

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-14-25

**Технология цифровых двойников в сельском хозяйстве: перспективы применения**

Дорохов Алексей Семенович, академик РАН, д-р техн. наук, главный научный сотрудник
dorokhov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

Павкин Дмитрий Юрьевич, канд. техн. наук, заведующий лабораторией
dimqaqa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8769-8365>

Юрочка Сергей Сергеевич[✉], канд. техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией
yurochkasr@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-2511-7526>

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Аннотация. Технология цифровых двойников (ЦД) пока недостаточно распространена в сельском хозяйстве. Внедрение адекватной модели цифрового двойника позволит сократить издержки при разработке, внедрении и обслуживании сельскохозяйственной техники. Основной проблемой при разработке цифровых двойников в сельском хозяйстве является высокая потребность проекта в ресурсах: от этапа создания лабораторного прототипа до пилотных и полевых испытаний прототипов сельскохозяйственных объектов. С целью сокращения затрат ресурсов при производстве образцов от идеи до серии и при дальнейшем их использовании в течение всего срока службы авторами предложена технология виртуального полигона с созданием цифровых образцов сельскохозяйственных машин (оборудования/деталей) для проведения виртуальных испытаний. Цифровые двойники в сельском хозяйстве разрабатываются с учетом обмена информации между цифровым двойником и физическим объектом. Таким образом, обеспечивается адекватность цифрового двойника в режиме реального времени изменения параметров цифрового двойника и достигается максимальное соответствие физического объекта цифровой копии. Применяя сформированные большие данные и искусственный интеллект, можно разрабатывать системы, которые в зависимости от изменения параметров физического и цифрового объекта автоматически изменяют параметры функционирования узлов/деталей/машин, что позволяет добиться наибольшей их эффективности. На примере животноводческой фермы и роботизированного доения рассмотрены возможные способы применения технологии ЦД. Предложен способ внедрения метода взаимодействия цифрового двойника с физическим объектом в лабораторные и натурные испытания. Разработанная технология цифровых двойников позволяет оставлять цифровую тень, иметь двухстороннюю связь между ЦД и испытываемым физическим объектом. Представленная концепция виртуального полигона дает возможность проводить виртуальные испытания сельскохозяйственных машин, изделий, технологий и систем.

Ключевые слова: технология цифровых двойников, цифровые двойники, сельское хозяйство, концепция виртуального полигона

Формат цитирования: 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. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-14-25>.

© Дорохов А.С., Павкин Д.Ю., Юрочка С.С., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Digital twin technology in agriculture: prospects for use

Aleksei S. Dorokhov, RAS Corresponding Member, DSc (Eng)

dorokhov.vim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>; Researcher ID: H-4089-2018

Dmitry Yu. Pavkin, PhD (Eng), Head of Laboratory

dimqaqa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8769-8365>

Sergey S. Yurochka[✉], Junior Research Engineer¹

yurochkasr@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-2511-7526>

Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract. The technology of digital twins (DT) is still insufficiently widespread in agriculture. The introduction of an adequate digital twin model will reduce costs in the development, implementation and maintenance of agricultural machinery. The main problem in the development of digital twins in agriculture is the high need for resources: from

the stage of designing a laboratory prototype to pilot and field testing of agricultural object prototypes. To reduce the cost of resources in the production of samples from an idea to a series and their further use throughout the entire service life, the authors proposed a technology of a virtual test site for testing digital samples of agricultural machines (equipment/parts). Digital twins used in agriculture are developed taking into account the exchange of information between the digital twin and the physical object. Thus, the adequacy of the digital twin is ensured in the real-time mode of changing its parameters. This feature helps achieve maximum correspondence of the physical object of the digital copy. Using the generated big data and artificial intelligence, it is possible to develop systems that, depending on changes in the parameters of a physical and digital object, automatically change the functioning parameters of units / parts / machines to reach their greatest efficiency. Using the example of a livestock farm and robotic milking, the authors consider possible ways of using the DT technology. The article proposes the introduction of a method of interaction between a digital twin and a physical object in laboratory and field tests. The developed technology of digital twins projects a digital shadow and ensures a two-way connection between the digital center and the physical object being tested. The presented concept of the virtual test site is promising for conducting virtual tests of agricultural machines, products, technologies, and systems.

Keywords: digital twin technology, digital twins, agriculture, virtual polygon concept

For citation: Dorokhov A.S., Pavkin D.Yu., Yurochka S.S. Digital twin technology in agriculture: prospects for use. Agricultural Engineering (Moscow), 2023;25(4):14-25. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-14-25>.

Введение. Технология цифровых двойников (ЦД) в мировой практике появилась в 60-е гг. XX в. Впервые технология применена в виде модификации высокоточных симуляторов для космонавтов НАСА. Технология цифровых двойников в сельскохозяйственной отрасли развивалась в 4 этапа (рис. 1).

В период 1960-2002 гг. цифровые двойники являлись односторонними и малоинформативными, а их адекватность была далекой от физического образца.

Технология ЦД формировалась в качестве технологических предпосылок. Например, в 1994 г. зарубежными компаниями были разработаны первые доильные роботы с системами технического зрения, физиологическая реализация роботов на тот момент была еще не готова для повсеместного внедрения, не было связи физического образца с цифровым двойником¹. Создаваемые трехмерные модели устройств, технологических линий увеличивали качество выпускаемых



Рис. 1. Концепция цифровых двойников в сельском хозяйстве. Этапы развития
Fig. 1. Key events and stages in the conceptualization of the use of digital twins in agriculture¹

¹ История развития Нидерландской компании Lely. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.lely.com/about-lely/our-company/history/> (дата обращения: 17.11.2022).

чертежей² [1]. Цифровым двойником являлись разработанные двухмерные и трехмерные модели в инженерном программном обеспечении, например, в Autocad, без привязки спроектированных деталей к поставщикам, без доработки моделей с учетом производственных издержек (цифровой двойник идеальный, без отображения погрешностей, реальный образец имеет погрешности и недостатки) и т.д.

На втором этапе развития технологии, начиная с 2003 г., увеличивается интерес к цифровым двойникам. Для разработки сельскохозяйственной техники и устройств применяются цифровое имитационное моделирование, технология 3D-печати и программное обеспечение в web-среде, что повышает эффективность процессов проектирования и снижает количество ресурсов, затрачиваемых на выпуск предсерийных образцов. При этом итоговая продукция получается более высокого качества, сокращаются издержки производства и издержки при выполнении технологических процессов³ [2-7]. В этот период разрабатываются доильные роботы второго поколения, усовершенствуются вакуумные системы, системы обнаружения областей интереса (детекция вымени), производится имитационное моделирование не только рабочих узлов (например, манипулятора), но и движения по магистралям жидкостей (молоко, промывочная жидкость, вакуум). Производится моделирование механического воздействия коров на стойло доильных роботов, результаты моделирования сравниваются с опытными данными, по результатам которых производится усиление конструктивных элементов. К цифровому двойнику добавляется информация, отображающая производство и жизненный цикл продукта (PML) в производственном секторе. Постепенно цифровая модель наполняется информацией, позволяющей сблизить модель с реальным объектом.

