

EDN: EFHTVU

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

Научная статья
УДК 631.3:004.942

Программное обеспечение для создания цифровых двойников рабочих органов сельскохозяйственных машин

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

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

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

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

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

■ **Для цитирования:** Миронов Д.А., Попов Д.В., Расулов Р.К., Ламм А.К. Программное обеспечение для создания цифровых двойников высокотехнологичных рабочих органов сельскохозяйственных машин и почвенной среды // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №2. С. 33-39. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-33-39. EDN: EFHTVU.

Scientific article

Software for Developing Digital Twins of Agricultural Machinery Working Bodies

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

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

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

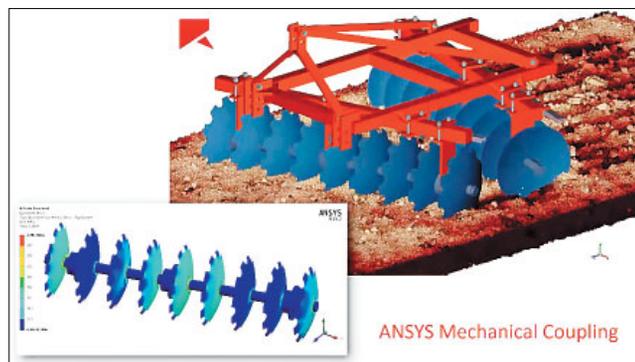


Рис. 1. Взаимодействие программ *Ansys Rocky* и *Ansys Mechanical*

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

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

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

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

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

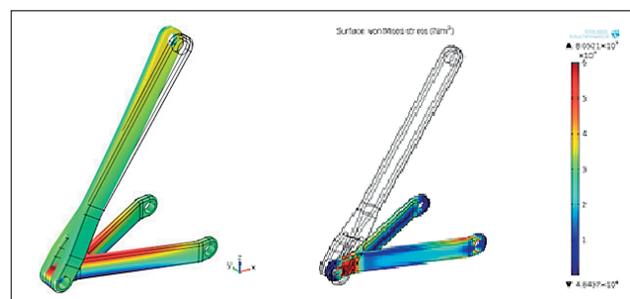


Рис. 2. Возможный элемент рамы рабочего органа (*Comsol*)
Fig. 2. Possible frame element of a working tool (*Comsol*)

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

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

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

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

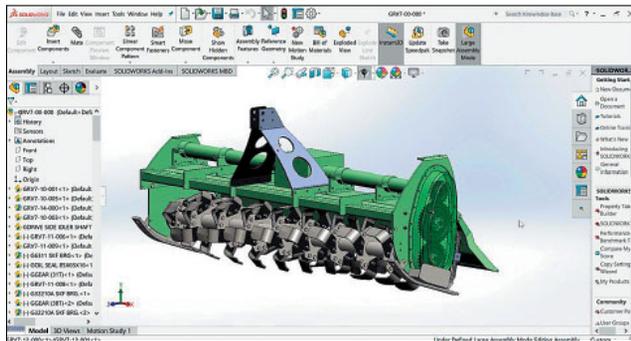


Рис. 3. Модель фрезерного культиватора (Solid Works)
Fig. 3. A Rotary Cultivator Model (Solid Works)

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

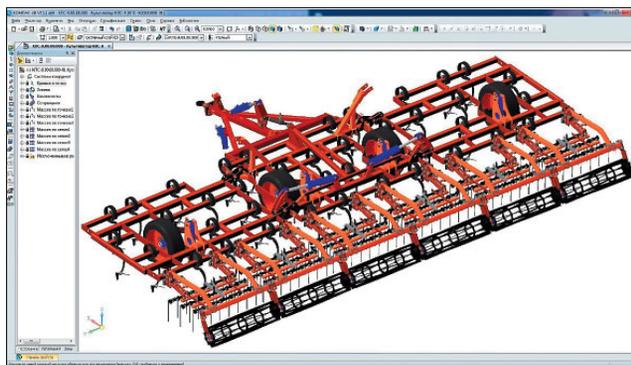


Рис. 4. Модель культиватора КПС-9 (Компас-3D)
Fig. 4. The KPS-9 Cultivator Model (Kompas-3D)

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

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

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

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



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

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

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

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

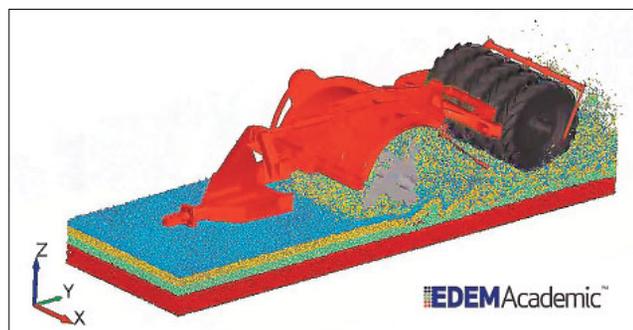


Рис. 6. Фрезерный культиватор в разрезе (Altair EDEM)
Fig. 6. Sectional View of a Milling Cultivator (Altair EDEM)

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

Представленные ПО делятся на CAD программы –

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

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

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

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

Выводы

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

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

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

REFERENCES

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

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

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

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

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

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

04.03.2024

26.04.2024

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

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

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

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

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

The authors read and approved the final manuscript.