

УДК 004.9

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0007

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СИСТЕМЫ
ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ШАХТЕРОВ**

© Автор(ы) 2022

SPIN: 8154-6049

AuthorID: 956902

ORCID: 0000-0002-7842-4466

ScopusID: 57196485592

АРХИПОВ Алексей Евгеньевич, аспирант

кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»

Тамбовский государственный технический университет

(392000, Россия, Тамбов, улица Советская, 106, e-mail: alexeiarkh@gmail.com)

SPIN: 7269-8304

AuthorID: 1120215

ORCID: 0000-0002-4741-1451

ScopusID: 57361762500

НАЗАРОВА Александра Олеговна, студентка кафедры

«Системы автоматизированной поддержки принятия решений»

Тамбовский государственный технический университет

(392000, Россия, Тамбов, улица Советская, 106, e-mail: nazarova.al.ol@yandex.ru)

SPIN: 8948-8510

AuthorID: 751895

ORCID: 0000-0002-3450-5213

ScopusID: 56104232400

ОБУХОВ Артем Дмитриевич, доктор технических наук, доцент

кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»

Тамбовский государственный технический университет

(392000, Россия, Тамбов, ул. Советская, 106, e-mail: obuhov.art@gmail.com)

Аннотация. В статье рассмотрена проблема выбора оптимальной системы визуализации и конфигурации виртуальных тренажерных комплексов для обучения и отработки плановых действий на рабочем месте и в условиях нестабильной внешней среды. Расчет сложности разрабатываемого обеспечения исходит из выбора качественного представления визуальной системы и минимальной программно-аппаратной конфигурации, позволяющей выработать необходимые практические навыки для обучаемого, исходя из требований к условиям работы, используемому производственному оборудованию и элементам инфраструктуры. Для комплексной отработки возможных производственных сценариев необходимо разработать математическую модель, предусматривающую множество возможных состояний как пользователя, так и его окружения в виртуальной реальности, после чего поставить и решить задачу структурно-параметрического синтеза системы визуализации. Такой подход обеспечивает отзывчивость системы на действия пользователя, а значит, позволяет обеспечить лучший иммерсивный опыт. Анализ и формализация структуры программно-аппаратного обеспечения рассматривается на примере расчета виртуального тренажерного комплекса для подготовки специалистов горнодобывающей отрасли. Предложены несколько конфигураций, различающихся по компоновке тренажера, и на их основе рассчитаны стоимость и время разработки систем. В результате тестирования фокус-групп на разных конфигурациях предложен оптимальный выбор тренажерного комплекса в соответствии с его эффективностью, стоимостью и временем разработки.

Ключевые слова: структурно-параметрический синтез, виртуальная реальность, трехмерное моделирование, профессиональная подготовка, горнодобывающая промышленность, экономическая эффективность, математическая модель.

**FORMULATION OF THE PROBLEM OF STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS
OF THE VISUALIZATION SYSTEM OF THE SIMULATION COMPLEX FOR TRAINING MINERS**

© The Author(s) 2022

ARKHIPOV Alexey Evgenievich, postgraduate student of the

Department Computer-integrated Systems in Mechanical Engineering

NAZAROVA Alexandra Olegovna, student of the Department Automated Decision Support Systems

OBUKHOV Artem Dmitrievich, doctor of technical sciences,

associate professor of the Department Automated Decision Support Systems

Tambov State Technical University

(392000, Russia, Tambov, st. Soviet, 106,

e-mails: alexeiarrh@gmail.com, nazarova.al.ol@yandex.ru, obuhov.art@gmail.com)

Abstract. The article deals with the problem of choosing the optimal visualization system and configuration of virtual training complexes for training and practicing planned actions at the workplace, and in an unstable environment. The calculation of the complexity of the software being developed is based on the choice of a high-quality representation of the visual system and the minimum software and hardware configuration that allows developing the necessary practical skills for the trainee, based on the requirements for working conditions, used production equipment and infrastructure elements. For a comprehensive development of possible production scenarios, it is necessary to develop a mathematical model that provides for many possible states of both the user and his environment in virtual reality, after which to set and solve the problem of structural-parametric synthesis of the visualization system. This approach ensures that the system is responsive to user actions, which means it allows you to provide a better immersive experience. Analysis and formalization of the structure of software and hardware is considered on the example of calculating a virtual simulator complex for training specialists in the mining industry. Several configurations are proposed, differing in the layout of the simulator, and on their basis, the cost and time of developing systems are calculated. As a result of testing focus groups on different configurations, the optimal choice of the training complex was proposed in accordance with its efficiency, cost and development time.

