

## О новой подготовке специалистов-механиков для строительной отрасли

Евгений Порфирьевич Плавельский<sup>1,2</sup>, Дмитрий Юрьевич Густов<sup>1</sup>,  
Владимир Израилевич Скель<sup>1</sup>, Александр Михайлович Агарков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

<sup>2</sup> Центральный научно-испытательный полигон строительных и дорожных машин (ЦНИП СДМ);  
г. Ивантеевка, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Современная строительная площадка часто характеризуется применением ТИМ/ВМ-технологий в качестве элемента перехода к цифровым двойникам (ЦД) строительного объекта. Создание ЦД подразумевает участие всех специалистов, область деятельности которых входит в строительный-технологический процесс, включая специалистов по средствам механизации строительства. Обзор публикаций разного уровня показывает актуальность поставленной задачи.

**Материалы и методы.** Для решения поставленной задачи вуз должен иметь ресурсы и людские, и материальные для обеспечения подготовки таких специалистов-механиков, которые могут участвовать в создании ЦД строительного объекта; ЦД строительных машин, механизмов и оборудования; в применении технологий ЦД при проектировании, конструировании, производстве, испытании, эксплуатации и утилизации строительных машин, механизмов и оборудования. Показана реальность решения задачи подготовки специалистов-механиков в области и цифровых технологий, и ЦД. Приводятся примеры применения ЦД в ряде отраслей промышленности с соответствующей подготовкой специалистов в таких вузах, как, например, СПбПУ, МГТУ «СТАНКИН», МГТУ им. Н.Э. Баумана. Подобная подготовка по строительным специальностям ведется и в НИУ МГСУ.

**Результаты.** В НИУ МГСУ при разработке проекта новой основной образовательной программы высшего образования по специальности 23.05.01 была добавлена дисциплина «Основы создания цифрового двойника строительных машин и оборудования».

**Выводы.** В качестве основных положений предлагается дополнить учебные планы подготовки кадров по специальности «Наземные транспортно-технологические средства» компетенциями в сфере создания ЦД; ввести дисциплину «Цифровые двойники подъемно-транспортных, строительных, дорожных средств и оборудования» или иную, отражающую профильность выпускающей кафедры, реализующей образовательную программу.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** строительный объект, строительная машина, цифровой двойник, новое в подготовке специалистов-механиков

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Плавельский Е.П., Густов Д.Ю., Скель В.И., Агарков А.М. О новой подготовке специалистов-механиков для строительной отрасли // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 3. Ст. 6. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.3.6

Автор, ответственный за переписку: Владимир Израилевич Скель, [skelvi@mgsu.ru](mailto:skelvi@mgsu.ru).

## New training of mechanical specialists for the construction industry

Evgeny P. Plavelsky<sup>1,2</sup>, Dmitriy Yu. Gustov<sup>1</sup>, Vladimir I. Skel<sup>1</sup>, Alexander M. Agarkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> Central Scientific Testing Site for Construction and Road Machines; Ivanteevka, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The modern construction site is often characterised by the application of BIM technologies as part of the transition to digital twins of the construction project. The creation of digital twins implies the participation of all specialists, whose field of activity is included in the construction and technological process, including specialists in construction mechanization means. The review of publications of different levels shows the relevance of the task.

**Materials and methods.** To solve this problem, the university should have both human and material resources to ensure the training of such mechanical specialists who can participate in the creation of digital twins of the construction object; in the creation of digital twins of construction machines, mechanisms and equipment; in the application of digital twin technologies in the design, construction, production, testing, operation and disposal of construction machines, mechanisms and equipment. The paper shows the reality of solving the problem of training specialists in mechanics in the field of both digital

technologies and digital twins. Examples of application of digital twins in a number of industries are given with the appropriate training of specialists in such universities as, for example, SPbPU, MSUT "STANKIN", BMSTU. Also, similar training in construction specialties is carried out in MGSU.

**Results.** The discipline "Fundamentals of creating a digital twin of construction machines and equipment" was added in NRU MGSU during the development of the project of a new basic educational programme of higher education in the specialty 23.05.01.

**Conclusions.** As the main provisions, it is proposed to supplement the curricula of personnel training in the specialty "Land transport and technological means" with competencies in the field of creating digital twins; introduce the discipline "Digital twins of handling, construction, road facilities and equipment" or another discipline that reflects the profile of the graduating department implementing the educational programme.

**KEYWORDS:** building object, construction machine, digital twin, new in the training of mechanical specialists

**FOR CITATION:** Plavelsky E.P., Gustov D.Yu., Skel V.I., Agarkov A.M. New training of mechanical specialists for the construction industry. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(3):6. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.3.6

*Corresponding author:* Vladimir I. Skel, [skelvi@mgsu.ru](mailto:skelvi@mgsu.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

На современной строительной площадке с аддитивными, ТИМ/ВМ технологиями многократно возрастает роль инженера-механика. Это связано не только с подбором и эксплуатацией соответствующих машин и механизмов, включая, например, 3D-принтеры, но и участием в создании новых инновационных машин и механизмов современными методами. Все это подразумевает применение цифровых технологий (ЦТ), особенно при создании цифровых двойников (ЦД, Digital Twin — DT) объекта не только программистами, но и с привлечением технологов, логистов, экономистов, строительных материаловедов и т.д.

Таким образом, требуется подготовка специалистов (инженеров-механиков), которые могут на новом современном уровне проводить работы на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) техники с применением ЦТ. К таким этапам относятся проектирование, производство, эксплуатация и ремонт подъемно-транспортных, строительных, дорожных средств и оборудования. Новый уровень касается в том числе и технологий ЦД [1]. Использование ЦД позволяет решать научно-исследовательские, проектно-конструкторские, производственно-технологические и организационно-управленческие задачи в области строительного машиностроения как части применяемых ЦТ в строительной области с получением наибольшего эффекта. Данные задачи направлены в конечном счете на получение огромного экономического эффекта. Именно поэтому мировые лидеры бизнеса вкладывают в исследование и создание ЦД, включая вложения и в соответствующее обучение.

Цифровые двойники, появившись в начале XXI в. [2], в последнее время прочно занимают публикационное поле [1–8], что показывает развитие и актуальность рассматриваемой темы в различных областях, по крайней мере материальной деятельности человека.

Фирма Gartner давно занимается информационными технологиями и, например, на 2022 г. пу-

бликует прогноз на прорывные технологии Hype Cycle for Emerging Technologies<sup>1</sup>. Многие авторы публикаций по ЦД приводят кривую фирмы Gartner (рис. 1)<sup>2</sup>. Она демонстрирует этапы развития прорывных технологий: технологическая идея, чрезмерные ожидания развития и применения новой идеи, избавление от иллюзий путем более реалистичной оценки плюсов и минусов от внедрения новой идеи, работа над максимальным уменьшением выявленных недостатков, этап получения (распространения) положительного эффекта, в первую очередь экономического. В наибольшей степени экономический эффект получают те, кто раньше других оценил и внедрил новую идею, хотя первопроходцам всегда трудно, особенно с учетом первоначального вложения капитала.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эффективная реализация подготовки специалистов достойного уровня возможна только в условиях следования дисциплин (и их содержания) основной профессиональной образовательной программы в русле общих тенденций развития мировой промышленности, заключающихся в сквозной цифровизации.

*Четвертая промышленная революция.* В настоящее время в мировой истории развития промышленности проходит очередной четвертый революционный период, при котором идет интенсивное развитие техник, технологий и т.д., приводящее к значительному экономическому росту. Развивающаяся четвертая промышленная революция характеризуется наукоемкостью, мультидисциплинарностью,

<sup>1</sup> Emerging technologies for 2022 fit into three main themes: evolving/expanding immersive experiences, accelerated artificial intelligence automation, and optimized technologist delivery. URL: <https://www.gartner.com/en/articles/what-s-new-in-the-2022-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies>

<sup>2</sup> Кривая Гартнера. Как оценить возможности технологических инноваций для бизнеса. URL: <https://blog.bitobe.ru/article/krivaya-gartnera/>

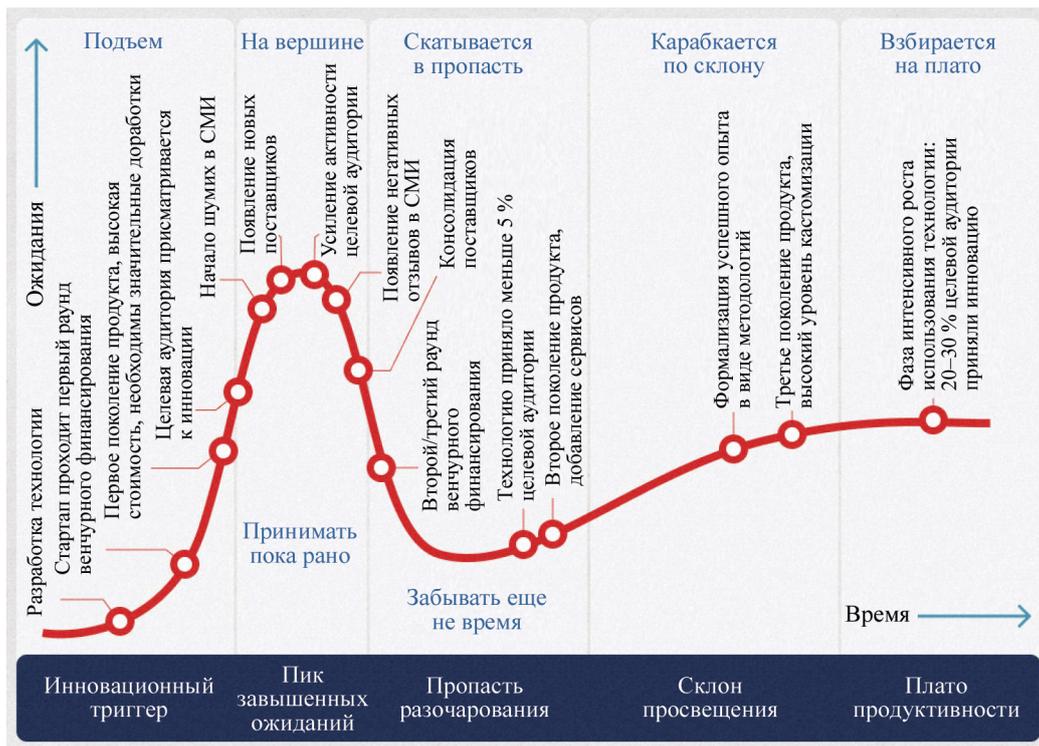


Рис. 1. Периоды развития перспективных идей по Gartner

конвергенцией и синергией, цифровыми платформами и большими данными (Smart Big Date), ИИ (искусственный интеллект — интеллектуальные помощники), Smart Design & Smart Manufacturing<sup>3</sup> [3]. К этому нужно добавить тот большой эффект, в первую очередь по качеству и скорости создания новой техники, который получается от совмещения этапов исследования, конструирования и проектирования на основе упомянутых выше конвергенции и синергии. К перечисленным характеристикам следует добавить и другие составляющие цифровизации, например непромышленный (IoT) и промышленный интернет вещей (IIoT), что в плане строительной отрасли более актуально. Также важно и то, что при создании ЦД одновременно получается и некоторый задел на будущее, как «побочный» продукт создания цифровых двойников.

