ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ «ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК» ДЛЯ ПОДЗЕМНОЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ В НИЖНЕКАНСКОМ МАССИВЕ

В. В. Кононов¹, В. Л. Тихоновский¹, С. С. Гуралев¹,
И. А. Бычкова¹, С. С. Уткин², В. С. Свительман²

¹АО «НЕОЛАНТ», Москва

²Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 29 апреля 2020 г.

В статье рассматриваются ключевые аспекты внедрения передовых цифровых технологий при создании сложных крупных промышленных объектов и потенциал их использования для подземной исследовательской лаборатории в Нижнеканском массиве (Красноярский край) (ПИЛ НКМ).

Ключевые слова: радиоактивные отходы, жизненный цикл, цифровой двойник, подземная исследовательская лаборатория, цифровые технологии, информационная модель.

Введение

В соответствии со Стратегией создания пункта глубинного захоронения РАО (ПГЗРО) от 28 марта 2018 г. [1], а также в соответствии с международным опытом и рекомендациями МАГАТЭ, первоначальным этапом сооружения объектов глубинной изоляции ВАО является создание подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ). Ключевая роль ПИЛ обусловлена тем, что в проектах геологической изоляции РАО процессы обоснования безопасности, характеристики площадки и проектирования неразрывно связаны (схематично это показано на рис. 1).

Так, на ранних стадиях предварительные модели системы захоронения могут в некоторой степени повлиять на выбор площадки. В дальнейшем информация, полученная в ходе характеристики площадки и экспериментов в ПИЛ, позволяет уточнить эти модели. Результаты

Рис. 1. Взаимосвязь различных аспектов в проектах создания ПГЗРО (адаптировано из [2])

Рис. 2. Поток данных и функции цифрового двойника в информационной системе научного сопровождения PULSE

предварительных оценок безопасности могут повлиять на выбор из нескольких концепций проекта, затем характеристики проектируемой системы инженерных барьеров используются на следующих этапах оценки безопасности, а результаты этой оценки, в свою очередь, участвуют в формировании набора детальных технических требований к проекту [3].

Кроме того, несмотря на то, что основным вызовом при планировании ПГЗРО является обоснование долговременной безопасности, эксплуатационная безопасность и инженерно-техническая осуществимость не менее важны для успешной реализации такого рода проектов [4]. Это означает, что все фазы создания ПИЛ (а затем и ПГЗРО), начиная с подготовительных работ и заканчивая эксплуатацией, требуют наличия высокоэффективного инструмента управления и сопровождения текущих процессов.

Из вышесказанного очевидно, что эффективный обмен информацией между различными аспектами деятельности в проекте создания ПГЗРО имеет решающее значение.

В рамках информационной системы научного сопровождения ПИЛ и ПГЗРО в Нижнеканском массиве PULSE [5] информация, касающаяся всех аспектов инженерно-технической осуществимости, будет агрегироваться в цифровой информационной модели (ЦИМ). Поток данных между ЦИМ и другими информационными подсистемами (базой знаний обоснования

долговременной безопасности, системой расчетных кодов и моделей, базами исходных данных) схематично изображены на рис. 2. Интеграция ЦИМ дает такие возможности, как, например, использование в расчетах актуальных характеристик элементов системы инженерных барьеров, верификация технических решений и оптимизация технологических процессов при помощи имитационных моделей.

Технология «цифровой двойник» и преимущества ее внедрения при создании сложных промышленных объектов

Независимо от отрасли, управление этапами жизненного цикла (ЖЦ) крупных промышленных предприятий, сопровождение всех текущих процессов, а также необходимость соблюдения требований к показателям надежности, безопасности и экономической эффективности, обоснованность принятия как управленческих, так и инженерных решений ставит перед всеми участниками сложные задачи, в решении которых помогают современные цифровые технологии.

