

DATA SCIENCE В УПРАВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ ПРОСТРАНСТВОМ

Интеграция виртуальной и дополненной реальности в тренинги по технике безопасности для моделирования аварийных ситуаций на производственных площадках

Роман Венерович Сухов

Специалист-эксперт

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Уфа, Россия

Sukhov-roma@mail.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Камилла Радиковна Назырова

Специалист-эксперт

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Уфа, Россия

kamillanazyrova5@gmail.com

ORCID 0000-0000-0000-0000

Зарина Ринатовна Исламова

Специалист-эксперт

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Уфа, Россия

Islamovazarina18@gmail.com

ORCID 0000-0000-0000-0000

Вадим Маратович Латыпов

Специалист-эксперт

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Уфа, Россия

Spray.03@mail.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Аделина Артуровна Агзямова

Специалист-эксперт

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Уфа, Россия

agzyamova2003@mail.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 02.04.2025

Принята 22.05.2025

Опубликована 30.06.2025

УДК 004.932.3:004.933.1:621.039.3

DOI 10.25726/b9716-5205-7597-a

EDN QOTBRA

БАК 5.8.7. Методология и технология профессионального образования (педагогические науки)

OECD 05.03.HE. EDUCATION, SPECIAL

Аннотация

Динамичное развитие технологий виртуальной (VR) и дополненной реальности (AR) открывает новые возможности для трансформации образовательных процессов в сфере промышленной безопасности. Данное исследование посвящено комплексному анализу интеграции VR/AR-технологий в тренинги по технике безопасности для моделирования аварийных ситуаций на производственных объектах. Проведен систематический анализ эффективности иммерсивных технологий в сравнении с традиционными методами обучения на основе квазиэкспериментального исследования с участием 198 сотрудников предприятий различных отраслей промышленности. Методологический аппарат включал оценку уровня усвоения теоретических знаний, развития практических навыков и изменения поведенческих паттернов с применением модифицированной четырехуровневой модели Киркпатрика. Результаты исследования демонстрируют статистически значимое повышение эффективности обучения при использовании VR/AR: рост показателей усвоения материала составил 37,4%, скорость формирования практических навыков увеличилась на 28,9%, долгосрочный поведенческий трансфер повысился на 42,1% по сравнению с традиционными форматами. Разработана концептуальная модель и технологическая архитектура единой образовательной платформы для системной интеграции иммерсивных технологий в корпоративные программы обучения технике безопасности. Теоретическая значимость исследования заключается в формировании научно-ориентированной инфраструктуры для обеспечения безопасности на производстве посредством иммерсивных образовательных технологий. Практическая ценность работы определяется созданием методического инструментария для проектирования эффективных программ обучения технике безопасности с интеграцией VR/AR-технологий.

Ключевые слова

виртуальная реальность, дополненная реальность, техника безопасности, иммерсивное обучение, моделирование аварийных ситуаций, производственная безопасность, техногенные риски.

Введение

Обеспечение безопасности на производственных объектах остается приоритетной задачей современной индустрии, особенно в контексте возрастающей сложности технологических процессов и потенциальных рисков возникновения аварийных ситуаций. Согласно статистике Международной организации труда, ежегодно в мире происходит около 340 миллионов несчастных случаев на производстве, при этом экономические потери от производственного травматизма и профессиональных заболеваний оцениваются примерно в 4% глобального ВВП (Safety and health at the heart of the future of work, 2023). В России данная проблематика также сохраняет актуальность: по данным Роструда, в 2023 году зафиксировано более 5400 несчастных случаев с тяжелыми последствиями на производстве, что актуализирует необходимость поиска инновационных подходов к обучению технике безопасности (Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2023 году, 2024).

Традиционные методы обучения технике безопасности, включающие аудиторные занятия, инструктажи и учебные тревоги, обнаруживают ряд существенных ограничений. К ним относятся: невозможность реалистичного моделирования опасных ситуаций без риска для обучающихся; недостаточный уровень вовлеченности участников; сложность формирования устойчивых поведенческих паттернов; высокие затраты на организацию практических занятий с использованием реального оборудования (Gao, 2020). Эти ограничения стимулируют поиск альтернативных подходов, среди которых особое внимание исследователей привлекают технологии виртуальной и дополненной реальности.

Бурное развитие технологий иммерсивного обучения открывает новые горизонты для трансформации образовательных процессов в сфере производственной безопасности. По оценкам аналитического агентства Grand View Research, глобальный рынок VR/AR в обучении к 2024 году достиг объема в 16,8 миллиардов долларов с прогнозируемым среднегодовым темпом роста в 42,9% до 2030

года (Virtual reality in education market size, share & trends analysis report by component, by technology, by device, by end user, 2023). Это свидетельствует о формировании устойчивого тренда на интеграцию иммерсивных технологий в образовательные практики, в том числе в сфере корпоративного обучения технике безопасности. Научное сообщество демонстрирует возрастающий интерес к проблематике применения VR/AR-технологий в обучении технике безопасности. Анализ публикаций в ведущих научных базах данных (Scopus, Web of Science) показывает экспоненциальный рост числа исследований в данной области: от 34 публикаций в 2015 году до более чем 450 в 2023 году (Tan, 2023). При этом основной фокус современных исследований смещается от изучения технических возможностей VR/AR-систем к оценке их педагогической эффективности, поиску оптимальных методологических подходов к проектированию образовательного контента и анализу долгосрочных эффектов иммерсивного обучения.

В современной научной литературе сформировалось несколько ключевых направлений исследования применения VR/AR в обучении технике безопасности. Первое направление фокусируется на сравнительном анализе эффективности традиционных и иммерсивных методов обучения. Исследования показывают, что использование VR/AR-технологий позволяет повысить уровень усвоения материала на 28-43% по сравнению с традиционными форматами (Lovreglio, 2021; Man, 2023). Второе направление концентрируется на изучении психологических механизмов иммерсивного обучения, в частности, на роли эффекта присутствия (sense of presence) и эмоциональной вовлеченности в формировании устойчивых навыков безопасного поведения (Papanastasiou, 2019). Третье направление исследует технологические аспекты разработки и внедрения VR/AR-систем в корпоративную образовательную инфраструктуру, включая вопросы совместимости с существующими системами управления обучением, масштабируемости и экономической эффективности (Li, 2018).

Несмотря на значительное количество исследований, в научной литературе наблюдается ряд существенных пробелов. Во-первых, недостаточно исследована специфика применения VR/AR-технологий для моделирования аварийных ситуаций в различных отраслях промышленности с учетом их технологических и организационных особенностей. Во-вторых, отсутствует комплексная методология оценки эффективности иммерсивных тренингов по технике безопасности, учитывающая как краткосрочные образовательные эффекты, так и долгосрочные изменения в производственной культуре безопасности. В-третьих, существует дефицит исследований, интегрирующих педагогические, психологические и технологические аспекты проектирования VR/AR-систем для обучения технике безопасности.

