

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ, КАК ОСНОВА ЭКСПЛУАТАЦИИ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

DIGITAL DOUBLES AS THE BASIS OF OPERATION FUEL AND ENERGY COMPLEX

K. Kondratiev

Summary. This article discusses the issue of digital twins, with reference to the Russian fuel and energy complex. Various examples of existing developments related to digital twins are described. It is shown that for the Russian fuel and energy complex there are currently separate developments for the digitalization of the industry. The study showed that it is too early to talk about the holistic coverage of the Russian fuel and energy complex by the digitalization process, but work in this direction is actively underway.

Keywords: digital twins, fuel and energy complex, operation, control, diagnostics, technological process.

Кондратьев Кирилл Анатольевич

Аспирант, АНО ВО «Российский новый университет»
kirillko645@gmail.com

Аннотация. В данной статье рассматривается вопрос о цифровых двойниках, с привязкой к топливно-энергетическому комплексу России. Описаны различные примеры имеющихся разработок, связанных с цифровыми двойниками. Показано, что для топливно-энергетического комплекса России в настоящее время имеются отдельные наработки по цифровизации отрасли. Исследование показало, что о целостном охвате топливно-энергетического комплекса России процессом цифровизации говорить рано, но работы в этом направлении активно ведутся.

Ключевые слова: цифровые двойники, топливно-энергетический комплекс, эксплуатация, контроль, диагностика, технологический процесс.

Топливо-энергетический комплекс России (ТЭК) — одна из основных отраслей в экономике страны по стабильности, промышленному производству, занятости и по доходам в бюджет. Он обеспечивает энергобезопасность страны [1]. Развитие человеческого общества требует постоянно растущего потребления энергии (рост численности населения, наличие территорий с суровыми климатическими условиями, энергоёмкость производства). Высока роль топлива для научно-технического прогресса страны, так как топливо связано с проведением процессов автоматизации и механизации производства, его электрификацией и теплофикацией. Указанные процессы обуславливают значительный рост потребления топлива. Энергетика важна для укрепления позиций и на международном уровне. ТЭК присуща главная роль в обеспечении стабильной социальной сферы страны. Для России энергетика особенно важна, так как большая часть территории относится к северным территориям и необходимо использовать энергию на поддержание комфортных условий жизни и деятельности в таком климате. При значительной протяженности территории страны транспортные перевозки, пассажирские и грузовые, необходимо обеспечить топливом.

В структуре ТЭК присутствуют взаимосвязанные отрасли: топливная промышленность; электроэнергетика; транспортировка, хранение и распределение энергии и исходного сырья. ТЭК — это система, которая объединяет многочисленные производства и процессы, в том числе изготовление добывающего оборудования

для топливно-энергетических ресурсов, оборудования для их переработки, преобразования, распределения, а также доставки (транспортировки) потребителю. Такое многообразие производств и технологических процессов требует новых подходов в управлении процессами эксплуатации всех отраслей, составляющих ТЭК, на всех этапах их жизненного цикла от начала строительства до утилизации.

Таким подходом является внедрение и широкое использование цифровых двойников при проектировании объектов, в технологиях компьютерного моделирования и разработки новых материалов, при оптимизации технологических процессов и внедрении технологий аддитивного производства, при обработке больших объемов данных и облачных вычислениях, при использовании искусственного интеллекта. Ниже приведен обзор примеров использования цифровых двойников в различных областях деятельности ТЭК с небольшим уклоном в сторону энергетической составляющей отрасли.

В статье [2] рассмотрена история возникновения и развития понятия цифровых двойников. Даны существующие определения цифровых двойников, в качестве которых рассматриваются технология/совокупность технологий/продукт использования технологий; процесс или продукт использования процесса; перечни и значимость технологий для получения окончательного продукта. Показано, что в настоящее время в России уже существуют отдельные наработки по использованию цифровых двойников в различных высокотехно-

логичных отраслях народного хозяйства, таких как автомобилестроение, машиностроение, на предприятиях энергетического и топливного комплекса. Так в «Газпром нефти» создаются цифровые двойники скважин, заводов, производственных площадок и месторождений, в Росатоме разрабатывается цифровая атомная электростанция. Анализ публикационной активности в системе Scopus привел к выводу о том, что наряду с ключевыми словами «цифровой двойник» (Digital Twin) используются «Индустрия 4.0» (Industry 4.0), «киберфизические системы» (Cyber-Physical Systems), «умная фабрика» (Smart Factory), «численное моделирование» (Simulation), «большие данные» (Big Data), «интернет вещей» (Internet of Things) и «машинное обучение» (Machine Learning).