Третий этап развития технологии ЦД происходил в период 2014-2018 гг. В 2014 г. появляется большое количество цифровых продуктов и решений⁴ [8-11]. Физическая реализация создаваемой машины/изделия имеет обратную связь с цифровым двойником, где информация от одного устройства передается другому. Цифровой двойник имеет еще больше необходимой

информации для его производства [12-15], адекватность и соответствие цифрового двойника с физической моделью выше. Собираются и передаются в облака и цифровые сервисы адекватные данные по интересующим объектам/процессам. Повышается качество машинного зрения⁵ [16]. В доильное оборудование для животноводческих ферм внедряется двух- и трехуровневое программное обеспечение, что позволяет обмениваться данными между машинами и устройствами. Например, доильный робот запрашивает данные по коровам, которые поступают из сортировочных ворот, или данные с метеостанции поступают на внутренний контроллер, который анализирует предыдущий опыт, текущую ситуацию и изменяет режимы работы исполнительных механизмов. Системы собирают данные по животным и ищут взаимосвязи: например, между жирностью молока и его количеством, скоростью молокоотдачи, удоем и уровнем кормления и т.д.

С 2018 г. по настоящее время при проектировании и создании цифровых двойников используются технологии VR и AR⁶ [17-20]. Искусственный интеллект точно обрабатывает накопленные данные, системы имеют функцию самодиагностики и самовосстановления. Например, при оповещении «Система встала в ошибку» цифровые двойники ферм обмениваются друг с другом накопленными данными, на основании которых принимают решение об изменении режимов работы систем микроклимата [21-23]. Технология блокчейн применяется в сельском хозяйстве для отслеживания происхождения молочной и мясной продукции [24-28]. Технология цифровых двойников способна существенно увеличить качество реализации физиологических образцов и выполнения процессов. Однако в сельскохозяйственной отрасли при изготовлении образцов от идеи до запуска мелкой серии существует ряд проблем.

Нами выявлены малая финансовая привлекательность и поддержка (со стороны государства, университетов, частных инвесторов) проектов, находящихся на стадии 4-7 уровней готовности технологии и уровней готовности производства, по сравнению с проектом, находящимся на 1-3 или 8-9 уровнях (рис. 2).

² Krouse J.K. What every engineer should know about computer-aided design and computer-aided manufacturing: the CAD/CAM revolution. CRC Press, 1982. 160 p.; Beasley D.B. CAD/CAM: directions and applications in agricultural engineering. 1982; Kassisieh N.M. The first phase of CAD/CAM implementation: a plan for small engineering companies: California State University, Northridge, 1987; De Gregori T.R. et al. Agriculture and modern technology. Iowa State University Press, 2001.

³ Li D., Zhao C. Computer and Computing Technologies in Agriculture III. Springer, 2010.

⁴ De Wilde S. The future of technology in agriculture. The Hague: Stichting Toekomstbeeld der Techniek. 2016. 118 p.

⁵ 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. 2013. Ч. 2. С. 355-357.

⁶ Паршуков Д.В. Применение технологий дополненной и виртуальной реальности в подготовке кадров сельского хозяйства // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: Материалы Международной научно-практической конференции. Ч. I. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2019. С. 141-143. EDN: DOGVHT.

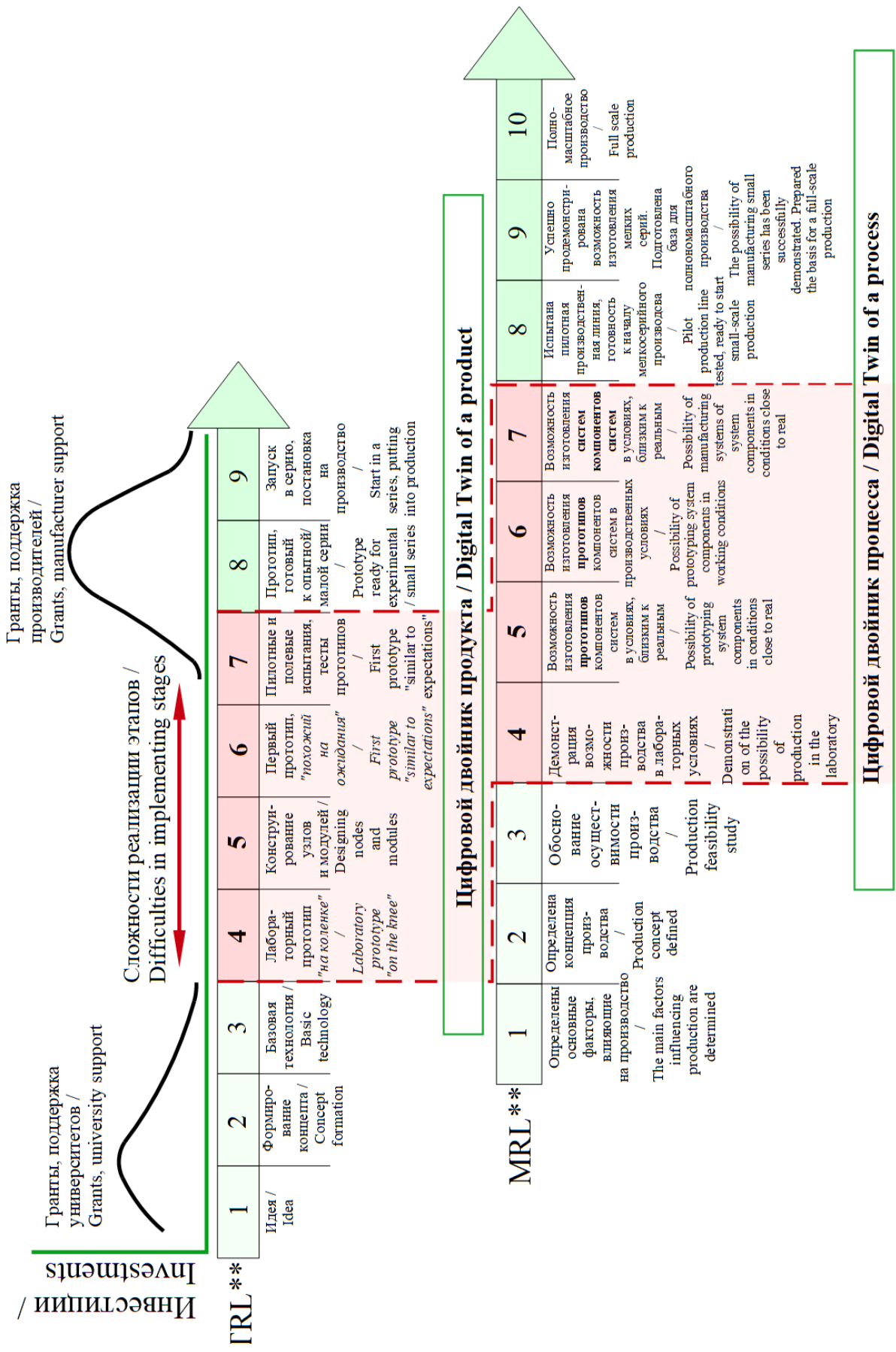


Рис. 2. Сложности внедрения цифрового двойника на рынок от идеи до серии: TRL – уровень готовности технологии; MRL – уровень готовности производства