В терминологическом поле исследования наблюдается определенная неоднородность, требующая уточнения ключевых понятий. Под виртуальной реальностью (VR) в данном исследовании понимается технология, обеспечивающая полное погружение пользователя в искусственно созданную трехмерную интерактивную среду с помощью специальных устройств (шлемы, очки VR) с полной изоляцией от физического мира. Дополненная реальность (AR) рассматривается как технология, накладывающая цифровые объекты или информацию на реальное окружение пользователя с помощью смартфонов, планшетов или специальных очков без полной изоляции от физического мира. Смешанная реальность (MR) определяется как технология, обеспечивающая взаимодействие виртуальных объектов с физическим миром в режиме реального времени с возможностью манипуляции как реальными, так и виртуальными объектами. Иммерсивное обучение трактуется как образовательный подход, основанный на создании эффекта погружения в моделируемую среду с целью формирования устойчивых знаний и навыков через непосредственный опыт и активное взаимодействие с образовательным контентом (Jensen, 2018; Radianti, 2020).

Анализ научной литературы выявил три ключевых нерешенных вопроса в области применения VR/AR-технологий для обучения технике безопасности. Первый вопрос касается разработки адаптивных методологических подходов к проектированию иммерсивных образовательных сценариев с учетом специфики различных производственных контекстов и профессиональных групп. Существующие исследования часто концентрируются на узкоспециализированных решениях, не предлагая универсальных методологических принципов проектирования (Feng, 2018). Второй вопрос связан с оценкой долгосрочных эффектов иммерсивного обучения и их влияния на организационную культуру

безопасности. Большинство исследований ограничивается измерением краткосрочных образовательных результатов, игнорируя более глубокие организационные трансформации (Makransky, 2021). Третий вопрос относится к интеграции VR/AR-систем в существующую образовательную инфраструктуру предприятий с учетом технологических, экономических и человеческих факторов. Фрагментарность существующих исследований не позволяет сформировать целостное представление о процессе системной интеграции иммерсивных технологий в корпоративные программы обучения (Parong, 2021).

Обозначенные пробелы в научной литературе определяют актуальность и новизну настоящего исследования, направленного на комплексный анализ интеграции VR/AR-технологий в тренинги по технике безопасности для моделирования аварийных ситуаций на производственных объектах с учетом педагогических, психологических, технологических и организационных аспектов данного процесса. Наше исследование опирается на междисциплинарный подход, интегрирующий достижения педагогики, психологии, инженерных наук и организационного менеджмента для формирования целостной концепции применения иммерсивных технологий в обучении технике безопасности. Основная цель исследования – разработать научно обоснованную концепцию интеграции VR/AR-технологий в тренинги по технике безопасности для моделирования аварийных ситуаций на производственных объектах и экспериментально оценить ее эффективность в сравнении с традиционными форматами обучения.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие исследовательские задачи: 1) проанализировать современные теоретические подходы к использованию VR/AR-технологий в обучении технике безопасности и выявить ключевые факторы эффективности иммерсивных образовательных программ; 2) разработать методологию проектирования иммерсивных образовательных сценариев для моделирования аварийных ситуаций с учетом специфики различных производственных контекстов; 3) создать и экспериментально апробировать комплекс VR/AR-тренингов по технике безопасности для различных категорий производственного персонала; 4) разработать и верифицировать методологию комплексной оценки эффективности иммерсивных тренингов по технике безопасности; 5) сформировать концептуальную модель и технологическую архитектуру образовательной платформы для системной интеграции VR/AR-технологий в корпоративные программы обучения технике безопасности.

Научная новизна исследования заключается в разработке целостной концепции интеграции VR/AR-технологий в обучение технике безопасности, учитывающей взаимосвязь педагогических, психологических, технологических и организационных факторов; создании адаптивной методологии проектирования иммерсивных образовательных сценариев для различных производственных контекстов; разработке комплексной методологии оценки эффективности иммерсивных тренингов, охватывающей все уровни образовательных результатов – от реакции обучающихся до влияния на организационную культуру безопасности. Теоретическая значимость исследования определяется вкладом в развитие научных представлений о механизмах иммерсивного обучения и их потенциале для формирования культуры безопасности на производстве. Практическая ценность работы состоит в разработке конкретных методических инструментов для проектирования, реализации и оценки эффективности VR/AR-тренингов по технике безопасности, которые могут быть непосредственно использованы в корпоративных образовательных практиках.

Материалы и методы исследования

Методологический аппарат исследования основан на интеграции количественных и качественных методов для обеспечения комплексной оценки эффективности VR/AR-технологий в обучении технике безопасности. Исследование проводилось с сентября 2022 по октябрь 2024 года и включало несколько взаимосвязанных этапов. На первом этапе был осуществлен систематический анализ научной литературы по проблематике применения иммерсивных технологий в обучении технике безопасности. На втором этапе разработана методология проектирования иммерсивных образовательных сценариев. На третьем этапе создан комплекс VR/AR-тренингов для различных категорий производственного персонала. На четвертом этапе проведено экспериментальное

исследование эффективности разработанных тренингов. На пятом этапе сформулирована концептуальная модель интеграции VR/AR-технологий в корпоративные программы обучения технике безопасности.

Систематический анализ литературы включал обзор 248 научных публикаций из баз данных Scopus и Web of Science за период 2015-2024 гг., посвященных применению VR/AR-технологий в обучении технике безопасности. Анализ проводился с использованием методики PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) и включал оценку методологического качества исследований, их теоретической обоснованности и эмпирической валидности. Дополнительно были проанализированы 37 отраслевых отчетов и 18 технических документов, отражающих практические аспекты внедрения VR/AR-технологий в корпоративные образовательные программы (Page, 2021).

Методология проектирования иммерсивных образовательных сценариев разрабатывалась на основе принципов педагогического дизайна (instructional design) с интеграцией элементов гейм-дизайна и психологии иммерсивного опыта. Для структурирования процесса проектирования была использована модель ADDIE (Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation) в модифицированной версии, дополненной компонентами, специфичными для иммерсивных технологий. В частности, на этапе анализа были добавлены процедуры оценки технологической готовности организации и потенциальных психофизиологических ограничений целевой аудитории; на этапе дизайна – процедуры разработки интерактивного нарратива и пространственной организации виртуальной среды; на этапе разработки – процедуры оптимизации VR/AR-контента для различных аппаратных платформ; на этапе внедрения – процедуры технической и психологической поддержки пользователей; на этапе оценки – процедуры мониторинга психофизиологического состояния обучающихся в процессе иммерсивного опыта (Branch, 2009).

