник Дона*. 2018. N4(51). С. 111. EDN: COOZTH.
- Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С., Миронова А.В. Разработка и исследование дозирующей системы высевального устройства пневматической сеялки // *Техника и оборудование для села*. 2021. N6(288). С. 8-11. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-6-8-11.
- Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N4. С. 6-10. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
- Несмиян А.Ю., Ценч Ю.С. Тенденции и перспективы развития отечественной техники для посева зерновых культур // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N3. С. 45-52. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-3-45-52.
- Чулков А.С., Чаплыгин М.Е., Шайхов М.М. Роботизированное кассетное загрузочное устройство карусельного типа для селекционной сеялки // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2024. Т. 17. N3(82). С. 99-107. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2024_3_99-107.
- Чулков А.С., Чаплыгин М.Е., Шайхов М.М. Обоснование параметров работы роботизированного кассетного загрузочного устройства карусельного типа для

селекционной сеялки // *Инженерные технологии и системы*. 2024. Т. 34. N4. С. 549-562. DOI: 10.15507/2658-4123.034.202404.549-562.

14. Yaropud V., Datsiuk D. By improving breeding seeder

sowing device small seeded crops. *Vibrations in Engineering and Technology*. 2021. Vol. 1(100). 152-162. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-15.

REFERENCES

- Izmailov A.Yu. Intelligent technologies and robotic means in agricultural production. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2019. N89(2). 209-210 (In Russian). DOI: 10.31857/S0869-5873895536-538.
- Beylis V.M., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M. et al. Trends in the development of advanced machine technologies and techniques in agricultural production. *Vestnik VIESH*. 2018. N4(33). 150-156 (In Russian). EDN: YTHPID.
- Zhalnin E.V. Revive breeding and seed production. *Selskiy Mehanizator*. 2014. N7. 4-5 (In Russian). EDN: SVKVRH.
- Tsench Yu.S., Nesmiyan A.Yu., Khomutova N.S. The history of development of seed-feeding devices on grain drills. *Studies in the History of Science and Technology*. 2020. Vol. 41. N1. 102-117 (In Russian). DOI: 10.31857/S020596060008429-3.
- Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P. et al. Scientific and technical results of agro-engineering scientific institutions for the production of main groups of agricultural products. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021. N4(286). 2-11 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-4-2-11.
- Chulkov A.S., Shaykhov M.M., Chaplygin M.E., Tekushev A.H. Cassette loading units for hanging devices of breeding seeders. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2023. Vol. 70. N2(51). 74-81 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-2-74-81.
- Chulkov A.S., Shibryaeva L.S. Parameters of a robotic loading device for selection seeder. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. N18(2). 92-97 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-92-97.
- Lavrov A.V. On the development of intellectual technology of seeding seed material. *Engineering Journal of Don*. 2018. N4. 111 (In Russian). EDN: COOZTH.
- Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S., Mironova A.V. Development and research of a pneumatic seed drill seedmetering unit. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021. N6(288). 8-11 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-6-8-11.
- Lobachevsky Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. N15(4). 6-10 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
- Nesmiyan A.Yu., Tsench Yu.S. Tendencies and prospects for the development of domestic machinery for sowing grain crops. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N3. 45-52 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-3-45-52.
- Chulkov A.S., Chaplygin M.E., Shaykhov M.M. Carousel type robotic cassette loading device for breeding seeder. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2024. N17(3). 99-107 (In Russian). DOI: 10.53914/issn2071-2243_2024_3_99-107.
- Chulkov A.S., Chaplygin M.E., Shaykhov M.M. Justifying the operation parameters of a robotic cassette loading device of the carousel type for a selection seeder. *Engineering Technologies and Systems*. 2024. Vol. 34. N4. 549-562 (In Russian). DOI: 10.15507/2658-4123.034.202404.549-562.
- Yaropud V., Datsiuk D. By improving breeding seeder sowing device small seeded crops. *Vibrations in Engineering and Technology*. 2021. Vol. 1(100). 152-162 (In English). DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-15.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Чулков А.С. – формулирование основных целей и задач исследования, составление начального варианта статьи, доработка текста и оформление материалов, визуализация материалов, формирование общих выводов, итоговая переработка статьи;

Шайхов М.М. – анализ литературных источников, формирование общих выводов, итоговая переработка статьи;

Текушев А.Х. – анализ литературных источников, доработка текста, формирование общих выводов.

Авторы одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Chulkov A.S. – developing the main goals and objectives of the study, drafting the initial manuscript, manuscript refinement, material design, research result visualization, developing general conclusions, proofreading the manuscript;

Shaikhov M.M. – literature review, formulating overall conclusions, final manuscript revision;

Tekushev A.Kh. — literature review, manuscript refinement and material design, formulating overall 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

03.12.2024

24.02.2025