

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 004.896

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-438-453



Использование цифровых двойников в обучении специалистов по обслуживанию нефтегазовых месторождений

© 2026, Е.К. Терешко ✉, М.Р. Малащенко, И.Н. Криони

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Рассматривается использование цифровых двойников при обучении студентов и начинающих работников по обслуживанию нефтегазовых месторождений. Актуальность темы определяется возрастающими требованиями к промышленной безопасности и надёжности работы производственных объектов, что ограничивает возможности применения традиционных форм обучения, предполагающих непосредственное присутствие на площадке. В этих условиях возрастает роль цифровых технологий, позволяющих организовать обучение в виртуальной среде без прямого участия в технологических процессах. Особое внимание уделяется использованию цифровых тренажёров, формируемых на основе технологий цифрового моделирования. Такие решения могут позволить обеспечить безопасную отработку профессиональных навыков и расширить возможности подготовки специалистов в условиях действующего производства и в образовательных организациях. Отмечаются ограничения внедрения цифровых решений, связанные с высокой ресурсоёмкостью моделей, зависимостью от инфраструктуры передачи данных, необходимостью поддержания актуальности цифровых представлений объектов. Цель исследования состоит в формировании методики использования цифровых двойников в составе обучающей среды, основанной на применении онтологически управляемых сценариев. Анализируются способы создания цифровых тренажёров, включая использование трёхмерного моделирования и технологий лазерного сканирования; предлагается структура цифрового тренажёра как элемента образовательной инфраструктуры. Внедрение предложенного подхода может повысить качество практической подготовки персонала, снизить вероятность ошибок при выполнении технологических операций и создать условия для повышения уровня промышленной безопасности.

Ключевые слова: нефтегазовое месторождение, цифровой двойник, обучение специалистов, онтология, сценарное обучение, цифровой тренажёр.

Цитирование: Терешко Е.К., Малащенко М.Р., Криони И.Н. Использование цифровых двойников в обучении специалистов по обслуживанию нефтегазовых месторождений. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №3(61). С.438-453. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-438-453.

Вклад авторов: Терешко Е.К. – постановка задачи исследования, концепция, методология; Малащенко М.Р. – сбор и систематизация данных, анализ аналогов, визуализация данных; Криони И.Н. – разработка онтологической модели и интеграции «цифровой двойник–онтология–симулятор».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В нефтегазовой отрасли (НГО) повышаются требования к промышленной безопасности (ПБ) и надёжности эксплуатации на объектах нефтегазовых месторождений (НГМ) [1]. Большое количество сложного технологического оборудования и линейных коммуникаций, их пространственная насыщенность и потенциальная аварийность делают обучение с непосредственным доступом на площадку невозможным даже для действующих сотрудников

нефтегазодобывающих компаний [2]. Аналогичные ограничения существуют и в подготовке специалистов НГО в университетах, где студенты обучаются на лабораторных макетах и не имеют доступа к месторождениям [3, 4]. Внедрение цифровых тренажёров (ЦТ) на базе цифровых двойников (ЦД) в образовательные программы, как инструмента для виртуальной практики, поможет решить данную проблему [5].

Использование ЦД в обучении позволяет перенести практическую отработку навыков в контролируемую виртуальную среду, минимизируя риски для персонала и исключая необходимость вмешательства в производственный процесс. Применение ЦТ в университетах может позволить студентам осваивать сложные процессы без риска и затрат на выезды на объекты [6, 7]. Опыт внедрения подобных решений выявляет ряд существенных ограничений: высокая ресурсоёмкость трёхмерных (3D) моделей [8]; ограниченная автономность мобильных устройств при эксплуатации в сложных климатических условиях; зависимость от качества связи при использовании серверной архитектуры [9]; отсутствие единых стандартов хранения и обмена данными; поддержание актуальности цифровой модели в условиях модернизации оборудования [10].

Недостаточно разработаны основы системного использования ЦД в образовательном процессе. Научная проблема заключается в отсутствии методики интеграции ЦД в систему подготовки и повышения квалификации персонала. Практическая задача связана с необходимостью повышения эффективности обучения при сокращении производственных рисков, временных и организационных затрат.

Гипотеза исследования заключается в том, что системное использование актуализированного ЦД НГМ в ЦТ позволит повысить уровень практической подготовки работников, сократить количество ошибок при выполнении производственных операций и обеспечить дополнительный резерв повышения ПБ.

Цель исследования состоит в разработке методики использования ЦД НГМ для обучения персонала на основе онтологически управляемых сценариев.

1 Обзор литературы

Интерес к ЦД в промышленности связан с развитием сенсорных технологий, систем обработки больших данных и инструментов 3D моделирования [11]. ЦД определяется как динамическая информационная модель объекта, способная отражать его текущее состояние и поведение во времени. На начальном этапе ЦД рассматривались как средство анализа и оптимизации режимов работы оборудования. В настоящее время их применение расширилось и включает задачи организационного управления и подготовки персонала [12, 13].

Внедрение ЦД в машиностроении позволяет моделировать загрузку оборудования, выявлять «узкие места» и прогнозировать отказоустойчивость узлов. Такие модели используются как основа для создания учебных симуляторов операторов станков и автоматизированных комплексов [14]. В энергетической отрасли ЦД используются для мониторинга оборудования, ЦТ полезны для обучения действиям в аварийных ситуациях [15]. В строительстве базой для формирования ЦД служат BIM-модели, использование которых в образовательных целях обеспечивает наглядное представление о конструктивных элементах, формируя у обучающихся целостное понимание структуры и принципов функционирования объектов [16].

На НГМ ЦД используются для мониторинга эксплуатации [17]. На основе ЦД создаются цифровые обучающие платформы (ЦОП), которые позволяют моделировать технологические операции [18]. Среди разработанных программных комплексов можно выделить следующие: комплекс для установки первичной переработки нефти с 3D-моделями и моделирова-

нием ошибок¹, тренажёры по безопасности объектов добычи, транспортировки и переработки, охватывающие резервуарные парки, компрессорные станции и трубопроводы²; тренажёры кустовых площадок (КП)³ с математическими моделями и поддержкой виртуальной реальности (VR), позволяющие отрабатывать диагностику и аварийные ситуации. Каждый из этих комплексов имеет ограничения: узкую специализацию, высокую стоимость внедрения, требования к использованию мощного оборудования.

В университетах ЦОП и мобильные приложения используются для моделирования месторождений как часть смешанного обучения, дополняя традиционные лабораторные занятия и повышая мотивацию студентов [19, 20]. В сценариях обучения предусматриваются нормальные и аварийные режимы, которые невозможно выполнить на производстве. Мобильные приложения тренажёров способны генерировать индивидуальные задания, используются для подготовки к лабораторным работам и для самостоятельной работы [20].

ВМ-модель, как виртуальная копия НГМ, может стать основой для создания ЦОП [21]. Для использования в целях обучения необходима доработка моделей – допускается упростить геометрию и сократить количество объектов, выстроить уровни детализации [22]. Чтобы модель стала интерактивной, необходимы её интеграция со специализированными программными средами, настройка правил поведения отдельных элементов (например, указать свойства потоков углеводородов, параметры процессов запуска и останова оборудования и пр.) [16]. В результате ВМ-модель превратится в интерактивную среду, в которой можно разрабатывать сценарии для обучения.

Другой подход к созданию ЦТ предполагает использование пространственных данных, полученных путём лазерного сканирования реального объекта, в результате которого формируется массив пространственных данных, содержащий координаты большого количества точек, и позволяющий получить детализированное представление геометрии объекта [23]. Требуется дополнительная обработка данных – преобразование геометрии объектов и оптимизация количества элементов. Разработанная модель интегрируется в программные платформы виртуальной или дополненной реальности [24]. Использование технологий сканирования позволяет создавать цифровые копии реальных объектов с высокой степенью достоверности.