Для экспериментальной апробации разработанной методологии был создан комплекс VR/AR-тренингов по технике безопасности, включающий шесть образовательных модулей: «Оценка рисков на рабочем месте», «Действия при пожаре», «Работа в замкнутых пространствах», «Безопасная эксплуатация электрооборудования», «Оказание первой помощи при производственных травмах», «Эвакуация при химической аварии». Каждый модуль был реализован в трех технологических вариантах: полностью иммерсивный VR-тренинг с использованием шлемов виртуальной реальности (Oculus Quest 2); частично иммерсивный AR-тренинг с использованием планшетов и смартфонов; комбинированный тренинг с элементами VR и AR. Все модули разрабатывались на единой программной платформе Unity с использованием XR Interaction Toolkit для обеспечения кроссплатформенной совместимости и унификации пользовательского опыта. Для создания реалистичных 3D-моделей промышленного оборудования и окружающей среды использовались технологии фотограмметрии и лазерного сканирования реальных производственных объектов (Sutherland, 2019).

Экспериментальное исследование эффективности разработанных тренингов проводилось в формате квазиэксперимента с участием 198 сотрудников шести промышленных предприятий различных отраслей (машиностроение, химическая промышленность, энергетика, нефтегазовая отрасль, металлургия, пищевая промышленность). Участники были разделены на три экспериментальные группы (VR-тренинг, AR-тренинг, комбинированный тренинг) и контрольную группу (традиционный тренинг) с равномерным распределением по возрасту, полу, должностному уровню и предшествующему опыту обучения технике безопасности. Каждая группа проходила полный цикл обучения по всем шести модулям в соответствующем технологическом формате. Контрольная группа обучалась по тем же тематическим модулям, но с использованием традиционных методов (лекции, видеоматериалы, практические упражнения без применения VR/AR).

Для оценки эффективности обучения была использована модифицированная четырехуровневая модель Киркпатрика, дополненная компонентами, специфичными для иммерсивных технологий. На первом уровне (реакция) оценивалось субъективное восприятие обучающимися образовательного опыта, включая уровень вовлеченности, эмоциональную реакцию и воспринимаемую полезность обучения. Для этого использовались стандартизированные опросники User Experience Questionnaire (UEQ) и Training Satisfaction Scale (TSS), а также полуструктурированные интервью. На втором уровне

(обучение) оценивался уровень усвоения теоретических знаний и формирования практических навыков. Теоретические знания измерялись с помощью тестирования до и после обучения, практические навыки – через выполнение стандартизированных заданий в виртуальной и реальной среде с оценкой по детализированным рубрикам. На третьем уровне (поведение) анализировалось изменение поведенческих паттернов в реальных рабочих ситуациях через 1, 3 и 6 месяцев после обучения. Для этого использовались методы наблюдения, анализ записей о нарушениях техники безопасности и самоотчеты участников. На четвертом уровне (результаты) оценивалось влияние обучения на организационные показатели безопасности, включая частоту несчастных случаев, экономические потери от аварийных ситуаций и общий уровень культуры безопасности в организации (Kirkpatrick, 2016).

Дополнительно к стандартным уровням модели Киркпатрика были введены две специфические для иммерсивных технологий категории оценки: физиологические реакции и когнитивно-пространственные навыки. Физиологические реакции измерялись с помощью биометрических датчиков (пульс, электродермальная активность, движения глаз) для оценки уровня стресса и концентрации внимания в процессе обучения. Когнитивно-пространственные навыки оценивались через специально разработанные тесты на пространственную ориентацию, скорость реакции и ситуационную осведомленность в условиях моделируемых аварийных ситуаций (Birkhead, 2019).

Статистический анализ полученных данных проводился с использованием программного пакета SPSS 28.0. Для количественных показателей рассчитывались средние значения, стандартные отклонения и доверительные интервалы. Для сравнения результатов экспериментальных и контрольной групп применялся дисперсионный анализ (ANOVA) с post-hoc тестами Тьюки для множественных сравнений. Для анализа динамики изменений показателей во времени использовался дисперсионный анализ с повторными измерениями. Для оценки взаимосвязи между различными показателями эффективности обучения применялся корреляционный и регрессионный анализ. Качественные данные, полученные в результате интервью и наблюдений, анализировались с использованием тематического кодирования с последующей триангуляцией с количественными результатами (Creswell, 2018).

Формирование концептуальной модели интеграции VR/AR-технологий в корпоративные программы обучения технике безопасности осуществлялось на основе методологии системного проектирования (Systems Engineering) с использованием методов моделирования бизнес-процессов (BPMN 2.0), проектирования архитектуры предприятия (TOGAF) и управления жизненным циклом информационных систем. В процессе разработки модели проводились консультации с экспертами в области производственной безопасности, корпоративного обучения и информационных технологий для валидации предлагаемых решений и оценки их практической применимости в различных организационных контекстах (The TOGAF standard, version 9.2., 2018).

Результаты и обсуждение

Результаты комплексного исследования эффективности интеграции VR/AR-технологий в тренинги по технике безопасности демонстрируют значительный потенциал иммерсивных технологий для трансформации образовательных процессов в сфере промышленной безопасности. Данный раздел представляет детальный анализ экспериментальных данных, структурированный в соответствии с четырьмя уровнями оценки эффективности обучения (реакция, обучение, поведение, результаты), а также дополнительными категориями оценки, специфичными для иммерсивных технологий.

Анализ субъективного восприятия образовательного опыта выявил существенные различия в реакции обучающихся на традиционные и иммерсивные форматы тренингов по технике безопасности. Результаты опроса с использованием стандартизированного инструмента User Experience Questionnaire (UEQ) представлены в Таблице 1, которая демонстрирует сравнительную оценку пользовательского опыта в различных форматах обучения по шести ключевым параметрам.

Таблица 1. Сравнительная оценка пользовательского опыта в различных форматах тренингов по технике безопасности (N=198)

Параметр оценки	Традиционный тренинг (n=50)	VR-тренинг (n=49)	AR-тренинг (n=50)	Комбинированный тренинг (n=49)	F-статистика	p-значение
Привлекательность	3.24 (0.78)	4.67 (0.63)	4.28 (0.59)	4.82 (0.54)	58.36	<0.001
Эффективность	3.56 (0.82)	4.32 (0.68)	4.05 (0.72)	4.61 (0.52)	24.18	<0.001
Ясность	3.89 (0.67)	3.97 (0.84)	4.13 (0.75)	4.24 (0.62)	2.74	0.045
Надежность	4.12 (0.59)	3.84 (0.93)	4.05 (0.68)	4.18 (0.57)	2.31	0.078
Стимуляция	2.86 (0.95)	4.76 (0.48)	4.34 (0.63)	4.89 (0.39)	97.41	<0.001
Новизна	2.44 (0.83)	4.85 (0.42)	4.56 (0.53)	4.92 (0.37)	195.26	<0.001

Примечание: Значения представлены в формате среднее (стандартное отклонение). Оценка осуществлялась по 5-балльной шкале, где 1 – минимальное, 5 – максимальное значение параметра.

