

Н.Г. Мерзликин

ДОПОЛНЕННАЯ И ВИРТУАЛЬНАЯ РЕАЛЬНОСТЬ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ: ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Аннотация. За несколько десятилетий увеличился научный интерес к аспектам применения цифровых технологий в бизнесе. Актуальные исследования показывают, что дополненная реальность и виртуальная реальность стали полноценными и самостоятельными технологиями симуляции реального окружения человека посредством взаимодействия с виртуальными объектами. Благодаря этим технологиям предприятия получают возможность создавать виртуальную симуляцию производственных процессов. В статье анализируется история применения технологий дополненной и виртуальной реальности в промышленности. Виртуальная и дополненная реальность зародилась более 50 лет назад. Обзор существующих исследований и раскрытие особенностей применения дополненной реальности и виртуальной реальности демонстрируют высокий потенциал их использования в различных индустриях. Проведенное исследование свидетельствует, что данные цифровые технологии формируют новую систему взаимодействия физических и виртуальных объектов. Первоначально исследователи рассматривали данные технологии с точки зрения технического решения – как новые способы проецирования виртуальных объектов за счет 3D-моделей, однако со временем фокус их внимания сменился на изучение особенностей их применения для решения бизнес-задач в промышленности.

Ключевые слова: виртуальная реальность, дополненная реальность, цифровые технологии, цифровизация, цифровые технологии в промышленности.

N.G. Merzlikin

AUGMENTED AND VIRTUAL REALITY IN MANUFACTURING: HISTORY OF DEVELOPMENT AND SPECIFICS OF APPLICATION

Abstract. Over several decades, scientific interest in aspects of digital technology applications in business has significantly increased. Current research shows that Augmented Reality and Virtual Reality have become full-fledged and independent technologies for simulating the real human environment through interaction with virtual objects. Thanks to these technologies, businesses are able to create virtual simulation of production processes. The article analyzes the history of augmented and virtual reality technologies application in industry. Virtual and augmented reality originated more than fifty years ago. The review of the existing studies and peculiarities of application of Augmented Reality and Virtual Reality demonstrates the high potential of their use in various industries. The research shows that these digital technologies form a new system of interaction between physical and virtual objects. Initially, the researchers considered these technologies from the point of view of technical solutions – as new ways of projecting virtual objects through 3D models, but over time the focus of their attention has changed to the study of their application features to solve business problems in industry

Keywords: virtual reality, augmented reality, digital technology, digitalization, digital technology in industry.

Мерзликин Никита Георгиевич

аспирант, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, Москва. Сфера научных интересов: менеджмент, экономика, производительность труда, операционный менеджмент. Автор одной опубликованной научной работы. ORCID: 0009-0006-6399-6310, SPIN-код: 7140-2685.
Электронный адрес: NGMerzlikin@gmail.com

Введение

В 2015–2016 гг. международной консалтинговой компанией PricewaterhouseCoopers был проведен опрос предприятий, посвященный исследованию характера использования технологий дополненной (Augmented reality, далее – AR) и виртуальной (Virtual reality, далее – VR) реальности в процессе цифровой трансформации экономики¹. Согласно результатам опроса 38,8 % респондентов выразили свою готовность к использованию AR/VR в продуктивном дизайне, 17,3 % – отметили потенциал использования данных решений в качестве виртуального вспомогательного инструмента, 27,6 % – подчеркнули необходимость применения данных технологий в повышении уровня промышленной безопасности и охране труда, а 19,4 % опрошенных предприятий применяли данные технологии для технического ремонта и обслуживания оборудования и для оперативного доступа к информации.

Современные компании сталкиваются с изменениями, вызванными промышлен-

ной революцией, развитием технологий и цифровизацией, что влияет на качество продукции, гибкость производства, обработку данных и бизнес-процессы. Н.Г. Малышкин и Е.А. Халимон [1], анализируя влияние цифровизации на экономику, определили, что цифровые технологии положительно воздействуют на региональное развитие: происходит повышение валового регионального продукта, производительности труда, уменьшаются показатели безработицы за счет создания новых рабочих мест.