Проведённый обзор позволяет сделать вывод о наличии трудностей при внедрении ЦД как обучающих инструментов на НГМ: высокая стоимость разработки и внедрения, отсутствие унифицированных стандартов к конфигурации цифровых моделей, сложности в актуализации данных.

2 Методика использования цифрового двойника в целях обучения

В таблице 1 представлены существующие технические решения ЦТ, достоинства и недостатки, на основании которых предложена методика использования ЦД НГМ в целях обучения, включающая следующие этапы.

Этап 1. Исследование возможностей создания ЦТ на базе 3D модели объекта.

Этап 2. Исследование возможностей создания ЦТ с помощью лазерного сканирования.

Этап 3. Описание структуры ЦД и его применения в образовательном процессе. На данном этапе разработаны сценарии: знакомства с оборудованием; обслуживания технологического процесса; отработки действий в аварийных ситуациях; моделирования управленческого воз-

¹ См. <https://maikop.fgoskomplekt.ru/catalog/vr-i-ar-dlya-obrazovaniya/vr-trenazhery-i-laboratorii-/neft-i-gaz1/programmnyj-kompleks-pererabotka-nefti-i-gaza-simulyacionnyj-trenazher-tehnologicheskoy-ustanovki-pervichnoj-pererabotki-nefti/>.

² См. <https://lcontent.ru/razrabotan-kompyuternyj-trenazhernyj-kompleks-bezopasnost-obektov-dobychi-transportirovki-pererabotki-nefti-i-gaza/>.

³ См. <https://galacom.ru/trenazher-kustovaja-ploshhadka-dobyvajushhih-i-nagnetatelnyh-skvazhin-operator-dobychi/>.

действия. Разработана модель взаимодействия обучающихся и наставников с ЦТ НГМ, схема взаимодействия ЦД, симулятора и онтологии, как семантического слоя ЦТ. Разработано онтологическое представление сценария, которое включает следующие этапы.

3.1. Определение основных целей и контекстов создания онтологии.

3.2. Систематизация информации для построения онтологии (анализ и группировка данных для выделения основных понятий, классов объектов, экземпляров, атрибутов и пр.).

3.3. Построение онтологической схемы сценария с визуализацией классов, экземпляров, отношений и атрибутов.

Этап 4. Выявление ограничений внедрения цифровых решений на объектах НГО (группы ограничений для внедрения ЦОП: технические, организационные и экономические).

Таблица 1 – Сравнение подходов к созданию цифрового тренажёра

Критерий сравнения	Тренажёр на основе 3D-модели	Тренажёр на основе облака точек
Источник данных	Проектная документация и CAD/BIM-модели	Лазерное сканирование
Характер модели	Отражает проектную структуру объекта	Отражает фактическое состояние объекта
Объём исходных данных	Относительно небольшой	Очень большой объём пространственных данных
Требования к оборудованию	Программные средства 3D-моделирования	Лазерные сканеры и специализированные системы обработки
Сложность подготовки модели	Умеренная	Высокая из-за обработки облака точек
Точность соответствия реальному объекту	Ограничена проектными параметрами	Высокая, соответствует реальному состоянию
Основные достоинства	Гибкость разработки и возможность раннего создания	Реалистичность и актуальность модели
Основные недостатки	Возможны расхождения с реальной конфигурацией	Значительные трудозатраты на обработку данных

3 Концептуальный проект цифрового тренажёра

ЦТ, создаваемый на основе ЦД НГМ, предназначен для: изучения персоналом состава оборудования технологической площадки месторождения; отработки действий по обеспечению технологического процесса на данной площадке; отработки аварийных ситуаций; апробации сценариев управления.

ЦТ может включать следующие площадки на месторождении: административно-бытовой комплекс (АБК); блочная кустовая насосная станция (БКНС); вакуумная компрессорная станция (ВКС); вахтовый жилой комплекс (ВЖК); дожимная насосная станция (ДНС); установка комплексной подготовки газа (УКПГ); установка подготовки нефти (УПН). Каждая площадка включает уникальный набор элементов и оборудования. Для каждой площадки разрабатывается следующий перечень онтологически управляемых сценариев обучения.

Знакомство с оборудованием. На начальном уровне ЦТ должен помочь научить обучающегося разбираться в составе оборудования, пространственной структуре площадки и назначении её основных элементов. Пользователь изучает размещение зданий, сооружений, технологических узлов, инженерных систем, маршруты перемещения по площадке, а также функциональное назначение оборудования.

Выполнение типовых операций с оборудованием. Сценарии такого типа могут включать обход оборудования, контроль состояния его узлов, выполнение операций его включения и отключения, проверку его параметров, работу с арматурой, иные действия, предусмотренные регламентом.

Отработка действий в нештатных и аварийных ситуациях. Отрабатываются действия при отказе оборудования, возгорании, перебоях с подачей электроэнергии и прочими действиями, влияющими на безопасность и устойчивость технологического процесса.

Отработка управленческих сценариев. Этот уровень подготовки связан с моделированием ситуаций, в которых требуется принять решение, влияющее на работу площадки. Сценарий ориентирован на мастеров, начальников смен, диспетчеров, технологов и других специалистов, принимающих решения.

Применение ЦД в обучении может быть организовано по уровням сложности: от базового знакомства с объектом до имитации сложных управленческих и аварийных ситуаций. Это позволяет соотнести учебные сценарии с квалификацией и функциями конкретных категорий персонала.

4 Требования к архитектуре цифрового тренажёра

Программная среда, на базе которой реализуется ЦТ, должна позволять задавать сценарную логику, то есть описывать последовательность событий, условия выполнения операций, варианты развития нештатных ситуаций и критерии оценки действий обучаемого. Это предполагает использование программных платформ, сочетающих инструменты трёхмерной графики, интерфейсного проектирования и настройки интерактивных сценариев. Важным условием является возможность актуализации модели: ЦТ должен поддерживать обновление 3D модели и атрибутивной информации, связанной с оборудованием и сценариями.

Схема взаимодействия обучающегося и наставника с ЦТ в процессе обучения представлена на рисунке 1.

