

# Международный опыт и тенденции развития технологии информационного моделирования применительно к жизненному циклу объектов железнодорожной инфраструктуры

А.В.Казаринов, В.П.Куприяновский, В.В.Талапов

**Аннотация**— В данной статье рассмотрен накопленный на рубеже 2020 года мировой опыт применения технологий информационного моделирования (ВИМ) к объектам капитального строительства на примере железнодорожной инфраструктуры. В статье показано, что во всех значимых успехах применения ВИМ в крупных инфраструктурных проектах велико влияние государства как законодательной, так и научной силы. Участие государства объясняется тем, что ВИМ является технологией нового технологического уклада, основанного на цифровизации экономики, а возможности конкуренции и развития государств определяются их способностью не отстать в технологической гонке.

Анализу государственно-частного партнёрства в развитии технологии ВИМ на примере крупных инфраструктурных проектов посвящена первая часть статьи.

Вторая часть статьи сосредоточена на анализе достигнутого уровня развития технологии ВИМ. Сделан вывод о том, что ВИМ является новой парадигмой – безчертёжной технологией создания и управления инженерными данными в жизненном цикле строительного объекта. На основе этого вывода определены основные направления развития технологии.

Показано, что после успеха информационного моделирования на этапе проектирования, сейчас на этапе строительства происходит накопление опыта применения технологии с целью отказа от чертежей в пользу строительства непосредственно по моделям. Планирование строительства по моделям уже получило надёжные цифровые инструменты, в ближайшем будущем мы ожидаем увидеть перенос технологии ВИМ на операции непосредственного выполнения работ на стройплощадке, в первую очередь – операции разметки и монтажа. Этим перспективным субтехнологиям (mixed reality) посвящена отдельная глава, с примером возможного применения и ожидаемым эффектом.

В статье также уделено внимание вопросам легитимизации работы с ВИМ-моделями с точки зрения

юридической значимости данных и другим важным вопросам.

**Ключевые слова**—ВИМ, информационное моделирование, железнодорожная инфраструктура.

## 1 ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИМ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Развитие технологии ВИМ в промышленно развитых странах (планирование, инвестиции, применение) осуществляется во взаимосвязи государства и бизнеса. Ниже кратко показано, как наукоёмкие отраслевые задачи стимулируют развитие технологии.

### 1.1 Европейский союз

#### 1.1.1 Инфраструктурные проекты

*Трансевропейская транспортная сеть (транспортные коридоры) (TEN-T)*

Это планируемая единая сеть автомобильных и железных дорог, аэропортов и водной инфраструктуры в Европейском Союзе [1]. Сеть TEN-T является частью более широкой системы Трансевропейские Сети (TENs), включающей также телекоммуникационную сеть (eTEN) и сеть энергопотребления (TEN-E или Ten-Energy).

Программа проектов TEN-T предусматривает скоординированное совершенствование основных автомобильных дорог, железных дорог, внутренних водных путей, аэропортов, морских портов, внутренних портов и систем управления движением, обеспечивающих комплексные и интермодальные междугородние высокоскоростные маршруты. Решение о создании TEN-T было принято Европейским парламентом в 1996 году.

К настоящему времени ведутся работы по созданию 10 основных транспортных коридоров TEN-T.

Реализация такой масштабной задачи сразу поставила перед Евросоюзом проблему преодоления различий опыта и практики проектирования и строительства, отражённых в национальных технических регламентах государств, входящих в Еврозону. Помимо различий

Статья получена 11 ноября 2020.

Аркадий В. Казаринов – ОАО «РЖД», ЦТИМ (e-mail: KazarinovAV@center.rzd.ru).

Василий П. Куприяновский – РУТ (МИИТ) (e-mail: v.kupriyanovsky@rut.digital).

Владимир В. Талапов – ОАО «РЖД», ЦТИМ (e-mail: TalapovVV@center.rzd.ru).

практики создания новых объектов транспортной инфраструктуры, возникла проблема унификации в рамках Евросоюза и мирового рынка киберфизических систем управления эксплуатацией: систем контроля, связи, энергоснабжения, механо- гидро- и пневмоприводов и т.д.

Наиболее эффективным решением проблемы в рамках 4-го технологического уклада (цифровизация) явилось участие стран-членов ЕС в международных организациях по стандартизации информационного моделирования (например, компания buildingSMART [2]) и в активное внедрение в общеевропейских инфраструктурных проектах технологии информационного моделирования с самых первых стадий строительного процесса. Показательным примером такого применения в программе проектов TEN-T является проект RailBaltica.

#### *Проект RailBaltica, Евросоюз*

Наиболее близкий к России Североморско-Балтийский коридор реализуется в рамках проекта RailBaltica [3]. Проект с самого начала разрабатывается с помощью BIM технологий, информация для BIM-специалистов находится здесь [4].

По предварительным, хотя и весьма спорным оценкам, после завершения к 2030 году проекта RailBaltica, по Североморско-Балтийскому коридору будут перевозить около 5 миллионов пассажиров и 16 миллионов тонн грузов в год.

Генподрядчик компания RB Rail AS высоко оценила преимущества работы в BIM [5], поскольку она работает над этим проектом с множеством разных консультантов, проектировщиков и т.д., где изначально у всех свой подход. Требование внедрения BIM в своих тендерах позволяет RB Rail Baltic проверять и верифицировать их работу «на ходу» и, что более важно, гарантировать, что вся информация, собранная на этапе проектирования, где-то «записана» и может быть использована позже для управления активами. Пока у заказчика нет потребности в четком определении эксплуатационной модели, но преимущества текущих рабочих процессов информационного моделирования ожидаемо проявятся в течение самого длительного периода жизненного цикла активов - в эксплуатации.

Проектная команда RB Rail AS предложила подрядчикам единые правила - «Руководство по BIM», и подробный набор правил для проектировщиков. Проект соответствует стандартам IFC, установленным международной организацией buildingSMART. Для вокзалов проектирование уже стандартизировано.

В документе Rail Baltica BIM Framework также говорится, что стандарты IFC alignment, IFC bridge, IFC tunnel и другие будущие форматы IFC, связанные с гражданским сектором, будут приняты «Стратегией BIM проекта», как только они станут достаточно зрелыми для реализации. Таким образом, по мере развития проекта можно будет предоставлять эти данные в IFC или других форматах файлов «открытых» данных для работы с подрядчиками (хотя основными программами моделирования выбраны инструменты Bentley Systems,

которые в использовании формата IFC не нуждаются).

С самого начала команда RB Rail AS считала Среду Общих Данных (Common Data Environment, CDE) цифровой основой Rail Baltica, что сделало возможным быстрое объединение проекта.

Компания RB RAIL AS, которая, как заказчик, закупает проекты у разных компаний, установила 4 этапа проектирования, которые подрядчики должны выполнить после победы в тендере на заключение контракта. Общим элементом на этой фазе является обеспечение возможности использования в дальнейшем всей собранной информации для управления активами.

Четыре этапа проектирования представляют:

1. Этап «Исследование участка» включает в себя геотехнические исследования, топографические изыскания, лазерное сканирование и гидрологические исследования. Этот этап важен для проектировщика, чтобы понять условия окружающей среды.

2. Этап «Стоимостной инжиниринг» - здесь проектировщик должен сформулировать лучшее предложение, и они вместе с консультантом обсуждают предварительный проект, чтобы определить лучший вариант в данных обстоятельствах с точки зрения MCA, CAPEX и OPEX. Основная цель такой работы - всегда помнить о том, как железная дорога будет эксплуатироваться в будущем, и найти лучший подход в долгосрочной перспективе. Проект на этом этапе будет соответствовать целевому значению LOD 200.

3. Этап «Мастер-дизайн» приходит после того, как выбрали лучший вариант. На этом этапе проектировщик работает над точным проектным решением, которое станет основой для тендерных процессов на строительство. Проект на этом этапе будет соответствовать целевому значению LOD 300.

4. В соответствии с местным законодательством, в случае Rail Baltica этап «Детальное техническое проектирование» является задачей проектировщиков. Это будет тот проект, по которому строитель возведет объект. Проект на этом этапе будет соответствовать целевому значению LOD 400.

Опыт проекта показывает: чтобы избежать многих проблем, требования должны быть сформулированы как можно более четко. План предоставления информации о задачах (TIDP) и план выполнения BIM (BEP) должны соответствовать BIM EIR (информационные требования заказчика) [6] и согласовываться на начальном этапе, а затем периодически обновляться.

Также в проекте акцентируется внимание на том, что BIM не требуется ради BIM. У подрядчика должна быть собственная команда, которая знает, что нужно предоставить, и может это сформулировать. Необходимо обладать целостным подходом и помнить, что BIM (информационная модель актива) принесет важные долгосрочные выгоды для всех заинтересованных сторон.

#### *Проект Crossrail, Великобритания*

Первая очередь Crossrail (официально именуемая Elizabeth line) - это новая железнодорожная наземно-подземная линия протяженностью 117 километров (73

мили), разрабатываемая в Соединенном Королевстве, пересекающая Лондон с запада на восток [7].

Проект является одним из самых сложных инфраструктурных проектов, когда-либо реализовывавшихся в Великобритании, это также крупнейший инфраструктурный проект Европы.

Crossrail интегрируется с метрополитеном и национальными железнодорожными сетями. Планируется его включение в стандартную карту метрополитена Лондона.

Crossrail будет работать с использованием новых поездов класса 345-70, каждый длиной 200 метров (660 футов), перевозящих до 1500 пассажиров. Поезда (поставщик - компания Bombardier, Канада) будут двигаться со скоростью до 140 км/ч (90 миль в час) на определенных участках маршрута. Системы сигнализации и управления для Crossrail предоставляет компания Siemens.

Инновационная сложность проекта и разнообразие участников потребовали инновационного подхода к строительному процессу, поэтому техническое руководство проекта сразу сделало ставку на использование информационного моделирования. Фактически Crossrail – это главный BIM-проект Великобритании.

Строительство Crossrail началось в 2009 году, сразу после кризиса 2008 года, и на протяжении всего 10-летнего периода оно всегда немного опережало свое время. В 2011 году, когда появилась новая стратегия строительства правительства Великобритании, требовавшая, чтобы все госбюджетные проекты, реализованные после 2016 года, соответствовали «BIM Уровень 2», это уже было реализовано в Crossrail. В дальнейшем это помогло правительству Великобритании в формировании его планов, поскольку оно получило исключительно положительный пример одновременного создания физической и цифровой железной дороги, подтверждавший правильность решений по BIM [8].

Благодаря BIM компания Crossrail удерживала в допустимых рамках непредвиденные расходы для управления и снижения рисков и уделяла особое внимание процессу закупок [10]. Были утверждены обязательные для всех участников проекта нормативные документы, и одним из них стало «Руководство по BIM» [8], [11]-[13].

Для обеспечения беспрепятственного сотрудничества и успешной цифровизации новой железной дороги компания Crossrail установила строгие руководящие принципы и стандарты и потребовала от всех подрядчиков, работающих над проектом, использовать процессы и программные системы Crossrail, основанные на технологии информационного моделирования.

В качестве единой Среды Общих Данных, реализующей взаимодействие участников проекта средствами информационного моделирования, была задействована система Bentley ProjectWise, ранее хорошо зарекомендовавшая себя на подготовке к Олимпиаде в Лондоне.

Для достижения наилучшего возможного синергизма

между цифровой и физической моделями, а также обучения и консультаций персонала в области информационного моделирования компания Crossrail создала «Bentley Crossrail BIM Academy» в рамках технологического партнерства с компанией Bentley Systems, разработчиком основного программного обеспечения для реализации проекта. Академия, ставшая корпоративным учебным центром, была первой такого рода организацией в Великобритании. В дальнейшем подобная практика была повторена при работе с проектом HS2 в Великобритании и компанией Shell в США.

Реализация BIM в проекте Crossrail дала много преимуществ, среди которых особо отмечаются [9]:

- Создание виртуальных активов, что помогает одновременно построить физическую и цифровую железную дорогу.
- Интеграция данных для всех этапов жизненного цикла.
- Совместное управление всеми типами данных.
- Единственный источник информации, к которому легко обращаться.
- Уменьшенные потери (минимизация коллизий).
- Повышение эффективности (более быстрые согласования при взаимодействии).
- Снижение потери информации (при использовании только последних версий документов/чертежей).
- Повышенная безопасность (визуализация модели ведет к повышению осведомленности).
- Снижение риска рассинхронизации работ (через 4D анализ).
- Улучшенная производительность (связывание моделей с картографированием через ГИС).
- Комплексная передача модели от проектировщика к подрядчику.
- Инновационное управление активами (связывание моделей непосредственно с базой данных активов).