Keywords: structural-parametric synthesis, virtual reality, 3D modeling, professional training, mining industry, economic efficiency, mathematical model.

Для цитирования: Архипов А.Е. Постановка задачи структурно-параметрического синтеза системы визуализации тренажерного комплекса для подготовки шахтеров / А.Е. Архипов, А.О. Назарова, А.Д. Обухов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 45-50. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0007.

Введение. При реализации тренажерных комплексов (ТК) одной из существенных проблем является выбор программного и аппаратного обеспечения, на котором они основаны [1]. При решении подобных задач зачастую отталкиваются от требований технического задания, выбирая наиболее функциональные компоненты в рамках материальных и временных ресурсов, но не всегда такое решение обеспечивает наилучшие показатели по качеству профессиональной подготовки.

Одним из существенных факторов ТК, влияющим на формирование необходимых компетенций, является качество визуализации рабочего пространства. Это позволяет максимально задействовать зрительную память при отработке моделей поведения при различных штатных и аварийных сценариях производственной деятельности. При разработке программ повышения квалификации с использованием ТК необходимо использовать различные средства визуализации для максимальной эффективности отображения обучающих сценариев и формирования необходимых умений и навыков при оптимальных экономических затратах [2]. Знания возможно формировать как посредством традиционных технологий обучения, так и с использованием технологий цифровизации. Первоначальные умения можно качественно формировать и при использовании обучающих видеороликов, но навыки выполнения трудовых функций и принятия наиболее важных решений целесообразнее развивать в процессе производственной деятельности, в том числе и в виртуальной реальности.

Тренажерная подготовка наиболее востребована и получила ускоренное развитие при подготовке к деятельности в отраслях с высокими рисками, где особенно велика значимость человеческого фактора,

где невозможно обучение на реально действующих объектах: транспорт, оборонный комплекс, работа по ликвидации чрезвычайных ситуаций, медицина, энергетика и т. д. [3-10]. Требования к параметрам системы визуализации (СВ) в каждой из этих областей применения тренажеров могут значительно отличаться. В ряде отраслей точность воспроизведения реальных процессов должна быть максимальной, что предъявляет высокие требования к аппаратному и программному обеспечению, и, как следствие, повышает стоимость системы визуализации [11]. В иных отраслях, напротив, даже низкосортная и упрощенная имитация процессов, происходящих в технической системе, позволит обеспечить требуемый уровень подготовки специалистов с минимальными издержками [12]. Специфика разработки систем визуализации тренажерных комплексов рассматривается в работах следующих ученых: S. Helle, A. Haller, Г.Я. Пятибратов, О.А. Кравченко [13-15]. В результате установлено, что каждая предметная область обладает своей спецификой, оказывающей непосредственное влияние на структуру тренажерного комплекса и его функционирование [16-19].

На основе проведенного анализа ТК средств и технологий визуализации получено, что не поставлена задача выбора компонентов для системы визуализации ТК в формализованном виде, не определены критерии оптимизации, позволяющие среди множества альтернативных вариантов выбрать наилучший.

Целью исследования является повышение экономической эффективности и качества подготовки персонала при использовании тренажерных комплексов за счет выбора оптимальных параметров системы визуализации. Для достижения поставленной цели поставим и решим задачу структурно-параметрического синтеза СВ ТК на основе

предлагаемого математического обеспечения. В качестве предметной области выбраны ТК для подготовки персонала горнодобывающей промышленности (шахтеров). Актуальность данной задачи обусловлена как социальной значимостью стабильной работы данной отрасли для общественной жизни, так и высоким уровнем аварийных ситуаций, вызванных как техногенными факторами, так и природными явлениями, а нередко, и действиями работников, которые либо недостаточно квалифицированы, либо нарушают установленные правила техники безопасности.

