

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-46-65>



УДК 004.93:004.5

Технологии расширенной реальности – новый компонент промышленной инженерии и производственных систем

**А.С. Зуев[@],
М.А. Макущенко,
М.Е. Иванов,
Е.С. Меркулов**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: zuev_a@mirea.ru

Технологии расширенной (виртуальной, дополненной и смешанной) реальности рассматриваются как новый универсальный компонент в составе методологической базы производственной (промышленной) инженерии, получающий возможности широкого применения как в условиях экстенсивного и интенсивного развития несущих и прочих отраслей четвертого и пятого, так и в контексте формирования ядра шестого технологического уклада. Обосновываются роль и место данных технологий в современных технологических процессах и производственных системах (в том числе в гибком, мелкосерийном и штучном производстве), а также в контексте внедрения киберфизических систем и предстоящей четвертой промышленной революции. Выделен состав задач, универсальных для широкого спектра отраслей любой национальной экономики, наиболее эффективное решение которых в условиях текущего и прогнозируемого уровня развития человеко-машинного взаимодействия может обеспечиваться в результате применения технологий виртуальной, дополненной и смешанной реальностей. На основе сопоставления принципов реализации и примеров прикладного внедрения обосновывается соответствие содержания понятия и возможностей применения «технологий расширенной

реальности» назначению и сферам внедрения сквозной цифровой технологии «виртуальная и дополненная реальности». Сделан и обоснован вывод о целесообразности интеграции технологий расширенной реальности на базе универсального программно-аппаратного комплекса, предоставляющего сервисы виртуальной, дополненной и смешанной реальностей в соответствии с содержанием конкретной задачи технологического процесса или выбранным пользователем режимом его эксплуатации. Приведены описания постановок задач, условий проведения и результатов экспериментов по разработке и тестированию интерактивных сред расширенной реальности, выполненных в Институте информационных технологий РТУ МИРЭА в 2019–2020 гг.

Ключевые слова: расширенная реальность, промышленная инженерия, производственная система, технологический процесс, технологический уклад, промышленная революция.

Для цитирования: Зуев А.С., Макущенко М.А., Иванов М.Е., Меркулов Е.С. Технологии расширенной реальности – новый компонент промышленной инженерии и производственных систем. *Российский технологический журнал*. 2020;8(4):46-65. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-46-65>

Extended reality technology – a new component in industrial engineering and production systems

**Andrey S. Zuev[@],
Maksim A. Makushchenko,
Mikhail E. Ivanov,
Egor S. Merkulov**

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author, e-mail: zuev_a@mirea.ru

Extended (virtual, augmented and mixed) reality technology gets considered as a new universal component of production (industrial) engineering's methodological basis, receiving the possibilities for wide use in both extensive and intensive development of carrying and other branches of the fourth, fifth and the forming nucleus of the sixth technological wave. The article gives grounds for the role and place of this kind of technology in contemporary technological processes and production systems (including the flexible, small-volume and discrete production), and in the context of cyberphysical systems and the incoming fourth industrial revolution. The authors describe underline the set of tasks that are universal for a wide range of branches in any national economy, that can be most efficiently completed in terms of the current and prognosed level of development of man-machine interaction can be provided for as a result of using VR, AR and MR technologies. Based on the comparison of implementation principles and examples of applied implementation, the article gives grounds for term correspondence and opportunities of use of "extended reality technology". The authors have made and explained the conclusion on practicability of integrating extended reality technology based on a universal hardware-software complex that provides VR, AR and MR services corresponding to the composition of a given task within the technological process or the operating mode chosen by a user. The article gives descriptions of task assignments, terms of conduct and results of experiments on designing and testing extended reality interactive environments performed at the institute of information technology RTU MIREA in 2019–2020.

Keywords: extended reality, industrial engineering, production system, technological process, technological wave, industrial revolution.

For citation: Zuev A.S., Makushchenko M.A., Ivanov M.E., Merkulov E.S. Extended reality technology – a new component in industrial engineering and production systems. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(4):46-65 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-46-65>

Введение

Технологическое и экономическое развитие государств непосредственно связано с научно-техническим прогрессом, с поиском и внедрением более эффективных способов формирования добавленной стоимости в отраслях национальной экономики, а также с созданием ее новых отраслей [1]. При этом достаточно продолжительные периоды эволюционного развития на основе совершенствования существующих технологий сменяются динамичными этапами научно-технических революций – изобретением и внедрением в производственные системы принципиально новых технологий и разработок, приводящих к расширению производственных возможностей как отдельных государств, так и мировой экономики в целом [2]. В соответствии с [3] процесс технико-экономического развития государства может быть представлен в виде последовательного замещения крупных комплексов технологически сопряженных производств – технологических укладов. При этом нововведения, революционизирующие технологическую структуру экономики, получили название «ключевой фактор», а отрасли, интенсивно его использующие и играющие ведущую роль в распространении нового технологического уклада, принято называть несущими отраслями.

Вместе с тем, вне зависимости от долевого состава и доминирования технологических укладов в структуре национальной экономики государства [4], построение производственных систем и технологических процессов в ее отраслях осуществляется с использованием доступного (освоенного) в текущий период времени инструментария производственной (промышленной) инженерии [5–7] – полидисциплинарного направления исследований в сфере проектирования, построения и улучшения интегрированных систем, состоящих из людей, денежных средств, знаний, информации, оборудования, энергии, материалов и процессов. С этой точки зрения состав освоенных и применяемых компонентов методологической базы производственной инженерии предопределяет условия формирования и функционирования производственных систем во всех, в том числе при использовании ключевого фактора – в несущих отраслях любого технологического уклада.

В контексте развития цифровой экономики Российской Федерации [8] и предстоящей четвертой промышленной революции (Индустрии 4.0) [9] в отдельную технологическую компоненту (сквозную цифровую технологию) выделены технологии виртуальной и дополненной реальностей. В настоящей статье авторами обосновано соответствие назначения и сфер применения данных технологий содержанию понятия и возможностям реализации «технологий расширенной реальности» [10], а также их ключевое значение как новой компоненты в составе методологической базы производственной (промышленной) инженерии, получающей возможности универсального применения в производственных системах и технологических процессах широкого спектра отраслей любой национальной экономики и в условиях любого долевого состава и доминирования технологических

укладов. Авторами сформулирован и обоснован вывод о целесообразности интеграции технологий расширенной реальности на базе универсального программно-аппаратного комплекса, предоставляющего сервисы виртуальной, смешанной и дополненной реальностей в режиме реального времени для технологических процессов производственных систем, приведены результаты выполненных экспериментов по разработке соответствующих интерактивных сред.

Производственная инженерия в условиях технологических укладов

К настоящему времени в мировом технико-экономическом развитии можно выделить жизненные циклы пяти последовательно сменявшихся друг друга и начало формирования шестого технологического уклада (табл. 1) [11]. При этом начала первого, третьего и пятого укладов были связаны с промышленными революциями, четвертая из которых прогнозируется в первой половине цикла шестого уклада [12, 13].