Существует программа «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержденная Распоряжением Правительства РФ 28.07.2017 № 1632-р, по которой разработано семь дорожных карт в направлении ЦТ. Согласно этой программе, университеты участвуют в ее осуществлении. В этом же русле в мире разработаны и разрабатываются новые платформы, в том числе и для создания ЦД.

Понятие «цифровой двойник» подробно определено в работе [2]. Цифровой двойник представляет собой цифровую модель, включающую мно-

жество составляющих и отличающуюся от других моделей, например ТИМ и ВІМ, тем, что позволяет управлять изделием с высокой степенью адекватности, это очень важно на всем протяжении его ЖЦ от проектирования до утилизации.

Цифровые двойники уже применяются в ведущих отраслях промышленности: транспортном машиностроении, судостроении, атомной энергетике, аэрокосмической промышленности и так далее [1], включая и строительство<sup>4</sup>. Разработан первый стандарт по ЦД — ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения», вступивший в силу в 2022 г. Этот стандарт распространяется на изделия машиностроения и непосредственно касается средств механизации строительства, например, в части проведения виртуальных испытаний.

Можно отметить, что идея включения в образовательный процесс подготовки специалистов-механиков по строительным машинам и оборудованию дисциплины по ЦД появилась после опубликования ГОСТ Р 57700.37–2021, общения с производителями строительных машин и механического оборудования на профессиональных выставках в Москве, общения с сотрудниками лабораторий по сертификации строительной техники, а также после появления в интернете множества публикаций, связанных с четвертой промышленной революцией. В резуль-

<sup>3</sup> Боровиков А. Лекция «Формирование цифровой промышленности на основе цифровых двойников». URL: <https://ok.ru/video/1798025381131>

<sup>4</sup> Цифровой двойник здания: как технология применяется в строительстве. URL: <https://digital-build.ru/czifrovoy-dvojnjk-zdaniya-kak-tehnologiya-primenyaetsya-v-stroitelstve/>

**Прогнозирование на основе численного моделирования изделий, процессов и ресурсов, а также их взаимодействия в виртуальном мире**



**Рис. 2.** Цифровизация производства подразумевает сквозную интеграцию всех уровней производства

тате авторы выяснили, что при создании ЦД специалисты по созданию математических, имитационных и других видов моделей часто не могут представить объемную картину моделируемого объекта и им на помощь должны прийти специалисты-механики, глубоко знающие и разбирающиеся в строительных машинах, механизмах и оборудовании.

Сегодня существует много информации по ЦТ, сквозным ЦТ и т.п. и, как логическое продолжение, ЦД. В качестве примера сделаем ссылку на обзор работ [2]. По существу, цифровой двойник — это цифровая модель объекта, но имеющая много особенностей. В основном ЦД делят на двойник детали (элемента); двойник изделия (сборки), состоящего из двойников деталей; двойник объекта как системы (машины), состоящей из функционально связанных изделий-сборок; двойник процесса, состоящий из всех составляющих конкретного технологического процесса отрасли. В определенном смысле приведенное деление ЦД условно в своей терминологии и здесь не охватывает все их виды, но дает представление о многообразии возможных вариантов. На рис. 2 дана схема связи и перехода от цифровой модели к реальному объекту при создании ЦД<sup>5</sup>.

Содержание рис. 2 в разной интерпретации приводится во многих интернет-публикациях<sup>6</sup>. Они, если касаются ЦД, перечисляют возможные положительные эффекты при их внедрении. Применительно к строительной отрасли с помощью ЦД можно решать задачи относительно достоверного прогнозирования объемов строительного производства конкретного объекта при реально имеющихся материальных, трудовых, финансовых и природных ресурсах; прогнозирования эффективности при-

менения (ввода) новых строительных технологий; оптимизации применения средств механизации строительства как по номенклатуре, так и по всему комплексу машин и механизмов, необходимых для осуществления строительной технологии данного объекта; прогнозирования и анализа возможного появления отказов составляющих объекта по отдельным элементам и объекта в целом; оптимального решения управленческих задач разного рода и уровня. Перечисленные задачи с помощью ЦД решаются более качественно и в более короткие сроки (по разным интернет-оценкам выигрыш по времени может быть в несколько раз).

Связь цифровой модели с физическим объектом при переходе к ЦД технической системы или отдельному ее элементу может быть более глубокая, чем представлено на рис. 2 и описано выше.

*Образовательная концепция 4.0.* Четвертая промышленная революция вынуждает применять новые подходы к подготовке специалистов: появилась образовательная концепция 4.0, описанная, например, в работе [4]. Эта концепция во многом связана с цифровизацией экономики, производства, образования. Не останавливаясь на предыдущих периодах развития образования, что может быть отдельной темой, отметим черты образования 4.0. В современное образование включены вопросы самостоятельного обучения и выполнения исследовательских работ. Источником информации стал не только преподаватель, но и в большой степени интернет, информационные технологии, включая ИИ. Быстрое внедрение в производство новых технологий требует своевременной подготовки соответствующих специалистов. В 2020 г. на основе анализа открытых источников были выделены топ-15 цифровых технологий с уровнем значимости (в скобках) как относительная встречаемость в массиве источников: промышленные роботы (1), искусственный интеллект (0,86), машинное обучение (0,68), цифровое прототипирование (0,56), сенсо-

<sup>5</sup> Цифровизация производства. URL: <https://raytec.pro/services/tsifrovizatsiya-proizvodstva/>

<sup>6</sup> Digitalization Changes Everything. URL: <https://oneplm.com/oneplm-industry/>

рика (0,42), беспроводная связь WLAN, PAN, RFID (0,30), блокчейн (0,21), большие данные (0,20), виртуальная и дополненная реальность (0,12), товар как услуга (Product-as-a-Servis, 0,09), компьютерное зрение (0,03), смарт-контракты (0,03), промышленный интернет вещей (0,03), цифровой двойник (0,02), умные фабрики (0,01)<sup>7</sup> (можно отметить, что в 2022 г. мировой рынок ЦД в прогнозе на 2025–2026 гг. уже оценивался порядка \$50 млрд). Что-то из перечисленного уже прочно вошло в производственную жизнь, например промышленные роботы и машинное (цифровое) зрение, но и они тоже меняются по своим возможностям и областям применения; другое интенсивно внедряется на транспорте, в добывающей промышленности и т.д. Естественно, что такая картина применения новых ЦТ и инструментов потребовала введения в учебный процесс соответствующих тем и направлений по всем образовательным программам.

Одно из определений университета 4.0 приводит А.И. Боровков: «4.0 — университет, способный решать проблемы-вызовы современной промышленности за счет изменения концепта самой промышленности, при помощи смещения центра тяжести в сторону проектирования, где на этапе проектирования закладываются все параметры будущей конструкции»<sup>8</sup>. Имеются и другие определения, но смысл концепции университета 4.0 сводится к применению ЦТ в образовании, в передаче обучающимся бизнес-навыков, переход к индивидуализации обучения. Все это имеет целью вооружить будущих специалистов такими знаниями, умениями и навыками, которые позволили бы им влиться в современный производственный процесс практически без дополнительного корпоративного обучения или при минимальной адаптации нового специалиста к условиям конкретной корпорации.

Разработку образовательных программ ведут не только преподаватели и обучаемые, но и профессиональное сообщество через профессиональные стандарты, практики и обеспечение. При этом должно быть современное и доступное программное обеспечение в виде чаще всего специализированных программных платформ для создания цифрового продукта. Иными словами, вуз должен иметь ресурсы и людские, и материальные для обеспечения подготовки таких специалистов, которые могут участвовать в создании ЦД строительного объекта; в создании ЦД строительных машин, механизмов и оборудования; в применении технологий ЦД при проектировании, конструировании, производстве, испытании, эксплуатации и утилизации строительных машин, механизмов и оборудования.

<sup>7</sup> Топ-15 цифровых технологий в промышленности. URL: <https://issek.hse.ru/news/494926896.html>

<sup>8</sup> Боровков А.И. Что такое университет 4.0. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=31kiW4WqCDw>

Такой подход предполагает определенную гибкость в формировании рабочих программ дисциплин, определяющих основную образовательную программу. Все это требует нового мышления от всех участников образовательного процесса: студента, преподавателя, руководителей вуза.

Прогрессивное новое не может быстро (относительно) завладеть умами всех участников процесса промышленной революции. Однако в наибольшей степени выиграет тот, кто сможет раньше других не только воспринять это новое, но и приступить к активному его внедрению. Это, как говорят, требует комплексного подхода, в который входит не только новое материальное, в частности программное обеспечение, но и, как сказано выше, новые подходы в образовании. Причем новые методы обучения необходимы как для подготовки специалистов, так и для подготовки преподавателей, наставников, тренеров [5]. Последнее интересно еще и тем, что источником образовательного контента и для студента, и для преподавателя зачастую могут быть одни и те же информационные ресурсы (интернет-ресурсы). Массовая целевая переподготовка преподавателей и общеобразовательной, и высшей школы, как показывает опыт, не всегда успевает за новыми требованиями.

В последнее время много дискуссий об искусственном интеллекте в образовании, его достоинствах и недостатках. Если отбросить крайние мнения, то можно констатировать, что ИИ в образовании уже существует и игнорировать этот факт контрпродуктивно. Можно провести аналогию с промышленными роботами, которых многие вначале встречали в штыки. Однако в полном соответствии с кривыми развития новых идей (технологий) фирмы Gartner (рис. 1) первые радужные предположения сменились реальностью: роботы не всемогущи и у них имеется много ограничений, особенно с учетом экономической составляющей их создания и эксплуатации.

*Искусственный интеллект в образовании.* Можно сказать, что ИИ в образовании пока еще ищет себе оптимальное место. К реальным достоинствам его можно отнести освобождение студента и преподавателя от рутинной работы. Например, для студента сегодня это оформление чертежей по требованиям соответствующих стандартов, создание типовой математической модели детали; для преподавателя — проверка определенного типа учебных работ и контрольных тестов. Практический, но больше лишь теоретический, итог применения технологий ИИ — это освобождение от шаблонной работы: освобождается время для творческой, например проектной, работы и студента, и преподавателя. Важной особенностью ИИ, например в виде нейронных сетей, является возможность их обучения и самообучения, и, соответственно, нахождение более современных возможных проектных реше-

ний. Однако в данном случае можно отметить важнейшую роль преподавателя в обучении студента вариантному формулированию задачи, требующей решения, с учетом ограничений, имеющихся в реальных условиях; в оценке адекватности предлагаемых сетью решений и при необходимости корректировке первоначальных формулировок. Это умение формулировать задачу и оценивать получаемые решения важно при создании ЦД машин или механизмов специалистами-механиками в комплексной бригаде IT-специалистов и специалистов другого профиля, участвующих в проекте.

Еще одна область применения ИИ в образовании — использование симуляторов. По назначению различают разные симуляторы. Например, симуляция физических процессов при разработке новых изделий, симуляция на основе цифровой модели разных видов испытаний продукции, игровая симуляция в образовании и др. [9]. Многие обучающие симуляторы основаны на виртуальной и дополненной реальности. Такие симуляторы могут работать в виртуальном и реальном пространстве и в реальном времени, что широко применяется в таких областях, в которых обучение связано с большими материальными затратами, с риском травмирования или даже гибели оператора и т.д. В качестве примера можно привести применение таких тренажеров в транспортной отрасли, особенно авиационной; в атомной и химической промышленности; в медицине и др. В области строительного машиностроения симуляторы-тренажеры используют в обучении управлением технологическими процессами, диагностировании машин и механизмов, приобретении навыков работы операторов машин, механизмов и оборудования. На кафедре механизации и автоматизации строительных машин НИУ МГСУ применяют имитаторы<sup>9</sup> для обучения специалистов реагированию на возникновение разного рода отказов, возникающих при наладке и эксплуатации пассажирских и грузовых лифтов.