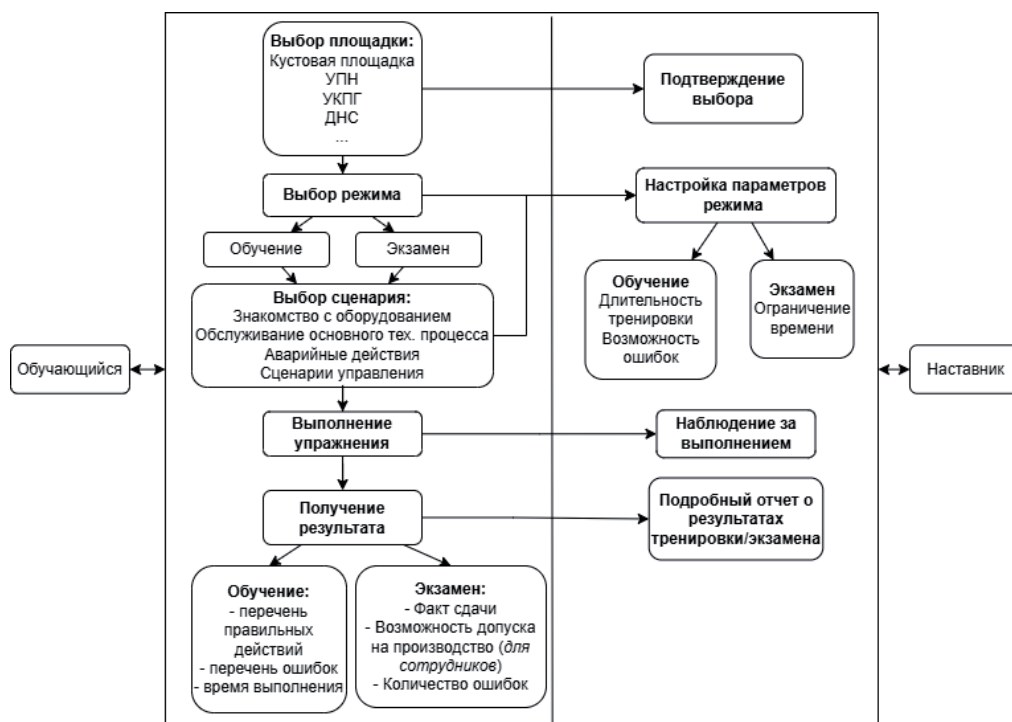


Рисунок 1 – Схема взаимодействия обучающегося и наставника с цифровым тренажёром

Пользователь проходит авторизацию, получает доступ к набору площадок и действий, которые соответствуют его роли (обучающийся или наставник), выбирает конкретную площадку и запускает учебный (или экзаменационный) модуль. Обучаемый выполняет предусмотренные сценарием действия, а система фиксирует их, сопоставляя с эталонной последовательностью. Пользователь получает сообщения о допущенных ошибках, нарушении логики выполнения операций или пропуске обязательных действий. После завершения сценария формируется отчёт о результатах, который может быть сохранён в базе данных и использован для анализа качества подготовки.

В ЦТ в качестве семантического слоя предполагается использовать онтологию. Для онтологически управляемых сценариев обучения в ЦТ НГМ разработана схема, обеспечивающая взаимодействие онтологии (*TrainingScenarioOntology*) с ЦД и симулятором. Онтология позволяет интерпретировать данные ЦД и генерировать персонализированные сценарии для симулятора (*Unity/Unreal Engine*). Представленные на рисунке 2 уровни обеспечивают замкнутый цикл обучения студента.

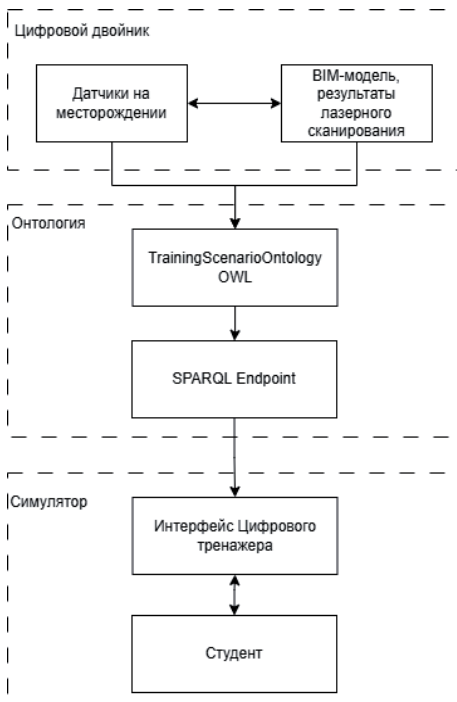


Рисунок 2 – Схема взаимодействия онтологии с цифровым двойником и симулятором

ЦД (физический уровень) формируется за счёт датчиков, измеряющих давление, температуру и вибрацию в реальном времени, а также *BIM*-моделей и данных лазерного сканирования. Разнородные данные (*JSON*-поток и облака точек *OBJ/GLTF*) конвертируются в *RDF*-триплеты и аннотируются семантическими метаданными, что обеспечивает их интерпретируемость для последующих уровней.

OWL-онтология (семантический уровень) строится в редакторе *Protégé* с *SPARQL Endpoint* и выполняет функции интеллектуального посредника. С использованием онтологии интерпретируются физические данные ЦД, автоматически генерируются персонализированные сценарии обучения по критериям пользователя. *SPARQL*-запросы извлекают последовательности действий, а *SWRL*-правила обеспечивают проверку корректности действий обучаемого.

Симулятор ЦТ (презентационный уровень) – *VR/AR*-интерфейс на базе *Unity/Unreal Engine* обеспечивает взаимодействие студента с виртуальной КП. Симулятор получает от онтологии готовый сценарий в формате *JSON*, визуализирует 3D-модель оборудования и собирает действия пользователя через *Unity C# API*. Обратная связь

формируется в реальном времени: успешные действия отмечаются зелёным индикатором, ошибки – красным, с текстовым пояснением.

Онтология является инструментом, который интегрирует и семантически насыщает данные, получаемые от ЦД, и создаёт основу для разработки архитектуры ЦТ. Благодаря связям, определённым в онтологии, осуществляется проверка действий обучающегося при выполнении каждого сценария.

Для сценария «Знакомство с оборудованием» сформирован фрагмент онтологического представления обучения студентов на примере КП (см. рисунок 3). В качестве примера на КП выбрана добывающая скважина, для которой рассматриваются: запорная арматура, манометр высокого давления, устье скважины. Построенный фрагмент онтологического представления показывает отношения между ключевыми классами и структурирует знания между ними: сценарий обучения, роль персонала, площадка НГМ, действие, режим. Центральным является сценарий обучения. Каждый класс имеет связь с экземплярами (например, для класса «режим» введены экземпляры «обучение» и «экзамен»). Экземпляры имеют атрибуты, характеризующие выбор настроек по запускаемому сценарию обучения (например, для класса «режим», в экземпляре «обучение» введены атрибуты «длительность тренировки» и «возможность ошибок»). Фрагмент онтологии отражает отношения, которые описывают: базовые связи между классами (сплошные стрелки), экземплярами и атрибутами онтологии (им

справедливо отношение «включает»); связи между классами онтологии (штрих-пунктирные стрелки), отражающие отношения: «включает», «содержит», «обучает», «использует».

