Цифровой бетон: открытый BIM, машиночитаемые стандарты, IoT, цифровые двойники, логистика 4.0, бережливое строительство и другие промышленные подходы на примерах транспортных инфраструктур

В.П.Куприяновский, О.Н. Покусаев, Д.Е.Намиот, А.А.Климов, М.Г.Жабицкий

***Аннотация*— Бетон является одним из основных строительных материалов. Расходы на строительство, имеющие долю, примерно, 13% валового внутреннего продукта, составляют до 10 триллионов долларов во всем мире, что делает строительный сектор одним из крупнейших в мировой экономике. При этом отмечается исключительно низкая производительность по сравнению с другими секторами, такими, например, как обрабатывающая промышленность и сельское хозяйство. Строительный сектор также является одним из основных факторов воздействия на окружающую среду. Доля глобальных выбросов CO2, приходящаяся на бетон, лежит в интервале 8%-9%. Новые концепции и методы необходимы на протяжении всей технологической цепочки от производства сырья до планирования, производства компонентов и сборки, чтобы обеспечить более эффективное использование материала на протяжении всего процесса строительства.**

Для решения этих актуальных проблем начинает активно использоваться новый термин - цифровой бетон. Под цифровым бетоном понимаются все продукты, произведенные с использованием технологий изготовления с использованием цифровых моделей и машин с числовым программным управлением на основе цифровых данных. В какой-то мере, введение такой трактовки понятия «цифровой бетон» следует уже доказавшим свою состоятельность измерениям «цифровой экономики». И в первом и во втором случае, оба понятия опираются на долю цифровых технологий в реальных экономических процессах. Обсуждению возможностей цифровых технологий для преобразований в технологиях работы с бетоном на примерах транспортных инфраструктур и посвящена настоящая работа.

***Ключевые слова*—BIM, Индустрия 4.0, Логистика 4.0, Интернет Вещей.**

Статья получена 1 августа 2021.

В.П. Куприяновский - РУТ (МИИТ) (email: vpkupriyanovsky@gmail.com)
О.Н. Покусаев – РУТ (МИИТ) (email: o.pokusaev@rut.digital)
Д.Е. Намиот - МГУ имени М.В. Ломоносова (e-mail: dnamiot@gmail.com)
А.А. Климов - РУТ (МИИТ) (email: aaklimov1961@gmail.com)
М.Г. Жабицкий ВИШ НИЯУ МИФИ (email:jabitsky@mail.ru)

I. Введение

Материалы на основе цемента, которые позже получили название бетон, использовались людьми почти с самого начала цивилизации. Египтяне использовали известь и гипсовый цемент, чтобы связать свои совокупные материалы, грязь и солому, в результате чего получили кирпичи, которые использовались для строительства своих знаменитых египетских пирамид (между 3000 и 2500 годами до нашей эры). Гидратированный цемент - это цементный материал, связанный с водой и используемый для строительства зданий и сооружений со времен Древнего Рима; он характеризуется приемлемой химической, физической, термической, механической и структурной стабильностью. Он играет основную роль в создании емкостей для хранения, дорог для передвижения, погодоустойчивой конструкции для защиты, инертного твердого стабилизатора для опасных отходов и т. д. Благодаря составу этих материалов и их преимуществам, он нашел применение в различных областях. Цемент является важным компонентом при производстве бетона, единственного наиболее распространенного строительного материала, используемого во всем мире для строительства небоскребов, автомагистралей, туннелей, мостов, гидротехнических дамб и железнодорожных шпал. Помимо его многочисленных желаемых свойств, есть некоторые нежелательные особенности. Чтобы преодолеть эти недостатки, было проведено множество исследований для подготовки, улучшения и оценки инновационных материалов на основе цемента. Несмотря на свою давность и глубокие исследования, каждый год развивается несколько методов и материалов, а также технология цемента. Не смотря на то, что основная тема этой статьи цифровые технологии, сам материал – бетон также меняется, и стоит на это обратить внимание для понимания дальнейшего.

Приведем три примера специальных выпусков открытых журналов на эту тему в 2021 году. Так,

Materials - рецензируемый журнал по материаловедению и инженерии, опубликовал специальный выпуск «Бетонные конструкции с фиброцементными и композиционными материалами» [1]. Этот специальный выпуск посвящен новым технологиям, методологиям, приложениям, инновациям и производству высокотехнологичных бетонных композитов путем применения последних продуктов из металлических или синтетических волокон для будущего строительства и инфраструктуры посредством армированных волокном композитов, композитов на основе фиброцемента и сборных или модульных фибробетонных композитов.