В посвященной цифровым двойникам статье [3] говорится о том, что они представляют собой технологию, которая объединяет облачные хранилища, Интернет вещей и машинное обучение. То есть для построения цифрового двойника и работы с ним необходимо большое пространство (облако). При этом большой объем данных обрабатывается с помощью технологии Edge Analytics. Цифровые двойники строятся как для отдельных деталей и единиц оборудования, так даже и для целых компаний.

Цифровые двойники подразделяются на единственный, составной и систему составных цифровых двойников (см. рисунок 1) [4].

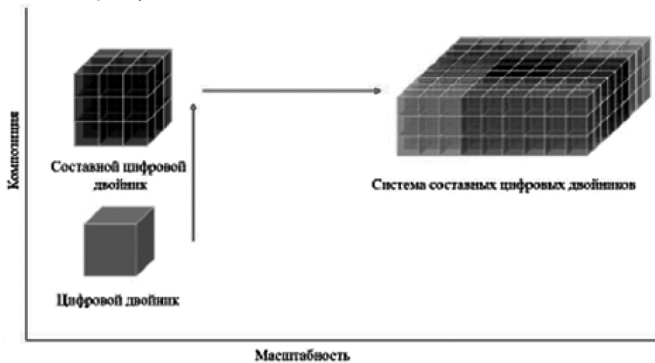


Рис. 1. Виды цифровых двойников

На рисунке 2 показан жизненный цикл цифрового двойника и соответствие его вида различным реальным объектам промышленности.

Среди основных трендов развития промышленности в мире выделяются рост сложности производственных процессов и использование технологии цифровых двойников. При этом речь идет о смещении процесса цифровизации технологий производства на этап проектирования конечного продукта и использовании при его отработке не реальных экспериментов с опытными образцами, а виртуальных испытаний с математическими моделями. За счет этого происходит обнаружение

ошибок проектирования на ранних этапах, сокращение времени разработки и уменьшение количества экспериментов. Все это положительно сказывается на цене конечного продукта [5].

В статье [6] рассматривается вопрос о системе распределительных сетей нового поколения — интеллектуальные сети Smart Grid. Основными требованиями к этим сетям являются гибкость, доступность, надежность и экономичность. Отмечено, что на данном этапе осуществления цифровизации энергетики вопрос об интеллектуальных сетях находится в стадии разработки и внедрения [6, 7]. Тем не менее крупными потребителями энергоресурсов (крупные предприятия) делаются определенные шаги в части организации интеллектуального учета, который включает в себя автоматический сбор, хранение и обработку информации. При этом получают пользу от такой формы учета и генерирующие компании, у которых появляются возможности отслеживать спрос на энергию, состояние потребителей и сетей (потери) и строить взаимоотношения с новыми потребителями. Авторы статьи [5] говорят о необходимости перехода от резервирования к риск-ориентированной модели управления при обеспечении надежности процессов управления. Это возможно только при переходе на цифровую экономику. Текущее состояние процесса цифровизации ТЭК проиллюстрировано на рисунке 3 [6].

Видно, что процесс внедрения цифровых технологий идет от электроэнергетических компаний к крупным компаниям-потребителям.

Для современного состояния существующих энергосистем характерны такие проблемы, как низкая надежность, высокая аварийность, недостаточная управляемость и т.п. Устранение этих проблем связано с внедрением в энергетику цифровых технологий. При этом авторы статьи [8] рассматривая вопрос о том, на ком должны лежать функции управления — на искусственном интеллекте или на человеке, отдают предпочтение человеку, хотя признают наличие группы специалистов, склоняющихся к первому варианту.