Fig. 2. Problems of stages and lack of investment to introduce the product to the market from idea to series: TRL – technology readiness level; MRL – manufacturing readiness level

Это связано с тем, что при поддержке проектов на уровнях 1-3 проект не требует больших инвестиционных вложений для проверки работоспособности идеи. Поддержка идей и формирование базовых технологий осуществляются фондами: РНФ, ФСИ, Гранты Президента РФ и пр.

Продукт, находящийся на уровнях 8-9, как правило, имеет уже доработанный предсерийный образец, который был произведен на испытанной пилотной, готовой к реализации производственной линии. За предсерийным образцом и технологической линией стоит сформированная команда с определенным набором компетенций. Рынок подтвержден и готов к принятию продукта, уровень рисков является низким.

Продукт, находящийся на уровнях 4-7, является самым непредсказуемым. Зачастую производится только формирование рабочего коллектива, разработчики не могут на 100% оправдать ожидания инвесторов, так как разрабатываемый продукт не был изготовлен и испытан. Не понимая его конкретных характеристик и его пользы на производстве, рынок не может принять разрабатываемый продукт.

Ситуация усугубляется отсутствием повсеместно распространенных машиноиспытательных станций, готовых принять современное инновационное оборудование, поэтому испытания производятся только в лояльных к разработчикам фермах и хозяйствах, где имеются свои издержки и ограничения. Отсутствует персонализированное изготовление изделий/машин/оборудования на заводах.

Преодолеть существующие проблемы можно внедрением в процесс разработки объекта технологии ЦД и дальнейшем сопровождением объекта на этапе всего срока службы и использования.

Цель исследований: разработать технологию мультидисциплинарного кросс-компьютерного инжиниринга (виртуального полигона) с созданием цифровых образцов сельскохозяйственных машин, оборудования, их деталей для проведения виртуальных испытаний с целью сокращения затрат ресурсов при производстве образцов от идеи до серии и дальнейшего сопровождения их на всем сроке службы и использования.

Для достижения поставленной цели поставлены задачи:

– разработать концепцию ЦД сельскохозяйственных объектов и процессов, включающих в себя все современные доступные технологии;

– разработать метод взаимодействия цифрового двойника с физическим объектом, позволяющий оставлять цифровую тень, иметь двухстороннюю связь между ЦД и испытываемым физическим объектом;

– описать концепцию виртуального полигона, дающего возможность проводить виртуальные испытания сельскохозяйственных машин, изделий, технологий, систем.

Материалы и методы. Для решения поставленных задач по применению технологии ЦД в сельском хозяйстве и внедрению технологии ЦД в процесс реализации разработок от идеи до серии проведен анализ зарубежных источников по данной проблеме.

При разработке ЦД, виртуального полигона использовалось имитационное моделирование. При моделировании применялась программа SolidWorks 2022, программный пакет Flow Simulation.

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим возможность применения в сельском хозяйстве технологии ЦД, взаимодействующей с физическими системами, внедряемой при производстве инновационного оборудования в соответствии со схемой, представленной на рисунке 3.

При цифровом моделировании изделий или технологий важно добиться адекватности цифровой модели. Сегодня подход к моделированию может осуществляться путем создания 3D-модели изделия, по которой в дальнейшем могут быть изготовлены и переданы на производство 2D-чертежи, и система после получит физическую реализацию со всеми недостатками, или путем наполнения и описания разрабатываемой цифровой модели с учетом технологии MBD, MBE и MBSE [29-31].

MBD (Model Based Definition) – это трехмерные CAD-модели, чьи спецификации содержат описание геометрии изделий, размеры, допуски, спецификацию материалов, наборы технических данных и решений. MBE (Model-Based Enterprise) – это стратегия управления сложным современным предприятием с производственными линиями, цифровым двойником технологической линии/производства, подстроенной под реализацию изделий, с сохранением трехмерной модели в центре своих операций, и выстраиваемой в цифровом виде сопутствующие процессы закупок, управления запасами и т.д. MBSE (Model Based System Engineering) является центральной концепцией в ЦД, представляющей собой единую согласованную модель проектируемой системы, которая объединяет все данные и свойства о создаваемой системе. Это концепция формализованного применения моделирования для поддержки формирования требований к системе, поддержки проектирования, анализа, верификации и валидации системы на всех фазах ее жизненного цикла.

Виртуальные испытания в технологии ЦД позволяют создать виртуальный полигон. Например, полигон животноводческого хозяйства включает в себя поле, на котором выращивается сельскохозяйственная



Рис. 3. Концепция цифровых двойников при разработке сельскохозяйственных машин, объектов, процессов
Fig. 3. Concept of the digital twins used for designing agricultural machines, objects, processes, including all modern available technologies

продукция, и на нём присутствуют все типы виртуальных сельскохозяйственных машин, воздействующих на растения, развивающихся в зависимости от заданных погодных условий, состава, характеристики и насыщенности почвы микро- и макроэлементами. Хозяйство включает в себя технологическую линию кормозаготовки (с машинами, оборудованием, процессами), животноводческую ферму с определенным микроклиматом, воздействующим на животных. Разработка виртуального полигона подразумевает сбор всех возможных входных и выходных воздействий, которые являются идентичными реальным производственным условиям. Это позволит поместить в виртуальный полигон, например, корову и относительно ее функции молоковыведения изучить, при прочих равных условиях, воздействие микроклимата на качество и количество получаемой продукции. Можно в виртуальный полигон поместить узел разрабатываемой машины и изучить процесс естественного выхода из строя датчиков контроля сероводорода. Компьютерное моделирование позволит найти закономерности, зависимости, установить влияние среды на техническое устройство и найти способ, который позволит продлить срок службы датчиков контроля уровня сероводорода в воздухе животноводческого помещения с двух месяцев (средняя продолжительность работы датчиков в реальных условиях) до времени целесообразного использования, оправдывающего вложенные в разработку датчика ресурсы. Еще одним примером использования

виртуального полигона может быть моделирование работы плуга во всех возможных характеристиках почвы.