Другой Специальный выпуск Materials 2021 года это «Конструкционный бетон: новые тенденции экологической эффективности и эксплуатационных качеств» [2]. Он отражает результаты симпозиума Fib 2021 в Лиссабоне, который прошел с 14 по 16 июня 2021 года и собрал вместе профессионалов, исследователей и студентов со всего мира, чтобы обсудить тематику этой встречи «Бетонные конструкции: новые тенденции экологической эффективности и производительности».

В этом выпуске отмечается, что последние годы конструкционный бетонный материал претерпел значительные изменения, поскольку его производство стало более высокотехнологичным. Это ответ на более строгие требования с точки зрения надежности, долговечности и прочности. Чрезвычайно важные разработки были достигнуты в отношении компонентов (цемент, добавки, добавки и заполнители), дизайна смеси и технологий производства, что привело к появлению широкого набора новых конструкционных бетонов. Например, самоуплотняющихся, наноармированных, армированных волокном, легких по весу, имеющих сверхвысокие характеристики и экологичность (низкоуглеродистые, с низким содержанием связующих веществ, включая переработанные заполнители).

Тематика этого специального выпуска охватывает последние разработки и новые задачи в следующих основных областях: устойчивые материалы на основе цемента и альтернативные связующие, включая геополимеры, отработанные цементы, щелочно-активированные цементы, модифицированные клинкеры и другие появляющиеся низкоуглеродистые цементы; прочность и долговечность бетона; современные материалы и специальные бетоны; характеристика материалов.

Еще один специальный выпуск «Экологичные бетонные материалы и технологии» [3] выпущен в 2021 году в другом издании Sustainability. Sustainability - это международный, междисциплинарный, научный, рецензируемый и открытый журнал, посвященный экологической, культурной, экономической и социальной устойчивости человека. Он представляет собой продвинутый форум для исследований, связанных с устойчивостью и устойчивым развитием.

В предисловии редактора к этому выпуску сказано [3]:

«Во всем мире существует огромный спрос на экологически чистое строительство, поскольку глобальное общество все больше внимания уделяет сокращению выбросов углерода и смягчению последствий изменения климата. В области бетонных материалов для создания устойчивой застроенной среды необходимо, чтобы специалисты-практики разумно и эффективно использовали имеющиеся ресурсы. Недавняя инновация в бетонных материалах и технологиях позволила спроектировать и построить устойчивую и прочную инфраструктуру. Основная цель этого специального выпуска - представить последние разработки и достижения в области бетонных материалов и технологий, которые решают глобальные проблемы устойчивого развития в строительстве».

Такой интерес к основному строительному материалу связан с тем, что расходы на строительство, имеющие долю примерно 13% ВВП (валового внутреннего продукта), составляют до 10 триллионов долларов во всем мире, что делает строительный сектор одним из крупнейших в мировой экономике [4]. Отмечается исключительно низкая производительность по сравнению с другими секторами, с глобальным ростом производительности труда всего на 1% в год в среднем за последние два десятилетия (мировая экономика 2,8%, обрабатывающая промышленность 3,6%). Производительность строительного сектора оставалась на том же уровне на протяжении всего прошлого века [4]. Для сравнения: с 1950-х годов производительность других секторов, таких как сельское хозяйство и обрабатывающая промышленность, выросла в 10–15 раз [4]. Строительный сектор также является одним из основных факторов воздействия на окружающую среду. На одни только здания приходится 39% выбросов углекислого газа (CO2), связанных с энергетикой, и более 36% мирового потребления энергии [4].

Здания и сооружения имеют относительно долгий срок службы. Принятые сейчас меры влияют на выбросы в среднесрочной и долгосрочной перспективе. Использование цемента и стали в зданиях с 2000 по 2015 год увеличивалось на 4% ежегодно из-за строительства в быстро развивающихся странах, преимущественно в Китае, Индии и Юго-Восточной Азии [4]. В Европе, Азии и Латинской Америке бетон чаще всего используется в жилых домах. В каркасе нежилых зданий он преобладает во всем мире, за исключением Северной Америки, где он покрывается только сталью [4]. Из 47,5 гигатонн сырья, потребленного во всем мире в 2015 году, 30 гигатонн (63%) можно отнести к бетонному строительству, что увеличивает общий запас бетона примерно до 428 гигатонн [4].

Поскольку углеродный углерод в строительстве в первую очередь зависит от потребности в материалах, это количество прямо пропорционально выбросам, возникающим, в частности, в результате производства бетона и цемента. Доля глобальных выбросов CO2, приходящаяся на бетон, оценивается в 8% по одним данным и 9% по другим данным ОЭСР [4]. Экологическая оценка бетона, выполненная

Исследовательской группой ресурсоэффективного проектирования конструкций и опубликованная Kromoser [4], показывает, что количество заключенного углерода в значительной степени зависит от состава бетона, места производства, эффективности производство и транспортировка сырья.

