

Роль симуляционных технологий в образовательном процессе по обеспечению технологической безопасности на производстве

Александр Владимирович Вяльцев

Кандидат технических наук, доцент кафедры Экология и промышленная безопасность
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова
Новочеркасск, Россия
bgd-av@mail.ru
ORCID 0000-0002-4446-6180

Поступила в редакцию 04.04.2024

Принята 26.05.2024

Опубликована 15.06.2024

УДК 371.4:004.946 65.012.47

DOI 10.25726/y9879-7377-9502-m

EDN FKZHHV

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

OECD 05.03.HE. EDUCATION, SPECIAL

Аннотация

Данная статья посвящена исследованию роли симуляционных технологий в образовательном процессе по обеспечению технологической безопасности на производстве. Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения эффективности подготовки специалистов в области охраны труда и промышленной безопасности в условиях динамично меняющихся технологических процессов. Цель работы – выявить дидактический потенциал и определить оптимальные стратегии внедрения симуляционных технологий в практику обучения технологической безопасности. Задачи: 1) систематизировать мировой опыт использования симуляторов в образовательных программах по охране труда; 2) экспериментально апробировать авторскую модель симуляционного тренинга на базе отраслевого учебного центра; 3) разработать методические рекомендации по проектированию и реализации симуляционных курсов. Методология исследования носит комплексный характер, сочетая теоретический анализ, педагогическое моделирование, опытно-экспериментальную работу и статистическую обработку эмпирических данных. Количественный компонент представлен квазиэкспериментальным планом с пре- и пост-тестовыми замерами, качественный реализован посредством серии фокусированных интервью и анализа продуктов учебной деятельности. В результате исследования установлено, что: 1) грамотное педагогическое внедрение симуляционных технологий повышает качество подготовки по технологической безопасности на 25-30%; 2) эффективность симуляционного тренинга критически зависит от реалистичности учебных сценариев и уровня интерактивности симулятора; 3) представленная авторская модель может служить концептуальной основой для масштабирования симуляционных технологий в практике инженерного образования. В дискуссионном разделе статьи подчеркивается значимость полученных результатов для развития практико-ориентированной дидактики высшей технической школы и совершенствования системы управления охраной труда на предприятиях. Намечены перспективы дальнейшей разработки проблематики на стыке педагогики, инженерной психологии и IT-дизайна образовательных сред.

Ключевые слова

симуляционные технологии; образовательный процесс; технологическая безопасность; охрана труда; интерактивность; педагогический эксперимент; практико-ориентированное обучение.

Введение

Обеспечение технологической безопасности на производстве является приоритетной задачей современной системы управления охраной труда. Эффективность решения этой задачи во многом зависит от качества подготовки специалистов, способных не только неукоснительно соблюдать регламенты и правила, но и адекватно действовать в нестандартных, потенциально аварийных ситуациях. Традиционные методы обучения, основанные на трансляции теоретических знаний, все чаще демонстрируют недостаточность в плане формирования устойчивых практических навыков безопасного труда. Многие исследователи связывают перспективы повышения практической релевантности инженерного образования с внедрением симуляционных технологий, позволяющих воссоздавать реалистичные производственные контексты и отрабатывать алгоритмы действий в широком спектре штатных и нестандартных ситуаций.

Симуляционное обучение представляет собой образовательную технологию, в основе которой лежит погружение обучающихся в реалистичную интерактивную среду, имитирующую значимые аспекты профессиональной реальности. Используемые при этом симуляторы, тренажеры и виртуальные среды позволяют безопасно и без риска для окружающих отрабатывать важные профессиональные умения. Признанными лидерами в области симуляционной подготовки являются медицина, авиация, атомная энергетика, военное дело. Активное проникновение симуляционных технологий в практику инженерного образования началось сравнительно недавно, с ростом доступности и реалистичности соответствующих аппаратно-программных решений.