«Цифровой двойник» или цифровая информационная модель — прототип реального объекта, группы объектов или процессов, где каждый элемент связан с базой данных, в которой сохраняется и актуализируется атрибутивная информация на всех этапах жизненного цикла:

от формирования идеи и разработки проектно-конструкторских и технологических решений до промышленной эксплуатации, а затем — вывода из эксплуатации.

Многообразие «цифровых двойников», как правило, классифицируется специалистами по трем типам: цифровые двойники-прототипы (Digital Twin Prototype, DTP), цифровые двойники-экземпляры (Digital Twin Instance, DTI) и агрегированные двойники (Digital Twin Aggregate, DTA) [6, 7].

DTP (Digital Twin Prototype) — виртуальный прототип реального физического объекта, включающий различные данные для всесторонней характеристики модели (габариты и структура объекта, технические требования и условия, технологические характеристики и пр.).

DTI (Digital Twin Instance) — создается на базе DTP-двойника и дополнительно содержит производственные и эксплуатационные данные (данные об изготовлении, используемых материалах и компонентах, статистику отказов, ремонтов, параметры мониторинга и пр.).

DTA (Digital Twin Aggregate) — информационная система управления, имеющая доступ ко всем двойникам и позволяющая собирать данные и обмениваться ими.

Применение технологии «цифровых двойников» делает возможным внедрение PLM-систем (Product Lifecycle Management, управление жизненным циклом изделия).

Необходимость внедрения передовых цифровых технологий на начальных этапах создания технически и технологически сложных промышленных объектов обусловлена рядом факторов. Ключевыми среди них являются потребности:

- в агрегировании большого объема разнородных данных в единый источник для возможности последующего проведения комплексной аналитической обработки;
- в получении актуальных данных в различных разрезах для принятия оптимальных проектно-технологических и управленческих решений;
- в минимизации появления ошибок/коллизий, обусловленных человеческим фактором;
- в обнаружении коллизий и своевременного их устранения;
- в повышении эффективности системы управления и контроля текущих процессов на всех этапах ЖЦ;
- в сохранении информации об объекте независимо от длительности жизненного цикла объекта или его отдельного этапа.

В настоящее время применение цифровых двойников рассматривается в проектах создания

ПГЗРО таких стран, как Япония [8], Великобритания [9], Швеция [10], Финляндия [11], Швейцария [12], Франция [13], Германия [14] и других.

Следует отметить, что проекты создания ПГЗРО являются протяженными во времени и сейчас, когда технология «цифровых двойников» получила достаточное развитие, находятся на различных стадиях жизненного цикла. При этом накопленные за время реализации проектов данные и документы, а также используемые информационные технологии — разнообразны и разнородны. В силу этих факторов и место «цифрового двойника» в ИТ-инфраструктуре проектов разных стран, и используемые подходы могут очень сильно отличаться.

Так, например, в основе немецкого «цифрового двойника» VIRTUS лежит ПО для геологического моделирования, а не САПР (рис. 3). В ИТ-инфраструктуре японского проекта уже на ранних стадиях разрабатывалось большое количество инструментов управления знаниями для решения различных задач, поэтому цифровая информационная модель, входящая систему проектирования iSRE, не является центральной, но при этом синхронизируется с этими информационными системами (рис. 4). Во французском проекте применение инструментов информационного моделирования неразрывно связано с реализацией концепции управления жизненным циклом объекта (PLM).

Рис. 3. Проектирование выработок в интерфейсе VIRTUS [14]

Рис. 4. Взаимосвязи системы проектирования ПГЗРО iSRE в ИТ-инфраструктуре японского проекта [8]

Возможности цифровой информационной модели для управления процессами проектирования и сооружения ПИЛ в Нижнеканском массиве

Внедрение технологии «цифровой двойник» в проекте создания ПГЗРО в части моделирования основных технологических процессов [5] для последующего анализа и оптимизации было начато в 2017 году ИБРАЭ РАН совместно с АО «НЕОЛАНТ» в рамках работ по теме «Создание информационной модели для анализа проектно-технических решений по сооружению ПГЗРО НКМ». Информационная модель разрабатывалась на базе системы управления инженерными данными (СУИД) «НЕОСИНТЕЗ». Результатом этой работы стала укрупненная габаритная трехмерная информационная модель ПГЗРО, включающая подгорную часть (в объеме отображения горных проходок), надземную часть (в объеме зданий и сооружений промплощадки), а также анимационные модели наиболее значимых участков основных технологических процессов для последующего обоснования и подтверждения их реализуемости и оценки оптимальности.