В современном мире многие первоначальные цифровые «инструменты» меняют или расширяют свою область назначения, например блокчейн — распределенный реестр. Технология блокчейна уже применяется в школьном и вузовском образовании, и перспективы ее дальнейшего использования увеличиваются. По своей структуре распределенная реальность становится все более объемной и доступной при определенных условиях практически везде, лишь бы было соответствующее оборудование (компьютер, ноутбук, гаджет). Основными характеристиками блокчейна являются децентрализация и безопасность, открытость и прозрачность, неизменность и доверие и др. Как следствие этих свойств, блокчейн удобен для хранения подлинных документов: дипломов, персональных документов

<sup>9</sup> Лабораторный стенд «Имитация лифта с устройством управления серии УЛ (УКЛ) ИЛ-УЛ и серии ШУЛМ».

и достижений обучающихся и сотрудников (преподавателей), научных достижений и публикаций и т.п.; для идентификации студента и других сотрудников в разных подразделениях своего и других вузов; для повсеместной доступности онлайн-курсов, особенно новых авторских; и многое другое. В качестве примера применения и перспектив развития технологии блокчейна в образовании приведем ссылки на две работы [10, 11].

Еще одной возможностью прорыва в образовании являются технологии больших данных (Big Data). Технологии больших данных позволяют оперировать персональными данными в части собственно персональных данных студентов и преподавателей, успехов в разных областях деятельности, предпочтениях в выборе учебного контента и т.п., включая прогнозирование дальнейшей деятельности обучающихся и их наставников, например в рамках интересов вуза; возможности безопасности и администрирования в вузе [12].

Как известно, большие данные характеризуются несколькими признаками, например «пятью V» (рис. 3<sup>10</sup>): объем (Volume) — терабайты и более; скорость (Velocity) — увеличение объема информации в геометрической прогрессии, что требует программ быстрой обработки и анализа данных; разнообразие (Variety) — данные могут быть представлены в разнообразной форме и форматах; достоверность (Veracity) — точность и достоверность получения данных; ценность (Value) — важность информации для той или иной отрасли и т.п.



Рис. 3. Признаки Большие данные

Можно добавить: быстро растущий объем данных связан с трафиком облачных вычислений, IoT/IIoT (Internet of Things/Industrial Internet of Things — интернет вещей/промышленный интернет вещей), мобильным трафиком и т.д.; высо-

<sup>10</sup> Data Science: The 5 V's of Big Data. URL: <https://medium.com/analytics-vidhya/the-5-vs-of-big-data-2758bfcc51d>



Рис. 4. Процессы и инструменты анализа больших данных

кая скорость, с которой данные накапливаются, в основном связана с интернетом вещей, мобильными данными, социальными сетями и т.д.; разнообразие данных связано со структурированными, полу-структурированными и неструктурированными данным из-за разных источников данных, генерируемых людьми или машинами; достоверность относится к обеспечению качества/целостности/достоверности/точности данных, так как они собираются из нескольких источников, то необходимо проверять точность информации, прежде чем использовать ее дальше; ценность относится к тому, насколько полезны сведения для принятия решений (нужно извлечь ценность из больших данных, используя надлежащую аналитику).

Важнейшая часть Big Data в техническом вузе — возможность на основе анализа больших данных выбрать, создать или уточнить проектируемую техническую конструкцию; это потенциал предсказания поведения, например, механической системы, созданной при курсовом проектировании или при разработке выпускной квалификационной работы. Как известно, любое проектирование многовариантно и возможность увидеть отдаленные последствия принятых конструктивных решений, по крайней мере, весьма заманчива. Таким образом, без анализа больших данных решение упомянутых задач затруднительно или требует много времени. Различают четыре вида анализа: описательный, фиксирующий случившуюся ситуацию; диагностический, определяющий причины случившегося; предиктивный, т.е. предсказательный или прогнозный, выполняемый на основе математической статистики, моделирования, машинного обучения, ИИ и т.д.

Для анализа больших данных, особенно при повторяющихся задачах, характерных, например, для высшей (любой) школы, вероятно применение Data Mining с возможностью машинного обучения, глубокого обучения и ИИ. Имеются и другие возможности (программы) механизировать анализ больших данных для решения разного рода задач

от описательных до прогнозных. Некоторое представление об анализе больших данных приведено в работе<sup>11</sup>, на рис. 4 показаны техники и методы анализа, применяемые к Big Data<sup>12</sup>.

Еще одной новой технологией, применяемой в образовании, является виртуальная (VR) и дополненная (DR) реальность. И та, и другая технологии используются для всех видов образования. Для школьного образования выпускается даже специализированное оборудование. Применение VR и DR в школе имеет много достоинств для создания у школьников мотивации к изучению гуманитарных дисциплин и дисциплин точных наук. Но эти же технологии применимы и в высшей школе<sup>13</sup>, но на несколько другом уровне. Существуют симуляторы и тренажеры на основе виртуальной реальности, позволяющие получить профессиональные навыки<sup>14</sup>. При этом используются технологии интерактивного обучения, игрового и других сопутствующих 3D-e-learning компьютерных программных комплексов. Для этого, кроме программного обеспечения, потребуется еще, например, иметь комплект очков виртуальной реальности.

*Цифровые двойники.* Этим перечислением не заканчивается характеристика университета 4.0. Однако указанные технологии, применяемые в высшей школе, в той или иной мере участвуют в создании и использовании ЦД. Адаптируя опыт, полученный в других отраслях, можно перечислить

<sup>11</sup> Big Data Analytics: How it works, tools, and real-life applications. URL: <https://www.altexsoft.com/blog/big-data-analytics-explained/>

<sup>12</sup> Большие данные (Big Data). URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Большие\\_данные\\_\(Big\\_Data\)?amp;action=edit&amp;section=6](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Большие_данные_(Big_Data)?amp;action=edit&amp;section=6)

<sup>13</sup> Быть или не быть? VR и AR в сфере образования. URL: <https://virtre.ru/articles/augmented-reality/byt-ili-ne-byt-vr-i-ar-v-sfere-obrazovaniya.html>

<sup>14</sup> Князева Г.В. Виртуальная реальность и профессиональные технологии визуализации.

основные пункты создания ЦД строительных и дорожных машин и оборудования<sup>15</sup>: создание адекватных математических моделей и электронных документов, описывающих поведение объекта (механизма, машины, оборудования, технологического процесса). Основные преимущества ЦД должны закладываться на этапе разработки изделия и далее на этапах производства и эксплуатации. И на каждом этапе создаются цифровые модели с высокой степенью соответствия реальным объектам и процессам. Создание моделей учитывает структурную схему и геометрию конструкции машины, ее кинематические и динамические зависимости; физико-механические свойства используемых материалов (конструкционных, эксплуатационных, защитных); параметры, характеризующие безопасность эксплуатации машины (прочность элементов и конструкции в целом, устойчивость от опрокидывания, вибробезопасность оператора, эргономические и санитарные требования, экологичность машины, ее эксплуатации и утилизации и др.). Учет всего перечисленного описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений, решаемых численными методами. Нелинейность уравнений связана, в первую очередь, со многими ограничениями, например по свойствам материалов, кинематике возможного движения, рабочей зоне машины и др. Эти системы дифференциальных уравнений должны аутентично описывать динамическое поведение машины и обязаны составляться механиками и математиками в работоспособном тандеме, что еще раз обосновывает необходимость соответствующей подготовки и механиков, и математиков.

Здесь можно заметить, что математическое моделирование строительных машин и оборудования давно применяется при исследовании динамики строительных машин с целью определения нагрузок в элементах конструкции и в главных механизмах строительных машин в переходных режимах работы; найденные динамические нагрузки позволяли выполнять расчет на прочность элементов конструкции или механизмов машин с учетом режима работы (кстати, определение реального режима работы на стадии проектирования машины является отдельной важной задачей); также математическое моделирование позволяло определить во времени протекание динамических процессов. Поэтому имеющийся опыт цифрового моделирования необходимо расширить решением дополнительно тех задач, которые ставятся при создании ЦД в конкретных условиях создания строительных, дорожных, подъемно-транспортных машин и оборудования с той или иной степенью детализации в зависимости от поставленных целей и задач. То есть в строительной отрасли создание ЦД машин, механизмов и технологических процессов с ними начинается

и происходит не на пустом месте, а с использованием соответствующего исследовательского опыта.

Цифровой двойник нуждается в информации о производительности, работоспособности, техническом обслуживании и т.д., которая поступает от датчиков [13]. Еще на этапе создания технического объекта определяются места установки датчиков ПоТ системы, информирующих ЦД о физическом состоянии машины. Выбор мест установки датчиков, способных информировать о жизненно важном состоянии элементов конструкции и машины, а также характеризующих текущие экономические показатели, является важнейшей и ответственной задачей для математиков, механиков, экономистов и т.д. Это перечисление можно продолжить с очевидной необходимостью совместной работы математиков и механиков, а вероятно и других специалистов, при адекватном создании ЦД строительной техники. Причем под механиками, математиками и т.п., как правило, следует понимать не отдельные персоналии, а соответствующие рабочие группы специалистов.

Ожидаемые «дивиденды» от разработки и применения ЦД могут и не оправдаться не только потому, что цифровая модель неадекватна реальному объекту, но и потому, что у ИИ в его широком понимании существуют определенные проблемы. К ним, например, относятся: ненадежная работа информационных датчиков, установленных в критических местах машины; выбор не в тех местах установки датчиков или невозможность их установки в нужном месте; неполная или искаженная, поступающая от датчиков, информация, и другие проблемы, связанные с интернетом вещей. Также среди проблем можно указать неадекватный алгоритм обработки данных, поступающих от датчиков; ограниченную или чрезмерную подробность построенной цифровой модели, связанную с формализацией задачи; нейронные сети, часто используемые для прогноза во времени поведения машины, могут ошибаться, хотя с формальной точки зрения принятое нейронной сетью решение правильное. Проблемы применяемых цифровых инструментов можно продолжить (примеры аварий можно найти в интернете для воздушного и наземного транспорта), но важно иметь о них представление и учитывать при создании ЦД. В настоящее время разрабатываются стандарты в рассматриваемой нами области для ограничения цифровых разработок с целью умышленного или неумышленного причинения вреда человеку, его дискриминации или необъективной оценки деятельности. К сожалению, пока упомянутые стандарты мало затрагивают производственную сферу, хотя работы ведутся и некоторые нормативные документы уже опубликованы. Глобально можно отметить, что еще в 2017 г. знаменитый британский ученый Стивен Хокинг предвидел, что искусственный интеллект для человечества может быть как

<sup>15</sup> Роль цифрового двойника в современном машиностроении. URL: [http://rosacademtrans.ru/cifrovoi\\_dvoinik/](http://rosacademtrans.ru/cifrovoi_dvoinik/)

величайшим добром, так и величайшей проблемой, включая гибель человечества<sup>16</sup>.