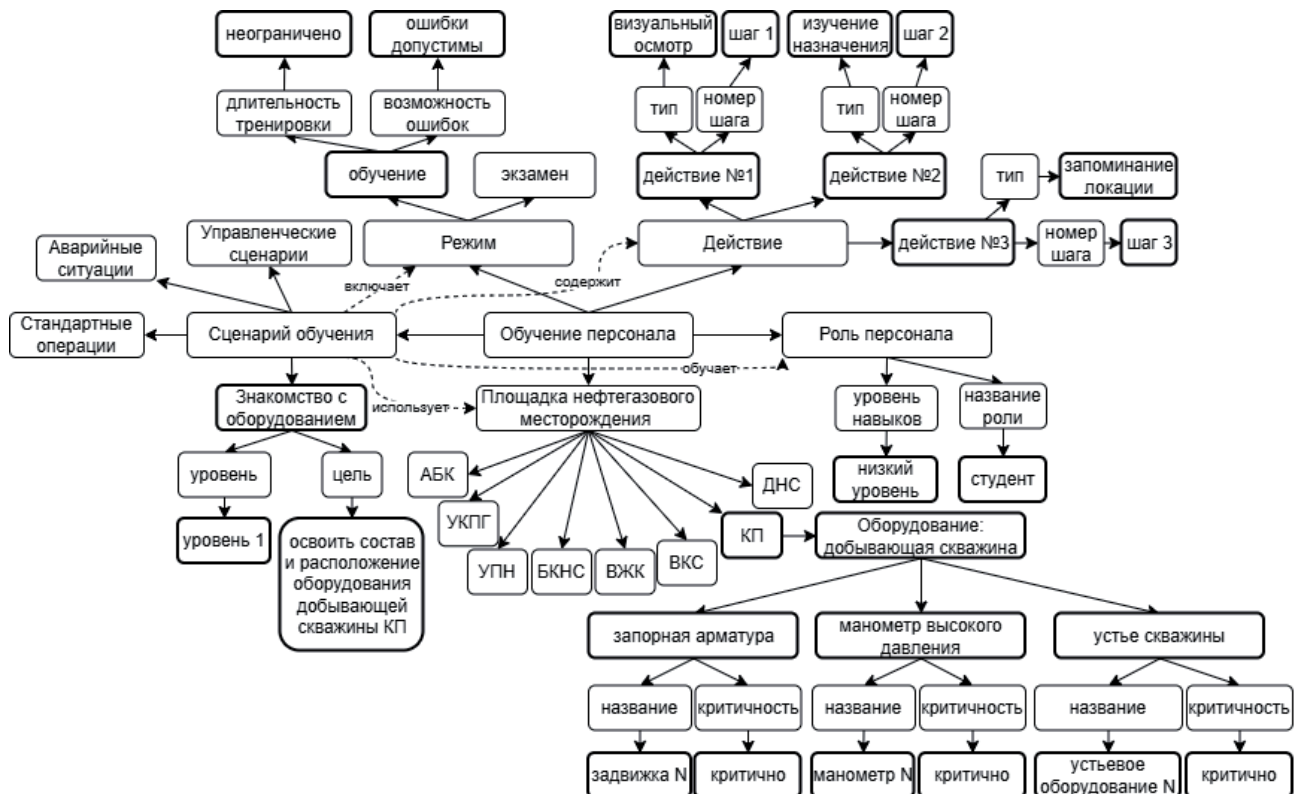


Рисунок 3 – Фрагмент онтологического представления сценария обучения «Знакомство с оборудованием»

Исходная концептуальная схема преобразована в онтологическую модель в формате *OWL* путём разделения элементов на четыре группы: классы, экземпляры, объектные свойства и *data*-свойства (см. рисунок 4).

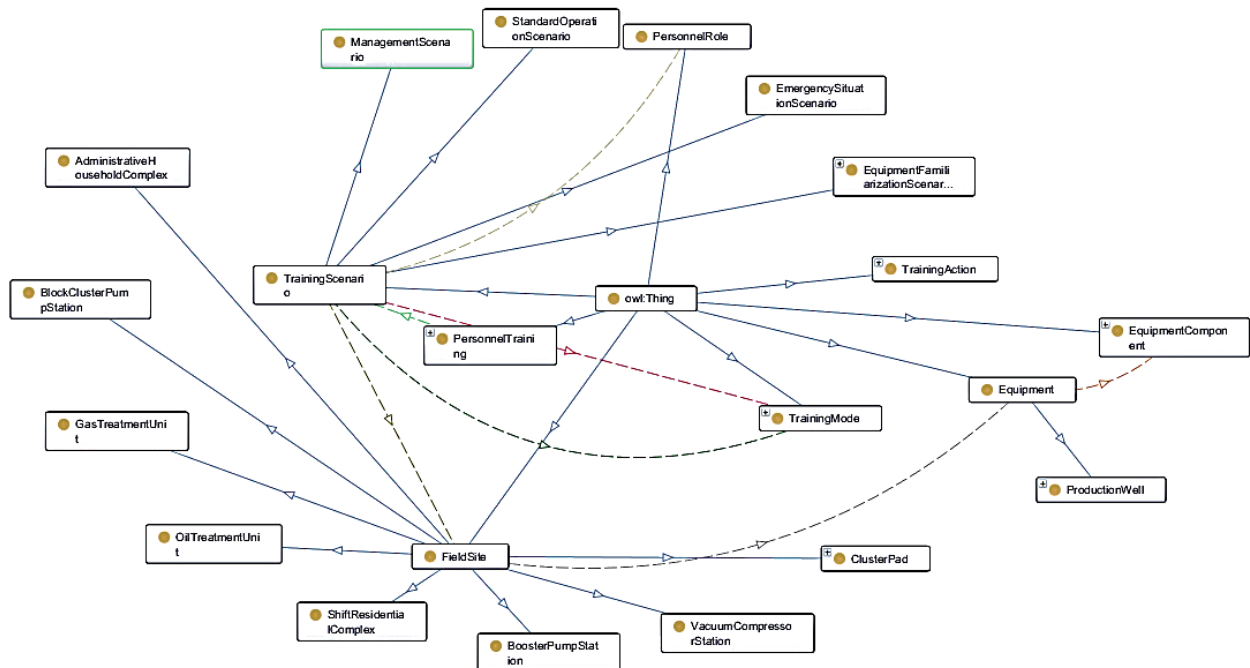


Рисунок 4 – Схема формализованной онтологической модели

Описание наполнения онтологической модели приведено в таблицах 2–4, в которых представлены соответственно: классы онтологической модели; объектные свойства онтологической модели; свойства данных онтологической модели.

Таблица 2 – Классы онтологической модели

Наименование класса	Обозначение класса	Назначение
Обучение персонала	<i>PersonnelTraining</i>	Общий процесс обучения персонала
Сценарий обучения	<i>TrainingScenario</i>	Сценарий, определяющий последовательность учебных действий
Знакомство с оборудованием	<i>EquipmentFamiliarizationScenario</i>	Сценарий изучения состава, назначения и расположения оборудования
Стандартные операции	<i>StandardOperationScenario</i>	Сценарии выполнения штатных операций
Аварийные ситуации	<i>EmergencySituationScenario</i>	Сценарии действий в нештатных и аварийных ситуациях
Управленческие сценарии	<i>ManagementScenario</i>	Сценарии отработки управленческих решений
Режим обучения	<i>TrainingMode</i>	Режим прохождения сценария: обучение, экзамен и т.д.
Действие	<i>TrainingAction</i>	Отдельное действие, входящее в сценарий
Роль персонала	<i>PersonnelRole</i>	Роль обучаемого или целевая профессиональная роль
Площадка НГМ	<i>FieldSite</i>	Производственная или инфраструктурная НГМ
АБК	<i>AdministrativeHouseholdComplex</i>	Административно-бытовой комплекс
БКНС	<i>BlockClusterPumpStation</i>	Блочная кустовая насосная станция
ВКС	<i>VacuumCompressorStation</i>	Вакуумная компрессорная станция
ВЖК	<i>ShiftResidentialComplex</i>	Вахтовый жилой комплекс
ДНС	<i>BoosterPumpStation</i>	Дожимная насосная станция
КП	<i>ClusterPad</i>	Кустовая площадка
УКПГ	<i>GasTreatmentUnit</i>	Установка комплексной подготовки газа
УПН	<i>OilTreatmentUnit</i>	Установка подготовки нефти
Оборудование	<i>Equipment</i>	Оборудование или технологический объект площадки
Добывающая скважина	<i>ProductionWell</i>	Оборудование: добывающая скважина
Компонент оборудования	<i>EquipmentComponent</i>	Составная часть оборудования

Таблица 3 – Объектные свойства онтологической модели

Объектное свойство	<i>Domain</i>	<i>Range</i>	Содержание
<i>hasScenario</i>	<i>PersonnelTraining</i>	<i>TrainingScenario</i>	Процесс обучения содержит сценарии обучения
<i>hasMode</i>	<i>TrainingScenario</i>	<i>TrainingMode</i>	Сценарий включает режим обучения
<i>containsAction</i>	<i>TrainingScenario</i>	<i>TrainingAction</i>	Сценарий содержит учебное действие
<i>trainsRole</i>	<i>TrainingScenario</i>	<i>PersonnelRole</i>	Сценарий соответствует роли
<i>usesSite</i>	<i>TrainingScenario</i>	<i>FieldSite</i>	Сценарий использует площадку НГМ
<i>containsEquipment</i>	<i>FieldSite</i>	<i>Equipment</i>	Площадка содержит оборудование
<i>hasComponent</i>	<i>Equipment</i>	<i>EquipmentComponent</i>	Оборудование имеет компоненты

К классам онтологии относятся: сценарий, режим, действие, роль, площадка, оборудование, компонент оборудования. Также классами стали типы сценариев (см. раздел 3) и типы площадок НГМ. Центральный класс – сценарий обучения (*TrainingScenario*) связывает между собой режим обучения, роль персонала, площадку НГМ и последовательность действий.