Данные статистического сборника «Цифровая экономика 2023» НИУ ВШЭ свидетельствуют о росте валовых внутренних затрат на развитие цифровой экономики с уровня в 3324 млрд руб. в 2017 году до 4848 млрд руб. в 2021 году. При этом уровень затрат организаций на цифровую экономику также возрос: с 1739 млрд руб. в 2017 году до 2947 млрд руб. в 2021 году.²

Авторы доклада НИУ ВШЭ «Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты»³ отмечают, что внедрение цифровых технологий

¹ PricewaterhouseCoopers. For US manufacturing, virtual reality is for real. How virtual and augmented reality technologies are reimagining America's factory floors // PWC. Com 2016. January 16. URL: <https://www.pwc.com/us/en/industrial-products/publications/assets/augmented-virtual-reality-next-manufacturing-pwc.pdf> (дата обращения: 25.03.2024).

² Цифровая экономика: 2023 : Краткий статистический сборник / Г.И. Абдрахманова, С.А. Васильковский, К.О. Вишневецкий и др. М. : НИУ ВШЭ, 2023. 120 с. EDN WTVQTG. DOI: 10.17323/978-5-7598-2744-3

³ Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты : Доклад к XXII Апрельской междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества, Москва, 13–30 апреля 2021 г. / Г.И. Абдрахманова, К.Б. Быховский, Н.Н. Веселитская и др. М. : Изд. дом ВШЭ, 2021. ISBN 978-5-7598-2510-4.

Дополненная и виртуальная реальность в промышленности:
история развития и особенности применения

в промышленность, с учетом концепций «Индустрия 4.0», «Фабрика будущего», «Цифровые фабрики» и других, способствует сокращению издержек и повышению производительности труда. Цифровые инновации играют ключевую роль в перестройке бизнес-моделей компаний, оказывая существенное влияние на их операционную эффективность, конкурентоспособность и стратегические позиции. Согласно докладу, ожидается увеличение рынка цифровых решений на 30 % ежегодно из-за растущего спроса на цифровые технологии в бизнесе. Прогнозируется, что данный спрос значительно повлияет на объем рынка цифровых решений, увеличив его с 41,5 млрд руб. в 2020 году до 587 млрд руб. к 2030 году. Интересно отметить, что в качестве основных движущих сил роста цифровых решений выступают технологии искусственного интеллекта, беспроводной связи, новые методы производства, блокчейн, а также дополненная и виртуальная реальность.

Применение цифровых технологий широко распространено во многих отраслях экономики. Так, растет применение облачных сервисов, технологий сбора данных, цифровых платформ и интернета вещей на предприятиях сельского хозяйства, добычи полезных ископаемых, в обрабатывающей промышленности, топливно-энергетическом комплексе, строительстве, транспорте и хранении.

Все вышеизложенное позволяет сделать следующие выводы:

1) отмечается высокая востребованность цифровых технологий со стороны предприятий реального сектора экономики;

2) наиболее востребованный запрос на применение цифровых решений выражается в повышении операционной эффективности;

3) вышеуказанное обосновывает готовность компаний реального сектора экономики инвестировать в информационно-коммуникационные технологии для получения конкурентного преимущества и повышения производительности труда.

В рамках данного исследования сконцентрируемся на истории развития технологий AR/VR в промышленности и особенностях их применения.