Внедрение испытаний ЦД в виртуальном полигоне позволит ускорить процессы разработки предсерийных образцов, снизить количество затрачиваемых ресурсов, рассмотреть наибольшее количество возможных вариантов развития ситуаций. Достижимый эффект от использования виртуальных испытаний ЦД на виртуальных полигонах возможен только в том случае, когда программный комплекс и существующие ресурсы обеспечивают адекватность цифровой модели и ее соответствие физической среде. Несответствие ЦД физическому объекту должно быть настолько малым, что результаты виртуальных испытаний ЦД должны находиться в текущих допусках, предъявляемых к физическому образцу после проведения натурных испытаний.

Задачу внедрения в лабораторные и натурные испытания метода, позволяющего оставлять цифровую тень, иметь двухстороннюю связь между ЦД и испытываемым физическим объектом, поможет раскрыть схема, представленная на рисунке 4. Взаимосвязь и обмен данными между цифровым двойником и физическим объектом происходят постоянно с заданными режимами на протяжении всей жизни физического объекта/системы. Для примера на схеме изображены цифровой двойник и физическая реализация системы натяжения доильных стаканов в роботизированной доильной установке. После создания трехмерной

модели, изготовления чертежей, проведения имитационного моделирования и доказательства эффективности дальнейшей работы над узлом/прототипом/системой на производстве изготавливается узел. После проведения приемочных работ изготовленного узла натяжения доильных стаканов цифровая модель требует корректировок после изготовления, так как физическая модель всегда имеет отклонения и при правильном проектировании отклонения находятся в пределах допусков.

Перед испытаниями физический объект следует укомплектовать адекватным набором датчиков подходящего типа.

Все полученные данные хранятся в едином источнике информации на протяжении срока жизни физического объекта/системы. В случае выявления цифровым двойником, имеющим встроенную функцию искусственного интеллекта, наиболее оптимального решения, как по режимам работы и алгоритмам, так и по техническому решению, производится модернизация цифрового двойника и физической модели.

Вышеописанный подход позволяет сократить затрачиваемые ресурсы на изготовление опытных образцов за счет предварительной работы с цифровым двойником, рассмотреть наибольшее количество вариаций узлов/прототипов/систем, повысить качество проведения испытаний, сократить путь от идеи до серии. Недостатком данного метода является необходимость большого набора датчиков, ресурсов, а также специалистов. При внедрении метода важно соблюсти баланс между стремлением создать наиболее адекватную цифровую модель с затрачиваемыми ресурсами и сложностью физического объекта.

Разработка виртуальных полигонов позволяет сократить количество затрачиваемых ресурсов на испытания. Виртуальный полигон – это аналог стенда или реального полигона, на котором исследуются технология, машина, узел, деталь с учетом воссозданных воздействий на исследуемый объект, с которыми он столкнется при работе в качестве физического образца.

Для примера рассмотрим разработку виртуального полигона на основании реальной фермы, построенной

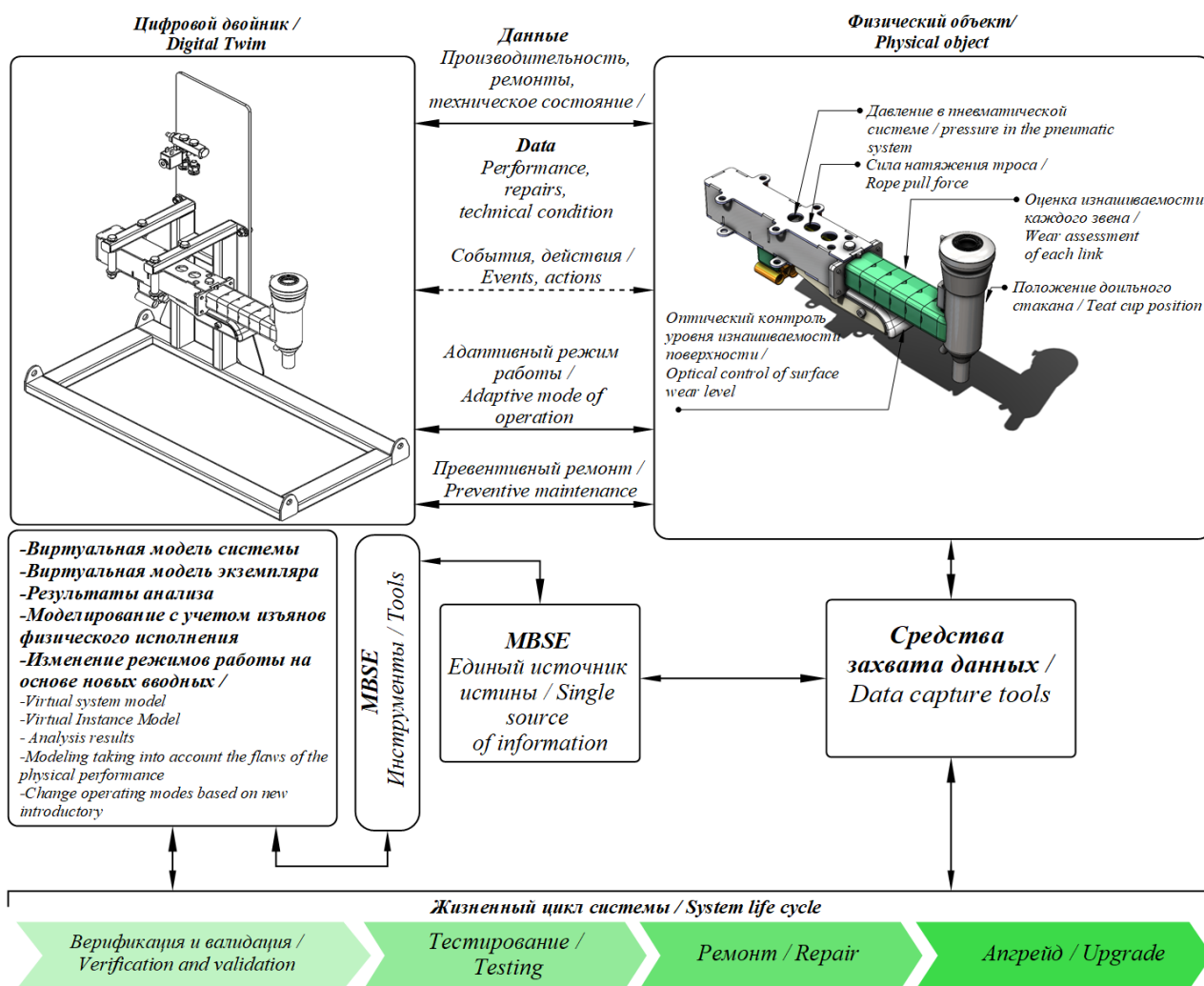


Рис. 4. Метод взаимодействия цифрового двойника и физического объекта

Fig. 4. Method of interaction between a digital twin and a physical object

по типовому проекту ОПТ 801-2-101.12.87 (фермы ФГУП «Григорьевское» в Ярославской области, имеющей проблемы с микроклиматом). Разработчики совместно с фермером принимают решение дооснастить ферму климатическими системами. По документации и в соответствии с реальным физическим объектом нами производился сбор параметров микроклимата на сертифицированные приборы в разное время года с различными сценариями погоды.