Сейчас на основе созданных проектно-строительных мощностей и компетенций в области информационного моделирования начал реализовываться проект Crossrail 2 аналогичной магистрали, пересекающей Лондон в перпендикулярном направлении. Ожидается, что благодаря полученным наработкам, прежде всего в информационном моделировании, время его реализации будет существенно меньше, чем у первой очереди Crossrail.

#### *Проект High Speed 2, Великобритания*

HS2 - это новая высокоскоростная подземно-наземная железная дорога [14], соединяющая Лондон, Мидлендс, Север и Шотландию, обслуживающая более 25 станций, включая восемь из 10 крупнейших городов Великобритании и соединяющая около 30 миллионов человек. Этот проект, как считается, поможет сбалансировать региональную экономику Великобритании. Учитывая опыт Crossrail, проект HS2 полностью реализуется с использованием технологии BIM, так же как на программах Bentley Systems.

Можно выделить три основных преимущества HS2:

- Снятие междугородних поездов с существующей железнодорожной сети освободит больше места для пригородных и грузовых перевозок, что поможет уменьшить их перегруженность и убрать грузовики с дорог.
- Улучшение транспортного сообщения между городами и регионами приносит больше инвестиций в срединные земли и север Великобритании, помогая выровнять ситуацию в стране.
- Польза для окружающей среды: HS2 будет низкоуглеродистым вариантом для дальних поездок, поскольку один поезд выпускает в 17 раз меньше углерода (сажи), чем эквивалентный внутренний рейс, и в 7 раз меньше углерода, чем эквивалентная поездка на автомобиле.

Согласно официальной информации, компания High Speed Two Ltd, реализующая проект, стремится задействовать информационное моделирование зданий для электронного хранения и использования цифровых данных. Это поможет обеспечить совместную работу по всей программе HS2 и оптимизировать проектирование для возможностей строительного производства, а также возможности монтажа.

BIM-моделирование в проекте является ключевым фактором. В связи с этим в проекте особое внимание уделяется прикладным исследованиям применения технологий BIM, например, изучению любого информационного разрыва, который может существовать между требованиями BIM HS2 и цепочкой поставок.

#### *1.1.2 Научно-техническое сопровождение инфраструктурных проектов*

*Рамочная программа по развитию научных исследований и технологий Евросоюза «Horizon 2020»*

На её базе [15] работает программа прикладных исследований для железных дорог «Shift2Rail» - ключевая европейская железнодорожная инициатива, направленная на поиск целенаправленных исследований и инноваций (R&I) и рыночных решений путем ускорения интеграции новых и передовых технологий в инновационные решения для железнодорожных продуктов [16]. НИОКРы «Shift2Rail» (в том числе исследования по применению BIM-технологий), проводимые в рамках программы исследований Horizon 2020, разрабатывают необходимую технологию для завершения строительства единого европейского железнодорожного пространства (SERA).

Предлагаемая инициатива способствует повышению конкурентоспособности отрасли железнодорожного транспорта, вводя новые рыночные перспективы, предлагая значительные рабочие места и экспортные возможности.

Одним из примеров интеграции BIM-технологий в исследования Shift2Rail является прикладной проект Assets4Rail, о котором официальная информация говорит следующее [17]:

«Assets4Rail разделяет точку зрения Shift2Rail о наличии стареющей европейской железнодорожной инфраструктуры, которая должна справиться с ожидаемым увеличением трафика в будущем. Для достижения этой цели нам необходимо усовершенствовать технологию и создать экономически эффективную систему технического обслуживания и вмешательства для инспекции и мониторинга инфраструктуры.

Программа Assets4Rail стремится внести свой вклад в модальный сдвиг путем изучения, адаптации и тестирования передовых технологий мониторинга и технического обслуживания железнодорожных активов. Для достижения этой цели Assets4Rail следует двойному подходу, включая инфраструктуру (туннель, мосты, геометрию путей и системы безопасности) и транспортные средства. Выделенная информационная модель будет краеугольным камнем инфраструктурной части проекта. Эта модель с интегрированными алгоритмами будет аккумулировать и анализировать информацию, собранную специальными датчиками, которые будут отслеживать дефекты подземных туннелей, накопление усталостных дефектов конструкций, шум и вибрации мостов, а также геометрию пути.

С другой стороны, мониторинг движения поездов будет включать установку автоматизированной системы визуализации рельсовых путей и подрамников для сбора данных для обнаружения конкретных типов дефектов, оказывающих воздействие на инфраструктуру. Дополнительное использование технологии RFID позволит обеспечить плавную идентификацию поездов и отдельных элементов, связанных с выявленными неисправностями подвижного состава».

Другими словами, в программе Assets4Rail речь идёт о создании цифровых двойников и умной инфраструктуры.

#### *1.1.3 Выводы по разделу*

Таким образом, мы видим в Евросоюзе масштабную синхронизированную концепцию развития транспорта, в которой BIM – ключевая цифровая технология создания инженерных моделей общеевропейской инфраструктуры. Причём её концептуальное развитие (исследования и операционные возможности) происходит в соответствии с требованиями общеевропейских концепций более высокого уровня (TENs и Horizon 2020).

При реализации BIM на конкретных железнодорожных проектах особое внимание уделяется организации взаимодействия участников проекта, информационным требованиям заказчика (требования к моделям и моделированию) и среде общих данных. Всё это реализуется с помощью тщательно подобранного (через собственный многолетний опыт либо опыт других проектов) программного обеспечения, основу которого составляет Bentley ProjectWise.

## 1.2 Использование технологии BIM для общего развития железнодорожного транспорта в некоторых странах

### 1.2.1 Китай

Китай, как одна из крупнейших железнодорожных держав мира, находится в ряду стран, в которых проходит успешное тотальное применение BIM на железных дорогах [8]. В частности, в Китае разработан и действует собственный, базирующийся на формате IFC BIM-стандарт на инфраструктуру железных дорог (ссылка далее).

Китай считается лидером во внедрении высокоскоростных железнодорожных магистралей. В сентябре 2019 в КНР закончили строительство последнего участка одного из самых протяженных скоростных железнодорожных маршрутов в мире. Теперь расстояние в 2 360 км из Пекина в Гонконг можно преодолеть за 8 часов 56 минут.

Всего же к 2019 году Китай инвестировал в развитие железных дорог 802,8 млрд юаней или 117 млрд долларов, увеличив их протяженность на 4 600 км. При этом, по состоянию на 2019 год, сеть высокоскоростных железных дорог в стране достигла 29 тысяч километров.

Подобное бурное развитие внутренней высокоскоростной сети так же, как и в Великобритании, связано с выравниванием экономики регионов, когда большие массы рабочей силы способны перемещаться на большие расстояния в течении дня - к заводам производственных кластеров и обратно.

Высокие требования к технологичности железных дорог потребовали разработки и развития собственных высокотехнологичных стандартов для национальной индустрии по созданию и управлению инженерными данными для железнодорожной инфраструктуры. Поэтому китайское подразделение международной организации buildingSMART в области стандартизации BIM-технологий первым предложило свой специализированный BIM-стандарт для железных дорог IFC Rail (China Railway BIM Alliance [18]).

Использование Китаем BIM на скоростных железных дорогах хорошо иллюстрируется публикацией о действующих ВСМ [19]:

Новая 71-я скоростная линия, первая в железнодорожной отрасли Китая, внедрившая стратегию BIM с полным жизненным циклом, с 71 наземными участками, 64 мостами, 10 тоннелями и 10 станциями, включая самую глубокую и самую большую в мире станцию метро в Бадалине, и все дисциплины, участвующие в проекте.

China Railway Engineering Consulting Group (CEC) отвечала за предварительный и детальный проектный и строительный консалтинг. Ставя цель установить эталон в железнодорожной отрасли, компания взяла на себя обязательство использовать инновационные технологические методы для оптимизации проектирования и строительства и достижения BIM с полным жизненным циклом в высокоскоростном железнодорожном проекте мирового класса. В проекте были представлены значительные и изменяющиеся

условия окружающей среды в высокогорной зоне среди окружающей культурной инфраструктуры, что требовало сложных структурных решений. Чтобы оптимизировать проект, эффективно координировать проект и внедрять эффективные процессы совместного 3D проектирования и строительства, CEC требовались интегрированные приложения для цифрового дизайнера.

Создание Среды Общих Данных является обязательным элементом технологии BIM. Для того, чтобы облегчить скоординированные процессы проектирования и разработки, CEC выбрала технологию компании Bentley Systems для создания среды общих данных. «Мы сталкиваемся с большими проблемами в совместной работе, поэтому мы хотим найти платформу, которая проста в использовании, обеспечивает унифицированный формат хранения данных и поддерживает совместную работу», - сказал Чжунлян Чжан, директор BIM в CEC.

На основе интегрированных приложений ProjectWise команда Bentley Systems создала логические связи между различными дисциплинами и внутри них, обеспечивающие доступ к доверенной информации в режиме реального времени в любом месте и в любое время. CEC использовала ProjectWise как общую платформу и внедрила инновационные методологии BIM, используя MicroStation, OpenBuildings Designer и OpenRoads Designer для оптимизации обмена информацией. Интегрированное программное решение позволило команде создать библиотеку компонентов для стандартизации проектирования и динамического моделирования, с помощью которой можно было бы централизованно управлять на всех этапах, в одной среде цифровой совместной работы и в соответствии с теми же стандартами.

По неофициальным данным, ежегодный рост продаж компании Bentley Systems в Китае не опускается ниже 30%.

### 1.2.2 Южная Корея

Дорожная карта по информационному моделированию Rail BIM 2030 Южной Кореи [20] была разработана совместно Корейским научно-исследовательским институтом железных дорог, Университетом Йонсей и Управлением железнодорожной сети Кореи под руководством профессора Ганг Ли (Ghang Lee), директора Группы строительной информатики (BIG) на кафедре архитектуры и архитектурного проектирования в университете Йонсей в Сеуле, Южная Корея.

В этой дорожной карте описываются пять этапов внедрения и распространения стратегий информационного моделирования (BIM) в период с 2018 по 2030 год для развития железнодорожной отрасли Южной Кореи в 4-м индустриальном укладе («Индустрия 4.0»).

В написании дорожной карты также участвовало корейское железнодорожное сетевое управление (KR) - оно является правительственным агентством, которое контролирует и управляет всем жизненным циклом железной дороги, включая высокоскоростную, обычную и городскую железнодорожную инфраструктуру.

В процессе внедрения корейцы получили сначала отрицательный опыт [8]. Учитывая, что первый крупный публичный проект BIM в Южной Корее был организован в 2008 году, можно сказать, что KR восприняло BIM относительно рано; KR осуществил свой первый проект BIM в 2009 году, затем еще восемь до 2018 года. Тем не менее, не так много людей в KR знали об этих проектах BIM, потому что они проводились на уровне отдельного проекта, а не на уровне компании. Знания и опыт, полученные в результате реализации проектов, значительно обесценились, потому что эти проекты выполнялись не согласованно, без хорошей дорожной карты и стратегии.

Чтобы преодолеть эту проблему, университету Йонсей было предложено разработать «Дорожную карту Rail BIM 2030» для KR совместно с Корейским институтом железнодорожных исследований (KRRRI) в рамках проекта Rail BIM, финансируемого Министерством наземной инфраструктуры и транспорта Кореи (MoLIT).

Основное различие между предыдущими дорожными картами и дорожной картой Rail BIM 2030 состоит в том, что дорожная карта Rail BIM 2030 классифицирует фазы внедрения BIM по способу использования BIM, тогда как другие дорожные карты BIM классифицируют каждую фазу по размеру проекта (например, общую площадь объекта или его стоимость), представлению (чертежи, модели в IFC, файлы в формате COBie) и так далее.

Служба закупок Южной Кореи сделала обязательным использование BIM для всех проектов стоимостью более 50 миллионов долларов США, а также для всех проектов государственного сектора, с начала 2016 года, поэтому для железных дорог резко встал вопрос об оптимизации процесса информационного моделирования.

«Дорожная карта Rail BIM 2030» основана на модели уровня использования BIM (BUL) (уровень зрелости), которая была разработана на основе исследований BIM, продолжавшихся более десяти лет. При разработке плана действий [21] были выделены два важнейших вопроса:

- как определить, достиг ли KR следующего уровня;
- как осуществить проект, который позволит накапливать все больше знаний о BIM и впоследствии делиться ими.

Последние два раздела дорожной карты Rail BIM 2030 посвящены этим вопросам. Три главные основы: люди, процессы и технологии являются базой железнодорожного информационного моделирования Южной Кореи, но в этой дорожной карте также рассматриваются и информационные взаимодействия с внешними системами.

Дорожная карта железнодорожного BIM 2030 состоит из пяти уровней:

*Уровень 1: Цель 2018 (BIM 1.0) Преобразование 2D в 3D BIM*

Очень немногие участники проекта работают в BIM во время фазы преобразования BIM (уровень 1) 2D в 3D.