Таблица 1. Периоды доминирования, ядро и ключевые факторы технологических укладов

Уклад	Период доминирования, годы	Ядро несущих отраслей	Ключевой фактор
1	1770–1830	Текстильная промышленность, текстильное машиностроение, выплавка чугуна, обработка железа, строительство каналов, водяной двигатель	Текстильные машины
2	1830–1880	Паровой двигатель, железнодорожное строительство, транспорт, пароходо- и машиностроение, станкоинструментальная, угольная промышленность, черная металлургия	Паровой двигатель, станки
3	1880–1930	Электротехническое, тяжелое машиностроение, производство и прокат стали, линии электропередач, неорганическая химия	Электродвигатель, сталь
4	1930–1970	Автомобиле-, тракторостроение, цветная металлургия, производство товаров длительного пользования, синтетические материалы, органическая химия, производство и переработка нефти	Двигатель внутреннего сгорания, нефтехимия
5	от 1970 до 2010	Электронная промышленность, вычислительная, оптико-волоконная техника, программное обеспечение, телекоммуникации, роботостроение, производство и переработка газа, информационные услуги	Микроэлектронные компоненты
6	2010–2050	Наноэлектроника, молекулярная и нанофотоника, наноматериалы и наноструктурированные покрытия, оптические наноматериалы, наногетерогенные системы, нанобиотехнологии, наносистемная техника, наноборудование	Нанотехнологии

В каждом периоде сменяющихся жизненных циклов технологических укладов происходили формирование новых и реорганизация существовавших производственных систем и технологических процессов. Необходимость накопления, систематизации и постоянного обновления соответствующей методологической базы привела к формированию и развитию специализированного полидисциплинарного направления исследований – производственной (промышленной) инженерии. Содержание соответствующего понятия менялось вместе со сменой технологических укладов:

- 1911 год – инструментарий обеспечения эффективного функционирования производственных, строительных, транспортных или даже торговых предприятий в любой сфере деятельности, где человеческий труд направлен на выполнение любого вида работы [14];
- 1954 год – разработка условий для эффективной координации людей, материалов и оборудования с целью достижения желаемых результатов оптимальным образом [15];
- 1963 год – отрасль инженерных знаний и практики, которая анализирует, измеряет и улучшает методы выполнения задач, возложенных на людей; разрабатывает и внедряет улучшенные системы интеграции задач, поставленных перед командами; определяет, прогнозирует и оценивает полученные результаты [16];
- 1977 год – искусство создания наиболее эффективной системы, состоящей из людей, материальных ценностей, энергии и информации, с помощью которой будет достигнута конкретная цель в промышленной, экономической или социальной деятельности с заранее заданными вероятностями и точностью; системой может быть отдельное рабочее место, группа, секция, отдел, департамент, учреждение или целое предприятие [17];
- 2005 год – специалисты в области промышленной инженерии проектируют процессы и системы, которые улучшают качество и производительность, используя знания в области инженерии, математики, управления бизнесом и менеджмента; они фокусируются на том, как производятся и исполняются продукты и услуги; они объединяют людей, информацию, материалы и оборудование, которые создают инновационные и эффективные организации; помимо производства, промышленные инженеры работают и консультируют в любой отрасли, включая, в том числе, здравоохранение, связь, финансовый сектор, фармацевтику, спорт, страхование, бухгалтерский учет, банковское дело, логистику и т.д. [18].

Достаточно полный обзор современного содержания данного полидисциплинарного направления исследований можно найти, например, в [19]. На основе приведенных выше определений промышленной инженерии можно сделать вывод, что с ходом научно-технического прогресса в производственных системах и технологических процессах все более усиливался акцент на необходимости координации и управления деятельностью, как всех категорий отдельных сотрудников, так и их различных объединений на всех уровнях управления (отделов, групп, команд, бригад и т.п.). С усложнением применяемых технологий возрастал объем информации, обрабатываемой на всех уровнях производственных систем, и все большую актуальность приобретали задачи информационного обеспечения технологических процессов, особенно в части поддержки и сопровождения выполняемых людьми трудовых функций и операций. Возрастающий объем информационной нагрузки требовал поиска и внедрения все более эффективных подходов, методов и инструментов доведения информации до отдельных сотрудников и их групп с минимальными затратами времени, в удобной форме и в соответствии с содержанием конкретной задачи технологического процесса. Особую актуальность данные вопросы приобрели в производственных системах гибкого [20], мелкосерийного и штучного производства сложных промышленных изделий [21], где структура технологических процессов и состав соответствующих операций динамически изменяются.

Фактически на современном уровне научно-технического развития наиболее медлительным элементом любого технологического процесса является человек, об-

ладающий по сравнению с программно-аппаратными комплексами наихудшими параметрами по скорости восприятия и осознания (обработки) информации, принятия решений и выполнения физических действий. Это обуславливает необходимость введения в методологическую базу промышленной инженерии новейших достижений человеко-машинного взаимодействия, позволяющих минимизировать затраты времени отдельных сотрудников и их групп на ознакомление с технической документацией и инструкциями; проведение инструктажей и согласование производственных заданий; обсуждение совместно выполняемых действий; перенастройку оборудования и контроль выполнения технологических операций и т.п. В контексте внедрения киберфизических систем и предстоящей четвертой промышленной революции [22] нерационально расходовать время сотрудников на восприятие и анализ информации не только с бумажных носителей, но и с экранов устройств компьютерной техники – планшетов, смартфонов и т.п. При этом имеющиеся в настоящее время возможности расширения контента печатной продукции [23] являются абсолютно недостаточными для производственных систем.

Новым достижением человеко-машинного взаимодействия являются технологии виртуальной, дополненной и смешанной реальностей, реализующие принципиально новые способы воспроизведения мультимедийной информации. С точки зрения задач информационного обеспечения технологических процессов производственных систем в части информационной поддержки и сопровождения персонала данные технологии являются универсальным инструментарием, одинаково применимым в различных отраслях, прикладных областях и задачах.

Технологии виртуальной, дополненной и смешанной реальностей

Виртуальную, дополненную и смешанную реальности можно охарактеризовать как новые технологии реализации человеко-машинного взаимодействия [24].

Технология виртуальной реальности (virtual reality, VR) [25, 26] – это способ погружения человека в виртуальную интерактивную среду, воспринимаемую на основе органов чувств и обеспечивающую как манипулирование цифровыми объектами, так и их взаимодействие между собой и с оператором в режиме реального времени. Простейшая форма виртуальной реальности – 360-градусные изображения или видео. В средах виртуальной реальности может быть воссоздана обстановка реальных рабочих мест и производственных локаций, симулирующая сценарии выполнения отдельных операций, реализации технологических процессов или, например, развития внешних ситуаций, позволяющие сформировать у операторов знания о соответствующих корректных (и безопасных) индивидуальных и коллективных действиях, и таким образом, подготовиться к функционированию в условиях реальной обстановки без необходимости ее физического воспроизведения или иммобилизации из производственной системы на период тренировки. Примерами могут являться: обслуживание и ремонт медицинской техники [27], сборка производственных роботов [28], сельское хозяйство [29], интерактивное обучение управлению строительством [30], моделирование и проектирование транспортных средств [31], разработанный в России симулятор осмотра места происшествия криминалистом [32]. С момента появления VR исполь-

зовалась в различных областях, таких как игры, военная подготовка, архитектурный дизайн, образование, обучение социальным навыкам, моделирование хирургических процедур, помощь пожилым людям, психологическое лечение и т.п.