Внедрение цифровых технологий в энергетику позволит увеличить количество контролируемых параметров электрических сетей. При этом существует объективная необходимость замены мнемосхем (диспетчерских пультов) на киберфизическую 3D-модель, построенную с использованием технологии виртуальной реальности. В этой модели ландшафт и все оборудование (опоры, провода, кабели, генераторы, трансформаторы и прочее) будет иметь точную привязку к местности. Для иллюстрации на рисунке 4 показаны изображения подстанции с участком линии электропередачи (ЛЭП).



Рис. 2. Жизненный цикл цифровых двойников

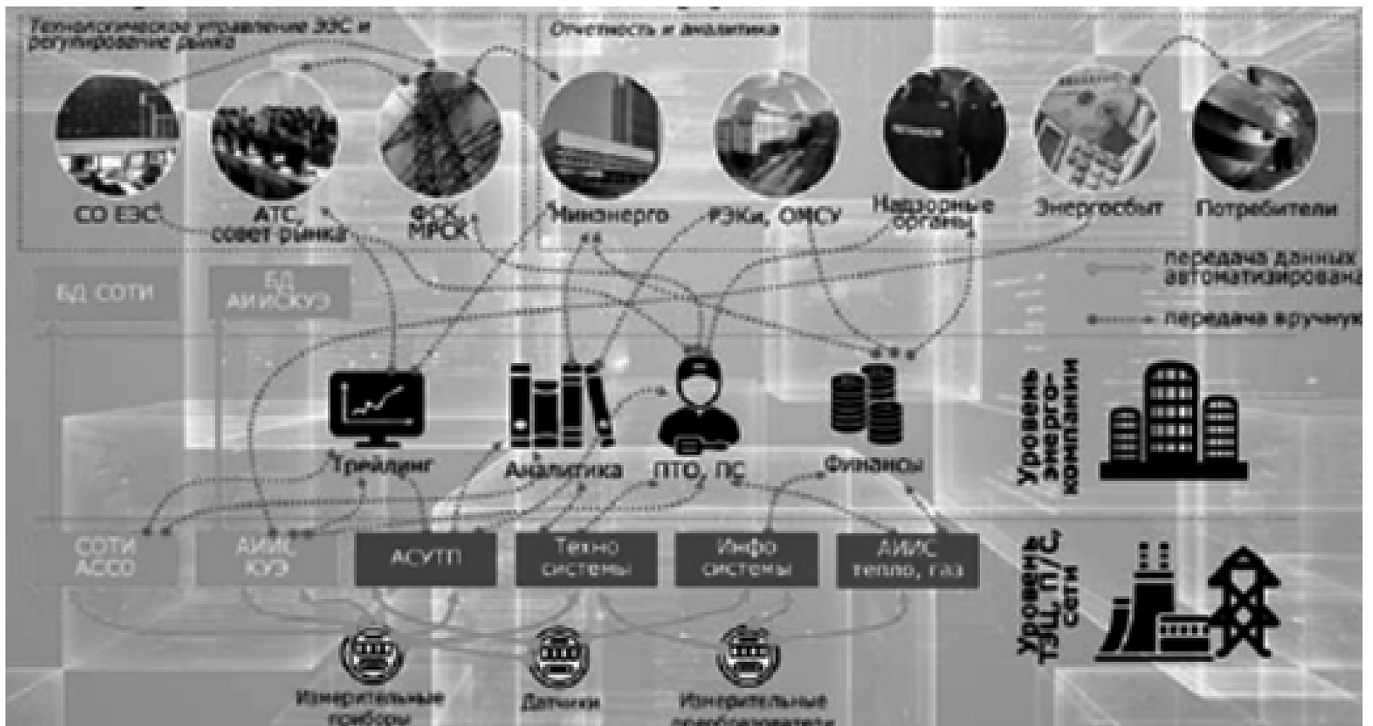


Рис. 3. Текущее состояние

Наличие такой модели позволит наглядно отслеживать состояние элементов электросети при воздействии различных климатических факторов (снег, дождь, ветер). При этом размещение датчиков не только на подстанциях, но и на опорах («цифровая опора»), позволит отслеживать в реальном времени пляску и обрыв проводов, вибрацию и падение опор. Передача информации диспетчеру может осуществляться по оптоволоконному кабелю, радиоканалу, через спутник или другим способом. Значительно расширяет объем и разнообразие информации использование видекамер, размещаемых на опорах.