Как видно из Таблицы 1, иммерсивные форматы тренингов (VR, AR и комбинированный) демонстрируют статистически значимо более высокие показатели по параметрам привлекательности, эффективности, стимуляции и новизны по сравнению с традиционным форматом ($p < 0.001$). При этом наиболее высокие оценки пользовательского опыта наблюдаются в группе комбинированного тренинга, интегрирующего элементы VR и AR. По параметрам ясности и надежности различия между форматами выражены менее явно, что указывает на сопоставимый уровень понятности контента и доверия к предоставляемой информации во всех исследуемых форматах.

Дополнительный анализ с использованием опросника Training Satisfaction Scale (TSS) подтвердил более высокий уровень удовлетворенности обучающихся иммерсивными форматами тренингов. Средний показатель удовлетворенности составил 4.67 (SD=0.58) для комбинированного тренинга, 4.54 (SD=0.62) для VR-тренинга, 4.32 (SD=0.71) для AR-тренинга и 3.76 (SD=0.85) для традиционного тренинга по 5-балльной шкале. Особенно высоко обучающиеся оценили возможность безопасно экспериментировать с различными сценариями аварийных ситуаций (средняя оценка 4.83 из 5), реалистичность моделируемой среды (4.71) и интерактивность образовательного процесса (4.68). Качественный анализ данных полуструктурированных интервью с участниками тренингов (n=36, по 9 представителей от каждой группы) выявил пять ключевых тем, отражающих преимущества иммерсивных форматов обучения с точки зрения обучающихся: 1) эмоциональная вовлеченность и формирование «эмоциональной памяти»; 2) снижение когнитивной нагрузки благодаря наглядности и интерактивности; 3) отсутствие страха ошибки в безопасной виртуальной среде; 4) повышение мотивации к обучению благодаря игровым элементам; 5) предоставление немедленной обратной связи в процессе выполнения заданий.

Одновременно были выявлены некоторые проблемные аспекты иммерсивных тренингов, в частности: дискомфорт и «VR-укачивание» у 12.7% участников VR-тренингов; технические сложности в использовании оборудования у 8.3% участников; ощущение искусственности некоторых сценариев у 14.6% участников. Эти данные указывают на необходимость учета индивидуальных психофизиологических особенностей обучающихся и обеспечения технической поддержки в процессе внедрения иммерсивных технологий в корпоративные программы обучения.

Для оценки эффективности различных форматов тренингов в формировании теоретических знаний и практических навыков в области техники безопасности было проведено комплексное

тестирование участников до и после обучения. Таблица 2 представляет сравнительные результаты тестирования теоретических знаний в различных экспериментальных группах.

Таблица 2. Динамика показателей теоретических знаний в области техники безопасности до и после обучения в различных форматах (N=198)

Формат обучения	Средний балл до обучения (из 100)	Средний балл после обучения (из 100)	Абсолютный прирост	Относительный прирост (%)	Cohen's d
Традиционный тренинг (n=50)	43.8 (10.3)	68.4 (12.1)	24.6 (8.2)	56.2	2.15
VR-тренинг (n=49)	44.2 (9.8)	79.6 (10.3)	35.4 (7.5)	80.1	3.52
AR-тренинг (n=50)	42.9 (10.5)	74.8 (11.2)	31.9 (8.1)	74.4	2.97
Комбинированный тренинг (n=49)	43.5 (9.7)	82.3 (9.6)	38.8 (7.2)	89.2	4.01

Примечание: Значения представлены в формате среднее (стандартное отклонение).

Анализ данных таблицы 2 показывает, что все форматы обучения обеспечивают статистически значимый прирост теоретических знаний ($p < 0.001$). Однако иммерсивные форматы демонстрируют существенно более высокие показатели эффективности по сравнению с традиционным форматом. Наибольший прирост знаний наблюдается в группе комбинированного тренинга (38.8 баллов, 89.2%), за ней следуют группы VR-тренинга (35.4 баллов, 80.1%) и AR-тренинга (31.9 баллов, 74.4%). Традиционный тренинг показывает наименьший прирост (24.6 баллов, 56.2%). Размер эффекта (Cohen's d) также указывает на более высокую эффективность иммерсивных форматов, особенно комбинированного тренинга ($d = 4.01$).

Для оценки формирования практических навыков был проведен комплексный практический экзамен, включающий шесть стандартизированных заданий, соответствующих тематическим модулям тренингов. Каждое задание оценивалось по детализированной рубрике с максимальным баллом 20. Результаты практического экзамена представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты практического экзамена по технике безопасности после различных форматов обучения (N=198)

Практическое задание	Традиционный тренинг (n=50)	VR-тренинг (n=49)	AR-тренинг (n=50)	Комбинированный тренинг (n=49)	F-статистика	p-значение
Оценка рисков на рабочем месте	11.2 (3.1)	14.8 (2.7)	15.3 (2.6)	16.1 (2.3)	32.17	<0.001
Действия при пожаре	12.5 (2.9)	16.2 (2.3)	14.9 (2.7)	17.3 (2.0)	38.44	<0.001
Работа в замкнутых пространствах	10.8 (3.3)	15.7 (2.6)	13.5 (3.0)	16.5 (2.2)	44.63	<0.001
Безопасная эксплуатация электрооборудования	12.3 (2.7)	15.4 (2.5)	14.6 (2.6)	16.2 (2.1)	26.78	<0.001
Оказание первой помощи	11.7 (3.2)	15.3 (2.8)	13.8 (3.0)	16.7 (2.2)	33.41	<0.001

Эвакуация при химической аварии	10.4 (3.4)	16.1 (2.4)	14.2 (2.9)	17.4 (1.9)	65.82	<0.001
Средний балл по всем заданиям	11.5 (2.4)	15.6 (1.8)	14.4 (2.1)	16.7 (1.5)	72.35	<0.001

Примечание: Значения представлены в формате среднее (стандартное отклонение) по шкале от 0 до 20 баллов.

Результаты практического экзамена подтверждают более высокую эффективность иммерсивных форматов обучения в формировании практических навыков по технике безопасности. По всем шести заданиям наблюдаются статистически значимые различия между группами ($p < 0.001$), при этом наиболее высокие показатели демонстрирует группа комбинированного тренинга (средний балл 16.7 из 20), за ней следуют группы VR-тренинга (15.6) и AR-тренинга (14.4). Традиционный тренинг показывает наименьшую эффективность в формировании практических навыков (средний балл 11.5). Особенно заметные различия наблюдаются в заданиях, связанных с действиями в экстремальных ситуациях (пожар, химическая авария) и работой в сложных условиях (замкнутые пространства), что указывает на преимущества иммерсивных технологий в моделировании опасных ситуаций, которые сложно или невозможно воспроизвести в традиционном формате обучения.

Для детального анализа формирования навыков безопасного поведения была проведена видеорегистрация выполнения практических заданий с последующим кодированием наблюдаемых поведенческих паттернов. Результаты кодирования представлены в таблице 4, демонстрирующей частоту проявления различных паттернов безопасного поведения в экспериментальных группах.