Эти работы стали основой для развития проекта создания цифрового двойника по следующим ключевым направлениям, работа над которыми идет в настоящее время:

- классификация и кодирование строительной информации для последующей автоматизации процессов инженерных изысканий, проектирования, строительства, эксплуатации;
- трехмерное моделирование;
- интеграция информационной модели с базой знаний в части документации и данных;
- создание системы мониторинга стоимостных показателей проекта;
- верификация в цифровом формате решений по транспортно-технологической схеме обращения с РАО;
- создание распределенной ИТ-инфраструктуры для функционирования цифрового двойника и центра сопровождения строительства на площадке.

Первоочередным стандартом проекта является стандарт кодирования проектно-технологических и сметных позиций и технической документации, создаваемой в процессе проектирования ПИЛ НКМ. Структура кода разрабатывается на основе принципов универсальной системы классификации кодирования KKS [15] и опыта реализации кодирования в проектах АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ, что обеспечит реализацию системы мониторинга стоимостных показателей и,

кроме того, позволит создать эффективную систему учета и контроля эксплуатации объекта. Для практической реализации и частичной автоматизации процесса кодирования, в рамках разработки стандарта кодирования предусмотрено создание специализированных надстроек к существующим видам программного обеспечения, используемого проектировщиками при разработке проектно-сметной документации (Word, Excel, AutoCAD, Гранд-Смета), позволяющим в полуавтоматическом режиме назначать код соответствующей проектной позиции, оптимизируя ресурсно-временные затраты.

Детализированная трехмерная модель ПИЛ НКМ на основе разрабатываемой рабочей и проектно-конструкторской документации (РД и ПКД) обеспечивает не только визуальное представление об объекте, но и является базой для работ по верификации проектно-технологических решений по обращению с РАО, а также наглядным инструментом поиска возможных коллизий. Структура трехмерной модели объектов ПИЛ НКМ в том числе обеспечивает взаимосвязь данных о материальном объекте (здание, сооружение, система, коммуникации, оборудование и т. п.) и данных об информационном объекте (стоимостные, временные, ресурсные и прочие проектные и фактические показатели выполнения СМР материальных объектов) с электронным архивом документации в составе ЦИМ ПИЛ НКМ.

Электронный архив ЦИМ представляет собой древовидную иерархическую структуру документации, разрабатываемой в процессе реализации проекта по созданию ПИЛ НКМ и формируемой в соответствии с группировкой по видам и типам, маркам и разделам, с обеспечением версионности и взаимосвязей с элементами трехмерной модели.

Система мониторинга стоимостных показателей реализует дополнительный функционал ЦИМ, обеспечивающий сравнение стоимостных показателей реализации проекта по документации стадий «П» и «Р», а также сравнение плановых показателей с фактической стоимостью СМР по первичным учетным документам, включая перевод сметной документации в цифровой формат в среде ЦИМ ПИЛ НКМ и настройку автоматически генерируемых отчетов.

Создание распределенной ИТ-инфраструктуры для функционирования ЦИМ ПИЛ НКМ, помимо закупки, установки и настройки необходимого программного и аппаратного обеспечения, включает работы по обеспечению информационной безопасности и организации защитного контура информационного обмена

Рис. 5. Состав ЦИМ и внутренняя схема взаимодействия

в составе ЦИМ, обучение пользователей и техническую поддержку функционирования ЦИМ ПИЛ НКМ.