Технология дополненной реальности (augmented reality, AR) [25, 33] – это способ дополнения реальной окружающей обстановки мультимедийным контентом, отображаемым поверх физических объектов, и таким образом заменяющим или дополняющим их в восприятии оператора. По сути это подсказка или голограмма, нарисованная поверх реального мира. Такой способ отображения виртуальных объектов не в полной мере обеспечивает как ощущение их реального пространственного расположения относительно всей совокупности окружающих оператора физических объектов, так и восприятие всех сценариев возможного взаимодействия с ней. Среды дополненной реальности позволяют заменить бумажные носители информации или их электронные версии на экранах устройств компьютерной техники (ноутбуков, планшетов, смартфонов и т.п.) цифровыми копиями, отображаемыми в поле зрения оператора, и тем самым, например: уменьшают умственные усилия, требующиеся для работы, и позволяют оперативно адаптироваться к меняющимся характеристикам сложных промышленных изделий, в том числе в условиях гибких производственных систем, а также при мелкосерийном и штучном производстве [34]; повышают эффективность доступа к информации об истории обслуживания оборудования [35]; обеспечивают безопасность за счет исключения необходимости перефокусировки внимания [36] и т.п.

Технология смешанной реальности (mixed reality, MR) [10, 37] – это способ комбинирования и организации естественного взаимного пространственного размещения объектов реального и виртуального окружения с целью создания сред, в которых физические и цифровые объекты имеют возможность взаимодействовать в режиме реального времени. Именно визуализация взаимного размещения физических и виртуальных объектов относительно друг друга в пространстве (на переднем и заднем плане, «послойно») обеспечивает как повышенную сложность реализации, так и возможности более широкого прикладного применения данной технологии по сравнению с AR: в архитектуре, дизайне и проектировании [38]; в человеко-машинном взаимодействии [39]; в сборке, настройке, обслуживании, ремонте и эксплуатации сложных промышленных изделий, в том числе оборудования, инструментов, приборов, механизмов, бытовой и компьютерной техники [40] и т.д.

Сферы и задачи прикладного применения технологий виртуальной, дополненной и смешанной реальностей фактически идентичны для широкого спектра отраслей любой национальной экономики (табл. 2), что обуславливает их роль как новых компоненты методологической базы промышленной инженерии, а также как универсального инструмента информационного обеспечения (поддержки и сопровождения) персонала для технологических процессов производственных систем, вне зависимости от долевого состава и доминирования технологических укладов в структуре национальной экономики государства, в том числе в контексте предстоящей четвертой промышленной революции.

Эффективность применения систем виртуальной, дополненной и смешанной реальностей как инструментов информационного обеспечения подтверждена опытом внедрения в международных и российских промышленных компаниях, а также имеет синергетический эффект [25] с другими «сквозными» [8] цифровыми технологиями:

- искусственный интеллект и большие данные – алгоритмы воспроизведения голоса и действий конкретного человека без его непосредственного участия;
- компоненты робототехники и сенсорики – дистанционное управление роботизированными системами и транспортом, проведение дистанционных операций на производстве и в медицине;
- технологии беспроводной связи – увеличение скорости загрузки контента и расширение рабочей зоны носимых VR/AR устройств;
- новые производственные технологии и промышленный интернет – создание и использование максимально точных цифровых копий предприятий и оборудования;
- квантовые технологии – на данном этапе сложно конкретизировать.

Таблица 2. Универсальные сферы применения VR, AR и MR.

Сфера применения в отраслях национальной экономики	Рассматриваемая технология		
	виртуальная реальность	дополненная реальность	смешанная реальность
Обучение персонала	+	+	+
Визуализация данных	+	+	+
Моделирование и проектирование	+	–	+
Интерактивные инструкции сотрудникам	–	+	+
Информационная поддержка персонала	+	+	+
Интерактивные руководства пользователя	–	+	+

Технологии расширенной реальности и интеграция VR, AR, MR

Расширенная реальность (extended reality, XR) – это понятие, обобщающее все среды человеко-машинного взаимодействия, основанные на комбинировании реальных и виртуальных объектов [41], надмножество, включающее любые частные случаи в концепции континуума реальность-виртуальность [42], в том числе VR, AR и MR. Несмотря на различные способы классификации гибридных сред реальности и виртуальности в настоящей статье VR также обобщается понятием расширенной реальности, так как в прикладных задачах практический интерес представляет симуляция реальных объектов и их взаимодействий между собой и с оператором на основе естественных физических принципов [43].

Возможность и целесообразность концептуального обобщения всех сред человеко-компьютерного взаимодействия, основанных на комбинировании реальных и виртуальных объектов, обосновывается универсальной предпосылкой, лежащей в основе технологии их реализации – в использовании специальных носимых гарнитур (шлемов и очков) [44] для управления световым потоком, воспринимаемым оператором, в частности:

- в VR воспроизводится световой поток, не содержащий изображения света, отражающегося от реальных физических объектов;
- в AR изображение реального светового потока частично перекрывается дополнительным мультимедийным контентом;
- в MR изображение реального отражающегося от физических объектов света дополняется изображениями частей виртуальных объектов в соответствии с логикой их пространственного расположения.

Применение специальных носимых гарнитур предопределяет целесообразность реализации всех технологий, обобщаемых понятием расширенной реальности, на базе универсального программно-аппаратного комплекса [45], предоставляющего сервисы виртуальной, дополненной и смешанной реальностей в соответствии с текущей потребностью оператора или содержанием конкретной задачи технологического процесса в случае применения в производственных системах. Функциональные возможности такого комплекса будут полностью соответствовать требованиям к инструментарию информационной поддержки операторов киберфизических систем – ключевого элемента предстоящей четвертой промышленной революции [9].

Развитие персональной компьютерной техники предполагает минимизацию массогабаритных характеристик устройств. С этой точки зрения модернизация гарнитур расширенной реальности будет связана с ключевым фактором шестого технологического уклада – нанотехнологиями [11]. Например, применение специальных контактных линз [46] позволит реализовать режим VR при закрытых, а режимы AR и MR при открытых глазах оператора. Вместе с тем ключевой проблемой технологий расширенной реальности будет оставаться необходимость симуляции тактильных ощущений оператора при взаимодействии с объектами и явлениями виртуальной окружающей обстановки [47].

Эксперименты с интерактивными средами расширенной реальности

В течении 2019 и 2020 годов в лаборатории технологий мультимедиа Института информационных технологий РТУ МИРЭА выполнялся ряд экспериментов по разработке и тестированию интерактивных сред виртуальной, дополненной и смешанной реальностей, направленных на исследование возможностей их прикладного применения в технологических процессах производственных систем. Далее для каждого эксперимента кратко приведены: название, гипотеза, описание реализации, описание разработанной среды, выводы о подтверждении гипотезы.