Помимо воздействия на окружающую среду из-за выбросов во время производства, необходимо учитывать аспект нехватки сырья, необходимого для бетонного строительства, например, песка [4] и гравия [4]. Бетон по-прежнему считается массовым строительным материалом с низкой степенью использования материала. Эффективное использование материала игнорируется из-за низких цен на сырье в пользу упрощения планирования и производства. Эта стратегия вскоре приведет, как считают в [4] к обратным результатам, как на экономическом, так и на экологическом уровне. Новые концепции и методы необходимы на протяжении всей технологической цепочки от производства сырья до планирования, производства компонентов и сборки, чтобы обеспечить более эффективное использование материала на протяжении всего процесса строительства.

Для решения этих актуальных проблем начинает активно использоваться новый термин - цифровой бетон. Под цифровым бетоном понимаются все продукты, произведенные с использованием технологий изготовления с использованием цифровых моделей и машин с числовым программным управлением на основе цифровых данных. Это относится ко всем цифровым методам изготовления, включая аддитивное производство (изделия и / или опалубки), например, использование гибкой опалубки, адаптивного литья, связывания слоя частиц и т. д, [55]. В какой-то мере, введение такой трактовки понятия «цифровой бетон» следует уже доказавшим свою состоятельность измерениям «цифровой экономики» [68]. И в первом и во втором случае, оба понятия опираются на долю цифровых технологий в реальных экономических процессах. Обсуждению возможностей цифровых технологий для преобразований в технологиях работы с бетоном на примерах транспортных инфраструктур и посвящена настоящая работа.

II. Современное распределенное производство бетона, строительство 4.0, BIM и Lean (бережливое строительство) как примеры промышленных подходов

Сегодня возрастающее давление на окружающую среду со стороны человеческой деятельности требует изменения отношения к тому, как в настоящее время работает строительная промышленность. Строительные производственные организации по всему миру теперь осознают необходимость сокращения отходов, более надежных схем использования продуктов, прогнозирующего мониторинга производственных процессов и учета продуктов в течение всего срока жизненного цикла, с особым вниманием к переработке и восстановлению вышедших из употребления материалов и продуктов. Развитие круговой и совместной экономики является одним из конкретных ответов на эту потребность, способствуя целостному взгляду, как на производство, так и на потребление товаров и услуг [6,7,12]. Часто в тандеме с этой парадигмой используется модель распределенного и мобильного производства [9,13,124,125], возникшая благодаря появлению новых технологий, продвигаемых в таких концепциях, как Индустрия 4.0, IoT и IIoT [5,8]. Децентрализованное производство по запросу, локализованное и настраиваемое производство обеспечивает новый путь к производству продуктов и материалов, зачастую очень специализированных, например, для местного рынка потребителей. Помимо общих закономерностей развития промышленности, имеются также специфические особенности развития строительной индустрии [10] и логистики [14], а также измерения доли цифровой экономики в той или иной отрасли [11] .

Существующие бизнес-модели индустрий показали, что существует потребность в надежных объектах в непосредственной близости от клиента. Такие объекты могут быть, например, просто магазинами, которые также могут производить, реконструировать и предоставлять услуги, но это также могут быть и строительные площадки, где главный клиент это строитель. Такая комбинация может снизить затраты, повысить устойчивость и предоставить клиентам настраиваемые продукты и услуги [17]. Кроме того, сокращение объемов транспортировки и увеличение вовлеченности клиентов на протяжении всего производственного процесса являются ключевыми преимуществами, реализуемыми при использовании перераспределенной модели распределенного производства для строительства. Многовекторная и дополняющая по элементам производственная экосистема возникающая в этом случае представлена на рисунке 1 и в применении к рассматриваемому материалу – бетону и всегда стоит помнить о различных ограничениях по его логистике из-за разных свойств этого материала. Например, готовый бетон для монолитных работ ограничен по времени своего использования и это давно учитывается при строительстве бетонных заводов.

Из литературы [18] ясно, что существует возможность для четкой и лучше определенной «цифровой нити» строительства, чтобы связать воедино этапы проектирования здания и производства с этапом сборки на месте и этапом окончательного демонтажа (возможно с модульным зданием). Сбор данных на трех этапах производства, сборки / строительства на месте и занятия (здание в эксплуатации) можно увидеть ниже на рисунке 2, который детализирует рисунок 1.