Экземплярами являются конкретные объекты (например, сценарий знакомства с оборудованием уровня 1 *Scenario_Familiarization_KP_Level1* является экземпляром класса *EquipmentFamiliarizationScenario*; КП KP_01 является экземпляром класса *ClusterPad*). Ком-

поненты оборудования (например, устьевое оборудование, задвижка, манометр) тоже стали экземплярами, так как в данной модели они – конкретные элементы оборудования добывающей скважины, а не классы типов оборудования.

Таблица 4 – Свойства данных онтологической модели

Свойство	Domain	Range	Пример значения	Содержание
<i>hasName</i>	<i>owl:Thing</i>	<i>xsd:string</i>	«КП», «Студент»	Наименование сущности
<i>hasGoalText</i>	<i>TrainingScenario</i>	<i>xsd:string</i>	«Освоить состав и расположение оборудования добывающей скважины КП»	Цель сценария
<i>hasScenarioLevel</i>	<i>TrainingScenario</i>	<i>xsd:string</i>	«Уровень 1»	Уровень сценария
<i>hasStepNumber</i>	<i>TrainingAction</i>	<i>xsd:positiveinteger</i>	1	Порядковый номер действия
<i>hasActionType</i>	<i>TrainingAction</i>	<i>xsd:string</i>	«Визуальный осмотр»	Тип действия
<i>hasInstructionText</i>	<i>TrainingAction</i>	<i>xsd:string</i>	«Выполнить визуальный осмотр оборудования»	Текст инструкции для обучаемого
<i>hasDurationPolicy</i>	<i>TrainingMode</i>	<i>xsd:string</i>	«не ограничено»	Длительность тренировки в режиме
<i>allowsErrors</i>	<i>TrainingMode</i>	<i>xsd:boolean</i>	«допустимо»	Допустимость ошибок в режиме
<i>hasSkillLevel</i>	<i>PersonnelRole</i>	<i>xsd:string</i>	«низкий уровень»	Уровень навыков, связанный с ролью
<i>hasCriticality</i>	<i>EquipmentComponent</i>	<i>xsd:string</i>	«критично»	Критичность компонента оборудования

В объектные свойства вынесены связи между сущностями (отношения «объект-объект»). Они отражают структуру исходной концептуальной модели. В атрибуты вынесены признаки с простыми типами значений (строка, число или логическое значение). Тип действия, уровень навыков и критичность компонента в данном фрагменте используются как атрибуты.

Для иллюстрации управления сценарием представлен пример *SPARQL*-запроса для извлечения последовательности учебных действий из онтологической модели сценария:

```
PREFIX ngt: <http://example.org/ngm-training#>
SELECT ?scenario ?action ?stepNumber ?actionType
WHERE {
  ?scenario a ngt:EquipmentFamiliarizationScenario ;
    ngt:trainsRole ngt:StudentRole ;
    ngt:usesSite ngt:KP_01 ;
    ngt:hasMode ngt:LearningMode ;
    ngt:containsAction ?action .
  ?action ngt:hasStepNumber ?stepNumber ;
    ngt:hasActionType ?actionType .
}
```

```
ORDER BY ?stepNumber
```

В блоке *WHERE* задаются условия выбора сценария (принадлежность классу сценария «Знакомство с оборудованием», связь с ролью «обучаемый», используемой КП и режимом). Запрос извлекает связанные с ним действия через объектные свойства *containsAction* и получает его порядковый номер и тип через связи *hasStepNumber* и *hasActionType* соответственно. Конструкция *ORDER BY ?stepnumber* позволяет вывести действия в порядке их выполнения.

5 Обсуждение

5.1 Ограничения текущего этапа исследования

Выявление ограничений внедрения ЦД на объектах НГО позволяет рассмотреть причины, по которым цифровизация эксплуатируемых производственных площадок оказывается более сложной, чем внедрение аналогичных решений на новых объектах. В условиях действующего производства цифровые инструменты необходимо адаптировать к существующей технологической, технической и организационной среде. Основные ограничения можно объединить в группы: технические, организационные и экономические [24].

Технические ограничения чаще всего связаны с тем, что часть оборудования и систем автоматизации на действующих объектах внедрена раньше современных цифровых платформ и не всегда совместима с ними.

Организационные ограничения проявляются в необходимости пересмотра отдельных рабочих процедур, подготовки персонала к использованию новых инструментов, а также повышением требований к защите производственных данных и технологических систем.

Экономические ограничения обусловлены затратами на модернизацию оборудования, закупку и настройку программных продуктов, доработку инфраструктуры и последующее техническое сопровождение.

Для действующих объектов НГО цена технологических сбоях от вмешательства в непрерывный производственный процесс высока, поэтому любые изменения должны внедряться с учётом требований надёжности, ПБ и сохранения стабильности работы оборудования.

Для подтверждения работоспособности предложенного подхода и соответствия модели Киркпатрика в статье представлены онтологическая модель с примерами *SPARQL*-запросов и следующий план внедрения ЦТ.

На первом уровне модели Киркпатрика оценивается реакция обучающихся. Предполагается проводить анкетирование обучающихся (студентов и операторов) после работы с ЦТ по 5-балльной шкале каждого критерия (интерес, понятность интерфейса, оцениваемая полезность, реалистичность). Будет проведено сравнение с традиционным форматом обучения – лекции, видеоинструкции.

На втором уровне модели Киркпатрика оценивается прирост знаний и навыков после выполнения обучающих упражнений. В качестве метода оценки предполагается тестирование уровня знаний до и после тренировки на ЦТ. В качестве ключевых метрик предполагается использовать *время освоения материала* – снижение среднего времени выполнения сценария с первой попытки до эталонного (заданного инструктором) и *процент ошибок* – уменьшение количества неправильных действий (пропуск операций, нарушение последовательности).

На третьем и четвёртом уровнях модели Киркпатрика (оценка степени применения полученных знаний на практике и польза для бизнеса) предусматривается внедрение разработанного ЦТ в практику. Фактическое внедрение ЦТ на месторождении и оценка снижения аварийности, повышения производительности труда требуют длительного наблюдения (6–12 месяцев).

5.2 Сравнительный анализ с существующими решениями

Предлагаемая в статье концепция платформы ЦД НГМ на основе онтологически управляемых сценариев обучения превосходит аналоги (см. таблицу 5) за счёт комплексной интеграции, охватывающей все КП НГМ.

Сравнение в таблице 5 показывает, что предложенная онтологическая модель отличается не только предметной областью, но и практической направленностью.

Предлагаемое в статье решение выделяется поддержкой онтологически управляемого сценарного подхода, позволяющего моделировать реальные сценарии обучения персонала в ЦД всего НГМ, что обеспечивает иммерсивное обучение с ветвящимися сценариями и устраняет фрагментацию, типичную для существующих программных решений.

Заключение

ЦТ на основе ЦД НГМ следует рассматривать как полноценный элемент системы профессионального обучения на основе онтологически управляемых сценариев. Внедрение ЦТ в

практику подготовки кадров НГО создаёт предпосылки для повышения уровня ПБ, улучшения качества обучения при сокращении нагрузки на действующие объекты.