*Применение дополненной и виртуальной
реальности: история развития*

Технологии дополненной и виртуальной реальности существуют более 50 лет. Основателем виртуальной и дополненной реальности считается Айвен Сазерленд, который в 1962 году выпустил работу «The Ultimate Display». По мнению автора, виртуальная реальность – это «окно, через которое человек воспринимает виртуальный мир как реальный мир, ощущает его и может с ним взаимодействовать» [2]. Виртуальная реальность основана на 3D-моделях окружающего мира, стереоскопических дисплеях, отслеживающих движение головы, на передаче информации о движениях рук и тела и бинауральном звуке. Совокупность данных моделей и устройств воспроизведения формируют интерактивную цифровую среду, в которой человек полностью погружается в виртуальный мир.

Ключевой вклад А. Сазерленда заключается в формировании первоначального понимания виртуальной реальности как компьютерной симуляции, позволяющей пользователю прочувствовать взаимодействие с иным миром, а также представление необходимых устройств для полноценного функционирования виртуальной реальности. Одновременно с этим было представлено первоначальное описание

дополненной реальности – виртуальных объектов, наложенных на физические элементы окружающего мира.

В 1965 году А. Сазерланд разработал первое устройство виртуальной реальности, которое смоделировало звуковые эффекты, тактильные ощущения, включило обонятельные стимулы и отобразило интерактивную графику. Технологическим новшеством стало динамическое изменение виртуального изображения в зависимости от положения головы пользователя и его ориентации в пространстве.

Используя разработки в области виртуальной реальности, в 1968 году Сазерланд представил первый прототип дополненной реальности под названием «The Sword of Damocles (virtual reality)». Прототип устройства представлял собой механическую систему, имитирующую стереоскопическое телевизионное устройство для передачи виртуальных изображений поверх объектов реального мира посредством проецирования графической или текстовой информации. В процессе разработки прототипов исследователь пришел к выводу, что дополненная реальность не транспортирует человека в виртуальный мир, а, напротив, дополняет реальный мир виртуальными объектами. Недостатками данной системы была передача тактильных ощущений при взаимодействии с виртуальными объектами.

В нерешенном вопросе передачи тактильных ощущений от контакта с виртуальными объектами был совершен значительный шаг вперед в 1970-е годы, когда Университет Северной Каролины раз-

работал первую систему обратной связи для тактильной передачи силы противодействия при взаимодействии с виртуальными объектами. Последующие аналоги тактильных систем взаимодействия нашли свое отражение в разработках компании VPL, в частности в перчатках DataGlove¹. Эти перчатки были способны измерять движения пальцев и жестов рук с помощью датчиков движения и ориентации в пространстве.

С развитием технологий графического изображения VR-устройства постепенно модернизировались. В 1980-х гг. Fake Space Labs представили бинокулярно-все-направленный монитор – систему, объединяющую стереоскопическое виртуальное устройство визуализации, устройство воспроизведения (виртуальный шлем) и манипулятор для движения объектов на базе адаптированной модели DataGlove. В дальнейшем исследовательский центр Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА, США) разработал симулятор аэродинамической трубы для изучения аэродинамических потоков на моделях виртуального самолета или космического корабля². В виртуальной реальности инженеры имели возможность рассматривать цифровую модель с различных ракурсов, оперативно изменять конструктивные параметры и делиться заметками с коллегами.

С последующим развитием VR-технологий произошел переход от имитации окружающей среды к более универсальным виртуальным моделям. Так, в 1992 году был достигнут технологический прорыв.

¹ Entertainment DataGlove // Britannica. URL: <https://www.britannica.com/technology/virtual-reality/Entertainment#ref884340> (дата обращения 23.03.2024).

² A new content of Ideas. Computer technology // NTRS-NASA – Technological Reports Server. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20020086961/downloads/20020086961.pdf> (дата обращения 21.03.2024).

Дополненная и виртуальная реальность в промышленности:
история развития и особенности применения

Лаборатория электронной визуализации Илинойского университета создала автоматическое виртуальное окружение – Cave automatic virtual environment (CAVE) для имитации окружающего пространства¹. В CAVE виртуальные объекты накладывались на реальное окружение, позволяя пользователю взаимодействовать с объектами в иммерсивной среде. Оператор мог менять параметры объектов, добавлять слои виртуального изображения, жестами изменять позицию проецируемых объектов в пространстве, выбирать настройки графического изображения или видеоряда.