Центр цифрового сопровождения строительства на площадке выполнения СМР обеспечивает:

- сбор фактографической информации непосредственно на площадке строительства с использованием технологий лазерного сканирования, сферического фотографирования, фото-видеосъемки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) для обеспечения визуального мониторинга процесса строительства (виртуальные штабы);
- сопровождение и контроль строительно-монтажных работ по средствам ведения и актуализации необходимых графиков процесса строительства (4D-модель), графиков поставки и монтажа оборудования, закупаемого и изготавливаемого в рамках проекта;
- авторский надзор при помощи ведения цифрового журнала;
- актуализацию и наполнение ЦИМ данными по результатам полевых работ, исполнительной документацией.

Состав ЦИМ и внутренняя схема взаимодействия представлена на рис. 5.

Цифровая информационная модель должна представлять собой структурированную совокупность данных о проектировании и сооружении ПИЛ НКМ в электронном виде, и содержать пространственное описание объектов ПИЛ, включая функционально-технологические, конструктивные, инженерно-технические и иные решения, тем самым обеспечивая единый консолидированный источник данных, необходимых для сооружения и последующей эксплуатации ПИЛ НКМ.

Основные показатели эффективности создания и применения технологии «цифровой двойник»

В качестве основных показателей эффективности создания и применения цифрового двойника на каждом этапе жизненного цикла объекта можно выделить следующее:

На этапе проектирования:

- сокращение времени и повышение качества разработки проектно-конструкторской документации (ПКД);
- своевременное выявление проектных коллизий;
- оптимизация и верификация проектно-технологических решений;

Рис. 6. Иллюстрация детализации от цифрового двойника площадки до цифрового двойника эксперимента

- повышение эффективности контроля и анализа разработки ПКД;
- создание системы мониторинга стоимостных показателей ПКД/РД.

На этапе строительства:

- повышение качества СМР за счет инструментов планирования, управления и контроля, в том числе: планирование потребности в материалах и распределение человеческих ресурсов, снижение времени простоя оборудования и персонала;
- выявление строительных коллизий и контроль качества выполнения СМР (лазерное сканирование, фото-панорамирование);
- контроль качества исполнительной документации;
- авторский надзор;
- организация удаленных штабов и совещаний;
- система мониторинга стоимостных показателей РД/СМР;
- формирование исполнительной модели «как построено».

На этапе эксплуатации:

- исполнительная модель, соответствующая реальному состоянию объекта на момент его ввода в эксплуатацию, как основа цифровой среды поддержки эксплуатации;
- наличие полноценной инженерно-технической информации;
- оптимизация планирования технического обслуживания и ремонта оборудования;
- эффективность работы эксплуатационного персонала;
- сокращение времени подготовки эксплуатационного и ремонтного персонала перед выполнением сложных работ.

На всех этапах ЖЦ:

- сокращение времени на поиск информации (различные критерии поиска);
- сохранение информации на весь период существования объекта.

Перспективой развития технологии является применение методов машинного обучения с использованием нейросетей, развитие систем онлайн-мониторинга и в совокупности — формирование самообучающейся интеллектуальной цифровой модели объекта для выполнения высокоточных прогнозных оценок и осуществления многовариантного проектирования с учетом различных ограничений.

Заключение

Создание и применение полнофункциональной ЦИМ как основы цифрового двойника объекта обеспечит участников проекта создания ПИЛ НКМ:

- единым актуальным источником информационно-технологических данных, соответствующих реальному текущему состоянию объекта;
- эффективным аналитическим инструментом, включая предиктивную аналитику для принятия оптимальных решений на ее основе;
- действенным инструментом контроля процессов проектно-исследовательских и строительно-монтажных работ, включая мониторинг стоимостных показателей;

А также это позволит по результатам завершения ПИР и СМР сформировать базу для создания цифровой среды поддержки промышленной эксплуатации ПИЛ НКМ.

Актуальным вызовом на данный момент остается интеграция ЦИМ с системой расчетно-прогностических комплексов, которая является краеугольным камнем обоснования долговременной безопасности ПГЗРО. Успешная реализация такой интеграции позволит воплотить цифрового двойника ПИЛ не только в разрезе проектирования и сооружения, но и с точки зрения моделирования релевантных для безопасности процессов (рис. 6).