Таблица 5 – Сравнение нефтегазовых онтологических моделей с предложенной моделью

Критерий	<i>OSDU Ontology</i> [25]	<i>Petro-Onto</i> [26]	<i>P-PSO</i> [27]	Онтология ЦТ НГМ
Предметная область	Ориентирована на данные геологоразведки и разработки месторождений: скважины, пласты, сейсмические данные. Практическое применение – семантический слой интеграции и управления геолого-промысловыми данными в цифровой платформе нефтегазовой компании.	Ориентирована на формализацию предметной области разведки и разработки НГМ. Практическое применение – создание единой семантической основы для интеграции разнородных данных и построения отраслевого графа знаний.	Ориентирована комплексное представление производственных систем. Практическое применение – информационный обмен между программными средствами, проектирование производственных систем, автоматизация и управление производством.	Ориентирована на формальное описание структуры и логики ЦТ, учебных сценариев, моделируемых технологических процессов и объектов. Практическое применение – роли семантического слоя, обеспечивающего интерпретацию данных от ЦД и формирование учебных заданий
Базовые классы	<i>osdu: AbstractCommonResources</i> – базовый класс для общих характеристик ресурсов (владельцев, источников, пространственных привязок); <i>osdu: MasterData</i> – класс для основных бизнес-и физических характеристик объектов отрасли – скважины, ствол скважины, бассейн; <i>osdu: WorkProduct</i> – класс для описания результатов производственной, инженерной или аналитической деятельности	<i>Business</i> – класс для описания бизнес-доменов, процессов и видов деятельности; <i>Object</i> – класс для описания физических и геологических объектов отрасли (бассейны, месторождения, скважины); <i>Knowledge</i> – класс для представления знаний (исследования, патенты, стандарты и техническая документация)	<i>Component</i> – базовый класс физического слоя (материальные элементы системы); <i>Processor</i> – производственные ресурсы, выполняющие обработку, сборку или контроль; <i>Operation</i> – класс технологического слоя, описывающий производственную операцию; <i>Controller</i> – класс управляющего слоя, описывает элемент принятия решения в производственном планировании и управлении	<i>TrainingScenario</i> – класс для описания ЦТ как программно-технической системы; <i>Processor</i> – класс для описания конкретного учебного задания или упражнения; <i>Equipment</i> – класс для описания технологического оборудования, агрегатов, узлов и систем.
Базовые свойства	Объектные свойства – <i>hasDataset</i> , <i>hasWell</i> , <i>hasWellbore</i> , <i>hasFacility</i> – описывают связи между объектами предметной области, рабочими продуктами, доменами и справочниками; свойства данных – <i>owners</i> , <i>viewers</i> , <i>createTime</i> , <i>modifyTime</i> – описывают атрибуты контроля доступа, временные метаданные и т.д.	Объектные свойства – <i>kindOf</i> и <i>hasDataProperty</i> для иерархических связей и связи с атрибутами, <i>isAPartOf</i> – отношение «часть-целое», <i>isConnectedBy</i> – связь между объектами инфраструктуры; свойства данных описывают атрибуты объектов – <i>label</i> , <i>businessCode</i> , <i>type</i> , <i>classification</i>	Объектные свойства – <i>hasSubPart</i> связывает изделие с подузлами; <i>hasComponent</i> – связывает производственную систему с физическими компонентами; <i>usesTool</i> – связывает операцию и процессор с применяемым инструментом; свойства данных описывают базовые атрибуты: параметры потоков, буферов, правил управления, заказов и производственных планов	Объектные свойства <i>hasScenario</i> , <i>hasMode</i> , <i>usesSite</i> описывают связи между ЦТ, сценариями, режимами обучения и используемыми узлами объекта НГМ; свойства данных <i>hasGoalText</i> , <i>hasStepNumber</i> , <i>hasInstructionText</i> и пр. описывают текстовые, числовые и временные характеристики сценариев и упражнений
Аксиомы и ограничения	Используются стандартные ограничения схем <i>rdfs</i> (<i>subclassOf</i> , <i>domain</i> , <i>range</i>) и <i>owl</i> (<i>minCardinality</i> , <i>allValuesFrom</i>), задающие правила построения иерархии и интерпретации классов и свойств	Используются правила и ограничения, близкие по смыслу к стандартным конструкциям <i>subclassOf</i> , <i>domain/range</i> и ограничениям значений свойств и атрибутов	Используются правила и ограничения на уровне концептуальной <i>UML</i> -модели, задающие иерархию, ассоциативные ограничения (связи между объектами), а также ограничения структурной целостности модели	Используются стандартные конструкции <i>rdfs:subclassOf</i> , <i>rdfs:domain</i> , <i>rdfs:range</i> , задающие иерархию классов и допустимые области применения свойств.

Предложенная платформа на основе онтологически управляемых сценариев обучения может иметь преимущества перед существующими решениями, обеспечивая персонализацию, интеграцию с 3D-моделями объектов НГМ и реальными данными.

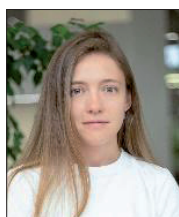
Перспективы дальнейших исследований включают валидацию платформы ЦТ на реальных объектах НГМ, интеграцию с ВМ-ЦД для предиктивного моделирования аварий, оценку эффективности ЦТ по разработанному плану эксперимента.

Список источников

- [1] **Zhang L., Wang J.** Intelligent safe operation and maintenance of oil and gas production systems: Connotations and key technologies. *Natural Gas Industry B*. 2023. V.10. №3. P.293-303. DOI: 10.1016/j.ngib.2023.05.006.
- [2] **Evangelista A. et al.** From knowledge to action: Assessing the effectiveness of immersive virtual reality training on safety behaviors in confined spaces using the Kirkpatrick model. *Safety Science*. 2025. V.181. P.106693. DOI: 10.1016/j.ssci.2024.106693.
- [3] **Баймухаметов Т.А.** Обучение профессиональным компетенциям на нефтегазовых предприятиях в вузе. *Управление образованием: теория и практика*. 2023. №2(60). С.223-232. DOI: 10.25726/c5392-0501-1769-k.
- [4] **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.
- [5] **Wei L. et al.** Applications of digital twins to offshore oil/gas exploitation: From visualization to evaluation. *IFAC-PapersOnLine*. 2020. V.53. №5. P.738-743. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.04.166.
- [6] **Гумеров И.И., Исанбаева Д.А.** Применение цифровых технологий в образовательных программах нефтегазовой отрасли для повышения квалификации специалистов в условиях цифровой трансформации. *Управление образованием: теория и практика*. 2024. №. 9-1 (86). С. 151-159. DOI: 10.25726/b2239-8134-2276-s.
- [7] **Адилмурдин Р.Р., Лайков Е.Г., Патока С.С., Валитов Э.Э., Иржанов А.Ж.** Анализ влияния цифровизации на подготовку специалистов в нефтегазовом вузе. *Управление образованием: теория и практика*. 2024. №2-2(77). С.61-71. DOI: 10.25726/t4445-0225-7161-v.
- [8] **Kineber A. F. et al.** Modelling the relationship between digital twins implementation barriers and sustainability pillars: Insights from building and construction sector. *Sustainable Cities and Society*. 2023. V.99. P.104930. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104930.
- [9] **Lu Y. et al.** Low-latency federated learning and blockchain for edge association in digital twin empowered 6G networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020. V.17. №7. P.5098-5107. DOI: 10.1109/TII.2020.3017668.
- [10] **Zribi H. et al.** Industry 4.0: digital twins characteristics, applications, and challenges in-built environments. *Production & Manufacturing Research*. 2025. T. 13. №. 1. P. 2456277. DOI: 10.1080/21693277.2025.2456277
- [11] **Anwer N. et al.** Developing and leveraging digital twins in engineering design. *CIRP Annals*. 2025. V.74. №2. P.843-868. DOI: 10.1016/j.cirp.2025.05.002.
- [12] **Karanam S. A. K., Hartman N. W.** A systematic review of digital twin (DT) and virtual learning environments (VLE) for smart manufacturing education. *Manufacturing letters*. 2025. V.44. P.1597-1608. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2025.06.179>.
- [13] **Ortiz J. S. et al.** Digital Twin-Based Active Learning for industrial process control and supervision in industry 4.0. *Sensors*. 2025. V.25. №7. P. 2076. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25072076>.
- [14] **Lu Y. et al.** Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and computer-integrated manufacturing*. 2020. V.61. P.101837. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101837.
- [15] **O'Dwyer E. et al.** Integration of an energy management tool and digital twin for coordination and control of multi-vector smart energy systems. *Sustainable Cities and Society*. 2020. V.62. P.102412. DOI: 10.48550/arXiv.2007.12129.
- [16] **Chen X. et al.** Effects of building information modeling prior knowledge on applying virtual reality in construction education: Lessons from a comparison study. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2023. V.10. №5. P.2036-2048. DOI: 10.1093/jcde/qwad091.
- [17] **Терешко Е.К., Малащенко М.Р., Середин Е.П.** Цифровая трансформация процессов промышленных объектов нефтегазового месторождения. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15. №3. С.376-389. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-376-389.
- [18] **Wanasinghe T. R. et al.** Digital twin for the oil and gas industry: Overview, research trends, opportunities, and challenges. *IEEE access*. 2020. V.8. P.104175-104197. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998723.