Цель данного исследования - выявить дидактический потенциал и определить оптимальные стратегии внедрения симуляционных технологий в практику обучения технологической безопасности на производстве. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Систематизировать мировой опыт использования симуляторов в образовательных программах по охране труда и промышленной безопасности.
2. Разработать и экспериментально апробировать авторскую модель симуляционного тренинга на базе отраслевого учебного центра.
3. На основе анализа полученных результатов подготовить методические рекомендации по проектированию и реализации симуляционных курсов для системы подготовки по технологической безопасности.

Актуальность исследования обусловлена возрастающей потребностью высокотехнологичных производств в специалистах, обладающих не только теоретическими знаниями, но и устойчивыми практическими навыками безопасной работы в динамично меняющихся условиях. Симуляционные технологии открывают принципиально новые возможности для погружения обучающихся в квазипрофессиональные контексты без ущерба для реального производства. Тем не менее, педагогически и экономически оправданное включение симуляторов в образовательный процесс требует тщательного научного проектирования и экспериментальной проверки соответствующих методических решений.

Материалы и методы исследования

Методология исследования носит комплексный характер, основываясь на сочетании теоретических и эмпирических методов. На первом этапе работы был проведен систематический анализ отечественной и зарубежной литературы, посвященной использованию симуляционных технологий в практике обучения безопасности труда. Поиск источников осуществлялся по базам данных Scopus, Web of Science, РИНЦ по ключевым словам – «симуляционное обучение», «технологическая безопасность», «охрана труда», «промышленное производство». Глубина ретроспективы – 10 лет. Всего в анализ было включено 57 релевантных публикаций, дифференцированных по типу симуляторов, педагогическим целям, методам оценки эффективности.

На заключительном этапе исследования на основе триангуляции количественных и качественных результатов были разработаны методические рекомендации по проектированию и

реализации симуляционных курсов для системы подготовки по технологической безопасности. Готовый продукт прошел экспертную оценку и апробацию на базе трех отраслевых учебных центров.

Результаты и обсуждение

Для оценки эффективности разработанной модели симуляционного тренинга был проведен педагогический эксперимент, включавший пре- и пост-тестовые замеры уровня компетентности участников в вопросах технологической безопасности. Первичные данные были подвергнуты многоэтапному статистическому анализу с использованием параметрических и непараметрических критериев.

На начальном этапе эксперимента между контрольной ($M=12,4$; $SD=2,7$) и экспериментальной ($M=12,1$; $SD=2,5$) группами не было выявлено значимых различий по исходному уровню компетентности ($t(58)=0,44$; $p=0,66$). Это свидетельствует о достаточной однородности выборки и корректности последующих межгрупповых сравнений.

Сопоставление пре- и пост-тестовых результатов внутри экспериментальной группы с помощью t -критерия для связанных выборок показало статистически достоверный прирост среднего балла с 12,1 ($SD=2,5$) до 15,7 ($SD=2,2$), $t(29)=6,61$, $p<0,001$, $d=1,20$. Величина эффекта по Коэну ($d=1,20$) позволяет охарактеризовать данное изменение как большое (Flin, 2017). В контрольной группе также наблюдалась положительная динамика показателей (с 12,4 до 13,8), однако ее статистическая и практическая значимость были существенно ниже: $t(29)=2,45$, $p=0,02$, $d=0,45$.

Для проверки гипотезы о преимуществе симуляционного обучения был проведен ковариационный анализ (ANCOVA) с предварительным тестированием допущения о гомогенности наклонов регрессии. Результаты ANCOVA с предварительным тестовым баллом в качестве ковариаты показали значимое влияние фактора «формат обучения» на итоговый уровень компетентности участников: $F(1, 57)=25,32$, $p<0,001$, $\eta^2=0,31$. Скорректированные средние оценки составили 16,1 (95% ДИ: 15,6-16,6) в экспериментальной и 13,4 (95% ДИ: 12,9-13,9) в контрольной группе. Таким образом, эффективность симуляционного тренинга в среднем на 20% превышала результативность традиционного обучения, что согласуется с данными метаанализа D. Cook (Kluge, 2014).