В ряде вузов России (например, СПбПУ, МГТУ «СТАНКИН», МГТУ им. Н.Э. Баумана, НИТУ МИСИС и др.) широко используются новые подходы в преподавании дисциплин, обеспеченных необходимыми программными продуктами (чаще всего в сфере технологии машиностроения, экономики и менеджмента) [1]. В сфере строительства НИУ МГСУ разработал программы и внедрил дисциплины, обеспечивающие применение ТИМ/ВМ-технологий на основе информационных моделей, которые связаны и имеют много общего с вопросами создания ЦД, но все же отличаются от них<sup>17, 18</sup> [6, 7]; в НИУ МГСУ существует дополнительное образование с обучением ТИМ-технологиям в строительстве.

Отметим, что применение ЦД в строительной отрасли подразумевает и включение в строительнотехнологический процесс соответствующей строительной техники, оборудования и средств малой механизации. Такая ситуация требует от специалистов в области строительных машин и оборудования иметь компетенции в области ЦТ вообще, и ЦД в частности. Дело в том, что при создании ЦД действующего строительного объекта (или части его) как многофакторного единого комплекса необходимо участие всех специалистов, в той или иной мере участвующих в полном цикле создания «изделия» от задания на проектирование и до полного исчерпания его ресурса. При этом все участвующие специалисты, включая специалистов-механиков, должны «говорить» на одном языке. Иначе «данные находятся в разных “колодцах”, которые не связаны между собой: разные базы данных, разные форматы, разная структура данных, разная методология их получения...» [7].

В области строительных, дорожных, коммунальных, подъемно-транспортных машин и механического оборудования уже ведутся разработки по созданию отдельных составляющих ЦД, в частности, в области математического, цифрового и имитационного моделирования. В 2021 г. в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова создана лаборатория цифровых методов управления жизненным циклом изделий машиностроения, которая развивает научное направление, связанное с проек-

тированием конструкций, разработкой новых материалов и методов диагностирования и испытания конструктивных элементов, узлов, агрегатов, машин и оборудования в области машиностроения; в область интересов этой лаборатории входит и создание ЦД машин строительной отрасли.

Как известно, создание моделей вообще и математических, в частности, преследует цель исследования свойств реальных физических объектов, которые могут еще не существовать, а только планируются к производству. Такая возможность определяет огромный экономический эффект, получаемый от моделирования будущего изделия: ошибки в проекте на начальных стадиях могут привести к колоссальным затратам при их ликвидации на уже изготовленной машине. В связи с этим этап создания модели является очень важным.

В зависимости от поставленных целей и решаемых задач варианты разнообразных моделей, пригодных для реального проектирования, производства и эксплуатации очень многообразны. Например, для строительного машиностроения можно составить описательную модель, обучающую, имитационную, оптимизационную или комплексную; кроме того, модели могут быть статическими и динамическими с разной степенью абстракции. Также модели могут быть идеальными и формальными, с разной степенью приближения к реальности; детерминированными и стохастическими и т.д., включая комплексную модель со многими признаками. Практика моделирования показывает, что создание модели, особенно принципиально новой (инновационной) машины, часто носит интуитивный характер и зависит от профессиональных качеств автора модели. Эта профессиональная интуиция специалиста-механика должна закладываться еще в вузе, используя все составляющие своевременно актуализированной основной профессиональной образовательной программы.

Упомянутая выше многовариантность проектирования технического изделия касается и возможностей предприятия по изготовлению элементов этого изделия. Технология создания ЦД позволяет либо учитывать возможности этого предприятия (станочный парк, квалификация работников, применяемые производственные технологии, материальные ресурсы), либо выбрать предприятие с учетом всего перечисленного. Чтобы использовать эти возможности ЦД, нужна разнообразная информация о предприятиях требуемого профиля и в необходимом виде. Перечисление источников многовариантности можно многократно продолжить с той лишь целью, дабы показать необходимость научить будущего специалиста-механика не только профессиональным специальным «механическим» знаниям, умениям и навыкам, но и возможности применения их при моделировании машин, создавая в команде ЦД.

Таким образом, по специальности «Наземные транспортно-технологические средства» специ-

<sup>16</sup> Стивен Хокинг увидел в искусственном интеллекте угрозу гибели человечества. URL: <https://www.forbes.ru/tehnologii/343535-stiven-hoking-uvitel-v-iskusstvennom-intellekte-ugrozu-gibeli-chelovechestva>

<sup>17</sup> Цифровой двойник здания — новый этап в развитии строительных технологий. URL: <https://bim-info.ru/articles/tsifrovoy-dvoynik-zdaniya-novyuy-etap-v-razvitii-stroitelnykh-tehnologiy/>

<sup>18</sup> Цифровой двойник здания: как технология применяется в строительстве. URL: <https://digital-build.ru/czifrovoy-dvoynik-zdaniya-kak-tehnologiya-primenaetsya-v-stroitelstve/>

ализации «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование» давно возникла необходимость в обучении новейшим технологиям проектирования, производства, эксплуатации и утилизации строительных машин и механизмов. Основой реализации этих этапов ЖЦ машины должны быть машиночитаемые без участия человека SMART-стандарты, взаимодействующие с математической моделью и задающие виртуально требуемые режимы испытаний и контролирующие и регистрирующие действия ЦД, а также результаты виртуальных испытаний. И подготовленный специалист-механик должен разбираться в перечисленных задачах и на равных с другими специалистами участвовать в создании и эксплуатации ЦД.

Используя накопленный в строительной и других отраслях опыт создания и применения ЦД, несмотря на сложность задачи, можно получать временные, ресурсные, проектные, производственные, экологические и в итоге конкурентно экономические преимущества. Наглядные примеры перечисленных сложностей создания и достоинств применения ЦД приведены в работе [1].

Подготовка специалистов-механиков в строительной отрасли уже возможна на базе имеющегося и появления нового отечественного софта: например, вендор ООО «Нанософт разработка» (nanoCAD) предлагает много модулей, включая 3D, «Растр» и «Механика»<sup>19</sup> [8].

Для специалиста-механика имеется много прикладных задач в области применения ЦД [14–26] теми командами, о которых шла речь выше. Например, испытания продукции. По стандарту<sup>20</sup> различают более 40 видов испытаний техники, включая сертификационные, что очень важно с учетом технического регламента таможенного союза в части строительных машин. Кроме того, ЦД позволяют производить ремонт машины по потребности, используя диагностические данные, получаемые от соответствующих датчиков. Есть и другие задачи.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Учитывая отмеченное, в НИУ МГСУ при разработке проекта новой основной образовательной программы высшего образования по специальности: 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства (специализация «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование») в порядке эксперимента в «дисциплины (модули) по выбору» в «части, формируемой участниками образовательных отношений», была добавлена дис-

<sup>19</sup> Решения нового времени. Отечественный софт — от САПРа до цифрового двойника. URL: <https://ardexpert.ru/article/24694>

<sup>20</sup> ГОСТ 16504–81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.

циплина «Основы создания цифрового двойника строительных машин и оборудования». За данной дисциплиной были закреплены профессиональные компетенции ПК-2 «Способность разрабатывать и анализировать конструктивные решения машин и отдельных узлов на стадиях производства, модернизации и ремонта подъемно-транспортных, строительных, дорожных средств и оборудования» и ПК-3 «Способность разрабатывать с использованием информационных технологий конструкторско-техническую документацию для производства новых или модернизируемых образцов подъемно-транспортных, строительных, дорожных средств и оборудования». Цифровой вектор развития вышеозначенных компетенций даст возможность выпускникам НИУ МГСУ адаптироваться в информационной среде организаций, разрабатывающих и производящих строительные машины и оборудование.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании отмеченного можно сделать следующие выводы и привести рекомендации.

Актуализированные учебные планы подготовки кадров по специальности «Наземные транспортно-технологические средства» должны быть дополнены компетенциями в сфере создания ЦД.

В дисциплинах, формирующих универсальные знания и умения («Информатика», «Начертательная геометрия, инженерная и компьютерная графика», «Математическое моделирование», «Уравнения математической физики» и т.п. по решению образовательной организации), необходимо ввести или усилить разделы: «Численное решение линейных и нелинейных дифференциальных уравнений», «Основы искусственного интеллекта», «Основы работы с большими данными», «Основы создания 3D-модели» и другие, формирующие у будущего специалиста компетенции, необходимые для участия в создании ЦД подъемно-транспортных, строительных, дорожных средств и оборудования.

В профессиональных дисциплинах необходимо ввести или более широко и акцентировано использовать современные понятия аддитивных и сквозных технологий, цифровизации производства и др.

С целью повышения качества подготовки специалистов перспективным является создание «объединенной дисциплины», в которой осуществляется групповая (объединенная) проектная работа студентов, обучающихся по разным направлениям подготовки, под руководством нескольких разнопрофильных преподавателей (предпочтительно практикующих представителей отрасли).

В области строительных, подъемно-транспортных, дорожных средств и оборудования существует много прикладных задач для применения ЦД, начиная от проектирования, изготовления, сертификации и до эксплуатации и утилизации.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / науч. ред. профессор А. Боровков. Изд. первое, исправ. и доп. М. : ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с.
2. Царев М.В., Андреев Ю.С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 7. С. 517–531. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531. EDN QOKQJW.
3. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Кукушкин К.В., Марусева В.М., Кулемин В.Ю. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК // Вестник Восточно-Сибирской открытой академии. 2019. № 32. С. 2. EDN ЗАХСОТ.
4. Голицына И.Н. Образование 4.0 в подготовке современных специалистов // Образовательные технологии и общество. 2020. Т. 23. № 1. С. 12–19. EDN DWTNHS.
5. Волков А. Нерешаемые задачи как основа высшего образования. Интервью с А.Е. Волковым // Вопросы образования. 2013. № 1. С. 273–277. DOI: 10.17323/1814-9545-2013-1-273-277. EDN QAJGNZ.
6. Ежкина Л.В., Курбатов В.Л. Применение технологии цифровых двойников в строительстве // Университетская наука. 2022. № 2 (14). С. 51–53. EDN TLBWDE.
7. Изряднова А.И., Целищева П.А., Бегунова Н.В. Цифровые двойники в современном строительстве: практика применения и перспективы использования // Фотинские чтения–2022 (весеннее собрание) : мат. IX Междунар. науч.-практ. конф. 2022. С. 102–111. EDN FKLQSP.
8. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research // IEEE Access. 2020. Vol. 8. Pp. 108952–108971. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358
9. Липкин Е. Индустрия 4.0: умные технологии — ключевой элемент в промышленной конкуренции. М. : Остек-СМТ, 2017. 223 с.
10. Кирилова Д.А., Маслов Н.С., Астахова Т.Н. Перспективы внедрения технологии блокчейн в современную систему образования // International Journal of Open Information Technologies 2018. Т. 6. № 8.
11. Уваров А.Ю., Гейбл Э., Дворецкая И.В., Заславский И.М., Карлов И.А., Мерцалова Т.А. и др. Трудности и перспективы цифровой трансформации образования / под ред. А.Ю. Уварова, И.Д. Фрумина. М. : Высшая школа экономики, 2019. 344 с. DOI: 10.17323/978-5-7598-1990-5. EDN ANYGHO.
12. Утёмов В.В., Горев П.М. Развитие образовательных систем на основе технологии Big Data // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2018. № 6. С. 104–116. DOI: 10.24422/MCITO.2018.6.14501. EDN OUTAGP.
13. Хитрых Д. Цифровые двойники в промышленности: истоки, концепции, современный уровень развития и примеры внедрения // САПР и графика. 2020. № 7 (285). С. 8–12.
14. Sharapov R., Agarkov A. Determination of the aerodynamic characteristics of a concentrator with adjustable parameters // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 03014. DOI: 10.1051/mateconf/201825103014
15. Ishkov A.D., Stepanov A.V., Miloradov S.V., Voronina I.V. Energy-efficient vibratory feeder of bulk construction materials // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 670–671. Pp. 458–461. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.670-671.458
16. Gustov Y.I., Gadolina I.V., Yushkov A.A. The deformation-topographic method for the study of the tribotechnical indicators of the working bodies of rotary excavators // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 786. Issue 1. P. 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/786/1/012031
17. Drozdov A. Automation of vibration modes of soil compaction machines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. Issue 7. P. 072022. DOI: 10.1088/1757-899X/869/7/072022
18. Kaitukov B., Stepanov M., Kapyrin P. The choice of concrete mixers for the concrete preparation // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 178. P. 06016. DOI: 10.1051/mateconf/201817806016
19. Sevryugina N., Kapyrin P. Triad model: simulation — functional tensometry — information database in the assessment of the reliability of technological machines // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263. P. 04063. DOI: 10.1051/e3sconf/202126304063
20. Kudryavtsev E.M. Automation of optimization of discrete technological processes // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 196. P. 04067. DOI: 10.1051/mateconf/201819604067
21. Plavelsky E.P., Sharapov R.R., Plavelsky A.E. The traffic performance of the wheeled carrying liquid materials study // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 744. Issue 1. P. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/744/1/012024
22. Skel V. Oscillation of gear mechanisms of construction machines // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263. P. 04061. DOI: 10.1051/e3sconf/202126304061
23. Stepanov M.A., Gridchin A.M. Perspectives of construction robots // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. P. 042126. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042126
24. Stepanov M.A., Korolev A.A. Mathematical modeling of a process the rolling delivery // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 317. P. 012019. DOI: 10.1088/1757-899X/317/1/012019