Полученные данные фиксировались в виртуальных полигонах. При базовом варианте вентиляционной системы построенного коровника внутри помещения производилось моделирование движения воздушных потоков газов (аммиак, сероводород, углекислый газ), оценивались температура, влажность, скорость движения воздуха и направление воздушных потоков (рис. 5). Адекватность виртуального полигона и цифровой модели объясняется макси-

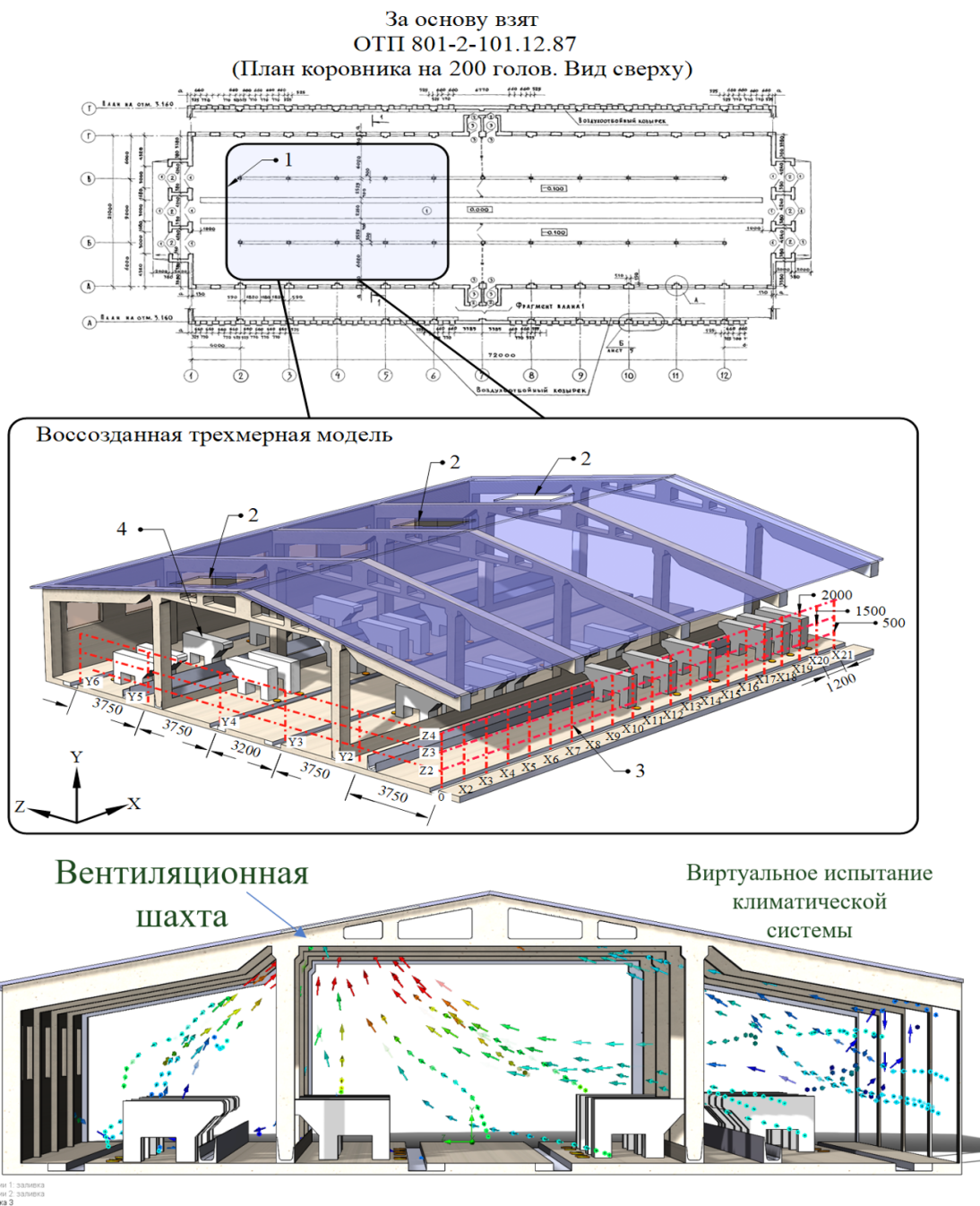


Рис. 5. Концепция виртуального полигона для виртуальных испытаний цифрового двойника климатической системы:
1 – воссозданная область виртуального полигона; 2 – вытяжка; 3 – масштабно-координатная сетка для определения граничных условий, установленных на реальном объекте; 4 – аппроксимированная трёхмерная модель коровы

Fig. 5. The concept of a virtual test site for virtual testing of the digital twin of the climate control system:
1 – recreated area of the virtual polygon; 2 – hood; 3 – scale-coordinate grid for determining the boundary conditions established on a real object; 4 – approximated three-dimensional model of a cow

мальной сходимостью цифровой модели и реального объекта.

Для проведения виртуальных испытаний на виртуальном полигоне создаётся концепт внедряемой технологии с наполнением цифровыми двойниками изделий/объектов/машин, являющихся ее составляющими. Концепт помещается в виртуальный полигон, соответствующий реальному объекту, с воссозданием реальных условий эксплуатации. По разработанным сценариям разработчики проводят виртуальные испытания, по результатам которых получают множество вариантов поведения концепта решения. Далее концепт внедряемой технологии изменяется с повторением виртуальных испытаний. Вышеописанные действия производятся адекватное количество раз при сопоставлении получаемых вновь результатов и их значимости с количеством затрачиваемых ресурсов. По результатам проведенного ряда виртуальных испытаний утверждается финальный концепт внедряемого решения. Решение разрабатывается, устанавливается, осуществляется пуско-наладка системы и проводятся финальные испытания.

Виртуальные испытания на виртуальном полигоне позволяют избегать изготовления промежуточных образцов, однако высокие требования к созданию адекватных моделей обуславливают глубокие поисковые исследования физических объектов. От собранных на первом этапе материалов зависят успех дальнейшей работы и эффективность внедряемых решений. Вторым недостатком являются предъявляемые требования к программно-аппаратной части, используемой как инструмент при создании цифровых двойников, виртуальных полигонов. Ввиду высокой нагрузки и долгой вычислительной мощности обычные мощности привычного программного обеспечения и офисных рабочих станций являются недостаточными, и для выполнения этой работы необходимы суперкомпьютеры. Третьим недостатком являются высокие требования к специалистам, создающим виртуальные полигоны и цифровые двойники, когда допущенные ошибки на этапе создания цифровых моделей могут повлечь за собой неэффективные затраты ресурсов.