Методология. На первом этапе исследования проанализируем и формализуем процессы, протекающие в СВ ТК для подготовки шахтеров. На основе анализа предметной области формируется модель технической системы шахты. В данную модель входит формализованное представление основных объектов шахты, процессов их взаимодействия, а также описание физических процессов, протекающих в данной технической системе. После анализа протекающих в шахте процессов была сформирована структура основных объектов шахты, их состояний, возможных действий обучаемого, а также составлен ряд ограничений на выполнение операций.

Далее на основе перечня операций формируется модель деятельности персонала [20], включающая следующие этапы: обнаружение источника пожара, перемещение к телефону, взятие трубки, оповещение о чрезвычайной ситуации, перемещение к шкафу с огнетушителями, открытие шкафа, взятие огнетушителя в руки, перемещение к источнику пожара на безопасное расстояние, тушение пожара до его полной ликвидации, утилизация огнетушителя, оповещение об успешном устранении пожара по телефону.

На следующем этапе необходимо формализовать непосредственно параметры и структуру СВ ТК. Предлагаемая модель описания и оценки эффективности СВ ТК представляет собой кортеж

$$M_{VS}(TS, P) = \langle HW_{VS}, SW_{VS}, R \rangle, \quad (1)$$

где $HW_{VS} \subset HW$ – множество аппаратных компонентов, используемых в системе визуализации АТК; $HW_{VS} \subset HW$ – множество программных компонентов, используемых в системе визуализации АТК; R – оценка системы визуализации АТК по набору метрик.

Структура системы визуализации определяет набор используемых программных и аппаратных компонентов (модулей m_k), используемых при реализации системы визуализации:

$$S_{VS} \subseteq HW_{VS} \times SW_{VS}, \\ S_{VS} = \{m_k\} \subseteq \{hm_{vs,i}\} \cup \{sm_{vs,i}\}, \quad (2)$$

где S_{VS} – область совместимых программных и аппаратных компонентов из всего множества сочетаний.

При этом структура S_{VS} определяет лишь категории используемых компонентов (например, шлем VR, монитор, контроллеры, трехмерная визуализация), а

не конкретные модели аппаратных компонентов или конечные программные реализации.

Под параметрами системы визуализации будем понимать множество значений, определяющих выбор конкретных моделей аппаратных компонентов MHW_{VS} и настройки программных модулей MSW_{VS} :

$$P_{VS} = \begin{cases} HW_{VS} \rightarrow MHW_{VS} = \{mhm_{vs,i}\}, \\ SW_{VS} \rightarrow MSW_{VS} = \{msm_{vs,i}\}. \end{cases} \quad (3)$$

Каждой модели $mhm_{vs,i}$ можно поставить в соответствие множество R_{HW_i} характеристик, включающее ее потребительские свойства (например, разрешение экрана, вес, стоимость, размеры и так далее). Аналогично для каждого $msm_{vs,i}$ задается R_{SW_i} – множество характеристик программного компонента, включающее его потребительские свойства (например, объем занимаемой памяти, количество полигонов, требования к вычислительной мощности, используемые библиотеки программного кода, язык программирования и так далее).

Совокупность выбранных программных SW_{VS} и аппаратных HW_{VS} компонентов СВ может быть оценена по набору метрик: $R_s, R_p, R_c, R_{IT}, R_e$ – оценки визуализации, стоимость и время разработки, стоимость эксплуатации, время подготовки и количество допущенных ошибок в процессе подготовки с использованием текущей конфигурации СВ.

Рассмотрим данные оценки более подробно. Стоимость разработки программного обеспечения СВ рассчитывается по формуле:

$$R_s(S_{VS}, P_{VS}) = \sum_{i \in S_{VS}, P_{VS}} (sd_i + sa_i) \quad (4)$$

где sd_i – стоимость разработки программного обеспечения i -го компонента СВ, для расчета могут использоваться известные методики, например, СО-СОМО II; sa_i – стоимость разработки дополнительного программного обеспечения для обеспечения взаимосвязанной работоспособности других элементов СВ при использовании i -го компонента СВ. Рассчитывается по тем же методам что и sd_i .