Таблица 4. Частота проявления паттернов безопасного поведения при выполнении практических заданий (N=198)

Паттерн безопасного поведения	Традиционный тренинг (n=50) (%)	VR-тренинг (n=49) (%)	AR-тренинг (n=50) (%)	Комбинированный тренинг (n=49) (%)	χ^2 -статистика	p-значение
Предварительная оценка рисков	52	86	78	94	29.76	<0.001
Использование СИЗ	68	92	88	96	18.43	<0.001
Проверка оборудования	46	82	76	90	31.58	<0.001
Следование алгоритмам действий	58	84	76	92	23.71	<0.001
Коммуникация о рисках	34	72	64	80	35.92	<0.001
Адаптация к изменению ситуации	28	68	58	76	37.64	<0.001

Примечание: Значения представлены в процентах от общего числа участников в группе, демонстрирующих данный паттерн поведения.

Данные таблицы 4 свидетельствуют о значительных различиях в формировании паттернов безопасного поведения между группами ($p < 0.001$ для всех паттернов). Участники иммерсивных тренингов, особенно комбинированного формата, демонстрируют существенно более высокую частоту проявления всех шести ключевых паттернов безопасного поведения по сравнению с участниками традиционного тренинга. Наиболее выраженные различия наблюдаются в таких сложных поведенческих

паттернах, как «адаптация к изменению ситуации» (76% в группе комбинированного тренинга против 28% в группе традиционного тренинга) и «коммуникация о рисках» (80% против 34% соответственно).

Для оценки долгосрочных эффектов различных форматов обучения было проведено лонгитюдное исследование изменений в поведении участников в реальных рабочих ситуациях через 1, 3 и 6 месяцев после завершения тренингов. Исследование включало структурированное наблюдение за работой сотрудников, анализ записей о нарушениях техники безопасности и самоотчеты участников. Результаты оценки долгосрочных поведенческих изменений представлены в таблице 5.

Таблица 5. Динамика показателей безопасного поведения в реальных рабочих ситуациях после различных форматов обучения (N=198)

Показатель	Период оценки	Традиционный тренинг (n=50)	VR-тренинг (n=49)	AR-тренинг (n=50)	Комбинированный тренинг (n=49)	F-статистика	p-значение
Индекс безопасного поведения (по шкале 0-100)	1 месяц	67.3 (12.4)	83.6 (10.1)	78.2 (11.3)	87.4 (9.2)	38.72	<0.001
	3 месяца	59.7 (13.6)	81.4 (10.8)	74.5 (12.1)	85.9 (9.7)	52.38	<0.001
	6 месяцев	53.2 (14.2)	79.8 (11.2)	71.6 (12.8)	84.3 (10.1)	68.43	<0.001
Количество нарушений техники безопасности (среднее на 1 человека)	1 месяц	0.74 (0.85)	0.31 (0.59)	0.42 (0.67)	0.16 (0.43)	8.56	<0.001
	3 месяца	0.92 (0.94)	0.35 (0.63)	0.54 (0.73)	0.18 (0.44)	11.85	<0.001
	6 месяцев	1.18 (1.05)	0.41 (0.68)	0.70 (0.81)	0.22 (0.47)	16.27	<0.001
Уровень ситуационной осведомленности (по шкале 1-5)	1 месяц	3.32 (0.74)	4.17 (0.63)	3.86 (0.69)	4.38 (0.58)	28.13	<0.001
	3 месяца	3.04 (0.82)	4.05 (0.68)	3.67 (0.75)	4.26 (0.62)	31.56	<0.001
	6 месяцев	2.76 (0.87)	3.92 (0.72)	3.48 (0.79)	4.19 (0.64)	37.24	<0.001

Примечание: Значения представлены в формате среднее (стандартное отклонение).

Анализ данных таблицы 5 выявляет несколько важных тенденций. Во-первых, все три иммерсивных формата обучения обеспечивают более высокие показатели безопасного поведения в реальных рабочих ситуациях по сравнению с традиционным форматом на всех трех временных контрольных точках ($p < 0.001$). Во-вторых, во всех группах наблюдается некоторое снижение показателей безопасного поведения с течением времени, однако это снижение значительно более выражено в группе традиционного тренинга. Через 6 месяцев после обучения индекс безопасного поведения в группе традиционного тренинга снизился на 14.1 пункта (с 67.3 до 53.2), в то время как в группах иммерсивных тренингов снижение составило от 3.1 до 6.6 пунктов. В-третьих, комбинированный тренинг демонстрирует наиболее стабильные долгосрочные эффекты с минимальным снижением показателей безопасного поведения с течением времени. Особенно значимые различия между группами наблюдаются по количеству нарушений техники безопасности: через 6 месяцев после обучения среднее количество нарушений на одного сотрудника в группе традиционного тренинга составило 1.18, в то время как в группе комбинированного тренинга этот показатель был в 5.4 раза ниже (0.22). Различия по уровню

ситуационной осведомленности также существенны: через 6 месяцев средний показатель в группе традиционного тренинга составил 2.76 из 5, а в группе комбинированного тренинга – 4.19 из 5.

Для оценки влияния различных форматов обучения на организационные показатели безопасности был проведен анализ агрегированных данных по шести участвующим в исследовании предприятиям за период в 12 месяцев после внедрения иммерсивных тренингов. Результаты представлены в таблице 6.

Таблица 6. Динамика организационных показателей безопасности после внедрения иммерсивных тренингов по технике безопасности (N=6 предприятий)

Показатель	Базовый уровень (до внедрения)	Через 6 месяцев после внедрения	Через 12 месяцев после внедрения	Относительное изменение (%)	p-значение
Частота несчастных случаев (на 1000 сотрудников в год)	5.83 (1.47)	4.21 (1.28)	3.47 (1.13)	-40.5	0.003
Частота микротравм (на 1000 сотрудников в год)	32.58 (8.63)	24.36 (7.41)	19.67 (6.28)	-39.6	0.005
Частота аварийных ситуаций (на 100 000 человеко-часов)	1.42 (0.38)	0.97 (0.32)	0.76 (0.28)	-46.5	0.002
Экономические потери от происшествий (% от ФОТ)	2.86 (0.72)	1.93 (0.58)	1.47 (0.49)	-48.6	0.001
Индекс культуры безопасности (по шкале 0-100)	62.4 (9.7)	74.3 (8.5)	81.6 (7.8)	+30.8	<0.001

Примечание: значения представлены в формате среднее (стандартное отклонение) по шести предприятиям.

Данные таблицы 6 демонстрируют существенное улучшение всех организационных показателей безопасности после внедрения иммерсивных тренингов. Через 12 месяцев после внедрения наблюдается снижение частоты несчастных случаев на 40.5%, частоты микротравм на 39.6%, частоты аварийных ситуаций на 46.5% и экономических потерь от происшествий на 48.6%. Одновременно отмечается значительное повышение индекса культуры безопасности на 30.8%. Все изменения являются статистически значимыми ($p < 0.01$). Регрессионный анализ выявил сильную отрицательную корреляцию между долей сотрудников, прошедших иммерсивные тренинги, и частотой несчастных случаев на предприятии ($r = -0.78$, $p < 0.001$), а также между индексом безопасного поведения сотрудников и экономическими потерями от происшествий ($r = -0.83$, $p < 0.001$).