Эксперимент № 1 – «сборка и разборка сложного промышленного изделия в среде виртуальной реальности». *Гипотеза:* в среде виртуальной реальности может быть реализован тренажер по сборке и/или разборке сложного промышленного изделия, позволяющий одному или нескольким операторам получить знания о порядке индивидуальных и/или коллективных действий при монтаже и/или демонтаже деталей с целью подготовки к выполнению соответствующих операций в реальной обстановке. *Реализация:* для гарнитур виртуальной реальности HTC, Oculus, Acer, Lenovo и HP разработано приложение — в виртуальном гараже (рис. 1а) выполнено размещение цифровых двойников комплектующих автомобиля ВАЗ 2101 («Копейка»), аналогичных представленным в техническом музее в Верхней Пышме (рис. 1б). Последовательность монтажа деталей жестко ограничена, инструкции для действий операторов визуализируются цветовым выделением комплектующего и места его установки при монтаже или размещения при демонтаже. *Выводы:* результаты применения тренажера сотрудниками и обучающимися РТУ МИРЭА, а также посетителями выставок (VI ежегодная национальная выставка «ВУЗПРОМЭКСПО-2019», Международная специализированная конференция по цифровизации экономики и промышленного бизнеса «FIT-M 2019», фестиваль науки и технологий «Geek Picnic 2019» в Краснодаре) показали, что даже не имеющие специальных знаний люди воспринимают визуализированные инструкции и способны осознать, запомнить и воспроизвести последовательности требующихся от них действий.



а

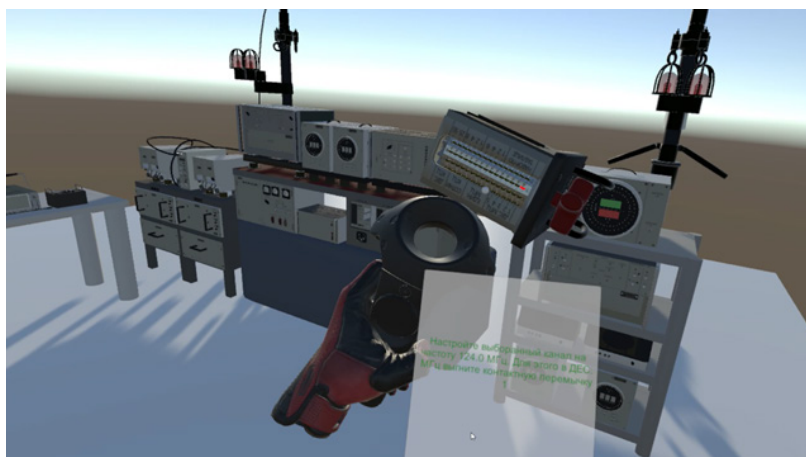


б

Рис. 1. Пример виртуальной (а) и реальной (б) сред обучения процессам сборки и разборки сложного промышленного изделия.

Эксперимент № 2 – «настройка и эксплуатация сложного промышленного изделия в среде виртуальной реальности». *Гипотеза:* в среде виртуальной реальности может быть реализован тренажер, позволяющий одному или нескольким операторам получить знания о порядке индивидуальных и/или коллективных действий по настройке и/или эксплуатации сложного промышленного изделия, с целью подготовки к выполнению соответствующих операций в реальной обстановке. *Реализация:* для гарнитур виртуальной реальности HTC, Oculus, Acer, Lenovo и HP разработано приложение – в виртуальном учебном классе выполнено размещение цифрового двойника оборудования автоматического радиопеленгатора (АРП-11) (рис. 2а), по аналогии со стендом в военном учебном центре РТУ МИРЭА (рис. 2б). В составе тренажера реализованы сценарии настройки и эксплуатации оборудования как в учебном (с визуализацией последовательности и состава требующихся действий), так и в контрольном (с фиксацией выполненных оператором операций) режимах. *Выводы:* результаты применения тренажера сотрудниками и обучающимися РТУ МИРЭА, а также посетителями выставок (VI ежегодная национальная выставка «ВУЗПРОМЭКСПО – 2019», Международная специализированная конференция по цифровизации экономики и промышленного бизнеса «FIT-M 2019», XXIII Международная выставка средств обеспечения безопасности государства «Интерполитех – 2019») показали, что даже не имеющие предварительной подготовки люди воспринимают визуализированные инструкции и способны осознать, запомнить и воспроизвести последовательности требующихся от них действий.

Эксперимент № 3 – «визуализация технической документации в среде дополненной реальности». *Гипотеза:* в среде дополненной реальности может быть выполнена визуализация совмещения элементов содержания технической документации с соответствующим промышленным изделием, обеспечивающая возможность интерактивного получения справочного мультимедийного контента. *Реализация:* для гарнитур дополненной реальности Epson (BT-300, BT-35E и Pro BT-2200) выполнена разработка клиентсерверного приложения, синхронизирующего элементы содержания технической документации



а



б

Рис. 2. Пример виртуальной (а) и реальной (б) сред обучения процессам настройки и эксплуатации сложного промышленного изделия.

с соответствующими отладочными платами (МІКRОЕ 701, 1099, 1385 и т.п.) из лаборатории кафедры вычислительной техники. В соответствии с моделью платы, а также направлением взгляда оператора на ее элементы выполняется отображение справочного мультимедийного контента (рис. 3). *Выводы:* результаты применения приложения сотрудниками и обучающимися РТУ МИРЭА, а также посетителями выставок (VI ежегодная национальная выставка «ВУЗПРОМЭКСПО – 2019», Международная специализированная конференция по цифровизации экономики и промышленного бизнеса «FIT-M 2019», XXIII Международная выставка средств обеспечения безопасности государства «Интерполитех – 2019») показали, что реализованный способ информационного обеспечения может быть применим для информационной поддержки и сопровождения операторов с любым уровнем начальной подготовки в какой-либо предметной области.

Эксперимент № 4 – «координация действий производственного персонала в среде смешанной реальности». *Гипотеза:* в среде смешанной реальности могут быть реализованы визуализация и контроль выполнения последовательности действий, требующихся от одного или нескольких сотрудников производственного персонала в рамках общего для них технологического процесса, а также в условиях отсутствия предварительного инструктажа, вербальных и невербальных коммуникаций. *Реализация:* для гарнитуры



Рис. 3. Пример визуализации элементов содержания технической документации как интерактивного справочного контента поверх отладочной платы.

смешанной реальности HoloLens выполнена разработка клиент-серверного приложения, координирующего действия от 1 до 4 операторов при формировании задаваемых администратором и неизвестных им заранее последовательностей пиктограмм.

Технология проведения эксперимента:

1. Действия администратора с серверной частью приложения:

1.1. Выбирает одну из библиотек пиктограмм, обозначающих виды спорта, буквы алфавита, дорожные знаки и т.п.

1.2. Задаёт произвольную последовательность пиктограмм в количестве от 3 до 10, которую должны будут составить операторы.

1.3. Выбирает вариант размещения заданной последовательности пиктограмм (слева-направо, справа-налево, сверху-вниз, снизу-вверх и т.п.).

1.4. Указывает количество участвующих в эксперименте операторов и задаёт очередность распределения им задач по поэлементному составлению требуемой последовательности пиктограмм.

2. Действия операторов с гарнитурой смешанной реальности:

2.1. Подходят к поверхности, на которой размещены распечатки пиктограмм из выбранной администратором библиотеки, и осматривают их.