В статье [9] рассматривается вопрос об обеспечении кибербезопасности предприятий ТЭК при их переходе на цифровые технологии. Определены перечни критического оборудования, выход из строя которого может привести к авариям, в том числе и с гибелью людей. Определены следующие меры для поддержания нормального функционирования жизненного цикла автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП):

- защита периметра;
- сегментирование сетей технологического контура;



Рис. 4. Изображение подстанции с участком ЛЭП

- резервирование технологических защит;
- реализация механизмов предотвращения несанкционированного изменения алгоритмов в контроллерах;
- использование всех доступных к применению штатных средств защиты на действующих и внедряемых АСУ ТП;
- импортозамещение.

В работе [10] затронут вопрос об эксплуатации «умных» скважин, то есть скважин, оборудованных большим количеством различных датчиков. Рассматривается выбор оптимального способа передачи информации с датчиков в базу данных. Особое внимание акцентируется на исследованиях сравнения времени чтения и записи данных. Показано, что наиболее предпочтительным является хранение замеров в виде файлов с последующей их передачей в базу данных.

Внедрение цифровых технологий в энергетике основано на реализации новых принципов управления энергетическим комплексом, что иллюстрирует таблица 1 [11].

- Приведены примеры цифровизации в ТЭК [11]:
- «Умное» месторождение — 29 месторождений и более 2000 цифровых скважин.
 - Система прогнозирования остаточного ресурса энергетического оборудования (холдинг Ростек).
 - Система анализа информационных потоков о полном цикле движения продукта вплоть до сведе-

Таблица 1
Сравнение существующей и цифровой модели управления энергетикой

Существующая модель		Цифровая модель
Использование углеводородного топлива	⇒	Использование альтернативных источников, децентрализация производства энергии
Преобладают компании, занимающиеся добычей и переработкой сырья	⇒	Частные инвестиции и децентрализованные рынки
Централизованные энергетические сети	⇒	Цифровая инфраструктура, «умные» электросети
Поток энергии «генератор — потребитель»	⇒	«Активный» потребитель, регулирующий свои потребности на генерирующем оборудовании
Одновременное производство и потребление электроэнергии	⇒	Рост эффективности использования электроэнергии и развитие технологий ее накопления
Использование углеводородного топлива в промышленности и на транспорте	⇒	Электрификация промышленности и транспорта

ний о продажах и взаимодействии с потребителем (компания Газпромнефть).

- Расчетная модель сети для оценки надежности существующих систем и сетей.



Рис. 5. Цифровой двойник солнечной электростанции

В статье [12] рассматривается использование фрактального подхода при выполнении онтологического инжиниринга для построения цифровых двойников. С помощью данного подхода построены цифровые двойники солнечной электростанции (см. рисунок 5) и топливно-энергетического комплекса.

Одним из применений цифровых двойников является их использование при проектировании и строительстве зданий [13]. Для этих целей используется информационное моделирование зданий или BIM-технология (Building Information Modeling). Помимо графической части проектирования (3D) в цифровых моделях (BIM-моделях) содержится вся информация о характеристиках конструкций, инженерных системах и используемого оборудования. Это позволяет осуществлять отслеживание процесса строительства в реальном времени (4D), учитывать изменение стоимостных показателей во времени (5D) и проводить анализ параметров здания при эксплуатации (6D). На рисунке 6 показано здание, спроектированное специалистами ПАО «Орелстрой» с помощью BIM-технологии в программе Autodesk Revit за 4 месяца. Здание введено в эксплуатацию в 2023 году, то есть при значительной экономии времени.

В статье [14] описаны результаты численного моделирования процесса распространения магистральной трещины в трубопроводе при действии внутреннего давления газа. Для различных марок сталей численно исследован процесс образования и распространения протяженной трещины. Определены форма трещины, утонение стенки трубы по краям трещины, а также скорость распространения трещины. На рисунке 7 проил-



Рис. 6. Здание, спроектированное с использованием BIM-технологии

люстрированы формы трещины, полученные при расчете (численный эксперимент с цифровым двойником трубопровода) и в результате прямого эксперимента.

Видно, что расчетная и реальная формы разрушения трубопровода совпадают.