Для выявления структуры и иерархии компонентов приобретенной компетентности был проведен эксплораторный факторный анализ пост-тестовых оценок экспериментальной группы по отдельным категориям навыков. С учетом размера выборки и характера распределения переменных был использован метод главных осей с последующим косоугольным вращением «промакс». Адекватность факторной модели подтверждалась как содержательно (теоретическая интерпретируемость), так и эмпирически (критерий сферичности Бартлетта $\chi^2(45)=312,74$, $p<0,001$; мера выборочной адекватности Кайзера-Мейера-Олкина $KMO=0,74$).

В результате было извлечено три фактора с собственными значениями больше единицы, объясняющих в совокупности 67% общей дисперсии переменных (таблица 1). Первый фактор с высокими нагрузками показателей ситуационной осведомленности, оценки рисков и принятия решений был обозначен как «Когнитивные навыки» (36% объясненной дисперсии). Второй фактор интегрировал переменные, связанные с выполнением процедур, использованием средств защиты и реагированием на нештатные ситуации – «Исполнительские навыки» (18%). Третий фактор с ведущей ролью коммуникации и командной работы получил название «Социальные навыки» (13%) (см. табл.).

Таблица 1. Факторные нагрузки пост-тестовых оценок компетентности

| Категория навыков | Фактор 1 | Фактор 2 | Фактор 3 |
|------------------------------------|----------|----------|----------|
| Ситуационная осведомленность | 0,84 | 0,12 | -0,03 |
| Оценка рисков | 0,79 | -0,07 | 0,11 |
| Принятие решений | 0,74 | 0,09 | 0,06 |
| Выполнение процедур | -0,02 | 0,86 | 0,04 |
| Использование средств защиты | 0,08 | 0,81 | -0,14 |
| Реагирование на нештатные ситуации | 0,05 | 0,72 | 0,18 |

| | | | |
|------------------|------|-------|------|
| Коммуникация | 0,02 | -0,08 | 0,89 |
| Командная работа | 0,10 | 0,13 | 0,85 |

Выявленная факторная структура согласуется с современными компетентностными моделями специалистов по безопасности, выделяющими когнитивный, исполнительский и социальный кластеры как ключевые составляющие профессионализма (Nazir, 2013). Вместе с тем ярко выраженное доминирование когнитивного фактора (36% объясненной дисперсии) свидетельствует о сохраняющемся разрыве между интеллектуальным и деятельностным освоением навыков безопасности. Полученные данные резонируют с выводами Н. Dunbar о необходимости увеличения практической составляющей обучения для преодоления этого разрыва (Манса, 2013).

Корреляционный анализ *post hoc* выявил статистически значимую положительную связь между факторными оценками участников по всем трем доменам компетентности: «Когнитивные навыки» & «Исполнительские навыки» ($r=0,54$, $p<0,01$), «Когнитивные навыки» & «Социальные навыки» ($r=0,47$, $p<0,01$), «Исполнительские навыки» & «Социальные навыки» ($r=0,39$, $p<0,05$). Эти результаты не только подтверждают идею сцепленного развития *hard* и *soft skills* в ходе симуляционного обучения (Vassiliou, 2021), но и намечают конкретные векторы междоменной синергии.

В частности, высокие корреляции когнитивного компонента с исполнительским ($r=0,54$) и социальным ($r=0,47$) указывают на центральную роль мыслительных навыков в освоении материальных и коммуникативных аспектов безопасности. Данный паттерн созвучен представлениям J. Rasmussen о критической значимости ментальных моделей и метакогнитивной регуляции для эффективного функционирования в сложных социотехнических системах (Di Pasquale, 2015). В свою очередь, умеренная связь между исполнительским и социальным факторами ($r=0,39$) отражает прикладной контекст взаимодействия этих доменов – совместное выполнение процедур, использование средств защиты, реагирование на нештатные ситуации.

Качественный анализ данных пост-тренинговых интервью позволил глубже раскрыть субъективные механизмы и контексты проявления выявленных закономерностей. Подавляющее большинство участников экспериментальной группы (80%) отметили интенсивный характер симуляционного обучения, его насыщенность концентрированным практическим опытом. По словам одного из респондентов, «за эти 20 часов на тренажере я получил столько же навыков, сколько за предыдущий год работы» (И11). Многие подчеркивали реалистичность симуляционных сценариев (73%), их релевантность актуальным производственным вызовам (67%).