2.2. Соблюдают очередность выполнения распределяемых им задач в соответствии с индикацией устройством смешанной реальности режимов выполнения действий и ожидания.

2.3. Выбирают выделенные контентом среды смешанной реальности распечатки пиктограмм – либо перемещают их в обозначенный участок зоны сборки последовательности, либо убирают из него, если была допущена (в том числе преднамеренно) ошибка.

Выводы: результаты участия в эксперименте сотрудников и учащихся РТУ МИРЭА, а также посетителей выставок (VI ежегодная национальная выставка «ВУЗПРОМЭКСПО – 2019»,

Международная специализированная конференция по цифровизации экономики и промышленного бизнеса «FIT-M 2019», XXIII Международная выставка средств обеспечения безопасности государства «Интерполитех – 2019») показали, что в условиях отсутствия предварительного инструктажа, вербальных и невербальных коммуникаций, как знакомые с содержанием эксперимента так и люди, не ознакомленные с ним, могут совместно выполнить в роли операторов требующиеся от них и заранее им неизвестные последовательности действий.

На рис. 4а показан вид среды смешанной реальности для первого оператора, на рис. 4б приведен аналогичный вид для второго оператора, на рис. 4в представлен вид эксперимента для стороннего наблюдателя, а на рис. 4г – интерфейс администратора.



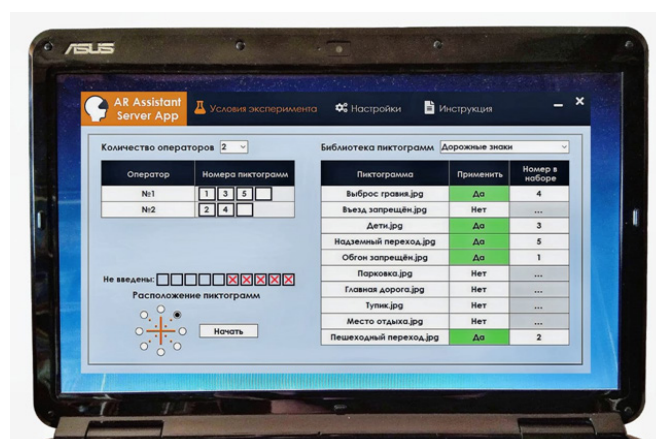
а



б



в



г

Рис. 4. Проведение эксперимента в среде смешанной реальности.

На основании результатов проведения описанных выше экспериментов по работе с интерактивными средами расширенной реальности авторами сделаны выводы о возможности адаптации лабораторного опыта их выполнения к реальным технологическим процессам, в том числе:

- опробованное в первом и втором экспериментах применение сред виртуальной реальности позволяет проводить подготовку сотрудников к монтажу, обслуживанию, ремонту, настройке и эксплуатации оборудования, в том числе в случаях, когда его вывод из технологического процесса возможен на ограниченное время, которое требуется минимизировать;

- реализованный в третьем эксперименте способ информационного обеспечения персонала контентом дополненной реальности, в случае достаточности задействованных вычислительных мощностей, может быть применен для информационной поддержки и сопровождения операторов любого уровня квалификации в любой предметной области;

- реализованный в четвертом эксперименте крайне упрощенный технологический процесс (сборка последовательности пиктограмм) на текущем этапе исследований обосновывает предоставляемые средами смешанной реальности возможности координации деятельности людей даже в условиях отсутствия возможностей проведения инструктажей, совещаний и т.п., а также вербальных и невербальных коммуникаций.

В следующих работах авторов для рассмотренных выше тренажеров и клиент-серверных приложений будет приведено подробное описание реализованных архитектурных решений и примененного инструментария. Имеющийся в настоящее время в данном направлении задел изложен в [48, 49].

Заключение

Технологии XR, обобщающие понятия виртуальной, дополненной и смешанной реальностей, могут применяться как новый компонент методологической базы производственной инженерии, позволяющий обеспечить универсальное решение задач информационной поддержки и сопровождения деятельности человека в технологических процессах производственных систем широкого спектра отраслей национальной экономики любого государства, вне зависимости от уровня их развития, а также долевого сочетания и доминирования технологических укладов.

В связи с этим, по мнению авторов, технологии расширенной реальности удовлетворяют определению как прорывной (нововведение, которое базируется на научном открытии или крупном изобретении и направлено на освоение принципиально новых продуктов и услуг, технологий новых поколений), так и улучшающей (нововведение, направленное на улучшение параметров производимых продуктов и используемых технологий, совершенствование продукции и технологических процессов) инновации [50]. При этом данные технологии фактически являются уникальным примером универсальной улучшающей инновации, имеющей типовое прикладное применение в технологических процессах и производственных системах различных отраслей национальной экономики.

Новый этап развития научно-технического прогресса ставит перед образовательными учреждениями высшего образования Российской Федерации задачи обеспечения соответствия содержания и уровня учебного процесса, а также научно-исследовательской

деятельности учащихся, современному уровню развития ключевых, в том числе цифровых технологий. В данном контексте освоение основ применения технологий расширенной реальности представляется авторам необходимой составляющей современного комплексного профессионального развития выпускников по инженерным направлениям подготовки.

Литература:

1. Глазьев С.Ю. Рывок в будущее. Россия в новых технологическом и мирохозяйственном укладах. М.: Книжный мир, 2018. 768 с. ISBN 978-5-6041071-1-9
2. Глазьев С.Ю. Стратегия опережающего развития России в условиях глобального кризиса. М.: Экономика, 2010. 255 с. ISBN 978-5-282-03056-3
3. Глазьев С.Ю. Теория долгосрочного технико-экономического развития. М.: ВлаДар, 1993. 310 с. ISBN 5-86209-003-7
4. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад. *Наука и жизнь*. 2010;4. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/17800/>
5. Salvendy G. Handbook of Industrial Engineering. Third edition. V. 3. New York: John Wiley & Sons Ltd., 2007. 2836 p. ISBN: 978-0470241820
6. Badiru A.B. Handbook of Industrial and Systems Engineering. Second edition. CRC Press LLC, 2013. 1476 p. ISBN: 978-1-4665-1504-8
7. Sassani F. Industrial Engineering Foundations: Bridging the Gap between Engineering and Management. Dulles: Mercury Learning & Information, 2016. 250 p. ISBN: 978-1942270867
8. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf>
9. Шваб К. Четвертая промышленная революция: пер. с англ. М.: Эксмо, 2019. 209 с. ISBN 978-5-699-90556-0
10. Fast-Berglund A., Gong L., Li D. Testing and validating Extended Reality (xR) technologies in manufacturing. *Procedia Manuf.* 2018;25:31-38. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.054>
11. Глазьев С.Ю., Дементьев В.Е., Елкин С.В., Крянев А.В., Ростовский Н.С., Фирстов Ю.П., Харитонов В.В. Нанотехнологии как ключевой фактор нового технологического уклада в экономике, под ред. академика РАН С.Ю. Глазьева и профессора В.В. Харитонova. М.: Трoвант, 2009. 304 с.
12. Садовничий В.А., Акаев А.А., Коротаев А.В., Малков С.Ю. Моделирование и прогнозирование мировой динамики / Научный совет по Программе фунда. исслед. Президиума Российской академии наук «Экономика и социология знания». М.: ИСПИ РАН, 2012. 359 с. ISBN 978-5-7556-0456-7
13. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. In: 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Koloa, HI. 2016. P. 3928-3937. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
14. Going C.B. Principles of Industrial Engineering. New York: McGraw-Hill, 1911. 174 p.
15. Lehrer R.N. The Nature of Industrial Engineering. *The Journal of Industrial Engineering*. 1954;5(1):4.
16. Urwick L.F. Development of Industrial Engineering. In: Industrial Engineering Handbook, H.B. Maynard (Ed.). New York: McGraw Hill, 1963. P. 1.3-1.16.
17. Sawada P.N. A Concept of Industrial Engineering. *Int. J. Prod. Res.* 1977;15(6):511-522. <https://doi.org/10.1080/00207547708943146>
18. Savory P. Details and Description of Industrial Engineering. Industrial and Management Systems Engineering Faculty Publications. 2005. 13 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/imsefacpub/33>
19. Darwish H., van Dyk L. The industrial engineering identity: from historic skills to modern values, duties, and roles. *S. Afr. J. Ind. Eng.* 2016;27(3):50-63. <https://doi.org/10.7166/27-3-1638>
20. Cupek R., Drewniak M., Ziębiński A., Fojcik M. «Digital Twins» for Highly Customized Electronic Devices – Case Study on a Rework Operation. *IEEE Access*. 2019;7:164127-164143. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2950955>
21. Casla P., Larreina J., Fletcher S. et al. Human-centered factories from theory to industrial practice. Lessons learned and recommendations. ACE Factories Cluster White Paper, 2019. 51 p. <http://ace-factories.eu/wp-content/uploads/ACE-Factories-White-Paper.pdf>
22. Внедрение и развитие Индустрии 4.0. Основы, моделирование и примеры из практики, под ред. Армина Рота. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2017. 294 с. ISBN 978-5-94836-482-7