Методология оценки соответствия оригиналов и цифровых моделей заключается в первую очередь в запросе, который предъявляется цифровому двойнику. Рассмотрим оценку оригиналов и цифровых моделей на примере автоматического механизма натяжения доильного стакана (рис. 4). При разработке физического объекта данного механизма (на рисунке не показан) основной задачей для нас являлось исследование влияния износа звеньев механизма натяжения на качество натяжения и постановку доильного стакана перед надеванием. В результате продолжительных

исследований (более 700 ч наработки как с чистым механизмом, так и с моделированием загрязнения песком, выступающего в качестве абразива) был получен рабочий износ звеньев механизма натяжения, критично не влияющий на постановку доильного стакана. Далее для формирования цифровой модели необходимо занести в ЦД с необходимой точностью (миллиметр или микрометр в зависимости от поставленной задачи) износ звеньев, материал и граничные условия, при которых работал физический объект. Пополнение ЦД информацией об износе материала необходимо выполнять с тем шагом, который позволит спрогнозировать износ ЦД. В нашем случае регистрация износа осуществлялась каждые 8 ч непрерывной работы при выбранном абразиве в виде песка. Такой подход актуален при дополнении ЦД обратным путем.

Внесенный износ звеньев с абразивом в ЦД позволит при дальнейшей работе изменять форму звена и моделировать износ. При изменении материала необходимо пополнять ЦД данными по износу конкретного материала, поскольку адекватность ЦД при моделировании и адекватность ЦД при моделировании и дополнении данными с физического объекта отличаются. Дополнение данными с физического объекта позволит получить более адекватный ЦД.

В России существует ряд ограничений, не позволяющих на данный момент внедрение в сельское хозяйство технологии ЦД и виртуальных полигонов (табл.).

Внедрением технологии ЦД в сельское хозяйство активно занимаются компании и учёные во всем мире. Британский агротехнический центр, разработчик сервиса The Agri-food Data Marketplace (аккумулирующий передовые сельскохозяйственные данные с дальнейшим их предоставлением производству), отмечает, что будущее ЦД – это индивидуальные цифровые двойники, описывающие конкретный объект. Например, ЦД коровы «Снежка» существует в реальном времени до тех пор, пока существует его аналог в реальном мире, с обновляющимися данными в реальном времени.

По мнению Agrimetrics, в 2023-2025 гг. учёные в области цифровых двойников в сельском хозяйстве будут решать вопрос снижения общей стоимости разработки и развёртывания ЦД. Разработкой ЦД в сельском хозяйстве будут заниматься научно-исследовательские институты, высокотехнологичные стартапы совместно с передовыми агропредприятиями⁷.

Нидерландская компания Connecterra⁸ создала ЦД коровы, под которым разработчики подразумевают

⁷ Исследования агрометрического центра. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.agrimetrics.co.uk/news/10-things-about-digital-twins-in-agriculture> (дата обращения: 17.11.2022).

⁸ Главная страница компании. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.connecterra.io/> (дата обращения: 17.11.2022).

Таблица

Ограничения при внедрении технологии ЦД в сельское хозяйство России

Table

Restrictions for the implementation of Digital Twin technology in Russia

Технические ограничения / <i>Technical limitations</i>	Рыночные ограничения / <i>Market restrictions</i>
<ul style="list-style-type: none"> •Технология готова. Массовое внедрение возможно с помощью интеграционных решений <i>API</i> или путем принятия стандартов <i>Io T</i>. •Не все фермы страны подключены к Интернету или его скорость является недостаточной. •Ожидается, что в ближайшие 5 лет удаленные места будут обеспечены доступной сетью.⁹ •К 2031 г. в стране планируется создание разветвлённой системы суперкомпьютерных центров для проведения исследовательских работ.¹⁰ • <i>Technology is ready for use. Mass adoption is possible through API integration solutions or through the adoption of IoT standards.</i> • <i>Not all farms in the country are connected to the Internet or its speed is insufficient.</i> • <i>the next 5 years, remote locations are expected to get an accessible network.</i> • <i>By 2031, the country plans to develop an extensive system of supercomputer centers for research work.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> •Практика предложения решений для ЦД не распространена в сельском хозяйстве. •Показатели эффективности для оценки преимуществ этой технологии в животноводстве не разработаны. •Бизнес-модели для монетизации технологии ЦД в животноводстве не разработаны и повсеместно не распространены. •Конкретный рынок потребителей технологии ЦД в сельском хозяйстве не сформирован. • <i>The practice of offering DT solutions is not common in agriculture.</i> • <i>No performance metrics have been developed to assess the benefits of this technology in livestock production.</i> • <i>Business models for DT technology monetization in animal husbandry have not been developed and are not widespread.</i> • <i>A specific market of DT technology consumers in agriculture has not been formed.</i>
Экономические ограничения / <i>Economic restrictions</i>	Правовые ограничения / <i>Legal restrictions</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Технология ЦД не внедрена в сельском хозяйстве, поэтому ее экономика неизвестна. • В связи с высокими рисками инвестировать в технологию ЦД склонны только компании с диверсифицированным бизнесом. • <i>The DT technology is not implemented in agriculture, so its economic indicators are unknown.</i> • <i>Due to the high risks, only companies with a diversified business are inclined to invest in the DT technology.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Нормативные указания этического использования цифровых двойников для сельского хозяйства не разрабатываются. • Использование системы ЦД для животных подлежит юридическим рассмотрениям • <i>Regulations on the ethical use of digital twins for agriculture are not being developed.</i> • <i>Use of the DT system for animals is subject to legal reviews</i>

удалённый контроль течки животных и ее физиологического состояния во время производственных циклов. Разработка основана на технологии *Io T*.

Компания *Delaval* разработала цифровую систему определения физиологической упитанности молочных коров *Body Score Condition*¹¹. Задача системы – оценить выраженность крестца животного и сравнить текущий объем с ранее полученными значениями, чтобы оценить физиологическое состояние животного на предмет наличия кетоза. Разработка основана на времяпролётной технологии.

Учеными из ФГБНУ ФНАЦ ВИМ разрабатывается цифровой двойник коровы, который формируется на основе данных, полученных с болусов (оценка двигательной активности, *ph* рубца, температура тела), на основании чего автоматически определяются

время охоты, количество выпитой воды, интенсивность моциона, возможные заболевания ЖКТ и опорно-двигательной системы [32-33]. Цифровой двойник коровы дополняется данными, полученными с системы автоматической линейной оценки экстерьера, где определяются балл упитанности, биометрические показатели вымени и сосков коровы, индексы тела коровы [34-35].