Время разработки (человеко-месяцев) программного обеспечения СВ рассчитывается по формуле:

$$R_t(S_{VS}, P_{VS}) = \sum_{i \in S_{VS}, P_{VS}} (td_i + ta_i) \quad (5)$$

где td_i – время разработки программного обеспечения i -го компонента СВ; ta_i – время разработки дополнительного программного обеспечения для i -го компонента СВ.

Стоимость эксплуатации (рублей) СВ можно определить по формуле:

$$R_c(S_{VS}, P_{VS}) = S_f + S_p + S_a + S_e + S_r + S_{em} + S_{oh} \quad (6)$$

где S_f – затраты на покупку и доставку аппаратных компонентов СВ; S_p – зарплата обслуживающего персонала СВ; S_a – амортизационные отчисления; S_e – затраты на потребление энергии; S_r – затраты на ремонт или восстановление; S_{em} – затраты на приобретение расходных материалов; S_{oh} – накладные расходы.

Время обучения (часов) R_{TT} с использованием

текущей конфигурации СВ ТК:

$$R_{TT}(S_{VS}, P_{VS}) = \frac{\sum_{j=1}^{nP} tt_j(S_{VS}, P_{VS})}{nP} \quad (7)$$

где tt_j – общее время подготовки j -го обучающегося при использовании конфигурации СВ компонента со структурой S_{VS} и параметрами P_{VS} ; nP – общее количество обучающихся.

Количество ошибок R_E в процессе обучения изменяется от 0 до 1 и определяется как среднее из суммы ошибок по всем упражнениям, компетенциям и обучаемым:

$$R_E(S_{VS}, P_{VS}) = \frac{\sum_{j=1}^{nP} \sum_{k=1}^{nK} nE_{jk}(S_{VS}, P_{VS})}{nP \cdot nK \cdot nQ}, \quad (8)$$

где nE_{jk} – количество ошибок, допущенных при выполнении заданий с использованием выбранных структуры и параметров СВ (S_{VS}, P_{VS}) в рамках проверки освоения k -ой компетенции (из всех nK компетенций); nQ – общее количество упражнений.

Задача структурно-параметрического синтеза СВ ТК формулируется следующим образом: определить такое множество элементов структуры $S_{VS}^* \subseteq S_{VS}$ и параметров $P_{VS}^* \subseteq P_{VS}$ аппаратных и программных модулей СВ ТК, при которых оценки системы визуализации достигают экстремальных значений, а именно: стоимость разработки, продолжительность разработки, стоимость эксплуатации, продолжительность подготовки, количество допущенных ошибок – минимума:

$$\{S_{VS}^*, P_{VS}^*\} = \underset{S_{VS}, P_{VS}}{\operatorname{argmin}} \{R_S(S_{VS}, P_{VS}), R_T(S_{VS}, P_{VS}), R_C(S_{VS}, P_{VS}),$$

$$R_{TT}(S_{VS}, P_{VS}), R_E(S_{VS}, P_{VS})\}, \quad (9)$$

при выполнении соотношений (1)-(8) модели описания и оценки эффективности СВ и следующих ограничений:

- на время разработки: $R_T \leq t_T$,
- на продолжительность подготовки: $R_{TT} \leq t_{TR}$,
- на экономические ресурсы: $R_S + R_C \leq E^*$,
- на соответствие осваиваемых компетенций требуемым: $PK \subseteq PK^*$,

где t_T – максимальное время разработки (человеко-месяцев); PK^* – набор необходимых компетенций; t_{TR} – максимально возможная продолжительность процесса подготовки персонала; E^* – максимально допустимые затраты на реализацию и обслуживание системы визуализации.

Так как задача (9) сформулирована как многокритериальная по Парето, при ее решении для конкретной предметной области возможна замена некоторых составляющих критерия оптимальности ее решения ограничениями, т.е. использование метода главного критерия или частичной линейной свертки. В качестве основного критерия выберем совокупные затраты $R_S + R_C$.