23. Зуев А.С., Зуева А.Н. Цифровая экономика и развитие печатных изданий. *Изв. ВУЗов. Проблемы полиграфии и издательского дела*. 2019;1:50-56.
24. Sharp H., Preece J., Rogers Y. Interaction Design: Beyond Human-Computer Interaction. 5th ed. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2019. 636 p. ISBN 978-1-119-54725-9
25. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Технологии виртуальной и дополненной реальности», утвержденная 10 октября 2019 года. [Электронный ресурс]. URL: <https://digital.gov.ru/ru/documents/6654/>
26. Foreman N., Korallo L. Past and Future Applications of 3-D (Virtual Reality) Technology. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014;6(94):1-8.
27. Cipresso P., Giglioli I.A.C., Raya V.L.A., Riva G. The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature. *Frontiers in Psychology*. 2018;9: Article 2086. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02086>
28. Sangsu C., Jung K., Noh S.D. Virtual reality applications in manufacturing industries: Past research, present findings, and future directions. *Concurr. Eng. Res. Appl.* 2015;23(1):1-24. <https://doi.org/10.1177%2F1063293X14568814>
29. Yu F., Zhang J.-F., Zhao Y., Tan C., Luan R.-P. The Research and Application of Virtual Reality (VR) Technology in Agriculture Science. In: Li D., Zhao C. (Eds). *Computer and Computing Technologies in Agriculture III*. 2009. P. 546-550. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12220-0_79
30. Wang P. et al. A Critical Review of the Use of Virtual Reality in Construction Engineering Education and Training. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2018;15(6):Article 1204. <https://doi.org/10.3390/ijerph15061204>
31. Wolfartsberger J., Zenisek J., Sievi C. Chances and Limitations of a Virtual Reality-supported Tool for Decision Making in Industrial Engineering. *IFAC- PapersOnLine*. 2018;51(11):637-642. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.390>
32. Велигодский Д.В. Опыт использования тренажера-симулятора «Виртуальный осмотр места происшествия» в рамках спецкурса «Информационно-справочное обеспечение судопроизводства» для обучения юристов. Материалы VII Международной научно-практической конференции «Уголовное производство: процессуальная теория и криминалистическая практика». Симферополь, 2019. С. 14-15.
33. Папагианнис Х. Дополненная реальность. Все, что вы хотели узнать о технологии будущего. М.: Эксмо, 2019. 288 с. ISBN: 978-5-04-089971-5
34. Mourtzis D., Zogopoulos V., Xanthi F. Augmented reality application to support the assembly of highly customized products and to adapt to production rescheduling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019;105:3899-3910. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03941-6>
35. Boccaccio A. et al. Exploiting Augmented Reality to Display Technical Information on Industry 4.0 P&ID. In: Cavas-Martínez F. et al. (Eds.). *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham., 2019. P. 282-291. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12346-8_28
36. Mourtzis D., Zogopoulos V., Katagis I., Lagios P. Augmented Reality based Visualization of CAM Instructions towards Industry 4.0 paradigm: a CNC Bending Machine case study. *Procedia CIRP*. 2018;70:368-373. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.02.045>
37. Speicher M., Hall B.D., Nebeling M. What is Mixed Reality? In: Proc. of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Glasgow, Scotland, UK, 2019. Paper No: 537. P. 1-15. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300767>
38. Wang X., Schnabel M.A. (Eds.). *Mixed Reality in Architecture, Design, and Construction*. Springer Science, 2009. 274 p. ISBN: 978-1-4020-9087-5
39. Wang X. (Ed.). *Mixed Reality and Human-Robot Interaction*. ISCA. V. 47. Springer Science, 2011. 175 p. ISBN: 978-007-0581-4
40. Shumaker R. (Ed.). *Virtual and Mixed Reality – Systems and Applications*. International Conference, Virtual and Mixed Reality 2011. Proceedings, Part II. Orlando, FL, USA, 2011. 455 p. ISBN 978-3-642-22023-4 <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22024-1>
41. Rubio-Tamayo J.L. Extended Reality, Interactivity and Immersive 3D Environments: Literature Review and Projections. In: VII Congreso Internacional Ciudades Creativas. Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias, Colombia; 2019. P. 396-414.
42. Mann S., Havens J.C., Iorio J., Yuan Y., Furness T. All Reality: Values, taxonomy, and continuum, for Virtual, Augmented, eXtended/MiXed (X), Mediated (X,Y), and Multimeditated Reality/Intelligence. Presented at the AWE 2018, Santa Clara, CA, USA. [Электронный ресурс]. URL: <http://wearcam.org/all.pdf>
43. Chuah S.H.-W. Why and Who Will Adopt Extended Reality Technology? Literature Review, Synthesis, and Future Research Agenda (December 13, 2018). [Электронный ресурс]. URL: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3300469>
44. Barfield W. *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*. 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press, 2015. 739 p. ISBN: 978-1-4822-4351-2