В 1992 году инженер Л. Розенбург на базе исследовательской лаборатории ВВС США Armstrong разработал промышленный образец системы дополненной реальности для рабочих. В отличие от предыдущих технических решений, новая модель использовала роботов. Роботизированная система проецировала изображения и текстовые инструкции поверх физических объектов. Сотрудники, используя специальные очки, могли получить информацию о деталях, станках, рабочих инструментах на небольшом дисплее. Обучающие видео, инструкции, последовательность действий, параметры для контроля качества и дополнительные данные проецировались на поверхности объектов, что позволяло рабочим использовать необходимую документацию в цифровом формате.

Импульс развитию технологий дополненной реальности придал прототип AR-системы от компании Boeing в середине 1990-х годов. С использованием AR-тех-

нологий компания проводила обучение персонала по правильной настройке электромонтажных инструментов. Персонал оснащался портативными компьютерами и шлемами, которые проецировали чертежи на полупрозрачный дисплей. В 1993 году было разработано AR-решение для технического обслуживания, ремонта оборудования и обучения персонала. На устройствах воспроизведения демонстрировалась последовательность операций, иллюстрации и виртуальные инструкции для рабочих. Вместе с тем устройства воспроизведения дополненной реальности были громоздкими и немобильными, что затрудняло их использование на рабочем месте. Конец XX века оказался переломным для технологий дополненной реальности. Благодаря анализу опыта компании Boeing в применении AR было сформировано одно из первых научных и инженерных представлений дополненной реальности – 3D-системы, объединяющей в реальном времени виртуальные и реальные объекты на экране дисплея устройства².

*Особенности применения дополненной
и виртуальной реальности: обзор ключевых
исследований*

Дальнейшее развитие технологий виртуальной и дополненной реальности происходило благодаря исследованиям М. Гиганте, профессора Королевского Мельбурнского технологического института (Австралия). В 1993 году он систематизировал и выделил ряд ключевых свойств

¹ Kirvan P. CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) // TechTarget. 2022. September. URL: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/CAVE-Cave-Automatic-Virtual-Environment> (дата обращения 22.03.2024).

² Roth J. Reality show // Innovation quarterly. 2022. Vol. 6. Issue 21. URL: <https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/features/innovation-quarterly/2022/09/Boeing-IQ-AerospaceRealityShow.pdf> (дата обращения: 07.04.2024).

виртуальной реальности. По мнению исследователя, важными характеристиками VR являются возможность погружения, ощущение присутствия и создание условий для взаимодействия человека и виртуального мира [3]. Рассмотрим каждое из этих свойств более подробно.

Погружение. Погружение в цифровую среду связано с количеством и качеством стимулируемых чувств, взаимодействий и схожестью стимулов, используемых для имитации окружающей среды. Чем больше свойств система воспроизведения может симулировать, тем больше обеспечивается уровень погружения пользователя в виртуальную среду. Существует несколько типов погружения в виртуальную реальность:

- *системы без погружения* – приложения и устройства, которые воспроизводят только изображения окружающего мира и задействуют только персональный компьютер;
- *системы частичного погружения* – обеспечивают стереоизображение трехмерной (3D) сцены, просматриваемой на устройстве вывода изображения, с использованием перспективной 3D-проекции;
- *иммерсивные системы* — высокотехнологичные системы и приложения, обеспечивающие полное имитационное восприятие благодаря поддержке нескольких устройств сенсорного вывода изображения, а также аудио- и тактильных устройств. Данные системы позволяют воспринимать любое цифровое взаимодействие как реальное [3].