Достаточно большое количество публикаций описывают примеры использования цифровых двойников для проектирования отдельных деталей или узлов машин, эксплуатируемых на предприятиях ТЭК. Так, в работе [15] даны краткие описания разработки цифрового двойника вибросита для системы очистки бурового раствора

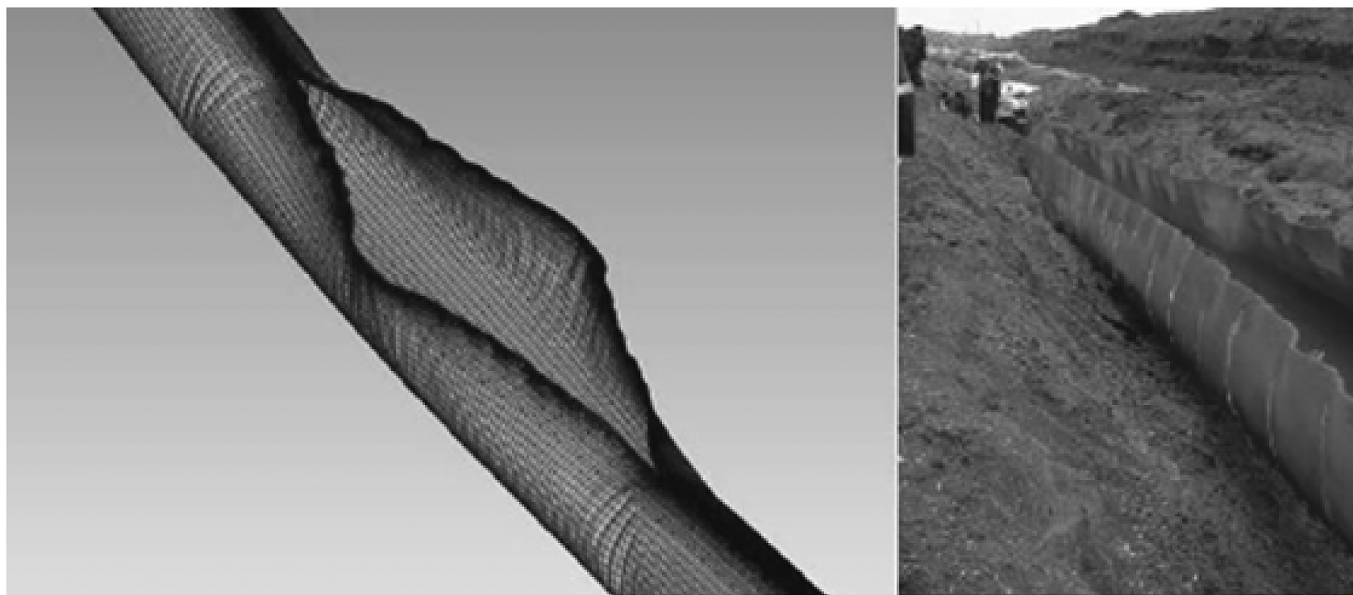


Рис. 7. Форма магистральной трещины в трубопроводе

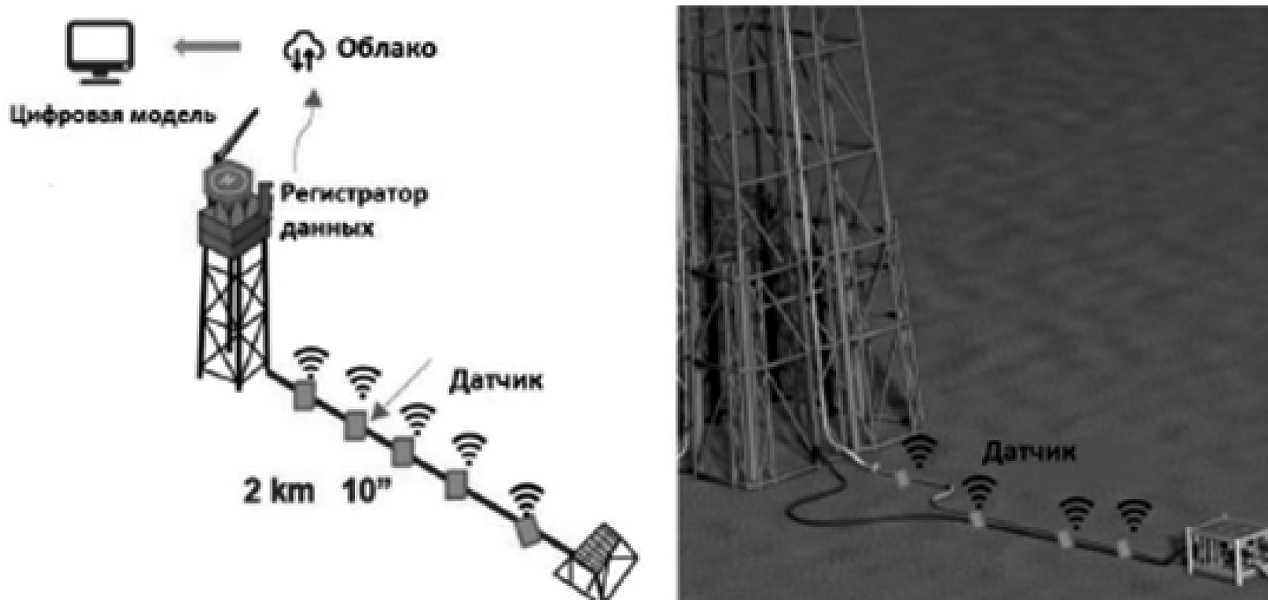


Рис. 8. Цифровой двойник трубопровода

и виртуальных испытательных полигонов. В статье [16] говорится о том, что в Санкт-Петербурге к концу 2023 года будут установлены на изношенные трубопроводы 488 датчиков в дополнение к уже к действующим 1846 датчикам. Это позволит охватить подземным контролем трубопроводов территорию радиусом до 600 км.

В статье [3] говорится о работах, проводимых ПАО «Газпром нефть», где переход на цифровые технологии считается приоритетным направлением деятельности с 2018 года. Осуществленные разработки цифровых двойников скважин, месторождений и заводов позволяют тестировать различные варианты организации добычи нефти и газа без рисков для людей и объектов. В ПАО «Сибур Холдинг» (нефтехимическая промышленность)

ведутся активные работы по созданию цифровых двойников для их использования в системах управления, моделирования технологических и производственных процессов и в логистике [3].

В статье [3] без конкретных примеров дан небольшой объем информации по использованию цифровых двойников в строительстве. В основном речь идет о контроле электричества, водных и тепловых ресурсов.

Примеры разработок цифровых двойников различных видов описаны в работе [4]. Приведены примеры цифрового месторождения нефти, цифровой морской платформы (с использованием технологии нефтегазового интернета вещей PloT), цифровой технологии бу-

рения. Для создания цифрового двойника подводных трубопроводов использовалась облачная платформа «Цифровой двойник месторождения». Весь необходимый комплекс расчетов был выполнен с помощью веб-графического интерфейса — GUI. На рисунке 8 показана схема размещения датчиков на трубопроводе и передачи данных, разработанная с использованием цифрового двойника.