Современный уровень развития высокопроизводительных вычислительных технологий уже позволяет не только теоретизировать на этот счет, но и строить практические планы. Не в последнюю очередь об этом говорит тот факт, что подобные задачи ставятся и в смежной области управления жизненным циклом атомных станций [16–18].

Внедрение передовых цифровых технологий в существующую концепцию управления комплексом взаимосвязанных процессов проектирования, сооружения, эксплуатации и закрытия позволит осуществить переход на качественно новый, современный уровень управления жизненным циклом таких технически и технологически сложных объектов, как ПИЛ и ПГЗРО [18].

Литература

1. Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов. ГК «Росатом», Москва. 2018. <http://www.norao.ru/upload/Стратегия.pdf>.
2. Vieno T., Ikonen A. T. K. Plan for Safety Case of spent fuel repository at Olkiluoto. Posiva Oy, 2005. № POSIVA-05-01.
3. Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Outcomes of the NEA MeSA Initiative. Nuclear Energy Agency. Organisation for Economic Cooperation and Development, 2012.
4. Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности № SSR-5. Нормы МАГАТЭ по безопасности. МАГАТЭ. Вена, 2011.
5. Свительман В. С., Савельева Е. А., Бутов Р. А., Линге Ин. И., Дорофеев А. Н., Тихоновский В. Л. Информационно-аналитическая платформа программы исследований по обоснованию долговременной безопасности российского ПГЗРО // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 79–87.
6. Grieves M., Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // Transdisciplinary perspectives on complex systems. Springer, Cham, 2017. P. 85–113.

7. Redelinghuys A. J. H., Kruger K., Basson A. A six-layer architecture for digital twins with aggregation // International Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. Springer, Cham, 2019. P. 171–182.
8. Sugita Y. et al. Development of a Design Support System for Geological Disposal of Radioactive Waste Using a CIM Concept.
9. Building Information Management Strategy and Implementation Plan — Radioactive Waste Management. United Kingdom, 2012. — Режим доступа: <https://rwm.nda.gov.uk/publication/building-information-management-strategy-and-implementation-plan/>.
10. Svensk kärnbränslehantering AB. Äspö Hard Rock Laboratory. Annual report 2015. TR-16-10–Svensk Kärnbränslehantering AB, 2016.
11. Engaging with BIM — Nuclear Engineering International. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.neimagazine.com/features/featureengaging-with-bim-5672206/>.
12. Fries T. Deep geological repository: use case digitalisation of site selection and alignment // CERN Tunnelling Workshop (Zurich, October 24th, 2019) — Режим доступа: <https://indico.cern.ch/event/823271/>.
13. Robert F. et al. Building information management for tunneling // Tunnels and Underground Cities. Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art. — CRC Press, 2019. P. 2950–2959.
14. Wieczorek K. et al. VIRTUS. Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz. — GRS-354. — Magdeburg: Gesellschaft für Anlagen-und Reaktorsicherheit gGmbH, 2014. — ISBN 978-3-944161-34-1. (In German).
15. РД 153-34.1-35.144-2002. Рекомендации по применению современной универсальной системы кодирования оборудования и АСУТП ТЭС. Основные положения. М: ОАО ВТИ, 2002.
16. Patterson E. A., Taylor R. J., Bankhead M. A framework for an integrated nuclear digital environment // Progress in Nuclear Energy. 2016. Vol. 87. P. 97–103. DOI: 10.1016/j.pnucene.2015.11.009.
17. Белокрылов П. Ю. и др. Интеграция процесса расчетного обоснования оборудования реакторных установок в единое информационное пространство для создания цифровых двойников ЯЭУ // Атомная энергия. 2019. Т. 127. № 6. С. 309–315.
18. Саптори А. В. и др. Применение методологии уровней готовности для бережливой разработки цифровых двойников сложных инженерных систем // Экономика науки. 2020. Т. 6. № 1–2. С. 62–74.