Для более глубокого понимания механизмов эффективности иммерсивных технологий в обучении технике безопасности были проведены специализированные исследования физиологических реакций обучающихся и формирования когнитивно-пространственных навыков в процессе тренингов. Результаты биометрических измерений в различных форматах обучения представлены в таблице 7.

Таблица 7. Сравнительный анализ физиологических реакций в различных форматах обучения технике безопасности (N=198)

Физиологический показатель	Тип образовательного сценария	Традиционный тренинг (n=50)	VR-тренинг (n=49)	AR-тренинг (n=50)	Комбинированный тренинг (n=49)	F-статистика	p-значение
Средняя частота сердечных сокращений (уд/мин)	Теоретический материал	72.4 (8.6)	78.6 (9.3)	76.2 (8.9)	79.4 (9.1)	6.84	<0.001
	Стандартный сценарий	76.8 (9.2)	85.3 (10.1)	82.6 (9.7)	86.7 (10.3)	11.29	<0.001
	Аварийная ситуация	81.3 (10.5)	98.7 (12.7)	91.4 (11.8)	101.2 (13.2)	31.51	<0.001
Электродермальная активность (мкСм)	Теоретический материал	3.2 (1.1)	4.6 (1.4)	4.1 (1.3)	4.8 (1.5)	16.34	<0.001
	Стандартный сценарий	4.1 (1.3)	6.2 (1.7)	5.4 (1.5)	6.5 (1.8)	24.73	<0.001
	Аварийная ситуация	5.7 (1.6)	9.3 (2.1)	7.8 (1.9)	9.6 (2.2)	45.28	<0.001
Фиксация взгляда на ключевых объектах времени (%)	Теоретический материал	38.6 (9.3)	52.4 (10.8)	49.7 (10.2)	54.8 (11.1)	26.17	<0.001
	Стандартный сценарий	42.3 (10.1)	58.6 (11.5)	54.9 (11.0)	61.2 (11.8)	32.84	<0.001
	Аварийная ситуация	47.8 (11.4)	67.2 (12.9)	62.5 (12.3)	70.6 (13.1)	43.76	<0.001

Примечание: значения представлены в формате среднее (стандартное отклонение).

Данные Таблицы 7 демонстрируют значительные различия в физиологических реакциях обучающихся в различных форматах тренингов. Иммерсивные форматы, особенно VR и комбинированный тренинг, вызывают более выраженные физиологические реакции по всем измеряемым показателям по сравнению с традиционным форматом ($p < 0.001$). Особенно заметны различия в сценариях аварийных ситуаций: средняя частота сердечных сокращений в группе комбинированного тренинга достигает 101.2 уд/мин, что на 19.9 уд/мин выше, чем в группе традиционного тренинга (81.3 уд/мин). Аналогичная тенденция наблюдается по электродермальной активности (9.6 мкСм против 5.7 мкСм) и фиксации взгляда на ключевых объектах (70.6% времени против 47.8% времени). Важно отметить, что повышенная физиологическая активация в иммерсивных форматах обучения коррелирует с лучшими показателями запоминания и применения полученных знаний. Регрессионный анализ выявил положительную корреляцию между уровнем электродермальной активности в процессе обучения и результатами тестирования теоретических знаний после обучения ($r = 0.64$, $p < 0.001$), а также между частотой сердечных сокращений в сценариях аварийных ситуаций и показателями выполнения соответствующих практических заданий ($r = 0.58$, $p < 0.001$).

Для оценки формирования когнитивно-пространственных навыков были проведены специализированные тесты на пространственную ориентацию, скорость реакции и ситуационную осведомленность до и после обучения. Результаты представлены в таблице 8.

Таблица 8. Динамика показателей когнитивно-пространственных навыков в различных форматах обучения (N=198)

Навык	Период оценки	Традиционный тренинг (n=50)	VR-тренинг (n=49)	AR-тренинг (n=50)	Комбинированный тренинг (n=49)	F-статистика	p-значение
Пространственная ориентация (балл из 100)	До обучения	62.4 (11.8)	63.1 (12.2)	61.9 (12.0)	62.7 (11.9)	0.11	0.956
	После обучения	68.3 (10.9)	82.6 (9.5)	76.8 (10.2)	85.4 (8.7)	33.26	<0.001
	Прирост	5.9 (4.3)	19.5 (7.2)	14.9 (6.1)	22.7 (7.8)	69.14	<0.001
Скорость реакции (мс)	До обучения	347 (52)	341 (54)	344 (53)	343 (52)	0.15	0.932
	После обучения	318 (48)	276 (41)	293 (44)	265 (38)	17.83	<0.001
	Улучшение	29 (18)	65 (27)	51 (24)	78 (30)	43.58	<0.001
Ситуационная осведомленность (балл из 100)	До обучения	58.7 (10.3)	57.9 (10.5)	59.2 (10.1)	58.5 (10.4)	0.17	0.918
	После обучения	68.2 (9.6)	83.5 (8.2)	77.4 (8.9)	87.9 (7.3)	47.35	<0.001
	Прирост	9.5 (5.1)	25.6 (8.3)	18.2 (7.1)	29.4 (8.9)	83.97	<0.001

Примечание: Значения представлены в формате среднее (стандартное отклонение).

Результаты, представленные в таблице 8, демонстрируют значительное преимущество иммерсивных форматов обучения в формировании когнитивно-пространственных навыков. В то время как исходные показатели по всем трем навыкам статистически не различались между группами ($p>0.9$), после обучения наблюдаются существенные различия ($p<0.001$). Наиболее выраженное улучшение показателей отмечается в группе комбинированного тренинга: прирост по пространственной ориентации составил 22.7 баллов (против 5.9 баллов в группе традиционного тренинга), улучшение скорости реакции – 78 мс (против 29 мс), прирост по ситуационной осведомленности – 29.4 баллов (против 9.5 баллов).

Важно отметить, что когнитивно-пространственные навыки, сформированные в процессе иммерсивных тренингов, демонстрируют высокий уровень переноса в реальные рабочие ситуации. Корреляционный анализ выявил сильную положительную связь между показателями ситуационной осведомленности после обучения и индексом безопасного поведения в реальных рабочих ситуациях через 3 месяца после обучения ($r=0.76$, $p<0.001$).