Греческая компания *BeeZon*¹² разработала цифровой двойник пасеки для слежения за климатическими изменениями, которые отрицательно сказываются на пчеловодстве. Система основывается на создании ЦД пчелиных систем, где отслеживаются болезни семей, инфекции вредителей, воздействие пестицидов и токсичность среди пчёл.

Компания из Словении *NarphaSea* создала цифровой двойник урожая оливок с использованием оптической технологии. Разработка направлена на защиту оливок от оливковой мухи. Система отслеживает появление и движение оливковых мух¹³.

¹² Главная страница компании. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.beezon.gr/> (дата обращения: 17.11.2022).

¹³ Необходимость модернизации сельского хозяйства цифровыми двойниками. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.challenge.org/knowledgeitems/why-modern-farming-need-the-digital-twins/> (дата обращения: 17.11.2022).

⁹ Стратегия и «дорожная карта» развития ИТ отрасли. [Электронный ресурс]. URL: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/479> (дата обращения: 17.11.2022).

¹⁰ Российская стратегия развития суперкомпьютеров. [Электронный ресурс]. URL: https://www.cnews.ru/news/top/2021-10-26_vlasti_ozabotilis_razvitiem (дата обращения: 17.11.2022).

¹¹ Главная страница компании. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.delaval.com/ru-by/-/farm-management/delpro-precision-analytics/delaval-body-condition-scoring-bcs/> (дата обращения: 17.11.2022).

Компания Aranca, являющаяся глобальной исследовательской и консультационной фирмой, работающей в США, Индии, Европе и Японии¹⁴, считает, что использование ЦД в сельском хозяйстве поможет повысить производительность и качество животноводческой продукции, и это позволит предотвратить дефицит продуктов питания. К 2020 г. Ирландский стартап Sainthus разработал с использованием технологии искусственного интеллекта и технического зрения систему для определения физиологического состояния животных.

Американская компания Cargill использует ЦД для оценки физиологического состояния крупного рогатого скота. Американский стартап Rex разработал крупнейшую базу данных о генетике, производительности и здоровье домашнего скота. Компании Connecterra и Quantified AG работают над созданием ЦД для мониторинга здоровья скота.

¹⁴ Зарубежный опыт внедрения цифровых двойников в сельское хозяйство. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.aranca.com/knowledge-library/articles/ip-research/use-cases-digital-twin-in-livestock-farming> (дата обращения: 17.11.2022).

Список использованных источников / References

1. Deraniyagala S. The impact of technology accumulation on technical efficiency: an analysis of the Sri Lankan clothing and agricultural machinery industries. *Oxford Development Studies*. 2001;29(1):101-114. <https://doi.org/10.1080/13600810125542>
2. Reddy P.K., Ankaiah R. A framework of information technology-based agriculture information dissemination system to improve crop productivity. *Current Science*. 2005;88(12):1905-1913. <http://www.jstor.org/stable/24110616>.
3. Yu F., Zhang Jf., Zhao Y., Zhao Jc., Tan C., Luan Rp. The research and application of virtual reality (VR) technology in agriculture science. *Computer and Computing Technologies in Agriculture III*. 2010;317. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12220-0_79
4. Iqbal M., Ahmad M. Science & technology based agriculture vision of Pakistan and prospects of growth. *MPRA*. 2005. P. 57441. <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/id/eprint/57441>.
5. Parihar S.S., Mishra B., Rai D.P. Sustainable models of information technology for agriculture and rural development. *Indian Research Journal of Extension Education*. 2010;10(1):20-23.
6. Tso T.C. Agriculture of the future. *Nature*. 2004;428(6979):215-217. <https://doi.org/10.1038/428215a>
7. Chen H., Yada R. Nanotechnologies in agriculture: new tools for sustainable development. *Trends in Food Science & Technology*. 2011;22(11):585-594. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.09.004>
8. Luvisi A. Electronic identification technology for agriculture, plant and food. A review. *Agronomy for sustainable development*. 2016;36(1):1-14. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0352-3>
9. Sarcheshmeh E.E., Bijani M., Sadighi H. Adoption behavior towards the use of nuclear technology in agriculture: A causal analysis. *Technology in Society*. 2018;55:175-182. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2018.08.001>
10. Bermeo-Almeida O., Cardenas-Rodriguez M., Samaniego-Cobo T., Ferruzola-Gómez E., Cabezas-Cabezas R., Bazán-Vera W. Blockchain in agriculture: A systematic literature review. *International Conference on Technologies and Innovation*. Springer, Cham. 2018;44-56. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00940-3_4

Выводы

1. Разработанная концепция цифровых двойников сельскохозяйственных объектов и процессов на базе современных доступных технологий подразумевает взаимное общение в режиме реального времени ЦД и физического объекта с накоплением и передачей информации, прогнозированием цифровым двойником поведения физического объекта и изменением его параметров и режимов работы.

2. Разработанный метод учитывает взаимодействие ЦД с физическим объектом при лабораторных, натуральных испытаниях и в течение жизни физического объекта, в котором физический объект оставляет цифровую тень, на основании чего ЦД принимает решения о дальнейшей работе физического объекта.

3. Концепция виртуального полигона, описанная на примере животноводческой фермы, дает возможность задавать адекватное количество параметров, воздействующих на объект, из внешней среды с целью испытания ЦД сельскохозяйственного объекта.

11. Pandey N. Role of information and communication technology in agriculture development: a study of Nabarangpur district. *Scholedge International Journal of Business Policy & Governance*. 2017;4(4):2394-3351. <http://dx.doi.org/10.19085/journal.sijbpg040401>
12. Monteiro J., Barata J., Veloso M., Veloso L., Nunes J. Towards sustainable digital twins for vertical farming. *Thirteenth International Conference on Digital Information Management (ICDIM)*. 2018;234-239. <https://doi.org/10.1109/ICDIM.2018.8847169>
13. Verdouw C.N., Kruize J.W. Digital twins in farm management: illustrations from the FIWARE accelerators SmartAgriFood and Fractals. *Paper presented at PA17 – The International Tri-Conference for Precision Agriculture in 2017*, Hamilton, New Zealand. <https://doi.org/10.5281/zenodo.893661>
14. Verdouw C., Kruize J.W. Digital twins in farm management: illustrations from the FIWARE accelerators SmartAgriFood and Fractals. *PA17. The International Tri-Conference for Precision Agriculture in 2017*. Hamilton, New Zealand. <https://doi.org/10.5281/zenodo.893661>
15. Yun S., Park J.H., Kim W.T. Data-centric middleware based digital twin platform for dependable cyber-physical systems. *Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. *IEEE*. 2017;922-926. <https://doi.org/10.1109/ICUFN.2017.7993933>
16. Никитин Е.А., Павкин Д.Ю., Шилин Д.В. Система управления роботизированным устройством для обслуживания кормового стола // Агроинженерия. 2021. № 4(104). С. 4-8. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-4-4-8>
17. Nikitin E.A., Pavkin D.Yu., Shilin D.V. Control system of a robotic device used for servicing a feed table. *Agricultural Engineering*, 2021;4(104):4-8. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-4-4-8>
17. Звягина Е.М. Исследование возможности внедрения VR/AR-технологий в аграрно-промышленном комплексе // Известия Международной академии аграрного образования. 2020. № 48. С. 57-61. EDN: NGZJBT.