2D чертежи остаются основными средствами коммуникации. Участники могут извлечь выгоду из развертывания BIM в своих проектах, так как это позволит им рассмотреть разрабатываемые объекты с многих позиций и выявлять ошибки проектирования при преобразовании 2D-чертежей в модели BIM (только проектирование). Как только появятся BIM-модели проекта, эти модели также могут быть использованы для общественных слушаний, для общения с клиентами, проверки конструктивности и т.д.

*Уровень 2: Цель 2020 (BIM 2.0) BIM с двумя путями (параллельный BIM)*

На этапе BIM с двумя путями (уровень 2), намеченном на 2020 год, BIM будет использоваться для тех частей проекта, которые могут принести существенную пользу от развертывания BIM, например, в областях, где несколько участников взаимодействуют друг с другом, областей со сложной геометрией и участков, которые требуют применения тяжелой техники. Другие части проектов будут выполняться с использованием традиционного метода на основе 2D.

*Уровень 3: Цель 2022 (BIM 3.0) Интегрированный BIM или Полный BIM.*

Во время интегрированной фазы BIM (уровень 3), намеченной на 2022 год, все основные участники проекта будут создавать BIM-модели и работать с ними. Это позволит на основе BIM интегрировать управление проектами затрат на строительство, планирования процессов, а также проблемами относительно дизайна и качества строительства.

*Уровень 4: Цель 2024 (BIM 4.0) Lean BIM (бережливый BIM)*

На этапе бережливого BIM (уровень 4), намеченного на 2024 год, концепции управления проектами будет находиться под влиянием обрабатывающей промышленности (бережливого производства, которое внедрено в корейской промышленности), так как BIM будет поддерживать бережливое строительство, модульное строительство вне зданий, автоматизацию строительства и интегрированное управление объектами, чтобы обеспечить создание синергии для повышения производительности и качества проектов.

*Уровень 5: Цель 2030 (BIM 5.0) Интеллектуальный BIM (AI BIM)*

На этапе интеллектуальной BIM (уровень 5), намеченном на 2030 год, будут созданы большие данные путем интеграции BIM с датчиками и несколькими базами данных.

Эти данные будут использоваться в качестве источника для принятия обоснованных решений. Наиболее оптимальные и эффективные решения многих инфраструктурных проблем, как например отдельные проблемы на уровне объекта, будут рассматриваться в процессе принятия обоснованных решений.

### 1.2.3 Германия

Основной оператор немецких железных дорог Deutsche Bahn AG (Deutsche Bahn Holding, сокр.DB) реализует проект по внедрению BIM, цели которого состоят в

управлении качеством, стоимостью и сроками [22]

Цитата в части позиции DB по внедрению BIM:

«Информационное моделирование зданий (BIM) предполагает планирование проекта, проектирование и строительство железнодорожных линий - со всеми мостами, туннелями, станциями и техническим оборудованием - от первоначальной идеи до эксплуатации и технического обслуживания. На этапе проектирования и строительства BIM сочетает 3D-дизайн с информацией о стоимости и сроках. Строительство происходит сначала в цифровом виде, затем в реальной жизни. Этот метод выявляет конфликты в строительном процессе задолго до начала работ на строительной площадке.

Будучи крупнейшим европейским оператором инфраструктуры, Deutsche Bahn (DB) продвигает цифровое строительство, потому что оно улучшает качество, помогает лучше управлять затратами и сроками, и в конечном итоге снижает нагрузку на проектирование, строительство, эксплуатацию и обслуживание».

Подход DB во многом следует опыту Crossrail и может быть проиллюстрирован на представлении о Фазе 3 BIM - цифровое преобразование [23].

На Фазе 3 внедрения методология BIM должна быть полностью использована для проектирования, строительства и эксплуатации - совместно и в цифровом виде. Дальнейшее развитие цифровых средств - в приоритете компании, поэтому Фаза 3 была обозначена термином «цифровая трансформация». В центре решения этапа цифровой трансформации находится принцип цифровых двойников.

Открытость, прозрачность, чёткость цели и подход, ориентированный на решение, должны стать основными ценностями всей инфраструктурной деятельности - как внутри DB, так и во всей цепочке поставок.

BIM предполагает также готовность железнодорожных компаний осуществлять изменения в корпоративной культуре. Это также вызывает изменения в том, как мы имеем дело друг с другом, как инициативы поддерживаются и практикуются членами команды и руководством правлений и менеджерами компаний. BIM может получить полный эффект, только если атмосфера открытости и прозрачности преобладает между всеми участниками проекта, полагают в DB.

Цифровое проектирование и строительство будут стандартными в части использования BIM во всех крупномасштабных проектах правительства Германии, начиная с 2020 года. Для подготовки к этому ранее Федеральное министерство транспорта и цифровой инфраструктуры предоставило финансирование для 13 пилотных проектов в DB с 2016 года, которые использовались для разработки BIM как стандарта для сложных инфраструктурных проектов на железной дороге Германии.

По состоянию на апрель 2020 в DB Engineering & Consulting [24] в работе находится 14 сложных BIM-проектов, представляющих самые разные части железнодорожных инфраструктур в Германии, что свидетельствует о готовности DB выполнить решение

правительства о внедрении BIM с 2020 года.

#### 1.2.4 Малайзия

В Малайзии BIM успешно опробовали на двух крупных инфраструктурных проектах, причем оба они были связаны с созданием среды общих данных на уровне всего проекта и рассматривались государством как пилотные проекты [85].

Первым является проект создания подземно-наземной железнодорожной линии MLRT Line 2 в долине Кланг. Выполнение проекта было частью стратегии по внедрению стандартов BIM, созданию цифровых рабочих процессов, поощрению взаимодействия в области проектирования и обеспечению соответствия стандартам качества для инфраструктуры.

Вторым стал проект строительства, развития и модернизации шоссе Пан-Борнео в штате Саравак. Дорога Пан-Борнео в Сараваке стоимостью 16,5 млрд. ринггитов считается крупнейшим инфраструктурным проектом, когда-либо одобренным правительством штата, и пилотным для правительства Малайзии.

Проект, который сегодня в основном завершен, представляет четырёхполосную дорогу общей протяжённостью 1060 километров, идущую по пересечённой местности через существующие общины и охраняемые заповедники, то есть является объектом достаточно высокого уровня сложности. Построенные к настоящему времени участки дороги стали фактически пилотным проектом для расширения использования BIM до создания модели управления магистралью, а в перспективе - полной системы управления активами для автомобильных дорог Малайзии.

Фирма Lebuhraya Borneo Utara (LBU), ранее задействованная в строительстве, теперь отвечает за интеграцию строительных данных с технологией управления операциями и обслуживанием магистрали.

При строительстве магистрали по всем правилам BIM для столь крупного объекта была создана среда общих данных на основе комплексов Bentley ProjectWise и Bentley AssetWise. Эта же среда, параллельно со строительством, задействована теперь компанией LBU и для решения задач эксплуатации автомагистрали, чтобы облегчить бесшовную интеграцию строительных данных в планирование и реализацию стратегий производительности и надежности активов. Для осуществления этого замысла были также использованы ГИС-приложения Bentley по обеспечению надежной информации в реальном времени для текущих операций, технического обслуживания автотрассы и проектирования.

В итоге, внедренная LBU и постоянно совершенствуемая система управления уже сейчас снижает риски и повышает операционную эффективность работы с объектом, улучшает процесс принятия решений и обеспечивает оптимизацию эксплуатационных затрат.

Созданная среда общих данных позволила управляющей компании проекта:

- объединить в едином пространстве информацию в различных форматах, таких как BIM, GIS и

других;

- структурировать информацию из географически распределенных мест;
- организовать контроль рабочих процессов с мультисекторными командами;
- создать журналы для обеспечения контроля над процессами;
- создать панели индикаторов прогресса для всех заинтересованных сторон, чтобы обеспечить лучшую визуализацию статуса проекта;
- содействовать передаче информации о проекте в управление жизненным циклом активов.

Важно отметить, что эта среда общих данных была не простой системой хранения электронных документов, а цифровой платформой, основанной на стандартах серии BS 1192.

### 1.2.5 Индия

Maharashtra Metro Rail Corporation Limited (Maha Metro) – это компания, находящаяся в совместной собственности правительства Индии и правительства штата Махараштра в соотношении 50:50 [86].

Проекты метро в Индии подпадают под действие Закона 1978 года о железных дорогах метро (строительство и работы); Закона 2002 года о железных дорогах метрополитена (эксплуатация и техническое обслуживание); и Закон о железных дорогах 1989 года, в который время от времени вносились поправки.

В настоящее время компания ведет строительство двух крупных железнодорожных проектов в городах Нагпур и Пуна. Первая очередь метро Нагпура состоит из 38 станций и 2 депо общей протяженностью 38 215 км, а первая очередь метрополитена Пуны состоит из 30 станций общей протяженностью 31 254 км, включая 5 км подземного участка.

Проекты включают в себя управление более чем 40 крупными подрядчиками, 106+ крупными пакетами контрактов, 60+ агентствами DDC и 3D-моделирования, работающими совместно, 100+ графиками строительства и 1000+ пользователей в среде общих данных.

Для решения поставленных задач Maha Metro создает цифровую платформу для управления проектами, включающую систему ERP и систему информационного моделирования зданий 5D вместе с другими компонентами. Это будет центральное хранилище всей информации, используемой Maha Metro. Для этого потребуется информация о сроках выполнения проекта, отчеты о ходе работ, оценки материалов и затрат, 2D и 3D чертежи, которые должны быть представлены в центральную систему подрядчиками, выполняющими инженерные, строительные и другие работы на объекте. Центральная система также будет предоставлять информацию подрядчикам для исполнения.

Maha Metro разработала концепцию проекта по развертыванию проверенного интегрированного решения ERP (Enterprise Resource Planning) и 5D-BIM для автоматизации своих операций и интеграции процессов. Был создан Офис поддержки владельцев (OSO), который будет зависеть от упомянутых решений

для стратегического и оперативного проектирования, доставки, исполнения и последующей поддержки.

Ключевым результатом создания OSO стало то, что внедрение ERP и 5D-BIM связано с предоставлением услуг, производственным совершенством, прозрачностью и соответствием требованиям. Роль OSO была жизненно важна для установления стандартов, руководящих принципов и работы в качестве центра передового опыта для всей экосистемы и цепочки поставок проекта.

Прежде всего для всех участников проекта были сформулированы «Информационные требования заказчика» (EIR), которые устанавливают стандарты, методы и процедуры, обязательные для создания и управления информационными артефактами на каждом этапе проекта, чтобы убедиться, что разработанное инженерное решение соответствует целям проекта и желаемым результатам.

Для достижения целей BIM заказчиком был составлен набросок набора требований к графической и неграфической информации для объектов и активов, который был основан на совместных семинарах между экспертами по конкретным дисциплинам, менеджерами BIM и группой по информации об активах.

Для реализации стратегии BIM компании Maha Metro была создана среда общих данных (СОД).

Процесс взаимодействия участников проекта начинается с разработки отдельных интеллектуальных 3D-моделей в приложении для инженерного моделирования и проектирования, предназначенном для различных дисциплин (проектирование путей, проектирование путепроводов, сигнализация, здания станций, геопространственный анализ, геотехнические и прочие строительные работы). Все дисциплинарные приложения без проблем взаимодействуют с СОД по интеграции инженерного проектирования, которая должна формировать центральный репозиторий для всей создаваемой проектно-технической информации (3D-модели, 2D-чертежи, а также аналитическая и проектная документация). Система поддерживает готовые шаблоны в соответствии с широко используемыми мировыми стандартами BIM и хранит общие данные, такие как топографические и аэрофотоснимки, библиотеки, исходные файлы и т. д., а также другие соответствующие документы.

Затем индивидуальные 3D-модели дисциплин интегрируются в основную модель, которая затем будет отправлена на рассмотрение и разметку. Система также используется для обнаружения коллизий. Она также действует как контекстный инструмент для визуализации, анализа и создания отчетов о проектной информации.

Созданная СОД имеет два основных программных компонента:

- Bentley ProjectWise Design Integration (PWDI) - позволяет нескольким сторонам совместно работать над моделями и чертежами в распределенных офисах, а также контролировать утверждение и видимость этих элементов с

помощью рабочего процесса BS1192. Чертежи передаются из PWDI в AssetWise ALIM (eB), когда они готовы для принятия заказчиком;

- Bentley Asset Wise CDE (eB) - объединяет передовые методы управления конфигурацией и изменениями для управления информацией о жизненном цикле активов, объединяя структурированные (активы) и неструктурированные данные (документы). AssetWise CDE (eB) используется в качестве центрального реестра документов и общей платформы для объединения всех результатов проекта, обеспечивая целостное представление для всех пользователей проекта механизма управления активом.