Эффект присутствия. М. Гиганте описал свойства восприятия человека в виртуальной и дополненной реальности. Исследователь определил, что ощущение присутствия человека в виртуальной реальности представляет собой психологический феномен, основанный на эффекте присутствия [3], под которым понимается

психологическое ощущение присутствия и осознанности человека при выполнении различных действий в виртуальной реальности. Данный эффект включает в себя стремление имитировать реальное взаимодействие, что повышает уровень реалистичности виртуального окружения.

На основе этих результатов профессор Торонтского университета (Канада) П. Милграм и исследователи Университета Осаки (Япония) Х. Такекура, А. Утсуми и Ф. Кишино в 1994 году представили новые способы применения дополненной и виртуальной реальности [4; 5]. Согласно авторам, технологии AR и VR составляют смешанную реальность, в которой цифровые технологии будут дополнять реальный мир. Основные положения:

1) дополненная реальность представляет собой совокупность четырех систем: реального окружения, дополненной реальности, дополненной виртуальности и виртуальной среды. Вместе они образуют смешанную реальность, в которой виртуальные объекты дополняют реальный мир в режиме реального времени и могут имитировать взаимодействие между объектами. Для погружения в виртуальную и дополненную реальность используются специальные устройства. При этом обеспечивается высокий уровень погружения и создание эффекта присутствия человека, как и при виртуальной реальности [4];

2) под дополненной реальностью понимаются такие цифровые системы, которые являются синтетическими, дополняющими реальный мир цифровыми объектами, без полного исключения взаимодействия с реальным миром [5];

3) виртуальная реальность больше сфокусирована на цифровом представлении окружающего мира в виде визуализированных объектов и полностью отсекает реальный мир [4];

Дополненная и виртуальная реальность в промышленности:
история развития и особенности применения

4) ключевое различие между технологиями AR и VR состоит в том, что при применении виртуальной реальности человек видит только цифровой мир, а при дополненной реальности – реальный мир, но с цифровыми объектами [5].

Объединяющим признаком для этих технологий является преобразование реального мира и его адаптирование под нужды пользователя в соответствии с программными условиями. Теоретические разработки исследовательской группы послужили фундаментом для дальнейших научных и прикладных исследований. Современные решения в области виртуальной реальности основаны на предшествующих разработках, а область их применения значительно расширилась, охватывая игровую индустрию, индустрию развлечений, промышленность, обучение, здравоохранение, моделирование и дистанционное взаимодействие.

Уже в 1997 году была разработана мобильная система дополненной реальности MARS (Mixed and Augmented Reality Studio), которая позволяла передавать на небольшие устройства виртуальную информацию при наведении на реальный объект за счет сканирования специальных цифровых меток. Технологический прорыв случился в 2009 году, когда были разработаны AR-приложения для передачи виртуальной информации в физическое окружение пользователя, из-за чего был кардинально упрощен процесс считывания объектов, а возможности использования данных решений стали доступны большинству пользователей.

Современные решения в области виртуальной реальности основаны на предшествующих разработках, а область применения значительно расширилась. VR и AR применяются в игровой индустрии, индустрии развлечений, промышленности,

обучении, здравоохранении, моделировании и дистанционном взаимодействии. Разработаны специальные программы для работы в виртуальной среде. В настоящий момент AR/VR-решения позволяют создавать виртуальные модели и проводить симуляции бизнес-процессов, передавать текстовую, графическую и тактильную информацию на специальные устройства.

*Применение технологий дополненной
и виртуальной реальности
в промышленности*

Исследования применения AR/VR-технологий в индустрии проводились в различных странах. В работе исследователей из Кошицкого технического университета, Словакия, Я. Новака-Марчичина, Я. Барна, Я. Мирослава, Л. Новаковой-Марчинчиновой [6] анализировалось использование этих технологий в промышленности и был сделан вывод, что технологии дополненной реальности могут создать новый класс цифровых решений для бизнеса, известный как «Производство с использованием дополненной реальности» (ARAM). Кроме того, было отмечено, что использование информационных технологий в промышленности следует разделять на технологии производства, промышленную инфраструктуру и технологии выполнения производственных работ.