Приведенный обзор материалов, опубликованный в периодической технической печати, показал, что работы по цифровизации ТЭК России ведутся. По большей части они касаются решения частных, конкретных задач. В то же время вопросы общего характера, имеющие стратегический уровень, практически не решаются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильева, В.Д. Топливо-энергетический комплекс России: проблемы и перспективы развития [Текст] / В.Д. Васильева // Научное обозрение. — 2019. — № 2-2. — С. 26–31.
2. Боровиков, А.И. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. [Краткий доклад] / А.И. Боровиков, А.А. Гамзикова, К.В. Кукушкин, Ю.А. Рябов. — СПб.: Политех-Пресс, 2019. — 62 с.
3. Курганова, Н.В. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства [Текст] / Н.В. Курганова, М.А. Филин, Д.С. Черняев, А.Г. Шаплеин, Д.Е. Намиот // International Journal of Open Information Technologies. — 2019. — Vol. 7. — № 5. — Рр. 105–115.
4. Быкова, В.Н. Применение цифрового двойника в нефтегазовой отрасли [Текст] / В.Н. Быкова, Е. Ким, М.Р. Гаджиалиев [и др.] // Актуальные проблемы нефти и газа. — 2020. — Вып. 1(28). — С. 1-11. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-28.art8> (дата обращения 29.03.2024).
5. Бурцев, Д.С. Инфраструктура и ресурсное обеспечение цифровой экономики [Текст] / Д.С. Бурцев, Е.С. Гаврилюк, А.Г. Изотова, А.С. Лебедева, И.Н. Леонтьева, Н.А. Литвинова, Е.Н. Кан, Ф.Э. Сатторов. — СПб: Университет ИТМО, 2021. — 190 с.
6. Сагитова, Т.М. Цифровая энергетика как элемент цифровой экономики [Текст] / Т.М. Сагитова, Л.А. Исмагилова // Материалы Региональной научной конференции-школы для молодежи «Инновационная экономика». — Уфа: РИК УГАТУ, 2018. — 385 с.
7. Кадирова, А.Т. Внедрение интеллектуальной сети Smart Grid [Текст] / А.Т. Кадирова // Материалы национальной (с международным участием) науч.-практ. конф. «Современные цифровые технологии: проблемы, решения, перспективы» (Казань, 19-20 мая 2022 г.). Под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. — Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2022. — 394 с.
8. Шпиганович, А.Н. Пути развития цифровой энергетике [Текст] / А.Н. Шпиганович, А.А. Шпиганович, К.А. Пушница // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2019. — Вып. 11. — С. 61–70.
9. Исмагилов, И.Р. Кибербезопасность объектов ТЭК: угрозы и меры защиты [Текст] / И.Р. Исмагилов // Материалы национальной (с международным участием) науч.-практ. конф. «Современные цифровые технологии: проблемы, решения, перспективы» (Казань, 19-20 мая 2022 г.). Под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. — Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2022. — 394 с.
10. Халимов, А.А. Выбор оптимального способа передачи информации с датчиков из «умных» скважин в базу данных [Текст] / А.А. Халимов, М.А. Сафин // Материалы национальной (с международным участием) науч.-практ. конф. «Современные цифровые технологии: проблемы, решения, перспективы» (Казань, 19-20 мая 2022 г.). Под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. — Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2022. — 394 с.
11. Трейман, М.Г. Энергоменеджмент. Использование информационных и цифровых технологий в энергоменеджменте [Текст] / М.Г. Трейман. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2023. — 58 с.
12. Массель, Л.В. Семантическое моделирование при построении цифровых двойников энергетических объектов и систем [Текст] / Л.В. Массель, А.Г. Массель // Онтология проектирования. — 2023. — Т. 13. — №1(47). — С.44–54. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-1-44-54.
13. Шевцова, А.В. Применение BIM-технологий в проектировании и строительстве [Текст] / А.В. Шевцова // Материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, ученых и специалистов «Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе» (20–22 декабря 2022 г.). В 2-х т. Т. 1 / Отв. ред. А.Н. Халин. — Тюмень: ТИУ, 2022. — 306 с.
14. Барсуков, А.А. Цифровой двойник динамического разрушения линейной части магистральных газопроводов из высокопрочных и вязких сталей [Текст] / А.А. Барсуков, Г.Х. Мурзаханов, В.Я. Великоднев // Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России: XV Всероссийская научно-техническая конференция: сборник трудов / отв. ред. В.Г. Мартынов; ред. А.Ф. Максименко, А.Н. Комков. — М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2022. — 584 с.
15. Боровиков, А.И. Цифровые двойники в нефтегазовом машиностроении [Текст] / А.И. Боровиков, Ю.А. Рябов, А.А. Гамзикова // Neftegaz.RU. — 2020. — №6. — С. 30–37.
16. Высокотехнологичная акустическая диагностика в ТЭК охватит свыше 600 км сетей / ТЭК Санкт-Петербурга [Электронный ресурс] URL: <https://www.gptek.spb.ru/press/news/vysokotekhnologichnaya-akusticheskaya-diagnostika-v-tek-okhvatit-svyshe-600-km-setey-/?ysclid=lu9j8842v578562574> (дата обращения 27.03.2024).

© Кондратьев Кирилл Анатольевич (kirillko645@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»