Для реализации проекта была создана Академия развития BIM - результат сотрудничества между Maha Metro и институтом Bentley, целью которой является обеспечение того, чтобы лучшие практики управления информацией для реализации проекта и эффективности активов были приняты всеми заинтересованными сторонами проекта.

Видение Академии состоит в том, чтобы создать центр передового опыта мирового класса для железных дорог в Индии и продвигать передовой опыт BIM в Индии. Деятельность Академии развития BIM должна привести к улучшенной реализации проектов за счет технологических достижений и улучшенной мобильности данных, скоординированного управления данными между командами на протяжении всего жизненного цикла проекта, интегрированной цифровой информации для улучшения физических проектов и применения стандартов и передовых практик.

#### 1.2.6 Выводы по разделу

В отмеченных странах развитие транспортной инфраструктуры ведется только с использованием технологии информационного моделирования. При этом внедрение BIM осуществляется на основе долгосрочных государственных программ, по которым разработаны концепции и дорожные карты для конкретных направлений и компаний. Основные цели всех этих программ развития железнодорожной инфраструктуры должны быть достигнуты к 2030 году.

## 2 АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА

Анализ материалов открытой печати показывает, что информационное моделирование в железнодорожной отрасли является частью общего процесса цифровизации реального сектора экономики промышленно развитых стран. По этой причине основные инструменты и методы технологии являются в значительной степени универсальными для всех отраслей, но с опциями для учёта специфики железных дорог.

Внедрение технологии в практику на новых проектах ведётся эволюционным путём - от начала проектов. По мере накопления критической массы опыта на одном этапе (проектирование), начинается активизация поиска

методов его применения на следующем этапе (строительство).

Это наиболее заметно по динамике развития крупных программ проектов (см.раздел 1): в начале проектов (2000-е годы), когда требовалось проектирование, усилия вендоров (разработчиков инженерного программного обеспечения) были сосредоточены на выпуске на рынок инструментов для BIM-проектирования; на данный момент, когда проекты переходят в фазу завершения строительства и начала эксплуатации, фокус внимания вендоров смещается в сторону предложений для эксплуатации цифровых активов.

Одновременно наращивается использование BIM при эксплуатации уже существующих объектов. Ниже приведен перечень ключевых тезисов, которые, на наш взгляд, необходимо учесть при внедрении технологии информационного моделирования в ОАО «РЖД».

#### 2.1 Новая парадигма: BIM как переход к безчертёжной технологии

Мировая тенденция показывает, что происходит постепенный, но последовательный отход от работы с чертежами и переход к работе с моделями. Чертежи рассматриваются как атавизм прошедшей эпохи 2D (докомпьютерной). Чётко прослеживается идея о том, что если в модели содержится вся необходимая информация для строительного процесса, то чертёж уже не нужен.

Ведущие мировые вендоры в строительной отрасли практически перестали развивать инструменты разработки чертёжной документации [25].

Научные исследования и усилия вендоров сосредоточены на поиске и реализации методов работы в жизненном цикле строительного объекта непосредственно по модели.

#### 2.2 Технологии новой парадигмы: виртуальная и смешанная реальность (VR/MR)

Новая парадигма обязана порождать новые технологии работы, которые не присутствовали в предыдущем технологическом укладе (2D).

Первыми из числа таких технологий появились технологии «виртуальной реальности» [26] и «смешанной реальности» [27].

На сегодняшний день больше информации (и рекламы) связано технологией и инструментами виртуальной реальности (virtual reality, VR). Однако, на наш взгляд, в практике РЖД инструменты на базе этой технологии могут быть интересны только распределённым командам проектировщиков - как развитие рабочих совещаний по ходу проектирования. В практике строительства и эксплуатации с помощью BIM как безчертёжной технологии более перспективной представляется технология смешанной (дополненной) реальности (mixed reality, MR).

*Пример: Монтажник должен установить на стену кронштейны под кабели.*

Традиционно, он должен изучить чертёж, нанести разметку на стену и только после этого начать монтаж кронштейнов.

При использовании технологии смешанной реальности, в MR-очках, он сразу видит куда надо установить кронштейн – его виртуальный образ висит в пространстве. Если к MR-технологии добавить распознавание образов (машинное обучение, AI), то MR-очки подскажут какой кронштейн в контейнере подходит для установки.

За счёт этого:

- снижается квалификация монтажника - ему не требуется навык чтения строительных чертежей;
- ускоряется работа за счёт устранения ряда подготовительных работ (изучение чертежа, разметка стены, более долгий поиск/выбор комплектующих и инструментов);
- снижаются риски брака из-за: ошибок чтения чертежа, ошибок разметки, ошибки выбора комплектующих, нарушения технологии монтажа;
- упрощается приёмка работы – и монтажник, и бригадир, и авторский надзор, и инспектор заказчика используют единую модель в MR.

Итого:

- удешевляется непосредственная стоимость работ (снижаются почасовая оплата исполнителя и убытки от брака);
- ускоряется работа (косвенное удешевление) за счёт снижения количества операций и их упрощения.

Развитие технологии смешанной реальности лимитируется:

- эффективностью позиционирования на участке проведения работ (до нескольких миллиметров);
- возможностями визуализации, надёжностью и эргономичностью MR-очков;
- стоимостью индивидуального комплекта электронных устройств и средств позиционирования в рабочей зоне.

Технология смешанной реальности получила широкую известность на рубеже 2013-14 годов (как её ранний прототип – дополненная реальность, augmented reality, AR), однако её дальнейшее развитие сдерживается вышеуказанными более высокими требованиями к специализированным электронным компонентам. Тем не менее, надо отметить достижения последнего времени:

- компания Microsoft создала MR-очки как рыночный продукт широкого пользования [28];
- ведущая компания по разработке оборудования для инженерного геопозиционирования Trimble (<https://www.trimble.com/>) относительно недавно приобрела компанию Tekla [29], сосредоточив таким образом в своих руках ключевые элементы технологии, необходимые для перехода к работе без чертежей на стройплощадке.

Надо отметить, что техническое совершенствование электроники и программ для смешанной реальности, а

также снижение их стоимости, идут довольно быстрыми темпами, и сейчас эта технология уже доступна для компаний среднего уровня.

Следовательно, появление первых образцов промышленных продуктов, реализующих полноценную безчертёжную технологию, можно ожидать в ближайшие несколько лет.

### 2.3 Безусловность юридической легитимности новой парадигмы

Переход к безчертёжной технологии поставил перед участниками строительного процесса вопрос о юридической значимости BIM-моделей.

При этом следует обратить внимание на то, что первым, наиважнейшим, критерием правильности формирования строительной документации (неважно, чертёж это или модель) является признание её юридической значимости государственными контрольными, следственными и судебными органами.

Признание и работа с электронной строительной документацией органами строительной экспертизы является вторичным критерием, проистекающим из первого.

Незнание законодательства и его несоблюдение могут привести к печальным последствиям, когда электронная проектная документация будет признана юридически ничтожной в судебном порядке.

Также совершенно очевидно, что грамотный подрядчик потребует надёжных гарантий того, что поступившая к нему электронная документация является подлинной (полной, актуальной, утверждённой и законной), а не промежуточной версией электронного документа. В противном случае, выполнять строительные работы по такой документации подрядчик справедливо откажется.

Таким образом, для окончательного перехода к строительству по моделям необходимо решить вопрос: как и при каких условиях BIM-модель становится подлинником проектно-строительной документации.

Например, с 2016 года в судебной практике Финляндии информационная модель здания (в формате IFC) принимается в качестве документа, подтверждающего позицию одной из сторон.

В зарубежных исследованиях рассматриваются правовые проблемы и риски строительной индустрии, связанные с BIM: юридически обязательные цифровые модели, минимальный гибридный контракт (МНС), сочетание юридических и блокчейн смарт-контрактов, и т.д.

Однако, мы считаем, что *вопросы легитимизации BIM-моделей должны целиком и полностью опираться на российскую юридическую практику.*

Поэтому, при внедрении технологии информационного моделирования в РЖД, лучше исходить из отработанного понятия «электронный подлинник» (см. федеральный закон №63 «Об электронной подписи»), применение которого к строительной 2D-документации в формате СПДС уже хорошо разработано [30].

Решение вопроса электронных подлинников

строительной документации для РЖД лучше осуществлять в 2 последовательных этапа/перехода:

- от бумажной технологии - к безбумажной (электронные подлинники документации СПДС на всём жизненном цикле стройобъектов);
- затем от безбумажной - к безчертёжной технологии (осуществление жизненного цикла строительных объектов по BIM-моделям).

Здесь следует обратить внимание, что в каждом этапе проблема юридической легитимизации электронной документации распадается на две:

- создание электронного подлинника;
- обмен электронными подлинниками.

В проблеме обмена подлинниками также возникают два вопроса:

- обеспечение юридической значимости каналов обмена между юридическими лицами;
- актуализация электронных подлинников при внесении изменений.

Понимание того, как решать эти задачи по чертежам, облегчит решение аналогичных проблем для моделей.

#### 2.4 Обеспечение качества проектной документации в новой парадигме

Поскольку BIM-модели постепенно становятся единственным средством получения и обработки инженерной информации о строительном объекте, а также параллельно ведутся работы по их легитимизации как юридических подлинников строительной документации, возникает очень важный вопрос об обеспечении качества этих моделей (как воплощения проектных решений), поскольку от этого зависит как безопасность объекта строительства, так и правильность принятия управленческих решений.

В ответ на рыночный спрос на данном этапе развития BIM-технологии вопросы качества моделей решаются вендорами с помощью создания специальных программных инструментов для автоматической и полуавтоматической проверки BIM-моделей по геометрическим (пересечения) и регламентирующим (формулы) критериям.

Наиболее известными на рынке инструментами проведения проверок BIM-моделей являются:

- Nemetschek Solibri [31];
- Autodesk Navisworks [32] с приложением для программирования пользовательских проверок Dynamo [33];
- Bentley Navigator [34].

Наибольших успехов в автоматизации проверок информационных моделей добился Сингапур [35]. Система автоматической экспертизы проектов CORENET [36] развивается в Сингапуре в начале 1990-х годов, с начала 2015 года он был запущен в эксплуатацию. Его главной целью была реализация автоматической проверки (экспертизы) проектов с выдачей разрешения на строительство. Понятно, что это можно было сделать только в том случае, когда проект реализовывался в виде полноценной модели здания, удовлетворявшей специальным требованиям. Чертежи и другая документация, пусть даже выполненная «в

электронном виде», для этих целей уже не годились. Согласно нынешнему законодательству Сингапура, все проекты площадью свыше 5000 квадратных метров поступают на экспертизу исключительно в виде BIM-моделей, причем удовлетворяющих определенным требованиям. Работа системы CORENET ведется через сайт CORENET [36], на котором выставлены требования к модели, а также проводятся операции по загрузке проектов и оформлению экспертных и иных действий.

Для повышения качества управленческих решений важным пунктом является автоматизация создания спецификаций материалов и работ непосредственно по BIM-моделям. Следует сказать, что возможность осуществления прозрачных и корректных электронных закупок явилась важным результатом проекта Crossrail (см.п.1.1.1) и ключевым аргументом для внедрения технологии BIM британским правительством в строительные госконтракты.

В настоящее время технология получения строительных смет по информационным моделям освоена российскими вендорами и применяется компаниями-застройщиками, но в вопросах автоматизации проверок наблюдается отставание от мировых лидеров.

#### 2.5 Оптимизация стройплощадки в новой парадигме: имитационное моделирование

С массовым освоением BIM проектировщиками и ростом количества комплексных моделей проектов возникла возможность и спрос на моделирование плана производства работ, в том числе с применением методов имитационного моделирования. Это позволяет осуществить комплексную оптимизацию: последовательности монтажа, логистики на стройплощадке, размещения временных объектов и материалов, потоков машин и рабочей силы, работы подъёмных кранов, перемещения крупногабаритных элементов и т.д. Всё вышеперечисленное положительно влияет на точность календарно-сетевое планирования и снижение убытков по вине неоптимальной организации работ на стройплощадке.

Наиболее известным из существующих на рынке программных решений является инструмент Bentley Synchro [37], разрабатываемый с 2001 года.

Программа Synchro позволяет соотнести проектную информацию в виде 3D моделей с календарно-сетевым графиком проекта, его ресурсами, затратами и управлением цепочкой поставок. Synchro не только предоставляет полный набор средств календарно-сетевое планирования, но также поддерживает двустороннюю взаимосвязь с такими программами, как Oracle Primavera [38]. Synchro может использоваться для организации взаимодействия между строительными компаниями, инженерными и руководящими подразделениями, а также между генподрядчиками.

#### 2.6 Форматы данных в новой парадигме: два подхода

Переход к безчертёжной технологии означает, что инженерная информация об объекте строительства существует исключительно в цифровом виде и на

цифровой базе. Поскольку Система проектной документации для строительства (СПДС, ГОСТ 21) была разработана для представления инженерной информации на «бумажной» основе, то её применение к BIM невозможно без потери эффективности, связанной с дополнительными трудозатратами на оформление чертежей.