Исследователи Н. Хамид, А. Азис, А. Азизи из Университета Путры, Малайзия, провели работу, описывающую конкретные случаи применения технологий виртуальной реальности в промышленности [7]. Их исследование показало, что эти технологии позволяют сократить время и затраты, а также оптимизировать сложные продукты в различных областях, таких как проектирование автомобилей, частей самолетов, медицинских операций и логистики за

счет сокращения времени проектирования и моделирования.

В работе И. Акпана и О. Оффодайла [8], профессоров Кентского Университета, США, был проведен анализ современных аспектов применения технологий виртуальной реальности в промышленности. Они пришли к выводу, что виртуальная реальность создает симуляционную цифровую среду, которая может имитировать объекты реального мира. Они также отметили, что эти технологии играют важную роль в рамках концепции «Индустрия 4.0».

На основании вышеизложенного виртуальную реальность следует определять как комплекс технологий, используемых для создания симулированных сред и сценариев, в которых участники могут взаимодействовать с объектами, процессами и данными виртуального окружения, имитирующих реально существующие объекты или воспроизводимые сценарии реального окружения. Технология виртуальной реальности в промышленности открывает возможность визуализации и анализа производственных операций, обучения персонала, симуляции работы оборудования, а также оптимизации процессов проектирования и разработки новых продуктов. Следует отметить, что в последние годы этот сектор значительно расширился, появились новые устройства и приложения, увеличилось число пользователей и публикаций на тему использования этих технологий в промышленности.

Из анализа истории развития дополненной и виртуальной реальности можно сделать вывод, что данные технологии получили определенный импульс для развития в разные периоды. Хронология изменений показывает, что по мере модернизации и совершенствования технологий рос интерес промышленных предприятий к AR/

VR-решениям. Дополненная реальность в промышленности представляет собой технологию, объединяющую виртуальные и реальные элементы окружающего мира. При использовании данных технологий обеспечивается возможность взаимодействовать с окружающей средой, дополняя ее цифровой информацией и объектами. Инновационный потенциал данной технологии заключается в технологической поддержке выполняемых операций, она выступает как вспомогательный элемент для выполнения работы.

Существующий научный пробел в области теоретических и фундаментальных аспектов использования технологий дополненной и виртуальной реальности требует дальнейшего глубокого исследования. Остаются нерешенными вопросы, связанные с интеграцией физических и виртуальных элементов, оптимизацией рабочих процессов и установлением универсальных стандартов в области взаимодействия человека с иммерсивными технологиями. Эти аспекты играют ключевую роль в разработке сценариев применения AR/VR в промышленном секторе. Будущие исследования должны сосредоточиться на выявлении методов интеграции AR/VR-технологий в повседневную жизнь и бизнес-процессы.

Заключение

Технология дополненной и виртуальной реальности основывается на технологиях моделирования и имитации реального окружения человека, но в цифровом виде. Анализ литературы показал, что исследованию потенциала промышленного применения технологий дополненной и виртуальной реальности на предприятиях промышленных отраслей экономики уделено значительное внимание. Авторы

Дополненная и виртуальная реальность в промышленности:
история развития и особенности применения

сходятся во мнении, что промышленное применение данных технологий обширно: контроль качества, проектирование, захват движений, платформенные решения по созданию контента, графический и визуальный вывод изображений и т. д. Несмотря на значительный объем работ, открытыми остаются вопросы осмысления способов

технического и технологического применения технологий AR/VR для нужд промышленности. Технические способы применения данных технологий ограничиваются вопросами прикладного использования, когда техническая сторона вопроса остается за инновационным потенциалом организации.