Информация об авторах

Кононов Виталий Владимирович, генеральный директор АО «НЕОЛАНТ» (105062, Москва, ул. Покровка, д. 47 А), e-mail: kononov@neolant.com.

Тихоновский Владислав Леонидович, кандидат технических наук, первый заместитель генерального директора, АО «НЕОЛАНТ» (105062, Москва, ул. Покровка, д. 47 А), e-mail: tikhonovsky@neolant.com.

Гуралев Сергей Сергеевич, первый заместитель генерального директора, АО «НЕОЛАНТ» (105062, Москва, ул. Покровка, д. 47 А), e-mail: guralev@neolant.com.

Бычкова Ирина Александровна, главный специалист ДИМ УИПР ОИР, АО «НЕОЛАНТ» (105062, Москва, ул. Покровка, д. 47 А), e-mail: bychkova@neolant.com.

Уткин Сергей Сергеевич, доктор технических наук, заведующий отделением, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: uss@ibrae.ac.ru.

Свительман Валентина Семеновна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: svitelman@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание статьи

Кононов В. В., Тихоновский В. Л., Гуралев С. С., Бычкова И. А., Уткин С. С., Свительман В. С. Возможности технологии «цифровой двойник» для подземной исследовательской лаборатории в Нижнеканском массиве // Радиоактивные отходы. 2020. № 2 (10). С. 99—108. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-2-99-108.

POTENTIAL OF A "DIGITAL TWIN" TECHNOLOGY FOR THE PURPOSES OF RESEARCH IN THE NIZHNEKANSKIY ROCK MASS UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY

Kononov V. V.¹, Tikhonovsky V. L.¹, Guralev S. S.¹, Bychkova I. A.¹, Utkin S. S.², Svitelman V. S.²

¹JSC "NEOLANT", Moscow, Russian Federation

²Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on April 29, 2020

The paper highlights key aspects associated with the introduction of advanced digital technologies under the development of large complex industrial facilities. It considers the applicability of a "digital twin" technology in the development of an underground research facility in the Nizhnekanskiy massif (Krasnoyarsk territory) (URF NKM).

Keywords: radioactive waste, information model, digital twin, underground research laboratory, life cycle.

References

1. Strategiya sozdaniya punkta glubinnogo zakhroneniya radioaktivnykh othodov [Strategy for the development of RW deep disposal facility]. Moscow, GK Rosatom Publ., 2018.
2. Vieno T., Ikonen A. T. K. Plan for Safety Case of spent fuel repository at Olkiluoto. Posiva Oy, 2005. № POSIVA-05-01.
3. Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Outcomes of the NEA MeSA Initiative. Nuclear Energy Agency. Organisation for Economic Cooperation and Development, 2012.
4. Disposal of radioactive waste. Specific safety requirements. No. SSR-5. IAEA Safety Standards. - IAEA, Vienna. 2011.
5. Svitelman V. S., Saveleva E. A., Butov R. A., Linge In. I., Dorofeev A. N., Tikhonovskiy V. L. Informatsionno-analiticheskaya platforma programmy issledovaniy po obosnovaniyu dolgovremennoy bezopasnosti rossiyskogo PGZRO [Informational

and Software Environment of the Russian Deep Geological Repository Research Program]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 79–87.

6. Grieves M., Vickers J. *Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. Transdisciplinary perspectives on complex systems*. Springer, Cham, 2017. P. 85–113.

7. Redelinghuys A. J. H., Kruger K., Basson A. *A six-layer architecture for digital twins with aggregation. International Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing*. Springer, Cham, 2019. P. 171–182.

8. Sugita Y. et al. Development of a Design Support System for Geological Disposal of Radioactive Waste Using a CIM Concept.

9. Building Information Management Strategy and Implementation Plan – Radioactive Waste Management. United Kingdom, 2012. Available at: <https://rwm.nda.gov.uk/publication/building-information-management-strategy-and-implementation-plan/>.