25. Kaytukov B., Stepanov M. Current issues of mobile cranes unification // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 03011. DOI: 10.1051/matec-conf/201825103011

26. Sharapov R.R., Kharlamov E.V., Yadykina V.V. The fluidized bed separator // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 324. P. 012052. DOI: 10.1088/1757-899X/324/1/012052

Поступила в редакцию 21 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 21 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 27 сентября 2023 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Евгений Порфирьевич Плавельский** — доктор технических наук, профессор кафедры механизации, автоматизации и роботизации строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; руководитель органа по сертификации; **Центральный научно-испытательный полигон строительных и дорожных машин (ЦНИИ СДМ)**; г. Ивантеевка, Санаторный проезд, д. 1; РИНЦ ID: 409359, Scopus: 57197824485, ResearcherID: AFN-4654-2022, ORCID: 0000-0002-6593-1100; eplavelsky@gmail.com;

**Дмитрий Юрьевич Густов** — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедры механизации, автоматизации и роботизации строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 306937, ORCID: 0000-0002-1866-7327, Scopus: 6504605458, ResearcherID: AFM-2496-2022; GustovDU@gic.mgsu.ru;

**Владимир Израилевич Скель** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механизации, автоматизации и роботизации строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 801889, ORCID: 0000-0002-8888-3500, Scopus: 57192374114, ResearcherID: ACY-2907-2022; skelvi@mgsu.ru;

**Александр Михайлович Агарков** — кандидат технических наук, доцент кафедры механизации, автоматизации и роботизации строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 713145, ORCID: 0000-0002-4818-7949, Scopus: 55863123000, ResearcherID: U-5430-2018; AgarkovAM@mgsu.ru.

*Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## INTRODUCTION

On a modern construction site with additive, TIM/BIM technologies, the role of the mechanical engineer increases manifold. This involves not only the selection and operation of appropriate machines and mechanisms, including, for example, 3D printers, but also participation in the creation of new innovative machines and mechanisms using modern methods. This implies the application of digital technologies, especially in the creation of digital twins of the object by not only programmers, but also involving technologists, logisticians, economists, construction material scientists and so on.

Thus, it is necessary to train specialists (mechanical engineers) who can carry out work at a new modern level at all stages of the life cycle of machinery with the use of digital technologies. These stages include design, production, operation and repair of lifting, transport, construction, road vehicles and equipment. At the same time, the new level concerns, among other things, digital twin technologies [1]. The application of digital twins allows solving research, design, production and technological, organizational and management tasks in the field of construction engineering as part of the applied digital technologies in the construction field with the greatest effect.

All these tasks are ultimately aimed at obtaining a huge economic effect. This is why global business leaders are investing in the research and creation of digital twins, including investments in relevant training.

Digital doubles, having appeared at the beginning of the 21st century [2], have recently firmly occupied the publication field [1–8], which shows the development and relevance of this topic in various fields, at least in material human activities.

Gartner has long been involved in information technology and, for example, for 2022 publishes a forecast for breakthrough technologies Hype Cycle for Emerging Technologies<sup>1</sup>. Many authors of publications on digital twins cite the Gartner curve (Fig. 1)<sup>2</sup>. It shows the stages of development of breakthrough technologies: technological idea, excessive expectations of

<sup>1</sup> Emerging technologies for 2022 fit into three main themes: evolving/expanding immersive experiences, accelerated artificial intelligence automation, and optimised technologist delivery. URL: <https://www.gartner.com/en/articles/what-s-new-in-the-2022-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies>

<sup>2</sup> URL: <https://blog.bitobe.ru/article/krivaya-gartnera/>

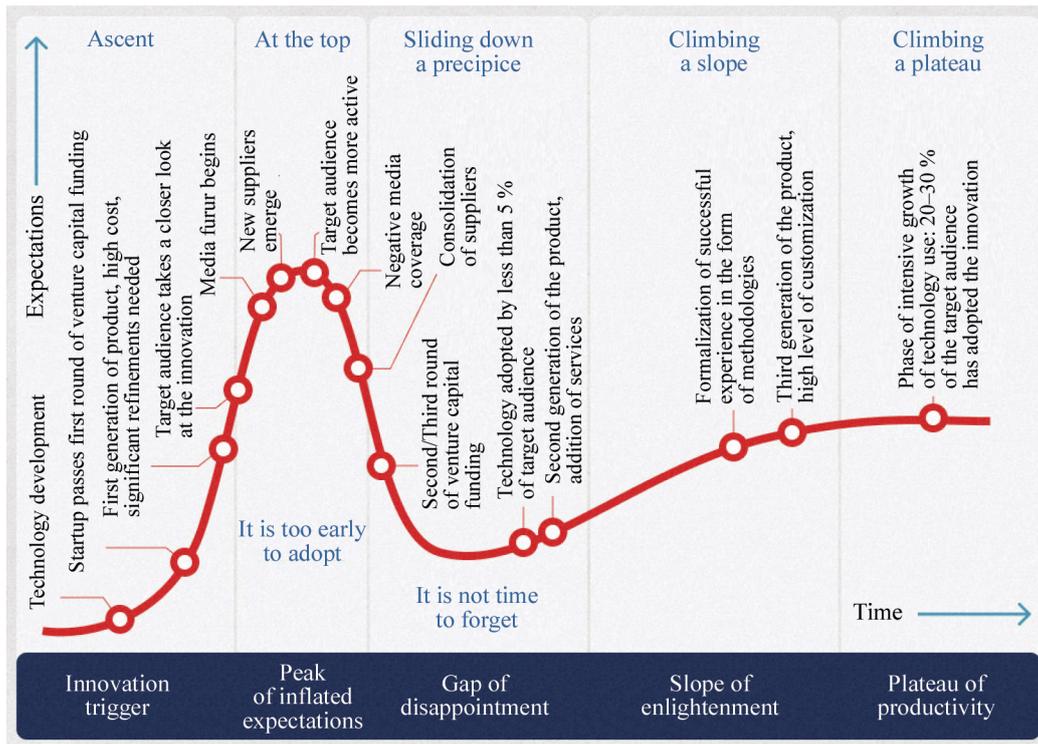


Fig. 1. Development periods of promising ideas according to Gartner

development and application of the new idea, getting rid of illusions through a more realistic assessment of the pros and cons of implementing the new idea, working to minimize the identified disadvantages and, finally, the stage of obtaining (spreading) a positive effect, and, first of all, economic. To the greatest extent, the economic effect is received by those who evaluated and implemented the new idea before others, although it is always difficult for pioneers, especially taking into account the initial investment of capital.

## MATERIALS AND METHODS

Effective implementation of training of specialists of a worthy level is possible only in the conditions of following the disciplines (and their content) of the basic professional educational programme in line with the general trends in the development of the global industry, consisting in end-to-end digitalization.

*Fourth Industrial Revolution.* The world's industrial history is currently undergoing another fourth revolutionary period, with intensive development of techniques, technologies, etc., leading to significant economic growth. The developing fourth industrial revolution is characterized by knowledge intensive, multidisciplinary, convergence and synergy, digital platforms and big data (Smart Big Date), AI (Artificial Intelligence — intelligent assistants), Smart Design & Smart Manufacturing<sup>3</sup> [3]. It is important to add

<sup>3</sup> Borovikov A. Lecture "Formation of digital industry based on digital twins". URL: <https://ok.ru/video/1798025381131>

the great effect, first of all, on the quality and speed of creating new technology, which is obtained from combining the stages of research, construction and design on the basis of the above-mentioned convergence and synergy. In addition to the above characteristics, other components of digitalization should also be added, such as the non-industrial (IoT) and industrial Internet of Things (IIoT), which is more relevant in terms of the construction industry. It is also important that the creation of digital twins also provides some future-proofing as a by-product of the creation of digital twins.

There is a programme "Digital Economy of the Russian Federation", approved by the Government of the Russian Federation on 28.07.2017 No. 1632-r, under which seven roadmaps in the direction of digital technologies have been developed. Under this programme, universities participate in its implementation. In the same vein, new platforms have been and are being developed worldwide, including for the creation of digital twins.

The concept of "digital twin" is defined in detail in [2]. A digital twin is a digital model that includes many components and differs from other models, such as TIM and BIM, in that it allows the product to be managed with a high degree of adequacy, which is very important, throughout its life cycle from design to disposal.

Digital twins (DT, Digital Twin) are already used in leading industries: transport engineering, shipbuilding, nuclear power, aerospace and so on [1], including

### Forecasting based on numerical modelling of products, processes and resources and their interaction in a virtual world

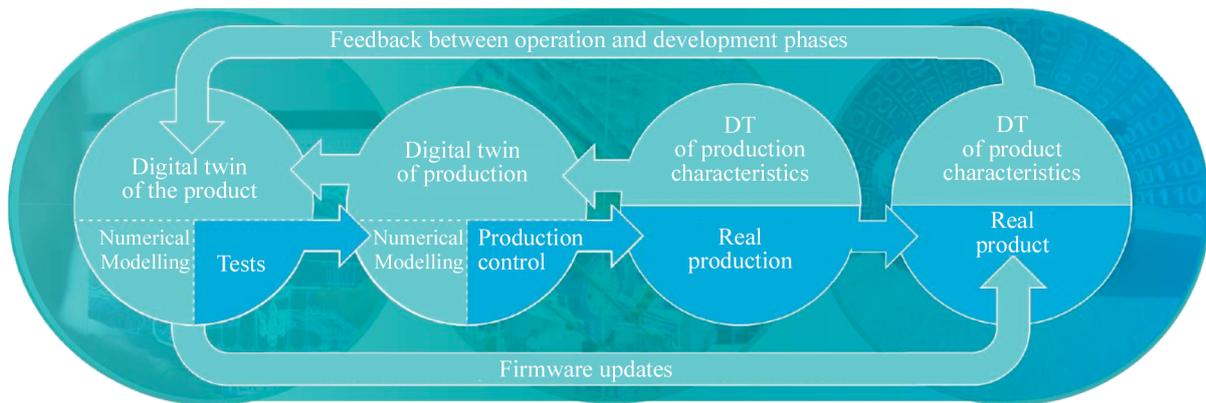


Fig. 2. Digitalization of production implies end-to-end integration of all levels of production

already construction<sup>4</sup>. The first standard on digital twins has been developed — GOST R 57700.37–2021 “Computer models and modelling. Digital twins of products. General provisions”, which will come into force in 2022. This standard applies to mechanical engineering products and already directly relates to construction mechanization equipment, for example, in terms of virtual testing.