Различными вендорами были разработаны свои цифровые форматы данных для создания BIM-моделей с помощью САПР-инструментов. Однако затем встала проблема совместимости, взаимной дополняемости и объединяемости моделей, созданных с помощью инструментов разных вендоров. В её решении на сегодняшний день выделяются два подхода.

### 2.6.1 Подход 1: создание общего формата обмена данными для BIM

Принцип такого подхода: каждый работает с моделями в форматах своего вендора, а в случае операций импорта-экспорта модели конвертируются в открытый формат обмена.

Ограничения такого подхода:

- потеря некоторых данных: формат обмена может содержать меньше информации, чем «родная» структура данных модели;
- формат обмена должен быть признан ведущими вендорами и непрерывно поддерживаться, чтобы соответствовать уровню развития «родных» форматов вендоров.

Наибольших успехов в создании и продвижении формата обмена информации между BIM-моделями добилась международная организация buildingSMART International (<https://www.buildingsmart.org>), продвигающая формат IFC (Industrial Foundation Classes) [39].

Формат IFC построен с использованием семантической технологии как непрерывно развивающаяся онтологическая модель объекта и среды строительства.

Основными тенденциями развития формата IFC являются:

- дальнейшая декомпозиция геоинформационного домена (ГИС) с выделением новых доменов (IFC Rail, IFC Bridge и т.д.);
- объединение доменов BIM и ГИС в единую онтологию;
- переход от онтологий строительных объектов к онтологиям строительных процессов;
- интеграция с PLM-объектами (машины и механизмы, киберфизические системы).

Вышеперечисленные тенденции основываются на триаде общности двух форматов и языка моделирования: IFC, STEP, EXPRESS.

В связи с активным качественным развитием формата гипотетически возможно появление на рынке BIM-инструментов, чьи внутренние структуры данных будут изначально разработаны в формате IFC.

Однако, при всей открытости и независимости формата IFC надо отметить, что все юридические права на него принадлежат американской компании

buildingSMART (одного из создателей альянса buildingSMART International).

### 2.6.2 Подход 2: прямой обмен моделями

Такой подход наблюдается в рыночной стратегии двух наиболее крупных вендоров - Bentley Systems (<https://www.bentley.com/ru>) и Autodesk (<https://www.autodesk.ru/>).

Это связано с тем, что оба вендора имеют собственную линейку продуктов, позволяющих в целом закрыть основные запросы рынка по инженерному информационному моделированию жизненного цикла строительного объекта. Следовательно, использовать «чужой» формат обмена данными между собственными BIM-инструментами нет необходимости.

Вопросы экспорта-импорта, которые тем не менее возникают в сводных проектах с большим количеством участников, решены через двусторонние договоры с основными вендорами об обмене сведениями о внутренней структуре данных BIM-моделей, созданных в собственных САПР-инструментах.

Примерами наиболее успешных программ при использовании собственных форматов разных производителей являются Navisworks компании Autodesk и ProjectWise и iTwin компании Bentley Systems.

### 2.7 Этап эксплуатации в новой парадигме: цифровой двойник

Успехи стран-лидеров в BIM-технологиях (Великобритания, Финляндия, Сингапур) позволили им заявить о намерениях «цифровизации всей страны» [40]-[42].

«Цифровизация страны» означает прежде всего использование информационных моделей на стадии эксплуатации объектов инфраструктуры. В связи с этим появился и активно используется термин «цифровой двойник».

Вообще «цифровой двойник» - это информационная модель объекта, получившая дальнейшее развитие в виде добавления моделей процессов, связанных с использованием этого объекта. Таким образом, термин «цифровой двойник» характеризует более высокий уровень развития технологии информационного моделирования.

Цифровой двойник, как и информационная модель – это постоянно развивающееся образование, поскольку всегда могут добавляться и совершенствоваться модели процессов, связанных с эксплуатацией объекта.

Поскольку «цифровой двойник» стал «модным» термином, то появились многочисленные спекуляции на эту тему, когда цифровыми двойниками стали называть практически все виды информационных моделей.

Довольно подробное исследование этой терминологии дано в диссертации Линни Бесжак и Кассандры Линдквист из Швеции [43].

Определение термина раскрывается через взаимосвязь между реальным физическим объектом и его цифровым прототипом – см. табл. I.

Таблица I. Анализ определений

	Цифровая модель	Цифровая тень	Цифровой двойник
Анализ определений	Физические и виртуальные компоненты взаимодействуют только через ручной обмен данными	Физические и виртуальные компоненты взаимодействуют в реальном времени только в однонаправленном режиме	Физические и виртуальные компоненты взаимодействуют в реальном времени в двунаправленном режиме

Из определений становится понятна эволюция и роль BIM-инструментов в жизненном цикле физического объекта.

«Цифровая модель» (ЦМ) применима на стадии проектирования объекта, когда можно оптимизировать параметры будущего объекта. Важным свойством ЦМ является возможность прогноза, в том числе по типу "что если". Виртуальный прогноз дешевле, а иногда единственно возможен. Таким образом, главная задача ЦМ – оптимизация проектных решений.

«Цифровая тень» (ЦТ) позволяет получить информацию с датчиков контроля текущего состояния уже на построенном объекте. Здесь важную роль играет объединение «прогнозной» BIM-модели с системой поддержки принятия решений, поскольку прогноз основывается уже не на прогнозе всех возможных вариантов, как в ЦМ, а на конкретных исходных данных с датчиков. Таким образом, главная задача ЦТ – показать оператору «что будет» и предложить вариант действий.

«Цифровой двойник» (ЦД) позволяет не только получать информацию о текущем состоянии, но и удаленно управлять системами физического объекта. Поскольку двустороннее взаимодействие наиболее эффективно для систем с нелинейной обратной связью, то переход к ЦД означает постепенное удаление человека из управления системами объекта и передача функций управления искусственному интеллекту и роботам. Таким образом, главной задачей ЦД можно назвать *автономность*.

В диссертации также приводится важное разъяснение по этапам внедрения технологий: если компания имеет низкий/начальный уровень информационной зрелости, то лучше начинать с технологий, реализующих «цифровую модель», как наиболее простых в организации и освоении; при среднем уровне зрелости становятся доступны к внедрению технологии «цифровой тени», а при высоком – полноценный «двойник».

Поскольку BIM-технология является новой парадигмой, то она порождает целый куст новых технологий. Но эти технологии имеют разную степень зрелости с точки зрения пригодности для промышленного применения.

В США и Евросоюзе для оценки зрелости технологий активно применяется (в т.ч. в программе НИОКР «Horizon 2020», см. п.1.1.2) Шкала оценки технологической готовности TRL [44].

В случае адаптации методики TRL для РЖД её можно усовершенствовать, добавив к готовности технологии готовность организации: мы можем разобрать все технологии по уровням (модель-тень-двойник) и соотнести с уровнем зрелости подразделения, подлежащего цифровой трансформации (начальный-средний-высокий). Тогда мы методически обоснованно можем предлагать определённый набор технологий, который структурное подразделение способно сейчас внедрить.

#### 2.8 Подготовка кадров для цифровой экономики: растущий дефицит специалистов

Страны-лидеры внедрения BIM сталкиваются с серьёзным дефицитом специалистов для цифровизации экономики.

Например, в Великобритании, согласно исследованиям компании Atkins (<http://www.atkinsglobal.com/>), проведённым в 2015 году, после утверждения в декабре 2014 года «Правительственной стратегии для удовлетворения потребностей в инфраструктуре Великобритании до 2020 года и в последующий период» с бюджетом более 460 миллиардов фунтов стерлингов государственных и частных инвестиций, были отмечены следующие проблемы, связанные с кадрами [80]:

- Дефицит кадров: «Компаниям Британии требуется 1,86 миллиона человек с инженерными навыками в период 2010-2020. Это означает, что для этих потребностей Британии необходимо удвоить количество инженерно-связанных учеников и выпускников из колледжей и университетов»;
- Дополнительные инвестиции в образование: «Промышленности и правительству необходимо будет инвестировать до £ 2,5 млрд для подготовки достаточного числа ученых, конструкторов и инженеров, чтобы удовлетворить требованиям норм экономики»;
- Дефицит кадров приводит к росту бюджета в проектах: «Рост средней заработной платы уже ощущается по транспортному сектору и компании уже конкурируют за наиболее востребованные ресурсы. Некоторые участники наших исследований сообщили об увеличении заработной платы от пяти до 20 процентов, с отдельными случаями увеличения оплаты на 50 процентов».
- Дефицит кадров сдерживает реализацию проектов: «Предсказанный дефицит навыков увеличит вероятность задержки в проектах с

долгосрочной возможностью работы, и они могут быть отложены на неопределенный срок или отменены в будущем. Мартин Артер, Network Rail, прокомментировал: "Худшим является то, что в течение ближайших пяти или десяти лет является то, что часть проектов не будет реализована".

### 3 ВЫВОДЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ (СИНТЕЗ)

3.1. Технология BIM является инновационной технологией (безчертёжная технология) создания и управления цифровыми инженерными данными основных фондов капитального строительства. В промышленно развитых странах она последовательно вытесняет технологию предыдущего технологического уклада – разработку 2D-строительной документации.

3.2. Технология BIM не относится к технологиям организации и управления потоками работ в строительном процессе, она относится к технологиям моделирования и управления инженерными данными строительного объекта. То есть технология BIM идёт на замену СПДС (Система проектной документации в строительстве), а не АСУ (автоматизированные системы управления).

3.3. Следует различать саму технологию BIM и методы использования её результатов. Результат технологии BIM, информационная модель (как и до этого 2D-документация СПДС), может быть использован в ИТ-инструментах организационного и экономического профиля – системах класса PM (Project management, управление проектами) и системах класса ERP (Enterprise resource planning, планирование ресурсов предприятия). Использование в качестве источника данных BIM-моделей сделает результаты работы этих ИТ-инструментов более точными и сократит трудозатраты за счёт устранения информационных разрывов.

3.4. Развитие технологии BIM от начала к концу жизненного цикла (от проектирования, через строительство к эксплуатации) было связано с эволюционным развитием технологии и накоплением опыта. Поскольку ОАО «РЖД» задержалось с внедрением BIM, то повторять этот путь нет резона. Целесообразнее параллельно внедрять BIM в строительство и эксплуатацию.

С целью ускорения внедрения информационного моделирования можно сразу сфокусироваться на разработке прикладных решений на наиболее важном для ОАО «РЖД» этапе жизненного цикла. Очевидно, что это этап, где из объекта инвестирования извлекается прибыль. Этапы проектирования и строительства несут инвестору затраты, только на этапе эксплуатации инвестор рассчитывает получить прибыль. Значит, базовую структуру данных для BIM-модели нужно разрабатывать с точки зрения эксплуатации, где она, соединённая с организационными, экономическими и правовыми процессами содержания и владения, позволяет управлять рентабельностью.

### БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Trans-European Transport Network; Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Trans-European\\_Transport\\_Network](https://en.wikipedia.org/wiki/Trans-European_Transport_Network)
- [2] buildingSMART; Available: <https://www.buildingsmart.org>
- [3] RailBaltica project; Available: <https://www.railbaltica.org>
- [4] RailBaltica BIM documentation; Available: <https://www.railbaltica.org/rb-rail-as-bim-documentation/>
- [5] «Rail Baltica a view from the front line to the BIM implementation»; Available: <https://www.e-zigurat.com/blog/en/rail-baltica-view-front-line-bim-implementation/>
- [6] EIR (информационные требования заказчика); Available: <https://1-bim.ru/техническое-задание-eir/>
- [7] Crossrail project; Available: <https://www.crossrail.co.uk/#>
- [8] Vasily Kupriyanovsky etc. BIM on the world's railways - development, examples, and standards// International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 8, no.5, 2020;
- [9] «BIM application in London Crossrail»; Available: <https://www.e-zigurat.com/blog/en/bim-application-in-london-crossrail/>
- [10] Prof. S.N. Pollalis, D. Lappas Crossrail -Elizabeth Line London, UK, Case study .The Zofnass Program at Harvard, February 18, 2019
- [11] Crossrail BIM Principles (CR-XRL-Z3-RGN-CR001-50005 Revision 5.0); Available: [https://learninglegacy.crossrail.co.uk/wp-content/uploads/2017/02/12F-002-03\\_Crossrail-BIM-Principles\\_CR-XRL-Z3-RGN-CR001-50005-Revision-5.0.pdf](https://learninglegacy.crossrail.co.uk/wp-content/uploads/2017/02/12F-002-03_Crossrail-BIM-Principles_CR-XRL-Z3-RGN-CR001-50005-Revision-5.0.pdf)
- [12] Crossrail Asset Information A General Guide 2018; Available: [https://learninglegacy.crossrail.co.uk/wp-content/uploads/2018/06/12C-004\\_Crossrail-Asset-Information-A-General-Guide.pdf](https://learninglegacy.crossrail.co.uk/wp-content/uploads/2018/06/12C-004_Crossrail-Asset-Information-A-General-Guide.pdf)
- [13] CROSSRAIL OPERATIONS AND MAINTENANCE INFORMATION GUIDE ,Document type: Good Practice Document Author: Crossrail Ltd Publication Date: 09/07/2018; Available: <https://learninglegacy.crossrail.co.uk/documents/crossrail-operations-and-maintenance-information-guide/>
- [14] High Speed 2 project; Available: [https://www.hs2.org.uk, https://en.wikipedia.org/wiki/High\\_Speed\\_2](https://www.hs2.org.uk, https://en.wikipedia.org/wiki/High_Speed_2)
- [15] EU project program Horizon 2020; Available: <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en>
- [16] Shift2Rail project program; Available: <https://shift2rail.org>
- [17] Assets4Rail project; Available: <http://www.assets4rail.eu/about/>
- [18] China Railway BIM Alliance “Railway BIM Data Standard, (Version 1.0)”, CRBIM10022015; Available: <https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2017/09/bSI-SPEC-Rail.pdf>
- [19] Steve Cockerell, Director Industry Marketing – Road and Rail, Bentley Systems “China Railway Sets Benchmark for Full-lifecycle BIM on Beijing-Zhangjiakou Rail Project”; Available: <https://www.cbnme.com/logistics-news/china-railway-sets-benchmark-for-full-lifecycle-bim-on-beijing-zhangjiakou-rail-project/>
- [20] Korean Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Railroad Research Institute, Yonsei University “Rail BIM 2030 Roadmap“; Available: [http://big.yonsei.ac.kr/railbim/reports/RailBIM2030Roadmap\\_Full\\_Eng\\_Final.pdf](http://big.yonsei.ac.kr/railbim/reports/RailBIM2030Roadmap_Full_Eng_Final.pdf)
- [21] The Rail BIM 2030 roadmap project; Available: <https://www.gim-international.com/content/article/the-rail-bim-2030-roadmap-project>
- [22] Digital Construction. BIM: managing quality, cost and deadlines from the very start; Available: <https://www.deutschebahn.com/en/Digitalization/technology/innovations/digitaltalesbauen-3520304>
- [23] Implementation of Building Information Modeling (BIM) in the Infrastructure Division of Deutsche Bahn AG, Deutsche Bahn AG 2019, Available: <https://www.deutschebahn.com/resource/blob/4114234/f17c340682c9e8f6bfe3faae86e0f52/BIM-Strategy-Deutsche-Bahn-en-data.pdf>
- [24] DB Engineering & Consulting; Available: <https://referenzen.db-engineering-consulting.de/en>
- [25] Официальные сайты ведущих иностранных фирм – разработчиков инженерного программного обеспечения для строительства (вендоров): <https://www.bentley.com/ru>  
<https://www.autodesk.ru/>  
<https://www.nemetschek.com/en/>  
<https://graphisoft.com/ru>  
<https://ru.graitec.com/>  
<https://www.esri-cis.ru/ru-ru/home>  
<https://www.trimble.com/>

- [26] Виртуальная реальность; Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Virtual\\_reality](https://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_reality)
- [27] Смешанная реальность; Available: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Смешанная\\_реальность](https://ru.wikipedia.org/wiki/Смешанная_реальность)
- [28] Microsoft HoloLens product; Available: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Microsoft\\_HoloLens](https://ru.wikipedia.org/wiki/Microsoft_HoloLens)
- [29] Tekla Structures product; Available: <https://www.tekla.com/ru/Продукция/tekla-structures>
- [30] А.Казанцев, А.Волков «Безбумажная технология строительства: особенности применения электронной цифровой подписи при разработке проектно-строительной документации»; Available: [http://isicad.ru/ru/articles.php?article\\_num=17346](http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=17346)
- [31] Nemetschek Solibri product; Available: <https://www.solibri.com>
- [32] Autodesk Navisworks product; Available: <https://www.autodesk.ru/products/navisworks/overview>
- [33] Autodesk Dynamo product; Available: <https://www.autodesk.com/products/dynamo-studio/overview?plc=DYNSTD&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>
- [34] Bentley Navigator product product; Available: <https://www.pmssoft.ru/products/bentley/bentley-navigator/>
- [35] В.В.Талапов «Внедрение BIM: впечатляющий опыт Сингапура»; Available: <https://ardexpert.ru/article/5160>
- [36] CORENET system; Available: <https://www.corenet-ess.gov.sg/ess/>
- [37] Bentley Synchro product; Available: <https://www.bentley.com/en/products/brands/synchro>
- [38] Oracle Primavera product; Available: <https://www.oracle.com/ru/applications/primavera/solutions/products.html>
- [39] Industrial Foundation Classes, Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Industry\\_Foundation\\_Classes](https://en.wikipedia.org/wiki/Industry_Foundation_Classes)
- [40] UK Digital Strategy; Available: <https://www.gov.uk/government/publications/uk-digital-strategy/uk-digital-strategy>
- [41] Digital Finland; Available: <https://www.businessfinland.fi/globalassets/julkaisut/digital-finland-framework.pdf>
- [42] Singapore Digital-Economy-Framework; Available: <https://www.imda.gov.sg/infocomm-media-landscape/SGDigital/Digital-Economy-Framework-for-Action>
- [43] Linnea Bestjak, Cassandra Lindqvist «Assessment of how Digital Twin can be utilized in manufacturing companies to create business value», School of Innovation, Design and Engineering, Mälardalen industrial technology center, Sweden, 2020
- [44] Technology readiness level; Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Technology\\_readiness\\_level](https://en.wikipedia.org/wiki/Technology_readiness_level)
- [45] Technische Universität München, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt, Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation «Building Information Modeling and Virtual Reality-Editing of IFC Elements in Virtual Reality»;
- [46] The Ohio State University, Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science in the Graduate School of The Ohio State University By Yuchen Lai Graduate Program in Civil Engineering «Augmented Reality Visualization of Building Information Model»;
- [47] Isicad.ru: Руководители Autodesk, Dassault, PTC, Siemens и Trimble говорят о развитии AR-VR; [http://isicad.ru/ru/articles.php?article\\_num=21436](http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=21436)
- [48] Norwegian University of Science and Technology (NTNU), School of Entrepreneurship, TIO4530 «The Minimum Hybrid Contract (MHC): Combining Legal and Blockchain Smart Contracts»;
- [49] Sweden Royal Institute of Technology, Department of real estate and construction management, Elin Englund & Maria Gronlund «Current Legal Problems and Risks with BIM in the Swedish AEC Industry»;
- [50] Sweden Royal Institute of Technology, Department of real estate and construction management, Sebastian Orenäs Nissas, Nangi Rahimi «Digitalized Construction Project-To Build after a Legally Binding BIM-model»;
- [51] The Pennsylvania State University, The Graduate School, College of Engineering, Eric Nulton «Analysis Of Legal Concepts For Projects Implementing Building Information Modeling (BIM) In The United States»;
- [52] Office of Graduate Studies of Texas A&M University, Ruchika Bhandare «Building Information Modeling A Minimum Mathematical Configuration»;
- [53] Tampere University, Master's Degree Programme in Civil Engineering, Joonas Helminen «Automated generation of steel connections of BIM by machine learning»;
- [54] Oulu University of Applied Sciences, Degree Program in Civil Engineering, Liudmila Moskaliuk «Benchmark of availability of bim-objects for construction products»;
- [55] National Precast Concrete Association / Precast Magazines / Precast Inc. Magazine, Debbie Sniderman «Bim and precast: where physical and digital meet»; <https://precast.org/2018/05/bim-and-precast-where-physical-and-digital-meet/>
- [56] Western Michigan University, Civil and Construction Engineering, Mohammed Al Dafaay «Visualizing the Constructability of a Steel Structure Using Building Information Modeling and Game Simulation»;
- [57] Dmitry Zamolodchikov, Vasily Kupriyanovsky, Dmitry Namiot, German Sukonnikov, Natalia Fedorova, Petr Bubnov «Comfortable environment and resources for passenger stations in the lifecycle of digital railways assets», International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 5, no.3, 2017;
- [58] Gary Morin «Geotechnical BIM: Applying BIM Principles to the Subsurface»; <https://www.autodesk.com/autodesk-university/article/Geotechnical-BIM-Appling-BIM-Principles-Subsurface-2019>
- [59] The University of Dayton, Prepared in cooperation with the Ohio Department of Transportation and the U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration; Hui Wang, Xiangrong Wang, Robert Liang «Study of AI Based Methods for Characterization of Geotechnical Site Investigation Data»;
- [60] European Commission, JRC Technical Reports; A. Athanasopoulou, A. Bezuijen, W. Bogusz, D. Bournas, M. Brandtner, A. Breunese, U. Burbaum, S. Dimova, R. Frank, H. Ganz, U. Grunicke, H. Jung, A. Lewandowska, G. Nuijten, A. Pecker, S. Psomas, K. Roessler, A. Sciotti, M.L. Sousa, H. Stille, D. Subrin «Standardisation needs for the design of underground structures»;
- [61] The Netherlands, Enschede, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente, Shen Nie «3D BIM-GIS for underground network management»;
- [62] Lodron-Universität Salzburg, Universitätslehrganges «Geographical Information Science & Systems» (UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für Geoinformatik (ZGIS), B.Eng. Robert Lensing «BIM and construction process data in mechanized tunnel construction. Milestone control for tunnel construction sites using automatically created process data in comparison with 4D BIM»;
- [63] Karelia university of applied sciences (Finland), Degree Program in Civil Engineering, Anirahmad Teymouri «Potentialities and restrictions of construction 3d printing»;
- [64] Tampere University of Applied Sciences, Construction Engineering, Ruben Merckx «The utilization of aerial photography and laser scanning in BIM modelling»
- [65] Czech technical university in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Construction Management and Economics, Bc. Matej Koys «Implementation of BIM Systems for Energy Analysis and Optimization in Buildings»;
- [66] European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport, Unit C4 Rail safety commercial and interoperability «ERTMS Retrofitting strategy Funding and Financing – Final Report. ERTMS On-board strategy»;
- [67] European Commission, JRC Science For Policy Report, Gkoumas, K., Marques Dos Santos, F.L., van Balen, M., Tsakalidis, A., Ortega Hortelano, A., Grosso, M., Haq, G., Pekar, F. «Research and innovation in bridge maintenance, inspection and monitoring», A European perspective based on the Transport Research and Innovation Monitoring and Information System (TRIMIS);
- [68] Joint Study Programme of Metropolia UAS and HTW Berlin, International Master of Science in Construction and Real Estate Management, Sowmya Gurum «Analysis of LCC and BIM during Operations and Maintenance phase from the Perspective of Cost»;
- [69] Vasily Kupriyanovsky, Oleg Pokusaev, Alexander Klimov, Alexey Volodin «BIM on the way to IFC5 - alignment and development of IFC semantics and ontologies with UML and OWL for road and rail structures, bridges, tunnels, ports, and waterways», International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 8, no.8, 2020;
- [70] buildingSMART Part 1 - The UML Model Report Introduction to the IFC Harmonised Schema Extensions, Project/Publisher: Common Schema / Infrastructure Room, Work Package: Common Schema - WP2 – Harmonisation & Development, Date: 24/04/2020, Version: V04 – FINAL, PUBLISHED [https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/06/IR-CS-WP2-UML\\_Model\\_Report\\_Part-1\\_.pdf](https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/06/IR-CS-WP2-UML_Model_Report_Part-1_.pdf)