Zvyagina E.M. Research of the possibility of VR/AR-technologies implementation in the agro-industrial sector. *Izvestiya mezhdunarodnoy akademii agrarnogo obrazovaniya*. 2020;48:57-61. (In Rus.)

18. Neethirajan S. The role of sensors, big data and machine learning in modern animal farming. *Sensing and Bio-Sensing Research*. 2020;29:100367. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2020.100367>

19. Huuskonen J., Oksanen T. Soil sampling with drones and augmented reality in precision agriculture. *Computers and electronics in agriculture*. 2018;154:25-35. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.039>

20. Klerkx L., Jakku E., Labarthe P. A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*. 2019;90-91:100315. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>

21. Chaux J.D., Sanchez-Londono D., Barbieri G. A digital twin architecture to optimize productivity within controlled environment agriculture. *Applied Sciences*. 2021;11(19):8875. <https://doi.org/10.3390/app11198875>

22. González J.P., Sanchez-Londoño D., Barbieri G. A monitoring digital twin for services of controlled environment agriculture. *IFAC-PapersOnLine*. 2022;55(19):85-90. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.188>

23. Rogachev A.F., Skiter N.N., Ketko N.V., Simonov A.B., Makarevich I.V. Digital twins as a tool for systemic integration of innovative digital technologies in agriculture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;1069(1):012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1069/1/012042>

24. Torky M., Hassanein A.E. Integrating blockchain and the internet of things in precision agriculture: Analysis, opportunities and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020;178:105476. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105476>

25. Xiong H., Dalhaus T., Wang P., Huang J. Blockchain Technology for Agriculture: Applications and Rationale. *Front. Blockchain*. 2020;3:7. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2020.00007>

26. Lin W., Huang X., Fang H., Wang V., Hua Y., Wang J., Yin H., Yi D., Yau L. Blockchain technology in current agricultural systems: From Techniques to Applications. *IEEE Access*. 2020;8:143920-143937. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3014522>

27. Chen Y., Li Y., Li C. Electronic agriculture, blockchain and digital agricultural democratization: Origin, theory

and application. *Journal of Cleaner Production*. 2020;268(3):122071. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122071>

28. Demestichas K., Peppes N., Alexakis T., Adamopoulou E. Blockchain in agriculture traceability systems: a review. *Applied Sciences*. 2020;10:4113. <https://doi.org/10.3390/app10124113>

29. Risco-Martín J.L., Mittal S. Model management and execution in DEVS unified process. *Model Engineering for Simulation*. 2019;291-313. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813543-3.00014-7>

30. Beshears R., Bouma A. Engaging supportability analysis through model-based design. 2020 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). IEEE; 2020:1-5. <https://doi.org/10.1109/RAMS48030.2020.9153646>

31. Bajzek M., Fritz J., Hick H., Maletz M., Faustmann C., Stieglbauer G. Model based systems engineering concepts. *Systems Engineering for Automotive Powertrain Development (Powertrain)*. Springer, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68847-3_8-1

32. Pavkin D.Yu., Dorokhov A.S., Vladimirov F.E., Dovlatov I.M., Lyalin K.S. Algorithms for detecting cattle diseases at early stages and for making diagnoses and related recommendations. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021;11 (23):11148. <https://doi.org/10.3390/app112311148>

33. Dorokhov A.S., Ivanov Y.A., Kirsanov V.V., Pavkin D.Y., Vladimirov F.E. Diagnosing sub-acute rumen acidosis in cows in the post-calving period with digital technologies. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinaria e Zootecnia*. 2021;73(2):271-276. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-12170>

34. Павкин Д.Ю., Юрочка С.С., Шилин Д.В., Рузин С.С. Бесконтактная оценка упитанности молочных коров с использованием TOF-технологии // *Агроинженерия*. 2021. № 2 (102). С. 39-44. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-39-44>

Pavkin D.Yu., Yurochka S.S., Shilin D.V., Ruzin S.S. Non-contact body condition score of dairy cows based on TOF-technology. *Agricultural Engineering*, 2021;2(102):39-44. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-39-44>

35. Юрочка С.С., Хакимов А.Р., Довлатов И.М., Владимиров Ф.Е., Павкин Д.Ю., Матвеев В.Ю. Применение метода определения биометрических параметров вымени лактирующих животных с использованием сверточной нейронной сети // *Вестник НГИЭИ*. 2022. № 9 (136). С. 30-40. EDN: XLPHLO.

Yurochka S.S., Khakimov A.R., Dovlatov I.M., Vladimirov F.E., Pavkin D.Y., Matveev V.Yu. Use of a convolutional neural network to determine the biometric parameters of the udder of lactating animals. *Bulletin NGIEI*. 2022;9:30-40.

Вклад авторов:

А.С. Дорохов – формирование сложностей внедрения цифровых двойников; формирование концепции цифровых двойников при разработке сельскохозяйственных машин, объектов, процессов; формирование направлений применения цифровых двойников;

Д.Ю. Павкин – формирование концепции цифровых двойников в сельском хозяйстве и этапов развития; предложил методы взаимодействия цифрового двойника и физического объекта, формирование ограничений внедрения технологии цифровых двойников в сельском хозяйстве;

С.С. Юрочка – проведение литературного обзора, формирование концепции виртуального полигона для виртуальных испытаний на животноводческих фермах.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 22.12.2022; поступила после рецензирования и доработки 03.07.2023; принята к публикации 03.07.2023

Contribution of the authors

A.S. Dorokhov – detecting the difficulties of introducing digital twins; the conceptualization of the use of digital twins in the design of agricultural machines, objects, processes; describing the uses of digital twins;

D.Y. Pavkin – the conceptualization of the use of digital twins in agriculture and their development stages; choosing methods of interaction between a digital twin and a physical object, the formation of restrictions on the introduction of the digital twin technology in agriculture;

S.S. Yurochka – conducting a literature review, forming the concept of a testing ground for virtual tests on livestock farms.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 22.12.2022; revised 03.07.2023; accepted 03.07.2023