It can be noted that the idea of including the discipline on digital twins in the educational process of training of mechanical specialists in construction machinery and equipment appeared after the publication of GOST R 57700.37–2021, communication with manufacturers of construction machinery and mechanical equipment at professional exhibitions in Moscow, communication with employees of laboratories for certification of construction equipment, as well as after the appearance on the Internet of many publications related to the fourth industrial revolution. As a result, we found out that when creating digital twins, specialists in creating mathematical, simulation and other types of models are often unable to present a volumetric picture of the modelled object, and they need to be assisted by mechanical specialists who have a deep knowledge and understanding of construction machines, mechanisms and equipment.

Today there is a lot of information on digital technologies, end-to-end digital technologies, etc., and, as a logical continuation, digital twins. As an example, let us refer to the review of works [2]. In essence, a digital twin is a digital model of an object, but with many peculiarities. Basically, digital twins are divided into a part (element) twin; a product (assembly) twin consisting of part twins; an object twin as a system (machine) consisting of functionally related products-assemblies; a process twin consisting of all components of a specific technological

process of an industry. In a certain sense, the given division of digital twins is conditional in its terminology and here does not cover all their types, but gives an idea of the variety of possible variants. Fig. 2 shows the scheme of connection and transition from a digital model to a real object when creating a digital twin<sup>5</sup>.

The contents of Fig. 2 are given in different interpretations in many Internet publications<sup>6</sup>. If they refer to digital twins, they list the possible positive effects of implementing digital twins. As applied to the construction industry with the help of digital twins it is possible to solve the problems of relatively reliable forecasting of volumes of construction production of a particular object with actually available material, labour, financial and natural resources; forecasting of efficiency of application (commissioning) of new construction technologies; optimization of application of construction mechanization means both by nomenclature and by the whole complex of machines and mechanisms necessary for implementation of construction technology of a given object; forecasting of the volume of construction production of a particular object; forecasting of the volume of construction production of a particular object with actually available material, labour, financial and natural resources. The listed tasks with the help of digital twins are solved more qualitatively and in shorter terms (according to different Internet estimates the time gain can be several times).

The connection of a digital model with a physical object when moving to a digital twin of a technical system or even a separate element of it may be even more profound than is presented in Fig. 2 and described above.

*Educational Concept 4.0.* The fourth industrial revolution forces to apply new approaches to the training of specialists: the educational concept 4.0, de-

<sup>4</sup> Digital twin of a building: how the technology is being applied in construction. URL: <https://digital-build.ru/czifrovoj-dvojniki-zdaniya-kak-tehnologiya-primenyaetsya-v-stroitelstve/>

<sup>5</sup> Digitalization of production. URL: <https://raytec.pro/services/tsifrovizatsiya-proizvodstva/>

<sup>6</sup> Digitalization Changes Everything. URL: <https://oneplm.com/oneplm-industry/>

scribed, for example, in [4], has appeared. This concept is largely associated with the digitalization of the economy, production, and education. Without dwelling on the previous periods of education development, which can be a separate topic, let us note the features of education 4.0. The issues of independent learning and research work are included in modern education. The source of information is not only the teacher, but also, to a large extent, the Internet, information technologies, including artificial intelligence. The rapid introduction of new technologies into production requires timely training of relevant specialists. In 2020, based on the analysis of open sources, the top 15 digital technologies were identified with the level of significance (in brackets) as the relative occurrence in the array of sources: industrial robots (1), artificial intelligence (0.86), machine learning (0.68), digital prototyping (0.56), sensorics (0.42), WLAN, PAN, RFID (0.30), blockchain (0.21), big data (0.20), virtual and augmented reality (0.12), product-as-a-service (Product-as-a-Service; 0.09), computer vision (0.03), smart contracts (0.03), industrial internet of things (0.03), digital twin (0.02), smart factories (0.01)<sup>7</sup> (it may be noted that as early as 2022. the global market for digital twins in the forecast for 2025–2026 was already estimated at around \$50bn). Some of the above have already entered the production life, for example, industrial robots and machine (digital) vision, but they are also changing in their capabilities and areas of application; others are already being intensively implemented in transport, mining and so on. Naturally, such a picture of the application of new digital technologies and tools required the introduction of relevant topics and directions in the educational process in all educational programmes.

One of the definitions of University 4.0 is given by A.I. Borovkov: “4.0 is a university capable of solving the challenges of modern industry by changing the concept of industry itself, by shifting the centre of gravity towards design, where all the parameters of the future design are laid down at the design stage”<sup>8</sup>. There are other definitions, but the meaning of the University 4.0 concept comes down to the application of digital technologies in education, the transfer of business skills to students, and the transition to individualization of learning. All this is aimed at equipping future specialists with such knowledge, skills and abilities that would allow them to enter the modern production process practically without additional corporate training or with minimal adaptation of a new specialist to the conditions of a particular corporation.

The development of educational programmes is not only led by teachers and learners, but also by the professional community through professional

standards, practices and provision. At the same time, there should be modern and accessible software in the form of, most often, specialized software platforms for creating digital products. In other words, the university should have both human and material resources to ensure the training of such specialists who can participate in the creation of digital twins of the construction object; in the creation of digital twins of construction machines, mechanisms and equipment; in the application of digital twin technologies in the design, construction, production, testing, operation and disposal of construction machines, mechanisms and equipment. This approach requires a certain flexibility in the formation of work programmes of disciplines that define the basic educational programme. All this requires new thinking from all participants of the educational process: student, teacher, university managers.

The progressive new cannot quickly (relatively) capture the minds of all participants in the industrial revolution process. However, the one who will benefit the most is the one who can first not only perceive this new thing, but also start to actively implement it. This, as they say, requires an integrated approach, which includes not only new material, in particular software, but also, as mentioned above, new approaches in education. In addition, new methods of education are required both for training specialists and for training teachers, mentors, coaches [5]. The latter is also interesting because the source of educational content for both students and teachers can often be the same information resources (Internet resources). Mass targeted retraining of teachers of both general and higher education, as experience shows, does not always keep up with the new requirements.

Recently there has been a lot of discussion about artificial intelligence in education, its advantages and disadvantages. If we put aside extreme opinions, we can state that artificial intelligence in education already exists and it is counterproductive to ignore this fact. One can draw an analogy with industrial robots, which many people initially met in a flinch. However, in full accordance with Gartner’s curves of new ideas (technologies) (Fig. 1), the first happy assumptions have been replaced by reality: robots are not omnipotent and have many limitations, especially considering the economic component of their creation and operation.

*Artificial intelligence in education.* It can be said that artificial intelligence in education is still looking for its optimal place. Its real advantages include freeing students and teachers from routine work. For example, for a student today it is the execution of drawings according to the requirements of the relevant standards, the creation of a typical mathematical model of a part; for a teacher it is the verification of a certain type of educational work and control tests. The practical, but more only theoretical, result of the application of artificial intelligence technologies is the liberation from template work: time is freed up for creative, for example, project work of both the student and the teacher.

<sup>7</sup> Top 15 digital technologies in industry. URL: <https://issek.hse.ru/news/494926896.html>

<sup>8</sup> Borovkov A.I. *What is University 4.0*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=31kIW4WqCDw>

An important feature of artificial intelligence, for example, in the form of neural networks is the possibility of their training and self-learning, and, accordingly, finding more modern possible design solutions. However, in this case we can note the crucial role of the instructor in teaching the student to formulate the problem requiring solution in a variant way, taking into account the constraints available in real-life conditions; in assessing the adequacy of the solutions proposed by the network and, if necessary, adjusting the initial formulations. This ability to formulate the problem and evaluate the resulting solutions is very important when creating digital twins of machines or mechanisms by mechanical specialists in an integrated team of IT and other specialists involved in the project.

Another area of application of artificial intelligence in education is the use of simulators. Different simulators are distinguished by their purpose. For example, simulation of physical processes in the development of new products, simulation based on a digital model of different types of product testing, game simulation in education and others [9]. Many training simulators are based on virtual and augmented reality. Such simulators can operate in virtual and real space and in real time, which is widely used in such areas in which training is associated with large material costs, with the risk of injury or even death of the operator and so on. Examples include the use of such simulators in the transport industry, especially aviation; in the nuclear and chemical industries; in medicine and others. In the field of construction, engineering simulators-trainers are used in training in technological processes management, in diagnostics of machines and mechanisms, in acquisition of skills of operators of machines, mechanisms and equipment. At the Department of Mechanization and Automation of Construction Machinery of the National Research University MGSU, simulators<sup>9</sup> are used to train specialists to respond to various types of failures occurring during the adjustment and operation of passenger and freight lifts.

In today's world, many of the original digital "tools" are changing or expanding their purpose, such as blockchain, a distributed ledger. Blockchain technology is already used in school and university education and the prospects for its further application are only increasing. By its structure, distributed reality is becoming more and more voluminous and is available under certain conditions almost everywhere, as long as there is the appropriate equipment (computer, laptop, gadget). The main characteristics of blockchain are decentralization and security, openness and transparency, immutability and trust, and others. As a consequence of these properties, blockchain is convenient for storing authentic documents: diplomas, personal documents and achievements of students and staff (teachers), scientific achievements and publications and the like; con-

venient for student and other staff identification in different departments of their own and other universities; ubiquitous availability of online courses, especially new author's courses; and much more. As an example of the application and prospects of blockchain technology development in education, we refer to two papers [10, 11].

Another opportunity for breakthrough in education is Big Data technologies. Big Data technologies allow to operate with personal data in terms of personal data of students and teachers, as well as about successes in different areas of activity, preferences in the choice of educational content and so on, including prediction of future activities of students and their tutors, for example, within the interests of the university; security and administration capabilities in the university [12].

As is known, big data is characterized by several attributes, for example, the "five V" (Fig. 3<sup>10</sup>): Volume — terabytes and more; Velocity — the volume of information increases exponentially, which requires programs for fast data processing and analysis; Variety — data can be presented in a variety of forms and formats; Veracity — the accuracy and reliability of data acquisition; Value — the importance of information for a particular industry and the like.



Fig. 3. Big Data attributes

We can add: the rapidly growing amount of data is related to cloud computing traffic, IoT/IIoT (Internet of Things/Industrial Internet of Things), mobile traffic, etc.; the high speed at which data is accumulated is mainly related to Internet of Things, mobile data, social media, etc.; data diversity is related to structured, semi-structured and unstructured data due to different data sources generated by humans or machines; trustworthiness refers to ensuring quality/integrity/validity/accuracy/precision. Data diversity is related to structured, semi-structured and unstructured data due to

<sup>9</sup> Laboratory stand "Simulation of a lift with control device of UL (UKL) series IL-UL and SHULM series".