- [19] **Шеляго Е.В., Калашиников П.К.** Цифровизация нефтегазового образования на примере проекта «Губкин цифра». *Научно-практическая конференция «Цифровая трансформация в нефтегазовой отрасли»*. 2024. С. 143-152.
- [20] **Шеляго Е.В., Шеляго Н.Д.** Применение мобильных обучающих приложений в сфере высшего образования на примере специальности «Нефтегазовое дело». *Нефтяное хозяйство*. 2021. №10. С.128-132. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-10-128-132.
- [21] **Wong, J.Y., et al.** BIM-VR Framework for Building Information Modelling in Engineering Education. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (ijim)*. 2020. 14(06). P.15–39. DOI: 10.3391/ijim.v14i06.13397.
- [22] **Sepasgozar S. M. E.** Digital twin and web-based virtual gaming technologies for online education: A case of construction management and engineering. *Applied Sciences*. 2020. V.10. №13. P.4678. DOI: 10.3390/app10134678.
- [23] **Di Stefano F. et al.** Mobile 3D scan LiDAR: A literature review. *Geomatics, natural hazards and risk*. 2021. V.12. №1. P.2387-2429. DOI: 10.1080/19475705.2021.1964617.
- [24] **Abreu N. et al.** Procedural point cloud modelling in scan-to-BIM and scan-vs-BIM applications: A review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2023. V.12. №7. P. 260. DOI: 10.3390/ijgi12070260.
- [25] **Abolhassani N.** A Data Mesh Adaptable Oil and Gas Ontology Based on Open Subsurface Data Universe (OSDU). *Proceedings of the 15th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management (IC3K 2023)*. 2023. Vol.2. P.29–39. DOI: 10.5220/0012160000003598.
- [26] **Tang X.** Construction and application of an ontology-based domain-specific knowledge graph for petroleum exploration and development. *Geoscience Frontiers*. 2023. Vol.14. Article 101426. DOI: 10.1016/j.gsf.2022.101426.
- [27] **Garetti M.** P-PSO ontology for manufacturing systems. *Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*. 2012. P.449–456. DOI: 10.3182/20120523-3-RO-2023.00222.

Сведения об авторах



Терешко Екатерина Кирилловна, 1996 г. рождения. Окончила аспирантуру СПбПУ (2023), к.э.н. (2024). Научный сотрудник лаборатории «Промышленные системы потоковой обработки данных» Передовой инженерной школы (ПИШ) «Цифровой инжиниринг» СПбПУ. Доцент Высшей инженерно-экономической школы, СПбПУ. В списке научных трудов более 50 работ в области развития строительного комплекса, цифровой трансформации, автоматизации проектирования и стратегического развития регионов. Author ID (РИНЦ): 943319; Author ID (Scopus): 57204719810; Researcher ID (WoS): ABH-2326-2020; ORCID ID: 0000-0001-7117-7549. ektereshko@mail.ru. ✉.

Малашенко Марина Руслановна, 2001 г. рождения. Окончила магистратуру СПбПУ (2025). Аналитик лаборатории «Цифровое моделирование промышленных систем» ПИШ «Цифровой инжиниринг» СПбПУ. Ассистент Высшей инженерно-экономической школы, СПбПУ. В списке научных трудов около 20 работ, посвящённых экономике северных регионов и нефтегазовой отрасли. ORCID ID: 0009-0008-5130-1774; ResearcherID (WoS): PKQ-5236-2026; Author ID (РИНЦ.): 1247088. malashenko.marina.r@yandex.ru.



Криони Илья Николаевич, 1996 г. рождения. Окончил магистратуру Уфимского государственного технологического университета (2020). Ведущий программист ООО «Тетракуб». Аспирант Высшей школы передовых цифровых технологий ПИШ «Цифровой инжиниринг» СПбПУ. В списке научных трудов более 10 работ в области автоматизации и обеспечения качества процесса строительного проектирования. Author ID (РИНЦ): 1120520; Author ID (Scopus): 57246625000; Researcher ID (WoS): AAX-5344-2021; ORCID ID: 0000-0002-9594-237X. ilkrioni@yandex.ru.

Поступила в редакцию 07.04.2026, после рецензирования 17.08.2026. Принята к публикации 28.08.2026.



Training of oil and gas field maintenance specialists using digital twins

© 2026, E.K. Tereshko ✉, M.R. Malashenko, I.N. Krioni

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St. Petersburg, Russia

Abstract

The use of digital twins in the training of students and early-career personnel involved in oil and gas field maintenance is considered. The relevance of the topic is determined by the increasing requirements for industrial safety and the operational reliability of production facilities, which significantly limits the use of traditional forms of training that involve direct presence on the site. Under these conditions, digital technologies capable of supporting training in a virtual environment without direct involvement in technological processes are becoming increasingly important. Particular attention is given to the use of digital training simulators developed on the basis of digital modeling technologies. Such solutions can facilitate the safe acquisition and practice of professional skills and expand opportunities for personnel training both at operating production facilities and within educational institutions. Limitations associated with the implementation of digital solutions are also identified, including the high computational resource requirements of the models, dependence on data transmission infrastructure, as well as the need to maintain up-to-date digital representations of physical assets. The aim of the study is to develop a methodology for the use of digital twins within a training environment based on ontology-driven scenarios. Approaches to the development of digital training simulators are analyzed, including three-dimensional modeling and laser scanning technologies, and a structure of a digital training simulator as an element of the educational infrastructure is proposed. The implementation of the proposed approach can improve the quality of practical training of personnel, reduce the likelihood of errors in the performance of technological operations, and contribute to enhanced industrial safety.

Keywords: oil and gas field, digital twins, specialists training, ontology, scenario-based training, digital training simulator.

For citation: Tereshko EK, Malashenko MR, Krioni IN. Training of oil and gas field maintenance specialists using digital twins. [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(3): 438-453. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-3-438-453.

Authors' contributions: Tereshko E.K. – problem formulation, conceptualization, methodology; Malashenko M.R. – data collection and systematization, analysis of analogous solutions, data visualization; Krioni I.N. – development of the ontological model and integration of the "digital twin–ontology–simulator" architecture.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and tables

- Figure 1 – Architecture of trainee–instructor interaction with the digital training simulator
- Figure 2 – Architecture of the digital twin–ontology–simulator integration
- Figure 3 – Fragment of the ontological representation of the “Equipment Familiarization” training scenario
- Figure 4 – Architecture of the formalized ontological model
- Table 1 – Comparison of approaches to creating a digital training simulator
- Table 2 – Classes of the ontological model
- Table 3 – Object properties of the ontological model
- Table 4 – Data properties of the ontological model
- Table 5 – Comparison of oil and gas domain ontologies with the proposed model

References

- [1] Zhang L, Wang J. Intelligent safe operation and maintenance of oil and gas production systems: Connotations and key technologies. *Natural Gas Industry B*. 2023. T. 10. №. 3. P. 293-303. DOI: 10.1016/j.ngib.2023.05.006.