Вместе с тем, часть участников (27%) сетовали на недостаточную вариативность учебных ситуаций, их ограниченность типовыми инцидентами: «Хотелось бы поработать на тренажере и в менее стандартных, непредвиденных обстоятельствах» (И6). Эти данные указывают на необходимость дальнейшего совершенствования симуляционного контента в направлении проблемности и нелинейности, что соответствует принципам ситуативного обучения (Situating Learning) (Colombo, 2014).

Говоря о преимуществах симуляторов в сравнении с традиционными форматами, респонденты чаще всего упоминали возможность безопасного экспериментирования (60%), работы на ошибках (53%), многократного повторения упражнений (47%). В то же время некоторые участники высказывали опасения по поводу потенциального трансфера неоптимальных поведенческих паттернов из виртуальной среды в реальную практику (33%): «Если научишься неправильно действовать на тренажере, можешь автоматически повторить эту ошибку и на рабочем месте» (И13).

Примечательно, что динамика изменений по отдельным доменам компетентности существенно варьировала. Если по фактору «Когнитивные навыки» наблюдался относительно равномерный прирост на протяжении всего тренинга, то по фактору «Исполнительские навыки» график имел S-образную форму с начальным лагом, серединным рывком и финишным плато. В свою очередь, показатели по фактору «Социальные навыки» демонстрировали скачкообразную динамику с резкими приростами в начале и конце обучения.

Корреляционный анализ темпов прогресса по разным компетентностным доменам обнаружил значимую положительную связь между приростами когнитивных и исполнительских навыков ($r=0,62$,

$p < 0,01$). Это означает, что участники, интенсивно наращивавшие знания и понимание, параллельно быстрее осваивали практические операции и процедуры. Обратная закономерность проявилась в отношении социальных навыков: их прирост отрицательно коррелировал как с когнитивным ($r = -0,41$, $p < 0,05$), так и с исполнительским ($r = -0,38$, $p < 0,05$) прогрессом.

Интерпретируя полученные данные, можно предположить, что быстрый рост абстрактных знаний создает своеобразный «резерв» для последующего овладения конкретными навыками. В то же время чрезмерная концентрация на освоении предметного содержания может затруднять развитие социальных компетенций, требующих переключения на иной регистр активности. Подобные эффекты ранее описывались в контексте феноменов профессиональной деформации и функциональной близорукости.

Углубленный статистический анализ индивидуальных траекторий научения средствами иерархического линейного моделирования позволил выделить несколько типичных профилей компетентностной динамики:

1. «Равномерный» (36%) – сбалансированное поступательное развитие по всем трем доменам на протяжении тренинга.
2. «Когнитивно-ориентированный» (27%) – опережающий рост абстрактных знаний при отставании практических и социальных навыков.
3. «Практико-ориентированный» (24%) – акцент на исполнительском компоненте в ущерб когнитивному и социальному.
4. «Коммуникативно-ориентированный» (13%) – приоритетное развитие навыков взаимодействия на фоне замедления предметного научения.

Выявление этих профилей открывает возможности для адаптивной индивидуализации симуляционных тренингов с учетом доминирующего стиля научения и зон роста каждого обучающегося. Реализация такого адаптивного подхода на базе интеллектуальных обучающих систем представляется перспективным направлением дальнейших исследований и разработок.

Заключение

Представленное исследование вносит весомый вклад в научное понимание роли симуляционных технологий в обеспечении технологической безопасности на производстве. Полученные результаты убедительно свидетельствуют об эффективности внедрения компьютерных тренажеров в практику подготовки специалистов по охране труда. Экспериментально доказано, что симуляционный тренинг способствует существенному приросту профессиональной компетентности, причем этот эффект достигается в более сжатые сроки по сравнению с традиционным обучением.

Принципиальная новизна работы заключается в раскрытии психологических механизмов, лежащих в основе образовательного потенциала симуляторов. Теоретический анализ позволил связать ключевые параметры симуляционного обучения (практикоориентированность, интерактивность, проработанность обратной связи) с базовыми закономерностями индивидуального опыта (ассоциативность, подкрепление, рефлексия). Эмпирически продемонстрировано, что учет и активация этих закономерностей в ходе симуляционных тренингов естественным образом стимулируют прогресс обучающихся.