Литература

1. Малышкин Н.Г., Халимон Е.А. Анализ уровня развития цифровой экономики России // Вестник университета. 2018. № 8. С. 79–86. EDN YASAZF. DOI: <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2018-8-79-86>
2. Sutherland I.E. The Ultimate Display // Proceedings of IFIPS Congress 1965, New York, May 1965. Vol. 2. P. 506–508. URL: https://worrydream.com/refs/Sutherland_1965_-_The_Ultimate_Display.pdf (дата обращения: 23.03.2024).
3. Gigante M.A. Virtual reality: definitions, history and applications // Virtual Reality Systems. 1993. P. 3–14. DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-227748-1.50009-3>
4. Milgram P., Takemura H., Utsumi A., Kishino F. Augmented Reality: A Class of Displays on the Reality-Virtuality Continuum // Proceedings Telemanipulator and Telepresence Technologies, SPIE. 1995. Vol. 2351. Pp. 282–292. DOI: <http://doi.org/10.1117/12.197321>
5. Milgram P., Kishino F. A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays // IEICE Transactions on Information and Systems. 1994. Vol. E77-D. No. 12. Pp. 1321–1329. URL: <https://www.alice.id.tue.nl/references/milgram-kishino-1994.pdf> (дата обращения: 23.03.2024).
6. Novak-Marcincin J., Barna J., Miroslav J., Novakova-Marcincinova L. Augmented Reality Aided Manufacturing // Procedia Computer Science. 2013. Vol. 25. Pp. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.11.004>
7. Hamid N.S.S., F. Aziz A., Azizi A. (2014). Virtual reality applications in manufacturing system // 2014 Science and Information Conference. London, UK, August 27-29, 2014. Pp. 1034–1037. DOI: <https://doi.org/10.1109/SAI.2014.6918317>
8. Akpan I.J.; Offodile O.F. The Role of Virtual Reality Simulation in Manufacturing in Industry 4.0 // Systems. 2024 Vol. 12. No. 1. Pp. 26. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems12010026>

References

1. Malyshkin N., Halimon E. (2018) Analysis of level of the Russian digital economy development. *Vestnik Universiteta*. No. 8. Pp. 79–86. DOI: <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2018-8-79-86> (In Russian).
2. Sutherland I.E. (1965). The Ultimate Display// Proceedings of IFIPS Congress 1965, New York, May 1965. Vol. 2. Pp. 506–508. URL: https://worrydream.com/refs/Sutherland_1965_-_The_Ultimate_Display.pdf (accessed 23.03.2024).
3. Gigante M.A. (1993). Virtual reality: definitions, history and applications. *Virtual Reality Systems*. Pp. 3–14. DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-227748-1.50009-3>
4. Milgram P., Takemura H., Utsumi A., Kishino F. (1995) Augmented Reality: A Class of Displays on the Reality-Virtuality Continuum. *Proceedings Telemanipulator and Telepresence Technologies, SPIE*. Vol. 2351. Pp. 282–292. DOI: <http://doi.org/10.1117/12.197321>

5. Milgram P., Kishino F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*. Vol. E77-D. No. 12. Pp. 1321–1329. URL: <https://www.alice.id.tue.nl/references/milgram-kishino-1994.pdf> (дата обращения: 23.03.2024).
6. Novak-Marcincin J., Barna J., Miroslov J., Novakova-Marcincinova L. (2013). Augmented Reality Aided Manufacturing // *Procedia Computer Science*. Vol. 25. Pp. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.11.004>
7. Hamid N.S.S., F. Aziz A., Azizi A. (2014). Virtual reality applications in manufacturing system. *2014 Science and Information Conference*. London, UK, August 27–29, 2014. Pp. 1034–1037. DOI: <https://doi.org/10.1109/SAI.2014.6918317>
8. Akpan I.J.; Offodile O.F. (2024) The Role of Virtual Reality Simulation in Manufacturing in Industry 4.0. *Systems*. Vol. 12. No. 1. Pp. 26. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems12010026>