<sup>10</sup> Data Science: The 5 V's of Big Data. URL: <https://medium.com/analytics-vidhya/the-5-vs-of-big-data-2758bfcc51d>

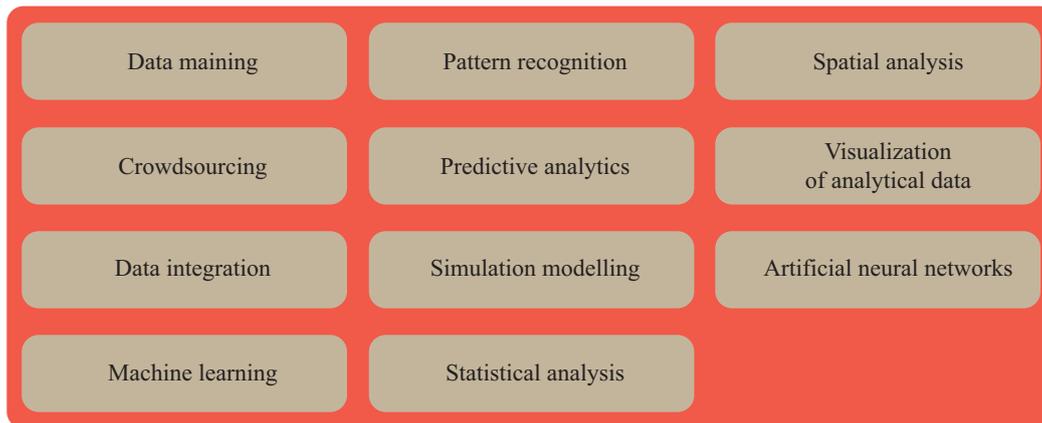


Fig. 4. Big Data analysis processes and tools

different sources of data generated by humans or machines; validity refers to ensuring the quality/integrity/validity/accuracy of data, since data is collected from multiple sources, it is necessary to check the accuracy of the data before using it further; value refers to how useful the data is for decision making (we need to extract value from big data using proper analytics).

The most important part of Big Data in a technical university is the possibility to select, create or refine a projected technical design on the basis of Big Data analysis; it is the potential to predict the behaviour of, for example, a mechanical system created during course design or during the development of a final qualification work. As we know, any design is multivariate and the ability to see the remote consequences of the design decisions made is at least very tempting. Thus, without analyzing big data the solution of the mentioned tasks is difficult or time-consuming. There are four types of analysis: descriptive type, which fixes the situation that happened; diagnostic type, which determines the causes of what happened; predictive type, i.e. predictive or forecasting, performed on the basis of mathematical statistics, modelling, machine learning, artificial intelligence and so on.

To analyse big data, especially for repetitive tasks, typical, for example, for higher (any) school, it is likely to apply Data Mining with the possibility of machine learning, deep learning and artificial intelligence. There are other possibilities (programmes) to machine analyse big data to solve different kinds of problems from descriptive to predictive. Some insight into big data analysis is given in<sup>11</sup> and Fig. 4 shows the analysis techniques and methods applied to Big Data<sup>12</sup>.

Another new technology used in education is virtual reality (VR) and augmented reality (AR). Both technolo-

gies are used for all types of education. Even specialized equipment is being produced for school education. The use of VR and AR in school has many advantages for motivating students to study humanities and science disciplines. But the same technologies are also applicable in higher education<sup>13</sup>, but on a slightly different level. There are simulators and simulators based on virtual reality, allowing to obtain professional skills<sup>14</sup>. This uses technologies of interactive learning, gaming and other related 3D e-learning computer software systems. For this, in addition to software, it will be necessary to have, for example, a set of virtual reality glasses.

*Digital twins.* The characterization of University 4.0 does not end with this enumeration. However, the listed technologies used in higher education are involved to some extent in the creation and use of digital twins. Adapting the experience gained in other industries, it is possible, for example, to list the main points of creating digital twins of construction and road machinery and equipment<sup>15</sup>: creation of adequate mathematical models and electronic documents describing the behaviour of the object (mechanism, machine, equipment, technological process). The main advantages of the digital twin should be laid down already at the stage of product development and further at the stages of production and operation. In addition, at each stage digital models with a high degree of correspondence to real objects and processes are created. Creation of models takes into account the structural scheme and geometry of the machine design, its kinematic and dynamic dependencies; physical and mechanical properties of the materials used (structural, operational, protective); parameters characterizing the safety of machine opera-

<sup>11</sup> Big Data Analytics: How It Works, Tools, and Real-Life Applications. URL: <https://www.altexsoft.com/blog/big-data-analytics-explained/>

<sup>12</sup> Big Data. URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Большие\\_данные\\_\(Big\\_Data\)?amp;action=edit&section=6](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Большие_данные_(Big_Data)?amp;action=edit&section=6)

<sup>13</sup> To be or not to be? VR and AR in education. URL: <https://virtre.ru/articles/augmented-reality/byt-ili-ne-byt-vr-i-ar-v-sfere-obrazovaniya.html>

<sup>14</sup> Knyazeva G.V. *Virtual Reality and Professional Visualization Technologies.*

<sup>15</sup> The role of the digital twin in modern engineering. URL: [http://rosacademtrans.ru/cifrovoi\\_dvoinik/](http://rosacademtrans.ru/cifrovoi_dvoinik/)

tion (strength of elements and the structure as a whole, stability against tipping, vibration safety of the operator, ergonomic and sanitary requirements, environmental friendliness of the machine itself, its operation and disposal, etc.). Taking into account all of the above is described by a system of nonlinear differential equations solved by numerical methods. Nonlinearity of the equations is connected, first of all, with many restrictions, for example, on the properties of materials, on the kinematics of possible motion, on the working area of the machine and others. These systems of differential equations must authentically describe the dynamic behaviour of the machine and must be prepared by mechanics and mathematicians in a workable tandem, which once again justifies the need for appropriate training of both mechanics and mathematicians.

It can be noted here that mathematical modelling of construction machines and equipment has long been used in the study of the dynamics of construction machines in order to determine the loads in the structural elements and in the main mechanisms of construction machines in transient modes of operation; the found dynamic loads allowed to perform strength calculations of structural elements or mechanisms of machines taking into account the mode of operation (by the way, the determination of the real mode of operation at the stage of machine design is a separate important task); also mathematical modelling of construction machines and equipment is used in the study of the dynamics of construction machines in order to determine the loads in the structural elements and in the main mechanisms of construction machines in transient modes of operation. Therefore, the available experience of digital modelling should be extended by solving additionally those tasks that are set when creating a digital twin in specific conditions of creation of construction, road, lifting and transport machines and equipment with this or that degree of detail depending on the goals and objectives. That is, in the construction industry, the creation of digital twins of machines, mechanisms and technological processes with them does not start and takes place from scratch, but with the use of relevant research experience.

The digital twin needs information about performance, operability, maintenance and so on, which comes from sensors [13]. Even at the stage of technical object creation, the installation locations of IIoT system sensors that inform the digital twin about the physical state of the machine are determined. The choice of installation locations for sensors capable of informing about the vital state of structural elements and the machine itself, as well as characterizing the current economic indicators is the most important and responsible task for mathematicians, mechanics, economists and so on. This enumeration can be continued with the obvious need for mathematicians and mechanics, and probably other specialists as well, to work together in the adequate creation of a digital twin of construction machinery. Moreover, mechanics, mathematicians and so on,

as a rule, should be understood not as individual persons, but as appropriate working groups of specialists.

The expected “dividends” from the development and application of digital twins may not be justified not only because the digital model is inadequate to the real object, but also because artificial intelligence in its broadest sense has certain problems. These include, for example: unreliable operation of information sensors installed in critical areas of the machine; wrong sensor locations or inability to install sensors in the right place; incomplete or distorted information coming from sensors, and other problems associated with the Internet of Things. Other problems include inadequate algorithms for processing sensor data; limited or excessive detail of the digital model built, related to the formalization of the problem; neural networks often used to predict the behaviour of the machine over time may be wrong, although from a formal point of view the decision made by the neural network is correct. The problems of the digital tools used can be continued (examples of accidents can be found on the internet for air and ground transport), but it is important to be aware of them and take them into account when creating digital twins. Standards are currently being developed in the field we are considering to limit digital designs to intentionally or unintentionally harm, discriminate against, or bias human performance. Unfortunately, so far the mentioned standards have little impact on the production sphere, although work is underway and some normative documents have already been published. Globally, it can be noted that back in 2017, the famous British scientist Stephen Hawking foresaw that artificial intelligence for humanity could be both the greatest good and the greatest problem, including the demise of humanity<sup>16</sup>.

A number of Russian universities (e.g., SPbPU, MSUT “STANKIN”, Bauman Moscow State Technical University, NUST MISIS and others) widely use new approaches in teaching disciplines provided with the necessary software products (most often in the field of mechanical engineering technology, economics and management) [1]. In the field of construction, NRU MGSU has developed programmes and introduced disciplines providing the application of TIM/BIM technologies based on information models, which are related and have much in common with the issues of creating digital twins, but still differ from them<sup>17, 18</sup> [6, 7];

<sup>16</sup> Stephen Hawking saw artificial intelligence as a threat to humanity's demise. URL: <https://www.forbes.ru/tehnologii/343535-stiven-hoking-uvidel-v-iskusstvennom-intellekte-ugrozu-gibelichlovechestva>

<sup>17</sup> Digital twin of a building — a new stage in the development of building technologies. URL: <https://bim-info.ru/articles/tsifrovoy-dvoynik-zdaniya-novyy-etap-v-razviti-stroitelnykh-tehnologii/>

<sup>18</sup> Digital twin of a building: how the technology is being applied in construction. URL: <https://digital-build.ru/czifrovoy-dvoynik-zdaniya-kak-tehnologiya-primenyaetsya-v-stroitelstve/>

in NRU MGSU there is additional education with training in TIM technologies in construction.

It should be noted that the application of digital twins in the construction industry also implies the inclusion of appropriate construction machinery, equipment and small mechanization tools in the construction process. This situation requires specialists in the field of construction machinery and equipment to have competences in the field of digital technologies in general and in the field of digital twins in particular. The point is that when creating a digital twin of an existing construction object (or a part of it) as a multifactor unified complex, it is necessary to involve all specialists in one way or another involved in the full cycle of creating the “product” from the design task to the complete exhaustion of its resource. In this case, all participating specialists, including mechanical specialists, must “speak” the same language. Otherwise, “Data are in different «wells» that are not connected with each other: different databases, different formats, different data structure, different methodology of their obtaining...” [7].

In the field of construction, road, municipal, lifting, transport machines, and mechanical equipment, developments are already underway to create individual components of digital twins, in particular in the field of mathematical, digital and simulation modelling. In 2021 at the Blagonravov Institute of Machine Building Science, FSBI of Science. A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering named after A.A. Blagonravov established the laboratory “Digital methods of life cycle management of mechanical engineering products”, which develops the scientific direction related to the design of structures, development of new materials and methods of diagnostics and testing of structural elements, units, assemblies, machines and equipment in the field of mechanical engineering; the area of interest of this laboratory includes the creation of digital twins of machines in the construction industry.

As is known, the creation of models in general and mathematical models, in particular, pursues the goal of studying the properties of real physical objects, which may not even exist yet, but are only planned for production. This possibility determines a huge economic effect obtained from modelling of the future product: errors in the design at the initial stages can lead to huge costs when they are eliminated on the already manufactured machine. In this regard, the stage of model creation is very important.