Результаты. Рассмотрим решение поставленной задачи. Определим конкретные ограничения:

$$PK^* = (pk_1, pk_2, pk_3) \quad (10)$$

где компетенция pk_i – это умение проводить

комплексный анализ внутренней и внешней среды деятельности, адекватно оценивать свои возможности и планировать оптимальное использование имеющихся ресурсов в сложившейся ситуации; pk_2 – психологическая устойчивость к стрессу, способность преодолевать психологическую инерцию при деятельности в чрезвычайных ситуациях; pk_3 – знание производственного регламента, нормативной документации о правилах деятельности в штатных и аварийных ситуациях.

$$t_T = 8, t_{TR} = 40, E^* = 1500000. \quad (11)$$

Значения t_T и E^* определяются техническим заданием на разработку ТК. Максимальная продолжительность обучения t_{TR} задается типовой программой по курсу «Промышленная безопасность» [21].

В результате структурного синтеза СВ методом перебора получено три возможных варианта компоновки: максимальный, основанный на максимальных оценках компонентов по отображению, взаимодействию и перемещению, включая адаптивную беговую платформу. Второй вариант (оптимальный) является сбалансированным, так как ориентирован на использование максимальных по качеству средств отображения и взаимодействия, но не использует дорогостоящих компонентов перемещения. Третий вариант (минимальный) основан на использовании монитора, клавиатуры и мыши, что значительно снижает стоимость решения. Однако из-за стоимости беговой платформы более миллиона рублей, максимальная конфигурация не принимала участия в дальнейших расчетах. Сравнение оптимальной и минимальной конфигураций по ряду метрик представлено в таблице 1.

Для оценки качества разработанной СВ ТК по метрикам продолжительности подготовки и количества ошибок проведены исследования на фокус-группе из 10 человек (студенты бакалавриата направления «Техносферная безопасность»). В группу входило 8 мужчин и 2 женщины, средний возраст: 19.9 ± 0.36 лет. Выбор участников обусловлен требованиями к целевой аудитории, проходящей первоначальную подготовку в угольно и горнодобывающей отрасли: молодая возрастная группа, преобладание мужчин, наличие базовых навыков и умений в области пожаротушения и охраны труда.

Таблица 1 – Сравнение конфигураций СВ

	Оптимальная	Минимальная
Затраты на разработку (основные)	598 157,00	598 157,00
Затраты на разработку (на детализацию сцены)	277 000,00	216 000,00
Затраты на эксплуатацию	220 000,00	100 000,00
Итоговые затраты R_C	1 095 157,00	914 157,00
Оценка качества компонентов $R_C + R_C$	28,83	14,47
Срок разработки, человеко-месяцев	7,3	6,7

Один этап обучения для группы занимал 1 час, включая инструктаж, подготовку, работу с

тренажером, этап рефлексии и оценки. Значения среднего и минимального качества обучения для каждой подгруппы указано на рисунке 1. Будем считать, что группа обучена, когда количество ошибок (максимальное в группе и среднее) ниже

0.1, что обеспечивает достижение уровня требуемой компетентности и профпригодности работников [21]. Продолжительность обучения оценивалась по времени выполнения не менее 90% заданий (что соответствует количеству ошибок в 0.1).