10. *Svensk kärnbränslehantering AB. Äspö Hard Rock Laboratory. Annual report 2015. TR-16-10– Svensk Kärnbränslehantering AB*, 2016.

11. Engaging with BIM – Nuclear Engineering International. Available at: <https://www.neimagazine.com/features/featureengaging-with-bim-5672206/>.

12. Fries T. Deep geological repository: use case digitalisation of site selection and alignment. CERN Tunnelling Workshop (Zurich, October 24th, 2019). Available at: <https://indico.cern.ch/event/823271/>.

13. Robert F. et al. Building information management for tunneling. *Tunnels and Underground Cities*.

Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art. CRC Press, 2019. P. 2950–2959.

14. Wieczorek K. et al. *VIRTUS. Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz. — GRS-354. — Magdeburg: Gesellschaft für Anlagen-und Reaktorsicherheit gGmbH*, 2014. ISBN 978-3-944161-34-1. (In German).

15. RD 153-34.1-35.144-2002. Rekomendatsii po primeneniyu sovremennoy universalnoy sistemy kodirovaniya oborudovaniya i ASUTP TES. Osnovnye polozheniya [Recommendations for the use of a modern universal classification system for TPP equipment and control systems. Fundamentals]. Moscow, VTI Publ., 2002.

16. Patterson E. A., Taylor R. J., Bankhead M. A framework for an integrated nuclear digital environment. *Progress in Nuclear Energy*, 2016, vol. 87, pp. 97–103. doi: 10.1016/j.pnucene.2015.11.009.

17. Belokrylov P. Yu. et al. Integratsiya protsessy raschetnogo obosnovaniya oborudovaniya reaktornykh ustanovok v edinoe informatsionnoe prostanstvo dlya sozdaniya tsifrovyykh dvoynikov YAEU [Integration of the Process of Calculation Justification of Equipment of Reactor Facilities in a Single Information Space for the Creation of Digital Twins of Nuclear Power Plants]. *Atomnaya energiya — Atomic Energy*, 2019, vol. 127, no. 6, pp. 309–315.

18. Sartori A. V. et al. Primenenie metodologii urovney gotovnosti dlya berezhlivoy razrabotki tsifrovyykh dvoynikov slozhnykh inzhenernykh sistem [Application of the methodology of readiness levels for the lean development of digital twins of complex engineering systems] *The Economics of Science — Ekonomika nauki*, 2020, vol. 6, no. 1–2, pp. 62–74.

Information about of authors

Kononov Vitaly Vladimirovich, General Director JSC "NEOLANT" (47 A, Pokrovka str., Moscow, 105062, Russia), e-mail: kononov@neolant.com.

Tikhonovsky Vladislav Leonidovich, Candidate of technical Sciences, First Deputy General Director JSC "NEOLANT" (47 A, Pokrovka str., Moscow, 105062, Russia), e-mail: tikhonovsky@neolant.com.

Guralev Sergey Sergeevich, First Deputy General Director JSC "NEOLANT" (47 A, Pokrovka str., Moscow, 105062, Russia), e-mail: guralev@neolant.com.

Bychkova Irina Alexandrovna, main specialist JSC "NEOLANT" (47 A, Pokrovka str., Moscow, 105062, Russia), e-mail: bychkova@neolant.com.

Utkin Sergey Sergeevich, Doctor of Technical Sciences, Head of Department, Nuclear Safety Institute of RAS (52, Bolshaya Tuskaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: uss@ibrae.ac.ru.

Svitelman Valentina Semenovna, PhD, Research associate, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tuskaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: svitelman@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description

Kononov V. V., Tikhonovsky V. L., Guralev S. S., Bychkova I. A., Utkin S. S., Svitelman V. S. Potential of a "Digital Twin" Technology for the Purposes of Research in the Nizhnekanskiy Rock Mass Underground Research Laboratory. *Radioactive Waste*, 2020, no. 2 (11), pp. 99–108. (In Russian). DOI: 10.25283/2587-9707-2020-2-99-108.