- [71] buildingSMART Part 2 - The UML Model Report, Common Schema Elements, Project/Publisher: Common Schema / IFC Infra Program Office, Work Package: Common Schema - WP2 – Harmonization & Development, Date: 24/04/2020, Version: V04 – FINAL, PUBLISHED [https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/06/IR-CS-WP2-UML\\_Model\\_Report\\_Part-2\\_.pdf](https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/06/IR-CS-WP2-UML_Model_Report_Part-2_.pdf)
- [72] buildingSMART Part 3 - The UML Model Report, Ports & Waterways Schema Elements, Project/Publisher: IFC Infrastructure for Ports & Waterways (IPW), Common Schema / IFC Infra Program Office, Work Package: IPW - WP3 – Schema Extension Development, Common Schema - WP2 – Harmonization & Development Date: 24/04/2020, Version: V07 – FINAL, PUBLISHED [https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/06/IR-CS-WP2-UML\\_Model\\_Report\\_Part-3\\_.pdf](https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/06/IR-CS-WP2-UML_Model_Report_Part-3_.pdf)
- [73] buildingSMART Part 4 - The UML Model Report Railway Schema Elements, Project/Publisher: IFC Rail / Railway Room Common Schema / IFC Infra Program Office Work Package: IFC Rail - WP2 - Schema Extension Development Common Schema - WP2 – Harmonization & Development, Date: 24/04/2020 Version: V04 – FINAL, PUBLISHED [https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/06/IR-CS-WP2-UML\\_Model\\_Report\\_Part-4\\_.pdf](https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/06/IR-CS-WP2-UML_Model_Report_Part-4_.pdf)
- [74] buildingSMART Part 5 - The UML Model Report Road Schema Elements, Project/Publisher: IFC Road Project Common Schema / IFC Infra Program Office Work Package: IFC Road – WP3 – Schema Extension Common Schema - WP2 – Harmonization & Development, Date: 24/04/2020, Version: V04 – FINAL, PUBLISHED [https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/06/IR-CS-WP2-UML\\_Model\\_Report\\_Part-5\\_.pdf](https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/06/IR-CS-WP2-UML_Model_Report_Part-5_.pdf)
- [75] Joonas Helminen: Automated generation of steel connections of BIM by machine learning, Master of Science Thesis, Tampere University, Master's Degree Programme in Civil Engineering;
- [76] Phil Jackson, on behalf of buildingSMART International Infrastructure Room "Infrastructure Asset Managers BIM Requirements"; Technical Report No. TR 1010.
- [77] BSI's Standards Outlook - Issue five "Double Vision"; [https://www.bsigroup.com/en-GB/blog/Built-Environment-Blog/double-vision/?utm\\_source=pardot&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=S-M-SUB-NEWS-BUILD-BSOL-BLOG-2001-2012](https://www.bsigroup.com/en-GB/blog/Built-Environment-Blog/double-vision/?utm_source=pardot&utm_medium=email&utm_campaign=S-M-SUB-NEWS-BUILD-BSOL-BLOG-2001-2012)
- [78] Mälardalen industrial technology center, Sweden; School of Innovation, Design and Engineering, Linnea Bestjak, Cassandra Lindqvist «Assessment of how Digital Twin can be utilized in manufacturing companies to create business value»;
- [79] EU projects on digital twins: ARTWIN AR, BIM2TWIN, VesselAI, VIMS, TwinERGY, COGNITWIN, MeDiTATe, COGITO, DUET, TWINECS, MooringSense, LEAD, Ashvin, SPHERE, DIGITbrain.
- [80] ATKINS (SNC-Lavalin Group) report "Skills deficit. Implications and opportunities for UK infrastructure";
- [81] Martin Simpson, University of Liverpool; Professor Jason Underwood, University of Salford; Dr Mark Shelbourn, University of Salford; Debbie Carlton, Dynamic Knowledge; Gulnaz Aksenova, University of Liverpool; Sajedah Mollasalehi, University of Salford "Evolve or Die: Transforming the productivity of Built Environment Professionals and Organisations of Digital Built Britain through a new, digitally enabled ecosystem underpinned by the mediation between competence supply and demand." Pedagogy and Upskilling CDBB Network.
- [82] HAME University of applied sciences, Degree Programme in Construction Engineering, Manish Yakami "State of Art in Thinking of BIM Competence".
- [83] buildingSMART COBie Certified Professional, Educational Curriculum. Version 1.0; <https://cobie.buildingsmart.org>
- [84] Aalto University, Department of Built Environment School of Engineering, M.sc Sanna Makkonen "Semantic 3D Modelling for Infrastructure Asset Management".
- [85] Oleg Pokusaev, Vasily Kupriyanovsky, Alexander Klimov, Dmitry Namiot, Julia Kupriyanovsky, Eugene Zarechkin "BIM, Ontology and Asset Management Technologies on European Highways"; International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 8, no.6, 2020.
- [86] Vikas Singhal "A Conceptual Framework for effective BIM-enabled Information Management in Railways", Master Dissertation European Master in Building Information Modelling, Universidade do Minho Escola de Engenharia.
- [87] С.А.Кобзев «Бережливая киберфизическая производственная система транспортной компании», Железнодорожный транспорт, 9 – 2020.

# International experience and development trends of information modeling technology in relation to the life cycle of railway infrastructure facilities

Arcady Kazarinov, Vasily Kupriyanovsky, Vladimir Talapov

**Abstract**— This article examines the world experience of applying information modeling (BIM) technologies to capital construction projects, accumulated at the turn of 2020, using the example of railway infrastructure. The article shows that in all the significant successes of using BIM in large infrastructure projects, the influence of the state, both legislative and scientific forces, is great. The participation of the state is explained by the fact that BIM is a technology of a new technological order based on the digitalization of the economy, and the possibilities of competition and development of states are determined by their ability to keep up with the technological race.

The first part of the article is devoted to the analysis of public-private partnerships in the development of BIM technology on the example of large infrastructure projects.

The second part of the article is focused on the analysis of the achieved level of development of BIM technology. It is concluded that BIM is a new paradigm - a *drawingless* technology for creating and managing engineering data in the life cycle of a construction object. Based on this conclusion, the main directions of technology development are determined.

It is shown that after the success of information modeling at the design stage, now at the construction stage there is an accumulation of experience in the application of technology in order to abandon the drawings in favor of building directly from the models. Model-based construction planning has already received reliable digital tools, in the near future we expect to see the transfer of BIM technology to the operations of direct work on the construction site, primarily the operations of marking and installation. A separate chapter is devoted to these promising sub-technologies (mixed reality), with an example of possible application and expected effect.

The article also pays attention to the issues of legitimizing work with BIM-models from the point of view of the legal significance of data and other important topics.

**Keywords**—BIM, information modeling, railway infrastructure.

## ESSAY

1. BIM technology is an innovative technology (*drawingless* technology) for the creation and management of digital engineering data for capital construction assets. In industrialized countries, it is consistently replacing the technology of the previous technological paradigm - the development by 2D construction documentation.

2. BIM technology does not apply to technologies for organizing and managing workflows in the construction process, it refers to technologies for modeling and managing

engineering data of a construction object. That is, in Russia, BIM technology is replacing the SPDS (Russian State System of Design Documentation in Construction), and not the business organization systems.

3. It is necessary to distinguish between the BIM technology itself and the methods of using its results. The result of BIM technology, an information model (as before 2D-SPDS documentation), can be used in IT tools of an organizational and economic profile - PM (Project management system) and ERP (Enterprise resource planning system). Using BIM models as a data source will make the results of these IT tools more accurate and reduce labor costs by closing information gaps.

4. The development of BIM technology from the beginning to the end of the life cycle (from design, through construction to facility operation) was associated with the evolutionary development of technology and the accumulation of experience. Since JSC "Russian Railways" was delayed with the introduction of BIM, there is no reason to repeat this path. It is more expedient to simultaneously implement BIM in construction and operation.

In order to accelerate the implementation of information modeling, one can immediately focus on the development of applied solutions at the most important stage of the life cycle for Russian Railways. Obviously, this is the stage where profit is made from the investment object. The stages of design and construction bear the costs of the investor, only during the facility operation stage the investor expects to make a profit. This means that the basic data structure for the BIM model needs to be developed from an facility operational point of view, where it, combined with the organizational, economic and legal processes of content and ownership, allows you to manage profitability.

## REFERENCES

- [1] Trans-European Transport Network; Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Trans-European\\_Transport\\_Network](https://en.wikipedia.org/wiki/Trans-European_Transport_Network)
- [2] buildingSMART; Available: <https://www.buildingsmart.org>
- [3] RailBaltica project; Available: <https://www.railbaltica.org>
- [4] RailBaltica BIM documentation; Available: <https://www.railbaltica.org/rb-rail-as-bim-documentation/>
- [5] «Rail Baltica a view from the front line to the BIM implementation»; Available: <https://www.e-zigurat.com/blog/en/rail-baltica-view-front-line-bim-implementation/>
- [6] EIR (customer information requirements); Available: <https://1-bim.ru/техническое-задание-eir/>

- [7] Crossrail project; Available: <https://www.crossrail.co.uk/#>
- [8] Vasily Kupriyanovsky etc. BIM on the world's railways - development, examples, and standards// International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 8, no.5, 2020;
- [9] «BIM application in London Crossrail»; Available: <https://www.e-zigurat.com/blog/en/bim-application-in-london-crossrail/>
- [10] Prof. S.N. Pollalis, D. Lappas Crossrail -Elizabeth Line London, UK, Case study .The Zofnass Program at Harvard, February 18, 2019
- [11] Crossrail BIM Principles (CR-XRL-Z3-RGN-CR001-50005 Revision 5.0); Available: [https://learninglegacy.crossrail.co.uk/wp-content/uploads/2017/02/12F-002-03\\_Crossrail-BIM-Principles\\_CR-XRL-Z3-RGN-CR001-50005-Revision-5.0.pdf](https://learninglegacy.crossrail.co.uk/wp-content/uploads/2017/02/12F-002-03_Crossrail-BIM-Principles_CR-XRL-Z3-RGN-CR001-50005-Revision-5.0.pdf)
- [12] Crossrail Asset Information A General Guide 2018; Available: [https://learninglegacy.crossrail.co.uk/wp-content/uploads/2018/06/12C-004\\_Crossrail-Asset-Information-A-General-Guide.pdf](https://learninglegacy.crossrail.co.uk/wp-content/uploads/2018/06/12C-004_Crossrail-Asset-Information-A-General-Guide.pdf)
- [13] CROSSRAIL OPERATIONS AND MAINTENANCE INFORMATION GUIDE ,Document type: Good Practice Document Author: Crossrail Ltd Publication Date: 09/07/2018; Available: <https://learninglegacy.crossrail.co.uk/documents/crossrail-operations-and-maintenance-information-guide/>
- [14] High Speed 2 project; Available: <https://www.hs2.org.uk>, [https://en.wikipedia.org/wiki/High\\_Speed\\_2](https://en.wikipedia.org/wiki/High_Speed_2)
- [15] EU project program Horizon 2020; Available: <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en>
- [16] Shift2Rail project program; Available: <https://shift2rail.org>
- [17] Assets4Rail project; Available: <http://www.assets4rail.eu/about/>
- [18] China Railway BIM Alliance “Railway BIM Data Standard, (Version 1.0)”, CRBIM10022015; Available: <https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2017/09/bSI-SPEC-Rail.pdf>
- [19] Steve Cockerell, Director Industry Marketing – Road and Rail, Bentley Systems “China Railway Sets Benchmark for Full-lifecycle BIM on Beijing-Zhangjiakou Rail Project”; Available: <https://www.cbnme.com/logistics-news/china-railway-sets-benchmark-for-full-lifecycle-bim-on-beijing-zhangjiakou-rail-project/>
- [20] Korean Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Railroad Research Institute, Yonsei University “Rail BIM 2030 Roadmap”; Available: [http://big.yonsei.ac.kr/railbim/reports/RailBIM2030Roadmap\\_Full\\_Eng\\_Final.pdf](http://big.yonsei.ac.kr/railbim/reports/RailBIM2030Roadmap_Full_Eng_Final.pdf)
- [21] The Rail BIM 2030 roadmap project; Available: <https://www.gim-international.com/content/article/the-rail-bim-2030-roadmap-project>
- [22] Digital Construction. BIM: managing quality, cost and deadlines from the very start; Available: <https://www.deutschebahn.com/en/Digitalization/technology/innovations/digitaltalesbauen-3520304>
- [23] Implementation of Building Information Modeling (BIM) in the Infrastructure Division of Deutsche Bahn AG, Deutsche Bahn AG 2019, Available: <https://www.deutschebahn.com/resource/blob/4114234/f17c340682cd9e8f6bfe3faae86e0f52/BIM-Strategy-Deutsche-Bahn-en-data.pdf>
- [24] DB Engineering & Consulting; Available: <https://referenzen.db-engineering-consulting.de/en>
- [25] Official sites of leading foreign firms - developers of engineering software for construction:  
<https://www.bentley.com/ru>  
<https://www.autodesk.ru/>  
<https://www.nemetschek.com/en/>  
<https://graphisoft.com/ru>  
<https://ru.graitec.com/>  
<https://www.esri-cis.ru/ru-ru/home>  
<https://www.trimble.com/>
- [26] Virtual reality; Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Virtual\\_reality](https://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_reality)
- [27] Mixed reality; Available: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Смешанная\\_реальность](https://ru.wikipedia.org/wiki/Смешанная_реальность)
- [28] Microsoft HoloLens product; Available: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Microsoft\\_HoloLens](https://ru.wikipedia.org/wiki/Microsoft_HoloLens)
- [29] Tekla Structures product; Available: <https://www.tekla.com/ru/Продукция/tekla-structures>
- [30] A.Kazantsev, A.Volkov “ Paperless construction technology: features of using an electronic digital signature in the development of design and construction documentation”; Available: [http://isicad.ru/ru/articles.php?article\\_num=17346](http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=17346)
- [31] Nemetschek Solibri product; Available: <https://www.solibri.com>
- [32] Autodesk Navisworks product; Available: <https://www.autodesk.ru/products/navisworks/overview>
- [33] Autodesk Dynamo product; Available: <https://www.autodesk.com/products/dynamo-studio/overview?plc=DYNSTD&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>
- [34] Bentley Navigator product; Available: <https://www.pmsoft.ru/products/bentley/bentley-navigator/>
- [35] V.Talapov “BIM Implementation: An Impressive Singapore Experience”; Available: <https://ardexpert.ru/article/5160>
- [36] CORENET system; Available: <https://www.corenet-ess.gov.sg/ess/>
- [37] Bentley Synchro product; Available: <https://www.bentley.com/en/products/brands/synchro>
- [38] Oracle Primavera product; Available: <https://www.oracle.com/ru/applications/primavera/solutions/products.html>
- [39] Industrial Foundation Classes, Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Industry\\_Foundation\\_Classes](https://en.wikipedia.org/wiki/Industry_Foundation_Classes)
- [40] UK Digital Strategy; Available: <https://www.gov.uk/government/publications/uk-digital-strategy/uk-digital-strategy>
- [41] Digital Finland; Available: <https://www.businessfinland.fi/globalassets/julkaisut/digital-finland-framework.pdf>
- [42] Singapore Digital-Economy-Framework; Available: <https://www.imda.gov.sg/infocomm-media-landscape/SGDigital/Digital-Economy-Framework-for-Action>
- [43] Linnea Bestjak, Cassandra Lindqvist «Assessment of how Digital Twin can be utilized in manufacturing companies to create business value», School of Innovation, Design and Engineering, Mälardalen industrial technology center, Sweden, 2020
- [44] Technology readiness level; Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Technology\\_readiness\\_level](https://en.wikipedia.org/wiki/Technology_readiness_level)
- [45] Technische Universität München, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt, Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation “Building Information Modeling and Virtual Reality-Editing of IFC Elements in Virtual Reality”;
- [46] The Ohio State University, Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science in the Graduate School of The Ohio State University By Yuchen Lai Graduate Program in Civil Engineering “Augmented Reality Visualization of Building Information Model”;
- [47] Isicad.ru: Leaders of Autodesk, Dassault, PTC, Siemens and Trimble talk about the development of AR-VR; [http://isicad.ru/ru/articles.php?article\\_num=21436](http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=21436)
- [48] Norwegian University of Science and Technology (NTNU), School of Entrepreneurship, TIØ4530 “The Minimum Hybrid Contract (MHC): Combining Legal and Blockchain Smart Contracts”;
- [49] Sweden Royal Institute of Technology, Department of real estate and construction management, Elin Englund & Maria Gronlund “Current Legal Problems and Risks with BIM in the Swedish AEC Industry”;
- [50] Sweden Royal Institute of Technology, Department of real estate and construction management, Sebastian Orenäs Nissas, Nangi Rahimi “Digitalized Construction Project-To Build after a Legally Binding BIM-model”;
- [51] The Pennsylvania State University, The Graduate School, College of Engineering, Eric Nulton “Analysis Of Legal Concepts For Projects Implementing Building Information Modeling (BIM) In The United States”;
- [52] Office of Graduate Studies of Texas A&M University, Ruchika Bhandare ” Building Information Modeling A Minimum Mathematical Configuration”;
- [53] Tampere University, Master’s Degree Programme in Civil Engineering, Joonas Helminen “Automated generation of steel connections of BIM by machine learning”;
- [54] Oulu University of Applied Sciences, Degree Program in Civil Engineering, Liudmila Moskaliuk “Benchmark of availability of bim-objects for construction products”;
- [55] National Precast Concrete Association / Precast Magazines / Precast Inc. Magazine, Debbie Sniderman “Bim and precast: where physical and digital meet”; <https://precast.org/2018/05/bim-and-precast-where-physical-and-digital-meet/>
- [56] Western Michigan University, Civil and Construction Engineering, Mohammed Al Dafaay “Visualizing the Constructability of a Steel Structure Using Building Information Modeling and Game Simulation”;
- [57] Dmitry Zamolodchikov, Vasily Kupriyanovsky, Dmitry Namiot, German Sukonnikov, Natalia Fedorova, Petr Bubnov “Comfortable environment and resources for passenger stations in the lifecycle of