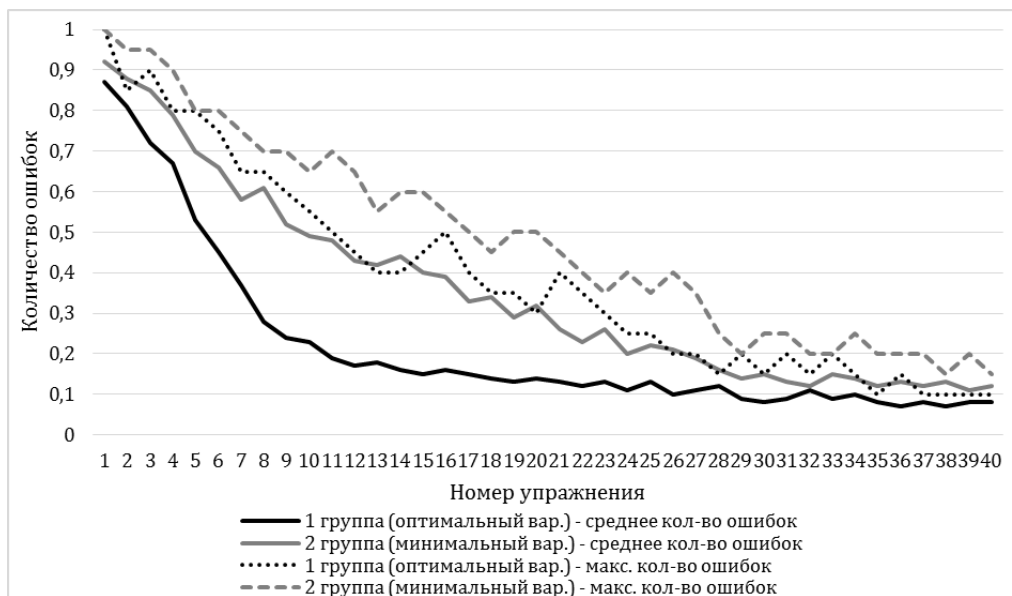


Рисунок 1 – Динамика изменения количества ошибок в двух подгруппах

Обсуждение. При использовании оптимальной конфигурации в среднем группа обучена уже после 28 занятия, полностью – после 34, что удовлетворяет условию задачи. Среднее количество ошибок при достижении ограничения по времени обучения (40 занятий по часу) для оптимальной конфигурации составило 0.08, что также удовлетворяет условиям. Для минимальной конфигурации данный показатель достигнут не был даже после 40 часов обучения. Максимальное количество ошибок при минимальной конфигурации также не удовлетворяет условиям (равно 0.15 на 40-м занятии). Таким образом, задача структурно-параметрического синтеза системы визуализации СВ ТК успешно решена при выборе оптимальной конфигурации. Полученные результаты подтверждают эффективность представленного алгоритма структурно-параметрического синтеза системы визуализации тренажерных комплексов.

Заключение. В работе поставлена и решена задача структурно-параметрического синтеза системы визуализации тренажерных комплексов с применением критериев качества и скорости освоения, стоимости и продолжительности разработки программного обеспечения, качества визуализации, стоимости и затрат на обслуживание системы визуализации, учитывающая ограничения на совместимость компонентов. Разработана модель описания и оценки эффективности системы визуализации для формализации структуры системы и связей между компонентами, свойств и параметров компонентов, влияющих на качественные и количественные характеристики системы визуализации, основанная на формализации

физических процессов в виртуальной среде, учитывающая особенности деятельности персонала при организации процесса освоения на тренажерных комплексах и позволяющая формализовать структуру системы визуализации, определить временные и стоимостные затраты и спрогнозировать возможности системы на этапе проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Трашкова А.В. Выбор способа реализации тренажера-симулятора для системы трехмерного моделирования открытых горных работ / Трашкова А.В., Вицентий А.В. // Труды Кольского научного центра РАН. – 2020. – Т. 11. – №. 8-11. – С. 83-90.
2. Архипов, А.Е. Проектирование системы визуализации тренажерного комплекса на основе компетентного подхода / Архипов, А.Е., Попов, А.И., Обухов, А.Д. // Вопросы журналистики, педагогики, языкознания. – 2020. – Т. 39. – №. 3. – С. 378-390.
3. Климов, А.А. Об особенностях использования тренажеров при реализации образовательных программ (на примере подготовки специалистов для транспорта) / Климов, А.А., Заречкин, Е.Ю., Куприяновский, В.П. // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2019. – Т. 15. – №. 2. – С. 477-487.
4. Злотников К.А. Научно обоснованные рекомендации по синтезу тренажеров с элементами виртуальной реальности / Злотников, К.А., Недеров, В.М., Нестеренко, А.А., Золотарев, А.С. // Экономика. Право. Инновации. – 2020. – №. 3. – С. 43-47.
5. Sharma, S. Improving emergency response training and decision making using a collaborative virtual reality environment for building evacuation / Sharma, S. // International Conference on Human-Computer Interaction. – Springer, Cham, – 2020. – С. 213-224.
6. Обухов, А.Д. Организация взаимодействия с виртуальной реальностью на основе беговой платформы для комплексного обучения специалистов / Обухов, А. Д., Дедов, Д. Л., Вострикова, В. В., Теселкин, Д. В., Суркова, Е. О. // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17. – №. 4. – С. 14-20.