Depending on the goals and tasks to be solved, the options of various models suitable for actual design, production and operation are very diverse. For example, a descriptive, training, simulation, optimization or complex model can be created for construction engineering; in addition, models can be static and dynamic with different degrees of abstraction. In addition, models can be ideal and formal, with different degrees of approximation to reality; deterministic and stochastic and so on, including a complex model with many features.

The practice of modelling shows that the creation of a model, especially a fundamentally new (innovative) machine, is often intuitive and depends on the professional qualities of the author of the model. This professional intuition of a specialist-mechanic should be laid down in the university using all components of the timely updated basic professional educational programme.

The above-mentioned multivariate design of a technical product also concerns the capabilities of the enterprise for manufacturing the elements of this product. The technology of digital twins creation allows either to take into account the capabilities of this enterprise (machine park, qualification of employees, applied production technologies, material resources), or to choose an enterprise taking into account all the above mentioned. In order to use these possibilities of digital twins, you need a variety of information about enterprises of the required profile and in the required form. The enumeration of sources of multivariability can be continued many times with the only purpose to show the necessity to teach the future specialist-mechanic not only professional special “mechanical” knowledge, skills and abilities, but also the possibility of their application in the modelling of machines, creating digital twins in a team.

Thus, in the specialty “Land transport and technological means” of specialization “Lifting and transport, construction, road vehicles and equipment” there has long been a need for training in the latest technologies of design, production, operation and disposal of construction machines and mechanisms. The basis for the implementation of these stages of the machine life cycle should be machine-readable without human participation (SMART) standards that interact with the mathematical model and set virtually required test modes and control and record the actions of the digital twin, as well as the results of virtual tests. Moreover, a trained specialist-mechanic should understand these tasks and participate equally with other specialists in the creation and operation of digital twins.

Using the experience accumulated in the construction and other industries in the creation and application of digital twins, despite the complexity of the task, it is possible to obtain time, resource, design, production, environmental and, ultimately, competitive and economic advantages. Clear examples of the listed difficulties of creation and advantages of digital twins application are given in [1].

Training of mechanical specialists in the construction industry is already possible on the basis of existing and new domestic software: for example, the vendor LLC “Nanosoft Development” (nanoCAD) offers many modules including 3D, “Raster” and “Mechanics”<sup>19</sup> [8].

For the mechanical engineer, there are many applications in the field of digital twin [14–26] by those

<sup>19</sup> Solutions of the new time. Domestic software — from CAD to digital twin. URL: <https://ardexpert.ru/article/24694>

commands discussed above. For example, product testing. According to the standard<sup>20</sup> distinguish more than 40 types of tests of machinery, including certification tests, which is very important in view of the technical regulations of the Customs Union in terms of construction machinery. In addition, digital twins allow the machine to be repaired on demand, using diagnostic data obtained from the relevant sensors. There are other tasks as well.

## RESULTS

Taking into account the above-mentioned, in NRU MGSU during the development of the project of the new basic educational programme of higher education in the specialty: 23.05.01 Land transport and technological vehicles (specialization: Lifting and transporting, construction, road vehicles and equipment) in the order of experiment in the “disciplines (modules) of choice” in the “part formed by the participants of educational relations”, the discipline “Basics of creating a digital twin of construction machinery and equipment” was added. This discipline was assigned professional competences PC-2 “Ability to develop and analyse design solutions of machines and individual units at the stages of production, modernization and repair of lifting-transport, construction, road vehicles and equipment” and PC-3 “Ability to develop with the use of information technologies design and technical documentation for the production of new or upgraded samples of lifting-transport, construction, road vehicles and equipment”. The digital vector of development of the above competences will allow graduates of NRU MGSU to adapt in the information environment of organizations that develop and produce construction machinery and equipment.

<sup>20</sup> GOST 16504–81. System of state testing of products. Testing and quality control of products. Basic terms and definitions.

## CONCLUSIONS

Conclusions and recommendations can be made on the basis of what has been noted.

The updated curricula of training in the specialty “Land transport and technological vehicles” should be supplemented with competences in the sphere of digital twin creation.

In the disciplines that form universal knowledge and skills (“Informatics”, “Descriptive geometry, engineering and computer graphics”, “Mathematical modelling” “Equations of mathematical physics”, etc. by the decision of the educational organization), it is necessary to introduce or strengthen the sections: “Numerical solution of linear and non-linear differential equations”, “Fundamentals of artificial intelligence”, “Fundamentals of working with big data”, “Fundamentals of 3D model creation”, etc., forming in the future specialist the competences necessary for participation in the creation of digital twins of lifting, transport, construction, road vehicles and equipment.

Modern concepts of additive and end-to-end technologies, digitalization of production, etc. should be introduced or more widely and accentuated in professional disciplines.

In order to improve the quality of specialist training, it is promising to create a “united discipline” in which group (united) project work of students studying in different areas of training is carried out under the guidance of several multidisciplinary teachers (preferably practicing representatives of the industry).

In the field of construction, material handling, road vehicles and equipment, there are many applications for the use of digital twins, ranging from design, manufacturing, certification to operation and disposal.

## REFERENCES

1. Prokhorov A., Lysachev M. *Digital twin. Analysis, trends, world experience* / scientific ed. Professor A. Borovkov. First edition, revised and enlarged. Moscow, AlliancePrint, 2020; 401. (rus.).
2. Tsarev M.V., Andreev Yu.S. Digital twins in industry: development history, classification, technologies, use cases. *Journal of Instrument Engineering*. 2021; 64(7):517-531. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531 EDN QOKQJW. (rus.).
3. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Kukushkin K.V., Maruseva V.M., Kulemin V.Yu. Digital twins and digital transformation of defense industry enterprises. *Bulletin of the East Siberian Open Academy*. 2019; 32:2. EDN ZAXCOT.
4. Golitsyna I.N. Education 4.0 in the training of modern specialists. *Educational Technologies and Society*. 2020; 23(1):12-19. EDN DWTHHS. (rus.).
5. Volkov A. Unsolvable problems as a basis of higher education. Interview with A. Volkov. *Educational Studies Moscow*. 2013; 1:273-277. DOI: 10.17323/1814-9545-2013-1-273-277. EDN QAJGNZ. (rus.).
6. Ezhkina L.V., Kurbatov V.L. Application of digital twin technology in construction. *University Science*. 2022; 2(14):51-53. EDN TLBWDE. (rus.).
7. Izryadnova A.I., Tselishcheva P.A., Begunova N.V. Digital doubles in modern construction: application practice and prospects of use. *Fedin readings — 2022 (spring meeting) : materials of the IX International Scientific and Practical Conference*. 2022; 102-111. EDN FKLQSP. (rus.).

8. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*. 2020; 8:108952-108971. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358
9. Lipkin E. *Industry 4.0: smart technologies are a key element in industrial competition*. Moscow, Ostek-SMT, 2017; 223. (rus.).
10. Kirilova D.A., Maslov N.S., Astakhova T.N. Prospects for the introduction of blockchain technology in the modern education system. *International Journal of Open Information Technologies*. 2018; 6(8). (rus.).
11. Uvarov A.Yu., Gable E., Dvoretzskaya I.V., Zaslavsky I.M., Karlov I.A., Mertsalova T.A. et al. *Difficulties and prospects of digital transformation of education* / Edited by A.Yu. Uvarova, I.D. Frumin. Moscow, Higher School of Economics, 2019; 344. DOI: 10.17323/978-5-7598-1990-5. EDN ANYGHO. (rus.).
12. Utemov V.V., Gorev P.M. Development of educational systems based on Big Data technology. *Scientific and methodical electronic journal "Concept"*. 2018; 6:104-116. DOI: 10.24422/MCITO.2018.6.14501. EDN OUTAGP. (rus.).
13. Khitrykh D. Digital doubles in Industry: origins, concepts, current level of development and examples. *CAD and Graphics*. 2020; 7(285):8-12. (rus.).
14. Sharapov R., Agarkov A. Determination of the aerodynamic characteristics of a concentrator with adjustable parameters. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:03014. DOI: 10.1051/mateconf/201825103014
15. Ishkov A.D., Stepanov A.V., Miloradov S.V., Voronina I.V. Energy-efficient vibratory feeder of bulk construction materials. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 670-671:458-461. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.670-671.458
16. Gustov Y.I., Gadolina I.V., Yushkov A.A. The deformation-topographic method for the study of the tribotechnical indicators of the working bodies of rotary excavators. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 786(1):012031. DOI: 10.1088/1757-899X/786/1/012031
17. Drozdov A. Automation of vibration modes of soil compaction machines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 869(7):072022. DOI: 10.1088/1757-899X/869/7/072022
18. Kaitukov B., Stepanov M., Kapyrin P. The choice of concrete mixers for the concrete preparation. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 178:06016. DOI: 10.1051/mateconf/201817806016
19. Sevryugina N., Kapyrin P. Triad model: simulation — functional tensometry — information database in the assessment of the reliability of technological machines. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:04063. DOI: 10.1051/e3sconf/202126304063
20. Kudryavtsev E.M. Automation of optimization of discrete technological processes. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 196:04067. DOI: 10.1051/mateconf/201819604067
21. Plavelsky E.P., Sharapov R.R., Plavelsky A.E. The traffic performance of the wheeled carrying liquid materials study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 744(1):012024. DOI: 10.1088/1757-899X/744/1/012024
22. Skel V. Oscillation of gear mechanisms of construction machines. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:04061. DOI: 10.1051/e3sconf/202126304061
23. Stepanov M.A., Gridchin A.M. Perspectives of construction robots. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 327:042126. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042126
24. Stepanov M.A., Korolev A.A. Mathematical modeling of a process the rolling delivery. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 317:012019. DOI: 10.1088/1757-899X/317/1/012019
25. Kaytukov B., Stepanov M. Current issues of mobile cranes unification. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:03011. DOI: 10.1051/mateconf/201825103011
26. Sharapov R.R., Kharlamov E.V., Yadykina V.V. The fluidized bed separator. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 324:012052. DOI: 10.1088/1757-899X/324/1/012052

Received September 21, 2023.

Adopted in revised form on September 21, 2023.

Approved for publication on September 27, 2023.

**BIONOTES:** **Evgeny P. Plavelsky** — Doctor of Technical Sciences Professor of the Department of Mechanization, Automation and Robotization of Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; head of the certification body; **Central Scientific Testing Site for Construction and Road Machines**; 1 Sanatorny proezd, Moscow Region, Ivanteevka, Russian Federation; ID RSCI: 409359, ORCID: 0000-0002-6593-1100, Scopus: 57197824485, ResearcherID: AFN-4654-2022; eplavelsky@gmail.com;

**Dmitrii Yu. Gustov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanization, Automation and Robotization of Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 306937, ORCID: 0000-0002-1866-7327, Scopus: 6504605458, ResearcherID: AFM-2496-2022; GustovDU@gic.mgsu.ru;

**Vladimir I. Skel** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanization, Automation and Robotization of Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 801889, ORCID: 0000-0002-8888-3500, Scopus: 57192374114, ResearcherID: ACY-2907-2022; skelvi@mgsu.ru;

**Alexander M. Agarkov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanization, Automation and Robotization of Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 713145, ORCID: 0000-0002-4818-7949, Scopus: 55863123000, ResearcherID: U-5430-2018; AgarkovAM@mgsu.ru.

*All authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare no conflict of interest.*