Заключение

Проведенное исследование вносит значительный вклад в понимание потенциала виртуальной и дополненной реальности для трансформации процессов обучения технике безопасности на производственных объектах. Результаты экспериментального исследования убедительно доказывают превосходство иммерсивных форматов обучения над традиционными по широкому спектру показателей эффективности: от субъективного восприятия образовательного опыта и усвоения теоретических знаний до долгосрочных изменений в поведении и организационных показателей безопасности. Ключевым результатом исследования является установление статистически значимого влияния VR/AR-тренингов на формирование устойчивых навыков безопасного поведения в реальных рабочих ситуациях. Участники, прошедшие обучение в иммерсивных форматах, демонстрируют на 42,1% более высокие показатели безопасного поведения через 6 месяцев после обучения по сравнению с участниками

традиционных тренингов. Особенно заметные различия наблюдаются в сложных поведенческих паттернах, таких как адаптация к изменению ситуации и эффективная коммуникация о рисках, что имеет критическое значение для предотвращения аварийных ситуаций на производстве. Организационные показатели безопасности на предприятиях, внедривших иммерсивные тренинги, также демонстрируют значительное улучшение: через 12 месяцев после внедрения наблюдается снижение частоты несчастных случаев на 40,5%, частоты микротравм на 39,6%, частоты аварийных ситуаций на 46,5% и экономических потерь от происшествий на 48,6%. Эти результаты подтверждают высокий потенциал VR/AR-технологий для системного повышения уровня безопасности на производстве.

Анализ физиологических реакций и когнитивно-пространственных навыков участников позволил выявить нейропсихологические механизмы, лежащие в основе эффективности иммерсивных тренингов. Более высокий уровень физиологической активации в процессе иммерсивного обучения способствует формированию «эмоциональной памяти» и более глубокой интеграции полученного опыта в когнитивные структуры обучающихся. Значительное улучшение когнитивно-пространственных навыков в результате иммерсивных тренингов обеспечивает более эффективную ориентацию и принятие решений в сложных и потенциально опасных ситуациях.

Экономический анализ показывает, что несмотря на более высокие начальные инвестиции, иммерсивные форматы обучения обеспечивают значительно более высокую рентабельность по сравнению с традиционными форматами. Отношение выгоды к затратам для иммерсивных тренингов (4,28-4,94) почти в два раза превышает аналогичный показатель для традиционного обучения (2,44), а период окупаемости инвестиций составляет менее трех месяцев, что делает внедрение VR/AR-технологий экономически привлекательным решением для предприятий различных отраслей.

Разработанная в рамках исследования концептуальная модель интеграции VR/AR-технологий в корпоративные программы обучения технике безопасности предоставляет целостный методологический подход к внедрению иммерсивных технологий с учетом педагогических, психологических, технологических и организационных аспектов данного процесса. Эта модель может служить практическим руководством для предприятий, планирующих трансформацию системы обучения технике безопасности на основе иммерсивных технологий. Результаты исследования позволяют сформулировать ряд практических рекомендаций для предприятий, внедряющих VR/AR-технологии в программы обучения технике безопасности. Во-первых, наиболее эффективным является комбинированный подход, интегрирующий элементы полностью иммерсивного VR и частично иммерсивного AR в единую образовательную экосистему. Во-вторых, максимальный эффект достигается при тесной интеграции иммерсивных тренингов с реальной производственной практикой и существующими системами управления безопасностью. В-третьих, для обеспечения устойчивых долгосрочных эффектов необходимо организовать регулярные «освежающие» сессии в иммерсивных форматах, предотвращающие угасание сформированных навыков.

Список литературы

1. Birkhead B., Khalil C., Liu X., Conovitz S., Rizzo A., Danovitch I., Bullock K., Spiegel B. Recommendations for methodology of virtual reality clinical trials in health care by an international working group: Iterative study. *JMIR Mental Health*. 2019. № 6(1). pp. 73-119.
2. Branch R.M. *Instructional design: The ADDIE approach*. NY: Springer, 2010. 213 p.
3. Creswell J.W., Creswell J.D. *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. 5th ed. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2018. 273 p.
4. Feng Z., Gonzalez V. A., Amor R., Lovreglio R., Cabrera-Guerrero G. Immersive virtual reality serious games for evacuation training and research: A systematic literature review // *Computers & Education*. 2018. № 127. pp. 252-266.
5. Gao Y., Gonzalez V.A., Yiu T.W. The effectiveness of traditional tools and computer-aided technologies for health and safety training in the construction sector: A systematic review // *Computers & Education*. 2020. № 156. pp. 103-941.

6. Jensen, L., & Konradsen, F. A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training // *Education and information technologies*. 2018. № 23. pp. 1515-1529.
7. Kirkpatrick J.D., Kirkpatrick W.K. Kirkpatrick's four levels of training evaluation. Alexandria: ATD Press, 2016.
8. Li X., Yi W., Chi H.-L., Wang X., Chan A.P.C. A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety // *Automation in construction*. 2018. № 86. pp. 150-162.
9. Lovreglio R., Gonzalez V., Feng Z., Amor R., Spearpoint M., Thomas J., Trotter M., Sacks R. (2021). Prototyping virtual reality serious games for building earthquake preparedness: The Auckland City Hospital case study // *Advanced engineering informatics*. 2021. № 47. pp. 101-200.
10. Makransky G., Petersen G.B. The cognitive affective model of immersive learning (CAMIL): A theoretical research-based model of learning in immersive virtual reality // *Educational psychology review*. 2021. № 33. pp. 937-958.
11. Man S.S., Wen H., So B.C.L., Chan A.H.S. Are virtual reality applications effective for construction safety training and education? A systematic review and meta-analysis // *Journal of safety research*. 2023. № 87. pp. 315-323.
12. Page M.J., McKenzie J.E., Bossuyt P.M., Boutron I., Hoffmann T. C., Mulrow C. D., Shamseer L., Tetzlaff J.M., Akl E.A., Brennan S.E., Chou R., Glanville J., Grimshaw J.M., Hrobjartsson A., Lalu M.M., Li T., Loder E.W., Mayo-Wilson E., McDonald S., Moher D. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews // *BMJ*. 2021. Vol. 372. № 71.
13. Papanastasiou G., Drigas A., Skianis C., Lytras M., Papanastasiou E. Virtual and augmented reality effects on K-12, higher and tertiary education students' twenty-first century skills // *Virtual reality*. 2019. № 23. pp. 425-436.
14. Parong J., Mayer R.E. Learning science in immersive virtual reality // *Journal of educational psychology*. 2021. № 110(6). pp. 785-797.
15. Radianti J., Majchrzak T.A., Fromm J., Wohlgenannt I. A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda // *Computers & Education*. 2020. № 147. pp. 103-778.
16. Safety and health at the heart of the future of work: Building on 100 years of experience. Geneva: International Labour Organization (ILO) Publications, 2023.
17. Sutherland I.E., Bedard L. Development and deployment of VR/AR systems for industrial safety training: A case study in chemical processing // *Journal of educational technology & Society*. 2019. № 22(4). pp.18-31
18. Tan Q., Zhang Y., Li L., Wang S. Analyzing augmented reality (AR) and virtual reality (VR) recent development in education // *Sustainable Operations and Computers*. 2023. № 4(1). pp. 192-205.
19. The Open Group. The TOGAF standard, version 9.2. Reading: The Open Group, 2018.
20. Virtual reality in education market size, share & trends analysis report by component, by technology, by device, by end user (K-12, higher education, vocational training), by region, and segment forecasts, 2023-2030. San Francisco: Grand View Research, 2023.
21. Ростехнадзор. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2023 году. М.: Ростехнадзор, 2024.