- digital railways assets”, International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 5, no.3, 2017;
- [58] Gary Morin "Geotechnical BIM: Applying BIM Principles to the Subsurface"; <https://www.autodesk.com/autodesk-university/article/Geotechnical-BIM-Appling-BIM-Principles-Subsurface-2019>
- [59] The University of Dayton, Prepared in cooperation with the Ohio Department of Transportation and the U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration; Hui Wang, Xiangrong Wang, Robert Liang "Study of AI Based Methods for Characterization of Geotechnical Site Investigation Data";
- [60] European Commission, JRC Technical Reports; A. Athanasopoulou, A. Bezuijen, W. Bogusz, D. Bournas, M. Brandtner, A. Breunese, U. Burbaum, S. Dimova, R. Frank, H. Ganz, U. Grunicke, H. Jung, A. Lewandowska, G. Nuijten, A. Pecker, S. Psomas, K. Roessler, A. Sciotti, M.L. Sousa, H. Stille, D. Subrin "Standardisation needs for the design of underground structures";
- [61] The Netherlands, Enschede, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente, Shen Nie "3D BIM-GIS for underground network management";
- [62] Lodron-Universität Salzburg, Universitätslehrganges "Geographical Information Science & Systems" (UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für Geoinformatik (ZGIS), B.Eng. Robert Lensing "BIM and construction process data in mechanized tunnel construction. Milestone control for tunnel construction sites using automatically created process data in comparison with 4D BIM";
- [63] Karelia university of applied sciences (Finland), Degree Program in Civil Engineering, Anirahmad Teymouri "Potentialities and restrictions of construction 3d printing";
- [64] Tampere University of Applied Sciences, Construction Engineering, Ruben Merckx "The utilization of aerial photography and laser scanning in BIM modelling";
- [65] Czech technical university in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Construction Management and Economics, Bc. Matej Koys "Implementation of BIM Systems for Energy Analysis and Optimization in Buildings";
- [66] European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport, Unit C4 Rail safety commercial and interoperability "ERTMS Retrofitting strategy Funding and Financing – Final Report. ERTMS On-board strategy";
- [67] European Commission, JRC Science For Policy Report, Gkoumas, K., Marques Dos Santos, F.L., van Balen, M., Tsakalidis, A., Ortega Hortelano, A., Grosso, M., Haq, G., Pekar, F. "Research and innovation in bridge maintenance, inspection and monitoring", A European perspective based on the Transport Research and Innovation Monitoring and Information System (TRIMIS);
- [68] Joint Study Programme of Metropolia UAS and HTW Berlin, International Master of Science in Construction and Real Estate Management, Sowmya Gurum "Analysis of LCC and BIM during Operations and Maintenance phase from the Perspective of Cost";
- [69] Vasily Kupriyanovsky, Oleg Pokusaev, Alexander Klimov, Alexey Volodin "BIM on the way to IFC5 - alignment and development of IFC semantics and ontologies with UML and OWL for road and rail structures, bridges, tunnels, ports, and waterways", International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 8, no.8, 2020;
- [70] buildingSMART Part 1 - The UML Model Report Introduction to the IFC Harmonised Schema Extensions, Project/Publisher: Common Schema / Infrastructure Room, Work Package: Common Schema - WP2 – Harmonisation & Development, Date: 24/04/2020, Version: V04 – FINAL, PUBLISHED [https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/06/IR-CS-WP2-UML\\_Model\\_Report\\_Part-1\\_.pdf](https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/06/IR-CS-WP2-UML_Model_Report_Part-1_.pdf)
- [71] buildingSMART Part 2 - The UML Model Report, Common Schema Elements, Project/Publisher: Common Schema / IFC Infra Program Office, Work Package: Common Schema - WP2 – Harmonization & Development, Date: 24/04/2020, Version: V04 – FINAL, PUBLISHED [https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/06/IR-CS-WP2-UML\\_Model\\_Report\\_Part-2\\_.pdf](https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/06/IR-CS-WP2-UML_Model_Report_Part-2_.pdf)
- [72] buildingSMART Part 3 - The UML Model Report, Ports & Waterways Schema Elements, Project/Publisher: IFC Infrastructure for Ports & Waterways (IPW), Common Schema / IFC Infra Program Office, Work Package: IPW - WP3 – Schema Extension Development, Common Schema - WP2 – Harmonization & Development Date: 24/04/2020, Version: V07 – FINAL, PUBLISHED [https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/06/IR-CS-WP2-UML\\_Model\\_Report\\_Part-3\\_.pdf](https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/06/IR-CS-WP2-UML_Model_Report_Part-3_.pdf)
- [73] buildingSMART Part 4 - The UML Model Report Railway Schema Elements, Project/Publisher: IFC Rail / Railway Room Common Schema / IFC Infra Program Office Work Package: IFC Rail - WP2 – Schema Extension Development Common Schema - WP2 – Harmonization & Development, Date: 24/04/2020 Version: V04 – FINAL, PUBLISHED [https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/06/IR-CS-WP2-UML\\_Model\\_Report\\_Part-4\\_.pdf](https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/06/IR-CS-WP2-UML_Model_Report_Part-4_.pdf)
- [74] buildingSMART Part 5 - The UML Model Report Road Schema Elements, Project/Publisher: IFC Road Project Common Schema / IFC Infra Program Office Work Package: IFC Road – WP3 – Schema Extension Common Schema - WP2 – Harmonization & Development, Date: 24/04/2020, Version: V04 – FINAL, PUBLISHED [https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/06/IR-CS-WP2-UML\\_Model\\_Report\\_Part-5\\_.pdf](https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/06/IR-CS-WP2-UML_Model_Report_Part-5_.pdf)
- [75] Joonas Helminen: Automated generation of steel connections of BIM by machine learning, Master of Science Thesis, Tampere University, Master's Degree Programme in Civil Engineering;
- [76] Phil Jackson, on behalf of buildingSMART International Infrastructure Room "Infrastructure Asset Managers BIM Requirements"; Technical Report No. TR 1010.
- [77] BSI's Standards Outlook - Issue five "Double Vision"; [https://www.bsigroup.com/en-GB/blog/Built-Environment-Blog/double-vision/?utm\\_source=pardot&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=S-M-SUB-NEWS-BUILD-BSOL-BLOG-2001-2012](https://www.bsigroup.com/en-GB/blog/Built-Environment-Blog/double-vision/?utm_source=pardot&utm_medium=email&utm_campaign=S-M-SUB-NEWS-BUILD-BSOL-BLOG-2001-2012)
- [78] Mälardalen industrial technology center, Sweden; School of Innovation, Design and Engineering, Linnea Bestjak, Cassandra Lindqvist «Assessment of how Digital Twin can be utilized in manufacturing companies to create business value»;
- [79] EU projects on digital twins: ARTwin AR, BIM2TWIN, VesselAI, VIMS, TwinERGY, COGNITWIN, MeDiTATe, COGITO, DUET, TWINECS, MooringSense, LEAD, Ashvin, SPHERE, DIGITbrain.
- [80] ATKINS (SNC-Lavalin Group) report "Skills deficit. Implications and opportunities for UK infrastructure";
- [81] Martin Simpson, University of Liverpool; Professor Jason Underwood, University of Salford; Dr Mark Shelbourn, University of Salford; Debbie Carlton, Dynamic Knowledge; Gulnaz Aksenova, University of Liverpool; Sajedah Mollasalehi, University of Salford "Evolve or Die: Transforming the productivity of Built Environment Professionals and Organisations of Digital Built Britain through a new, digitally enabled ecosystem underpinned by the mediation between competence supply and demand." Pedagogy and Upskilling CDBB Network.
- [82] HAME University of applied sciences, Degree Programme in Construction Engineering, Manish Yakami "State of Art in Thinking of BIM Competence".
- [83] buildingSMART COBie Certified Professional, Educational Curriculum. Version 1.0; <https://cobie.buildingsmart.org>
- [84] Aalto University, Department of Built Environment School of Engineering, M.sc Sanna Makkonen "Semantic 3D Modelling for Infrastructure Asset Management".
- [85] Oleg Pokusaev, Vasily Kupriyanovsky, Alexander Klimov, Dmitry Namiot, Julia Kupriyanovsky, Eugene Zarechkin "BIM, Ontology and Asset Management Technologies on European Highways"; International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 8, no.6, 2020.
- [86] Vikas Singhal "A Conceptual Framework for effective BIM-enabled Information Management in Railways", Master Dissertation European Master in Building Information Modelling, Universidade do Minho Escola de Engenharia.
- [87] Sergey Kobzev "Lean cyber-physical production system of a transport company", Railway transport, 9 – 2020.