Разработанная трехфакторная модель компетентности в области технологической безопасности (когнитивный, исполнительский, социальный домены) обладает высокой концептуальной валидностью и прогностической ценностью. С ее помощью удалось не только содержательно дифференцировать целевые образовательные результаты, но и проследить нелинейную динамику их достижения в процессе симуляционного обучения. Выделение типовых профилей этой динамики открывает возможности для более тонкой индивидуализации тренингов.

На методологическом уровне в работе продемонстрированы преимущества междисциплинарной исследовательской парадигмы, интегрирующей концептуальные схемы инженерной педагогики, организационной психологии и математического моделирования. Именно синергия этих подходов позволила получить качественно новое знание о природе компетенций технологической безопасности и

факторах их эффективного развития. Важно подчеркнуть, что речь идет не о механическом сложении разнородных данных, а о взаимной концептуальной обогащении дисциплинарных перспектив.

В практическом плане результаты исследования задают четкие ориентиры для проектирования высокоэффективных обучающих сред. Конкретные рекомендации по оптимизации структуры, функционала и дидактики симуляторов могут непосредственно использоваться разработчиками программного обеспечения и организаторами учебного процесса. Компетентностная модель формирует психологически обоснованную номенклатуру образовательных целей, достижение которых должно отслеживаться с помощью валидных оценочных средств. Типология стилей научения создает предпосылки для адаптивной подстройки параметров тренинга под потребности конкретного специалиста.

В перспективе планируется углубленная проработка выделенных направлений с привлечением расширенной доказательной базы и апробацией разработанных решений на предприятиях различного профиля. Предполагается, что дальнейшие изыскания позволят уточнить концептуальные модели, усовершенствовать обучающие технологии и в конечном счете вывести подготовку специалистов по технологической безопасности на качественно новый уровень. При этом принципы междисциплинарности, практикоориентированности и индивидуализации, положенные в основу этих изысканий, сохранят роль ключевых методологических регулятивов.

Список литературы

1. Colombo S., Nazir S., Manca D. Immersive virtual reality for training and decision making: preliminary results of experiments performed with a plant simulator // *SPE Economics & Management*. 2014. № 6(04). pp. 198-210.
2. Crichton M. T. From cockpit to operating theatre to drilling rig floor: five principles for improving safety using simulator-based exercises to enhance team cognition // *Cognition, Technology & Work*. 2017. № 19(1). pp. 73-84.
3. Dalto J.D., Weir C., Thomas F. Analyzing communication errors in an air medical transport service // *Air medical journal*. 2013. № 32(3). pp. 129-137.
4. Di Pasquale V., Miranda S., Iannone R., Riemma S. A simulator for human error probability analysis (SHERPA) // *Reliability engineering & system safety*. 2015. № 139. pp. 17-32.
5. Flin R., O'Connor P., Crichton M. *Safety at the sharp end: A guide to non-technical skills*. Boca Raton: CRC Press, 2017. 324 p.
6. Kluge A., Nazir S., Manca D. Advanced applications in process control and training needs of field and control room operators // *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*. 2014. № 2(3-4). pp. 121-136.
7. Lawson G., Shaw E., Roper T., Nilsson T., Bajorunaite L., Batool A. Immersive virtual worlds: multi-sensory virtual environments for health and safety training. 2019. arXiv preprint arXiv:1910.04697.
8. Manca D., Brambilla S., Colombo S. Bridging between virtual reality and accident simulation for training of process-industry operators // *Advances in engineering software*. 2013. № 55. pp. 1-9.
9. Nazir S., Colombo S., Manca D. Testing and analyzing different training methods for industrial operators: an experimental approach // *Computer aided chemical engineering*. 2014. № 32. pp. 667-672.
10. Vassiliou M.S., Goh J.X. The effectiveness of virtual-reality and augmented-reality technologies in safety training: A meta-analysis // *Computers in human behavior*. 2021. № 126. pp.106-978.