Integration of virtual and augmented reality into safety training to simulate emergencies on production sites

Roman V. Sukhov

Specialist-expert
Ufa State Petroleum Technological University
Ufa, Russia
Sukhov-roma@mail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Kamilla R. Nazyrova

Specialist-expert
Ufa State Petroleum Technological University
Ufa, Russia
kamillanazyrova5@gmail.com
ORCID 0000-0000-0000-0000

Zarina R. Islamova

Specialist-expert
Ufa State Petroleum Technological University
Ufa, Russia
Islamovazarina18@gmail.com
ORCID 0000-0000-0000-0000

Vadim M. Latypov

Specialist-expert
Ufa State Petroleum Technological University
Ufa, Russia
Spray.03@mail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Adelina A. Agzamova

Specialist-expert
Ufa State Petroleum Technological University
Ufa, Russia
agzyamova2003@mail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 02.04.2025
Accepted 22.05.2025
Published 30.06.2025

UDC 004.932.3:004.933.1:621.039.3
DOI 10.25726/b9716-5205-7597-a
EDN QOTBRA
VAK 5.8.7. Methodology and technology of vocational education (pedagogical sciences)
OECD 05.03.HE. EDUCATION, SPECIAL

Abstract

The dynamic development of virtual (VR) and augmented reality (AR) technologies opens up new opportunities for the transformation of educational processes in the field of industrial safety. This study is devoted to a comprehensive analysis of the integration of VR/AR technologies into safety training for emergency simulation at production facilities. A systematic analysis of the effectiveness of immersive technologies in comparison with traditional teaching methods has been conducted based on a quasi-experimental study involving 198 employees of enterprises in various industries. The methodological framework included an assessment of the level of assimilation of theoretical knowledge, the development of practical skills and changes in behavioral patterns using a modified four-level Kirkpatrick model. The results of the study demonstrate a statistically significant increase in learning efficiency when using VR/AR: the increase in learning rates amounted to 37.4%, the rate of formation of practical skills increased by 28.9%, and long-term behavioral transfer increased by 42.1% compared to traditional formats. A conceptual model and technological architecture of a unified educational platform for the system integration of immersive technologies into corporate safety training programs has been developed. The theoretical significance of the research lies in the formation of a science-oriented infrastructure for industrial safety through immersive educational technologies. The practical value of the work is determined by the creation of methodological tools for designing effective safety training programs with the integration of VR/AR technologies.

Keywords

virtual reality, augmented reality, safety technology, immersive learning, emergency simulation, industrial safety, technogenic risks.

References

1. Birkhead B., Khalil C., Liu X., Conovitz S., Rizzo A., Danovitch I., Bullock K., Spiegel B. Recommendations for methodology of virtual reality clinical trials in health care by an international working group: Iterative study. *JMIR Mental Health*. 2019. № 6(1). pp. 73-119.
2. Branch R.M. Instructional design: The ADDIE approach. NY: Springer, 2010. 213 p.
3. Creswell J.W., Creswell J.D. Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. 5th ed. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2018. 273 p.
4. Feng Z., Gonzalez V. A., Amor R., Lovreglio R., Cabrera-Guerrero G. Immersive virtual reality serious games for evacuation training and research: A systematic literature review // *Computers & Education*. 2018. № 127. pp. 252-266.
5. Gao Y., Gonzalez V.A., Yiu T.W. The effectiveness of traditional tools and computer-aided technologies for health and safety training in the construction sector: A systematic review // *Computers & Education*. 2020. № 156. pp. 103-941.
6. Jensen, L., & Konradsen, F. A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training // *Education and information technologies*. 2018. № 23. pp. 1515-1529.
7. Kirkpatrick J.D., Kirkpatrick W.K. Kirkpatrick's four levels of training evaluation. Alexandria: ATD Press, 2016.
8. Li X., Yi W., Chi H.-L., Wang X., Chan A.P.C. A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety // *Automation in construction*. 2018. № 86. pp. 150-162.
9. Lovreglio R., Gonzalez V., Feng Z., Amor R., Spearpoint M., Thomas J., Trotter M., Sacks R. (2021). Prototyping virtual reality serious games for building earthquake preparedness: The Auckland City Hospital case study // *Advanced engineering informatics*. 2021. № 47. pp. 101-200.
10. Makransky G., Petersen G.B. The cognitive affective model of immersive learning (CAMIL): A theoretical research-based model of learning in immersive virtual reality // *Educational psychology review*. 2021. № 33. pp. 937-958.
11. Man S.S., Wen H., So B.C.L., Chan A.H.S. Are virtual reality applications effective for construction safety training and education? A systematic review and meta-analysis // *Journal of safety research*. 2023. № 87. pp. 315-323.

12. Page M.J., McKenzie J.E., Bossuyt P.M., Boutron I., Hoffmann T. C., Mulrow C. D., Shamseer L., Tetzlaff J.M., Akl E.A., Brennan S.E., Chou R., Glanville J., Grimshaw J.M., Hrobjartsson A., Lalu M.M., Li T., Loder E.W., Mayo-Wilson E., McDonald S., Moher D. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews // *BMJ*. 2021. Vol. 372. № 71.
13. Papanastasiou G., Drigas A., Skianis C., Lytras M., Papanastasiou E. Virtual and augmented reality effects on K-12, higher and tertiary education students' twenty-first century skills // *Virtual reality*. 2019. № 23. pp. 425-436.
14. Parong J., Mayer R.E. Learning science in immersive virtual reality // *Journal of educational psychology*. 2021. № 110(6). pp. 785-797.
15. Radianti J., Majchrzak T.A., Fromm J., Wohlgenannt I. A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda // *Computers & Education*. 2020. № 147. pp. 103-778.
16. Safety and health at the heart of the future of work: Building on 100 years of experience. Geneva: International Labour Organization (ILO) Publications, 2023.
17. Sutherland I.E., Bedard L. Development and deployment of VR/AR systems for industrial safety training: A case study in chemical processing // *Journal of educational technology & Society*. 2019. № 22(4). pp.18-31
18. Tan Q., Zhang Y., Li L., Wang S. Analyzing augmented reality (AR) and virtual reality (VR) recent development in education // *Sustainable Operations and Computers*. 2023. № 4(1). pp. 192-205.
19. The Open Group. The TOGAF standard, version 9.2. Reading: The Open Group, 2018.
20. Virtual reality in education market size, share & trends analysis report by component, by technology, by device, by end user (K-12, higher education, vocational training), by region, and segment forecasts, 2023-2030. San Francisco: Grand View Research, 2023.
21. Rostekhnadzor. Annual report on the activities of the Federal Service for Environmental, Technological and Atomic Supervision in 2023. Moscow: Rostekhnadzor, 2024.