- [2] **Evangelista A. et al.** From knowledge to action: Assessing the effectiveness of immersive virtual reality training on safety behaviors in confined spaces using the Kirkpatrick model. *Safety Science*. 2025; 181: 106693. DOI: 10.1016/j.ssci.2024.106693.
- [3] **Baymukhametov TA.** Training of professional competencies at oil and gas enterprises at the university [In Russian]. *Education management: theory and practice*. 2023; 2 (60): 223-232. DOI: 10.25726/c5392-0501-1769-k.
- [4] **Volkova MM, Manurova RA, Shaidullina DN.** The use of virtual simulators for training specialists in the oil and gas industry [In Russian]. *Bulletin of the Technological University*. 2019; 22 (4): 115-121.
- [5] **Wei L. et al.** Applications of digital twins to offshore oil/gas exploitation: From visualization to evaluation. *IFAC-PapersOnLine*. 2020; 53(5): 738-743. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.04.166.
- [6] **Gumerov II, Isanbayeva DA.** The use of digital technologies in educational programs of the oil and gas industry to improve the skills of specialists in the context of digital transformation [In Russian]. *Education management: theory and practice*. 2024; 9-1 (86): 151-159. DOI: 10.25726/b2239-8134-2276-s.
- [7] **Adilmuridin RR, Laikov EG, Patoka SS, Valitov EE, Irzhanov AJ.** Analysis of the impact of digitalization on the training of specialists in an oil and gas university [In Russian]. *Education management: theory and practice*. 2024; 2-2(77): 61-71. DOI: 10.25726/t4445-0225-7161-v.
- [8] **Kineber AF. et al.** Modelling the relationship between digital twins implementation barriers and sustainability pillars: Insights from building and construction sector. *Sustainable Cities and Society*. 2023; 99: 104930. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104930.
- [9] **Lu Y. et al.** Low-latency federated learning and blockchain for edge association in digital twin empowered 6G networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020; 17(7): 5098-5107. DOI: 10.1109/TII.2020.3017668.
- [10] **Zribi H. et al.** Industry 4.0: digital twins characteristics, applications, and challenges in-built environments. *Production & Manufacturing Research*. 2025; 13(1): 2456277. DOI: 10.1080/21693277.2025.2456277.
- [11] **Anwer N. et al.** Developing and leveraging digital twins in engineering design. *CIRP Annals*. 2025; 74(2): 843-868. DOI: 10.1016/j.cirp.2025.05.002.
- [12] **Karanam S. A. K., Hartman N. W.** A systematic review of digital twin (DT) and virtual learning environments (VLE) for smart manufacturing education. *Manufacturing letters*. 2025; 44: 1597-1608. DOI: 10.1016/j.mfglet.2025.06.179.
- [13] **Ortiz J. S. et al.** Digital twin-based active learning for industrial process control and supervision in industry 4.0. *Sensors*. 2025; 25(7): 2076. DOI: 10.3390/s25072076.
- [14] **Lu Y. et al.** Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and computer-integrated manufacturing*. 2020; 61: 101837. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101837.
- [15] **O'Dwyer E. et al.** Integration of an energy management tool and digital twin for coordination and control of multi-vector smart energy systems. *Sustainable Cities and Society*. 2020; 62: 102412. DOI: 10.48550/arXiv.2007.12129.
- [16] **Chen X. et al.** Effects of building information modeling prior knowledge on applying virtual reality in construction education: Lessons from a comparison study. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2023. T. 10. № 5. C. 2036-2048. DOI: 10.1093/jcde/qwad091.
- [17] **Tereshko EK, Malashenko MR, Seredin EP.** Digital transformation of industrial facilities processes of oil and gas field [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(3): 376-389. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-376-389.
- [18] **Wanasinghe TR. et al.** Digital twin for the oil and gas industry: Overview, research trends, opportunities, and challenges. *IEEE access*. 2020; 8: 104175-104197. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998723.
- [19] **Shelyago EV, Kalashnikov PK.** Digitalization of oil and gas education on the example of the Gubkin Digital project [In Russian]. *Scientific and practical conference "Digital transformation in the oil and gas industry"*. 2024: 143-152.
- [20] **Shelyago EV, Shelyago ND.** Case-study of using educational mobile applications in higher education in the oil and gas engineering specialty [In Russian]. *The oil industry*. 2021; 10: 128-132. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-10-128-132.
- [21] **Wong JY, et al.** BIM-VR Framework for Building Information Modelling in Engineering Education. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*. 2020; 14(06): 15-39. DOI: 10.3991/ijim.v14i06.13397.
- [22] **Sepasgozar SME.** Digital twin and web-based virtual gaming technologies for online education: A case of construction management and engineering. *Applied Sciences*. 2020; 10(13): 4678. DOI: 10.3390/app10134678.
- [23] **Di Stefano F. et al.** Mobile 3D scan LiDAR: A literature review. *Geomatics, natural hazards and risk*. 2021; 12(1): 2387-2429. DOI: 10.1080/19475705.2021.1964617.
- [24] **Abreu N. et al.** Procedural point cloud modelling in scan-to-BIM and scan-vs-BIM applications: A review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2023; 12(7): 260. DOI: 10.3390/ijgi12070260.
- [25] **Abolhassani N.** A Data Mesh Adaptable Oil and Gas Ontology Based on Open Subsurface Data Universe (OSDU). *Proceedings of the 15th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management (IC3K 2023)*. 2023; 2: 29-39. DOI: 10.5220/0012160000003598.

- [26] **Tang X.** Construction and application of an ontology-based domain-specific knowledge graph for petroleum exploration and development. *Geoscience Frontiers*. 2023; 14. Article 101426. DOI: 10.1016/j.gsf.2022.101426.
- [27] **Garetti M.** P-PSO ontology for manufacturing systems. *Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*. 2012. P.449–456. DOI: 10.3182/20120523-3-RO-2023.00222.
-

About the authors

Ekaterina Kirillovna Tereshko (b. 1996) completed her postgraduate studies at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU) in 2023; Candidate of Economic Sciences (2024). Researcher at the Laboratory of Industrial Streaming Data Processing Systems, Advanced Engineering School “Digital Engineering”, SPbPU. Associate Professor at the Higher School of Engineering and Economics, SPbPU. The list of scientific papers includes more than 50 works in the fields of construction industry development, digital transformation, design automation, and strategic development of regions. Author ID (RSCI): 943319; Author ID (Scopus): 57204719810; Researcher ID (WoS): ABH-2326-2020; ORCID ID: 0000-0001-7117-7549. ektereshko@mail.ru. ✉.

Marina Ruslanovna Malashenko (b. 2001) received her Master’s degree from Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU) in 2025. Analyst at the Laboratory of Digital Modeling of Industrial Systems, Advanced Engineering School “Digital Engineering”, SPbPU. Assistant Professor at the Higher School of Engineering and Economics, SPbPU. The list of scientific papers includes approximately 20 works on the economics of the northern regions and the oil and gas industry. ORCID ID: 0009-0008-5130-1774; ResearcherID (WoS): PKQ-5236-2026; Author ID (RSCI): 1247088. malashenko.marina.r@yandex.ru.

Ilya Nikolaevich Krioni (b. 1996) received his Master’s degree from Ufa State Technological University in 2020. Lead Software Developer at Tetracube LLC. Postgraduate student at the Higher School of Advanced Digital Technologies, Advanced Engineering School “Digital Engineering”, SPbPU. The list of scientific papers includes more than 10 works in the fields of automation and quality assurance in the construction design process. Author ID (RSCI): 1120520; Author ID (Scopus): 57246625000; Researcher ID (WoS): AAX-5344-2021; ORCID ID: 0000-0002-9594-237X. ilkrioni@yandex.ru

Received April 7, 2026. Revised August 17, 2026. Accepted August 28, 2026.