45. Chuah S.H-W. Wearable XR-technology: literature review, conceptual framework and future research directions. *Int. J. Tech. Market.* 2019;13(3/4):205-259.
<https://doi.org/10.1504/IJTMKT.2019.104586>
46. Smart contact lens for augmented reality and methods of manufacturing and operating the same: Pat. KR20160037008A, South Korea. Appl. № KR1020140129517A; appl. 2014.09.26; publ. 2016.04.05.
URL: <https://patents.google.com/patent/KR20160037008A/en?q=lens&q=smart&assignee=samsung&oq=samsung+lens+smart>
47. Racat M., Capelli S. Haptic Sensation and Consumer Behaviour: The Influence of Tactile Stimulation in Physical and Online Environments. Springer: Palgrave Pivot, 2020. 125 p. ISBN: 978-3-030-36921-7
48. Зуев А.С., Болбаков Р.Г. О телекоммуникационных сервисах на основе технологий виртуальной реальности. *Российский технологический журнал.* 2017;5(6):3-10.
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-6-3-10>
49. Зуев А.С., Зуева А.Н., Леонов Д.А. Технологии дополненной реальности как новый источник конкурентных преимуществ продукции машиностроения. *Российский технологический журнал.* 2020;8(1):9-20.
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-9-20>
50. Акаев А.А., Садовничий В.А. О новой методологии долгосрочного циклического прогнозирования динамики развития мировой системы и России. Прогноз и моделирование кризисов и мировой динамики. М.: Изд-во ЛКИ, 2010. С. 5-69.

References:

1. Glaz'ev S.Yu. *Ryvok v budushchee. Rossiya v novykh tekhnologicheskoy i mirokhozyaistvennom ukladakh* (Jerk into the future. Russia in the new technological and world economic structures). Moscow: Knizhnyi mir; 2018. 768 p. (in Russ.). ISBN 978-5-6041071-1-9
2. Glaz'ev S.Yu. *Strategiya operezhayushchego razvitiya Rossii v usloviyakh global'nogo krizisa* (Strategy for the rapid development of Russia in the context of global crisis). Moscow: Ekonomika; 2010. 255 p. (in Russ.). ISBN 978-5-282-03056-3
3. Glaz'ev S.Yu. *Teoriya dolgosrochnogo tekhniko-ekonomicheskogo razvitiya* (Theory of long-term technical and economic development). Moscow: Vldar Publ.; 1993. 310 p. (in Russ.) ISBN 5-86209-003-7
4. Kablov E.N. Sixth technological structure. *Nauka i zhizn' = Science and life.* 2010;4. [Electronic resource]. (in Russ).
URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/17800/>
5. Salvendy G. Handbook of Industrial Engineering. Third edition. V. 3. New York: John Wiley & Sons Ltd.; 2007. 2836 p. ISBN: 978-0470241820
6. Badiru A.B. Handbook of Industrial and Systems Engineering. Second edition. CRC Press LLC; 2013. 1476 p. ISBN: 978-1-4665-1504-8
7. Sassani F. Industrial Engineering Foundations: Bridging the Gap between Engineering and Management. Dulles: Mercury Learning & Information; 2016. 250 p. ISBN: 978-1942270867
8. Programma «Tsifrovaya ekonomika Rossiiskoi Federatsii», utverzhennaya rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 28 iyulya 2017 g. № 1632-R (The program «Digital economy of the Russian Federation», approved by the order of the Government of the Russian Federation dated July 28, 2017 No. 1632-R [Electronic resource]. (in Russ).
URL: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf>
9. Shvab K. Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya (The fourth industrial revolution: trans. from Engl.). Moscow: Eksmo; 2019. 209 p. (in Russ.). ISBN 978-5-699-90556-0
10. Fast-Berglund A., Gong L., Li D. Testing and validating Extended Reality (xR) technologies in manufacturing. *Procedia Manuf.* 2018;25:31-38.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.054>
11. Glaz'ev S.Yu., Dement'ev V.E., Elkin S.V., Kryanev A.V., Rostovskii N.S., Firstov Yu.P., Kharitonov V.V. *Nanotekhnologii kak klyuchevoi faktor novogo tekhnologicheskogo ukлада v ekonomike* (Nanotechnologies as a key factor of the new technological order in Economics, S.Yu. Glaz'ev, V.V. Kharitonov (Eds.). Moscow: Trovnt; 2009. 304 p. (in Russ).
12. Sadovnichii V.A., Akaev A.A., Korotaev A.V., Malkov S.Yu. Modelirovanie i prognozirovanie mirovoi dinamiki (Modeling and forecasting of world dynamics / Scientific Council for the Fund Program. research. Presidium of the Russian Academy of Sciences «Economics and sociology of knowledge»). Moscow: ISPI RAN Publ.; 2012. 359 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7556-0456-7
13. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. In: 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Koloa, HI. 2016. P. 3928-3937.
<https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
14. Goings C.B. Principles of Industrial Engineering. New York: McGraw-Hill; 1911. 174 p.
15. Lehrer R.N. The Nature of Industrial Engineering. *The Journal of Industrial Engineering.* 1954;5(1):4.
16. Urwick L.F. Development of Industrial Engineering. In: Industrial Engineering Handbook, H.B. Maynard (Ed.). New York: McGraw Hill; 1963. P. 1.3-1.16.
17. Sawada P.N. A Concept of Industrial Engineering. *Int. J. Prod. Res.* 1977;15(6):511-522.
<https://doi.org/10.1080/00207547708943146>