7. Волкова, М.М., Манурова, Р.А., Шайдуллина, Д.Н. Применение виртуальных тренажеров для обучения специалистов нефтегазовой отрасли // Вестник технологического университета. – 2019. – Т. 22. – №. 4. – С. 115-121.

8. Немтинов В.А. Создание виртуальной технологической лаборатории и организация обучения при подготовке кадров высшей квалификации / Немтинов В.А., Манаенков И.М., Немтинова Ю.В. // Высшее образование в России. – 2020. – Т. 29. – № 2. – С. 159-168.

9. Bernardes, S.M.F. Methodological approaches for use virtual reality to develop emergency evacuation simulations for training, in emergency situations / Bernardes, S.M.F., Rebelo, F., Vilar, E., Noriega, P., Borges, T. // Procedia Manufacturing. – 2015. – Т. 3. – С. 6313-6320.

10. Likitweerawong, K. The virtual reality serious game for learning driving skills before taking practical test / Likitweerawong, K., Palee, P. // 2018 International Conference on Digital Arts, Media and Technology (ICDAMT). – IEEE, – 2018. – С. 158-161.

11. Makransky, G. A structural equation modeling investigation of the emotional value of immersive virtual reality in education / Makransky, G., Lilleholt, L. // Educational Technology Research and Development. – 2018. – Т. 66. – №. 5. – С. 1141-1164.

12. Obukhov A. et al. Methodology for the Development of Adaptive Training Systems Based on Neural Network Methods // Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software. – Springer, Cham, 2021. – С. 238-253.

13. Helle, S. Miracle Handbook: Guidelines for Mixed Reality Applications for culture and learning experiences / Helle, S., Lehtonen, T., Woodward, C., Turunen, M., Salmi, H. – 2017.

14. Haller, A. Transshipment Simulators for Training of Ports' Personnel / Haller, A., Putz, L. M., Schauer, O. // Advanced Engineering Forum. – Trans Tech Publications, – 2015. – Т. 13. – С. 277-281.

15. Pyatibratov, G.Y. Design Principles and Implementation of Advanced Simulators for Training Astronauts to Work in Zero or Low Gravity Conditions / Pyatibratov, G.Y., Kravchenko, O.A., Kivo, A.M. // Procedia Engineering. – 2016. – Т. 150. – С. 1410-1414.

16. Kwok P.K. Crisis management training using discrete-event simulation and virtual reality techniques / Kwok, P.K., Yan, M., Chan, B.K., Lau, H.Y. // Computers & Industrial Engineering. – 2019. – Т. 135. – С. 711-722.

18. Li, L. Application of virtual reality technology in clinical medicine / Li, L., Yu, F., Shi, D., Shi, J., Tian, Z., Yang, J., Jiang, Q. // American journal of translational research. – 2017. – Т. 9. – №. 9. – 3867 с.

19. Fombona-Pascual, A. Augmented Reality, a Review of a Way to Represent and Manipulate 3D Chemical Structures / Fombona-Pascual, A., Fombona, J., Vicente, R. // Journal of chemical information and modeling. – 2022. – Т. 62. – №. 8. – С. 1863-1872.

20. Ketelhut, D.J. Studying situated learning in a multiuser virtual environment / Ketelhut, D.J., Dede, C., Clarke, J., Nelson, B., Bowman, C. // Assessment of problem solving using simulations. – Routledge, – 2017. – С. 37-58.

21. Архипов, А.Е. Разработка модели деятельности персонала в тренажерных комплексах / Архипов, А.Е., Сиухин, А.А., Сидорчук, А.О., Скворцов, В.И. // Новые информационные технологии в научных исследованиях. – 2018. – С. 106-107.

22. Седельников, Г.Е. Разработка компьютерного видеоинформационного комплекса непрерывного развития компетентности работников угольных предприятий в сфере охраны труда / Седельников, Г.Е. // дис. – Кемерово : дис. канд. техн. наук. – 2020.

**Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований,
в рамках научного проекта № 20-37-90123
Аспиранты, договор 20-37-90123\20 от 25.08.2020 г.**

Статья поступила в редакцию 25.07.2022

Статья принята к публикации 16.09.2022