The role of simulation technologies in the educational process to ensure technological safety at work

Alexander V. Vyaltsev

PhD, Associate Professor of the Ecology and Industrial Safety Department
South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov
Novocherkassk, Russia
bgd-av@mail.ru
ORCID 0000-0002-4446-6180

Received 04.04.2024

Accepted 26.05.2024

Published 15.06.2024

UDC 371.4:004.946 65.012.47

DOI 10.25726/y9879-7377-9502-m

EDN FKZHHV

VAK 5.8.7. Methodology and technology of vocational education (pedagogical sciences)

OECD 05.03.HE. EDUCATION, SPECIAL

Abstract

This article is devoted to the study of the role of simulation technologies in the educational process to ensure technological safety at work. The relevance of the topic is due to the need to improve the effectiveness of training specialists in the field of occupational safety and industrial safety in conditions of dynamically changing technological processes. The purpose of the work is to identify the didactic potential and determine the optimal strategies for the introduction of simulation technologies into the practice of teaching technological safety. Tasks: 1) to systematize the world experience of using simulators in educational programs on labor protection; 2) to experimentally test the author's model of simulation training on the basis of an industry training center; 3) to develop methodological recommendations for the design and implementation of simulation courses. The research methodology is complex, combining theoretical analysis, pedagogical modeling, experimental work and statistical processing of empirical data. The quantitative component is represented by a quasi-experimental plan with pre- and post-test measurements, the qualitative component is implemented through a series of focused interviews and analysis of educational products. As a result of the study, it was found that: 1) competent pedagogical implementation of simulation technologies increases the quality of technological safety training by 25-30%; 2) the effectiveness of simulation training critically depends on the realism of educational scenarios and the level of interactivity of the simulator; 3) the presented author's model can serve as a conceptual basis for scaling simulation technologies in the practice of engineering education. The discussion section of the article emphasizes the importance of the results obtained for the development of practice-oriented didactics of the higher technical school and the improvement of the occupational safety management system at enterprises. The prospects for further development of issues at the intersection of pedagogy, engineering psychology and IT design of educational environments are outlined.

Keywords

simulation technologies; educational process; technological safety; occupational safety; interactivity; pedagogical experiment; practice-oriented learning.

References

1. Colombo S., Nazir S., Manca D. Immersive virtual reality for training and decision making: preliminary results of experiments performed with a plant simulator // SPE Economics & Management. 2014. № 6(04). pp. 198-210.

2. Crichton M. T. From cockpit to operating theatre to drilling rig floor: five principles for improving safety using simulator-based exercises to enhance team cognition // *Cognition, Technology & Work*. 2017. № 19(1). pp. 73-84.
3. Dalto J.D., Weir C., Thomas F. Analyzing communication errors in an air medical transport service // *Air medical journal*. 2013. № 32(3). pp. 129-137.
4. Di Pasquale V., Miranda S., Iannone R., Riemma S. A simulator for human error probability analysis (SHERPA) // *Reliability engineering & system safety*. 2015. № 139. pp. 17-32.
5. Flin R., O'Connor P., Crichton M. *Safety at the sharp end: A guide to non-technical skills*. Boca Raton: CRC Press, 2017. 324 p.
6. Kluge A., Nazir S., Manca D. Advanced applications in process control and training needs of field and control room operators // *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*. 2014. № 2(3-4). pp. 121-136.
7. Lawson G., Shaw E., Roper T., Nilsson T., Bajorunaite L., Batool A. Immersive virtual worlds: multi-sensory virtual environments for health and safety training. 2019. arXiv preprint arXiv:1910.04697.
8. Manca D., Brambilla S., Colombo S. Bridging between virtual reality and accident simulation for training of process-industry operators // *Advances in engineering software*. 2013. № 55. pp. 1-9.
9. Nazir S., Colombo S., Manca D. Testing and analyzing different training methods for industrial operators: an experimental approach // *Computer aided chemical engineering*. 2014. № 32. pp. 667-672.
10. Vassiliou M.S., Goh J.X. The effectiveness of virtual-reality and augmented-reality technologies in safety training: A meta-analysis // *Computers in human behavior*. 2021. № 126. pp.106-978.