18. Savory P. Details and Description of Industrial Engineering // Industrial and Management Systems Engineering Faculty Publications. 2005. 13 p. [Electronic resource].
URL: <https://digitalcommons.unl.edu/imsefacpub/33>
19. Darwish H., van Dyk L. The industrial engineering identity: from historic skills to modern values, duties, and roles. *S. Afr. J. Ind. Eng.* 2016;27(3):50-63.
<https://doi.org/10.7166/27-3-1638>
20. Cupek R., Drewniak M., Ziębiński A., Fojcik M. «Digital Twins» for Highly Customized Electronic Devices – Case Study on a Rework Operation. *IEEE Access*. 2019;7:164127-164143.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2950955>
21. Casla P., Larreina J., Fletcher S. et al. Human-centered factories from theory to industrial practice. Lessons learned and recommendations. ACE Factories Cluster White Paper; 2019. 51 p.
<http://ace-factories.eu/wp-content/uploads/ACE-Factories-White-Paper.pdf>
22. Vnedrenie i razvitie Industrii 4.0. Osnovy, modelirovanie i primery iz praktiki, pod red. Armina Rota (Introduction and development of Industry 4.0. Fundamentals, modeling and examples from practice, Armin Roth (Ed.). Moscow: TEKhNOSFERA Publ., 2017. 294 p. (in Russ). ISBN 978-5-94836-482-7
23. Zuev A.S., Zueva A.N. The digital economy and the development of print media. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy poligrafii i izdatel'skogo dela = Proceedings of the institutions of higher education. Issues of the graphic arts and publishing*. 2019;1:50-56 (in Russ.).
24. Sharp H., Preece J., Rogers Y. Interaction Design: Beyond Human-Computer Interaction. 5th ed. New York: John Wiley & Sons Ltd; 2019. 636 p. ISBN 978-1-119-54725-9
25. Dorozhnaya karta razvitiya «skvoznoi» tsifrovoy tekhnologii «Tekhnologii virtual'noi i dopolnennoi real'nosti», utverzhdannaya 10 oktyabrya 2019 goda (Roadmap for the development of «end-to-end» digital technology «Virtual and augmented reality Technologies», approved on October 10, 2019. (in Russ). [Electronic resource].
URL: <https://digital.gov.ru/ru/documents/6654/>
26. Foreman N., Korralo L. Past and Future Applications of 3-D (Virtual Reality) Technology. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki = Sci. Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt.* 2014;6(94):1-8 (in Russ.).
27. Cipresso P., Giglioli I.A.C., Raya V.L.A., Riva G. The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature. *Frontiers in Psychology*. 2018;9: Article 2086.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02086>
28. Sangsu C., Jung K., Noh S.D. Virtual reality applications in manufacturing industries: Past research, present findings, and future directions. *Concurr. Eng. Res. Appl.* 2015;23(1):1-24.
<https://doi.org/10.1177%2F1063293X14568814>
29. Yu F., Zhang J.-F., Zhao Y., Tan C., Luan R.-P. The Research and Application of Virtual Reality (VR) Technology in Agriculture Science. In: Li D., Zhao C. (Eds). Computer and Computing Technologies in Agriculture III. 2009. P. 546-550.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-12220-0_79
30. Wang P. et al. A Critical Review of the Use of Virtual Reality in Construction Engineering Education and Training. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2018;15(6):Article 1204.
<https://doi.org/10.3390/ijerph15061204>
31. Wolfartsberger J., Zenisek J., Sievi C. Chances and Limitations of a Virtual Reality-supported Tool for Decision Making in Industrial Engineering. *IFAC- PapersOnLine*. 2018;51(11):637-642.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.390>
32. Veligodskii D.V. *Experience in using the simulator «Virtual inspection of the scene » in the special course «Information and reference support of legal proceedings» for training lawyers. In: Materialy VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Ugolovnoe proizvodstvo: protsessual'naya teoriya i kriminalisticheskaya praktika». Simferopol' (Proc.of the VII International scientific and practical conference «Criminal proceedings: procedural theory and criminalistic practice», Simferopol.); 2019. P. 14-15 (in Russ.).*
33. Papagiannis Kh. *Dopolnennaya real'nost' . Vse, chto vy khoteli uznat' o tekhnologii budushchego (Augmented reality. Everything you wanted to know about future technology)*. Moscow: Eksmo; 2019. 288 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-04-089971-5
34. Mourtzis D., Zogopoulos V., Xanthi F. Augmented reality application to support the assembly of highly customized products and to adapt to production re-scheduling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019;105:3899-3910.
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-03941-6>
35. Boccaccio A. et al. Exploiting Augmented Reality to Display Technical Information on Industry 4.0 P&ID. In: Cavas-Martínez F. et al. (Eds.). Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham., 2019. P. 282-291.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-12346-8_28
36. Mourtzis D., Zogopoulos V., Katagis I., Lagios P. Augmented Reality based Visualization of CAM Instructions towards Industry 4.0 paradigm: a CNC Bending Machine case study. *Procedia CIRP*. 2018;70:368-373.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.02.045>
37. Speicher M., Hall B.D., Nebeling M. What is Mixed Reality? In: Proc. of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Glasgow, Scotland, UK, 2019. Paper No: 537. P. 1-15.
<https://doi.org/10.1145/3290605.3300767>

38. Wang X., Schnabel M.A. (eds.) *Mixed Reality in Architecture, Design, and Construction*. Springer Science; 2009. 274 p. ISBN: 978-1-4020-9087-5
39. Wang X. (Ed.). *Mixed Reality and Human-Robot Interaction*. ISCA. V. 47. Springer Science; 2011. 175 p. ISBN: 978-007-0581-4
40. Shumaker R. (Ed.). *Virtual and Mixed Reality – Systems and Applications*. International Conference, Virtual and Mixed Reality 2011. Proceedings, Part II. Orlando, FL, USA; 2011. 455 p. ISBN 978-3-642-22023-4 <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22024-1>
41. Rubio-Tamayo J.L. Extended Reality, Interactivity and Immersive 3D Environments: Literature Review and Projections. In: VII Congreso Internacional Ciudades Creativas. Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias, Colombia, 2019. P. 396-414.
42. Mann S., Havens J.C., Iorio J., Yuan Y., Furness T. All Reality: Values, taxonomy, and continuum, for Virtual, Augmented, eXtended/MiXed (X), Mediated (X,Y), and Multimediated Reality/Intelligence. Presented at the AWE 2018, Santa Clara, CA, USA. [Electronic resource]. URL: <http://wearcam.org/all.pdf>
43. Chuah S.H-W. Why and Who Will Adopt Extended Reality Technology? Literature Review, Synthesis, and Future Research Agenda (December 13, 2018). [Electronic resource]. URL: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3300469>
44. Barfield W. *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*. 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press; 2015. 739 p. ISBN: 978-1-4822-4351-2
45. Chuah S.H-W. Wearable XR-technology: literature review, conceptual framework and future research directions. *Int. J. Tech. Market*. 2019;13(3/4):205-259. <https://doi.org/10.1504/IJTMKT.2019.104586>
46. Smart contact lens for augmented reality and methods of manufacturing and operating the same: Pat. KR20160037008A, South Korea. Appl. № KR1020140129517A; appl. 2014.09.26; publ. 2016.04.05. URL: <https://patents.google.com/patent/KR20160037008A/en?q=lens&q=smart&assignee=samsung&oq=samsung+lens+smart>
47. Racat M., Capelli S. *Haptic Sensation and Consumer Behaviour: The Influence of Tactile Stimulation in Physical and Online Environments*. Spriger: Palgrave Pivot; 2020. 125 p. ISBN: 978-3-030-36921-7
48. Zuev A.S., Bolbakov R.G. On prospects of development of telecommunication systems and services based on virtual reality technology. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2017;5(6):3-10 (in Russ). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-6-3-10>
49. Zuev A.S., Zueva A.N., Leonov D.A. Augmented reality technology as a new source of competitive strengths in engineering products. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(1):9-20 (in Russ). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-9-20>
50. Akaev A.A., Sadovnichii V.A. On a new methodology for long-term cyclical forecasting of the dynamics of the world system and Russia. In: *Prognoz i modelirovanie krizisov i mirovoi dinamiki* (Forecast and modeling of crises and global dynamics). Moscow: LKI Publishing House; 2010. P. 5-69 (in Russ.).

Об авторах:

Зуев Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, директор Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Макущенко Максим Александрович, программист специализированной учебно-научной лаборатории технологий мультимедиа Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Иванов Михаил Евгеньевич, заведующий специализированной учебно-научной лабораторией информационных технологий интернета вещей Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Меркулов Егор Сергеевич, программист специализированной учебно-научной лаборатории технологий мультимедиа Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Andrey S. Zuev, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Maksim A. Makushchenko, Programmer of Specialized Educational and Scientific Laboratories of Multimedia Technologies, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Mikhail E. Ivanov, Head of the Specialized Educational And Scientific Laboratory of Information Technologies of the Internet of Things, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Egor S. Merkulov, Programmer of Specialized Educational and Scientific Laboratories of Multimedia Technologies, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Поступила: 29.04.2020; Получена после доработки: 08.06.2020; Принята к опубликованию: 06.07.2020.