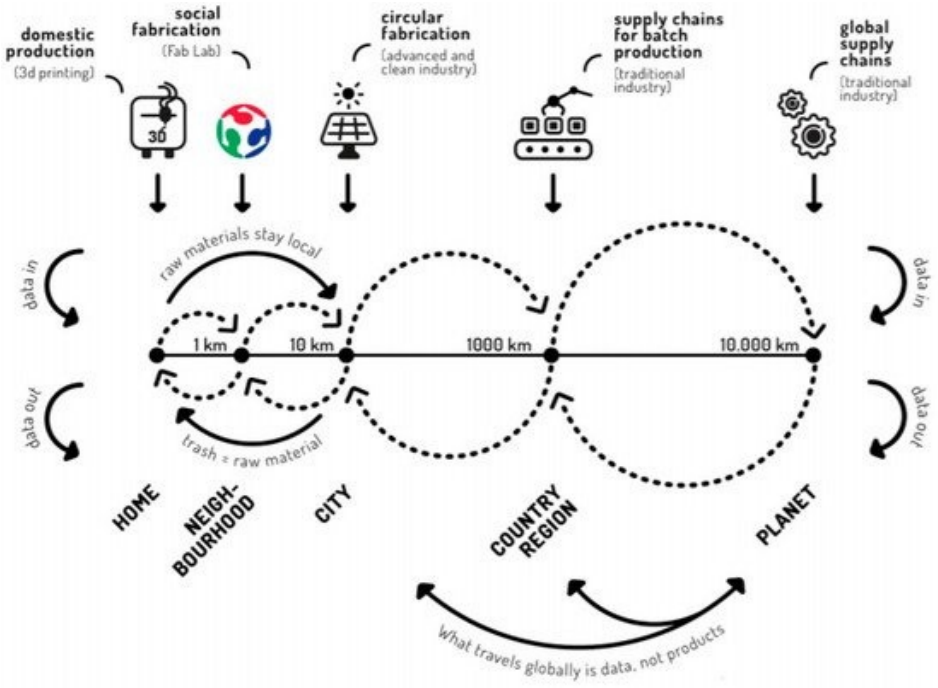

Рис. 1. Многовекторная и дополняющая по элементам распределенная производственная экосистема [17]

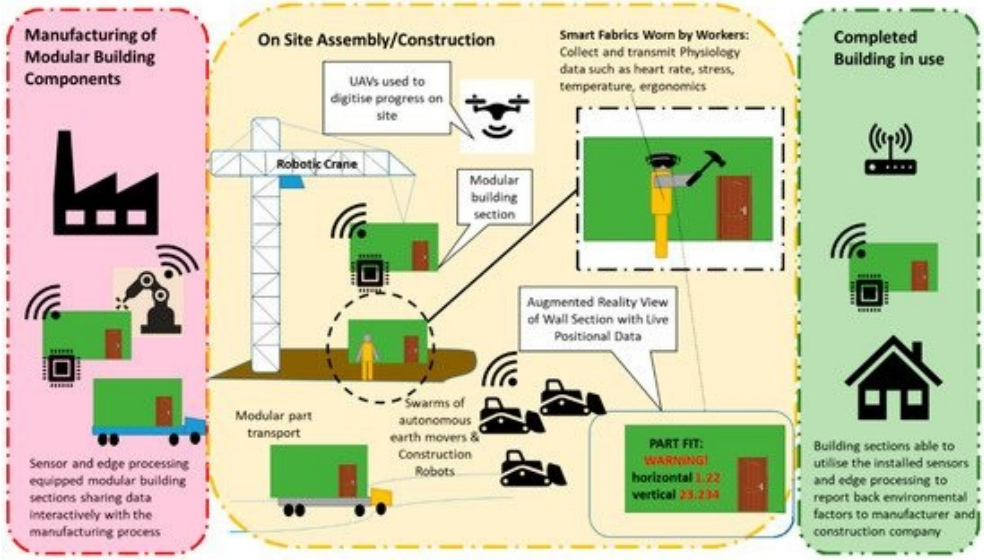

Рис. 2. Трехфазная модель использования интеллектуальных активов (цифровой нити) в строительстве [18].

Модель на рисунке 2 демонстрирует возможности использования сенсорного блока, состоящего из краевых вычислений (Edge) и беспроводной связи с бортовым источником питания [18]. Последняя необходима, чтобы обеспечить зондирование и обмен данными между модульным компонентом здания и производственной линией, производящей его. Представлена связь между компонентом модульного здания и оборудованием на объекте, а также рабочими, участвующими в его сборке в законченное здание и зондирование окружающей среды в здании при использовании, чтобы помочь в регулировке, например, уровней отопления и вентиляции, а также производительности модуля (при этом такие данные могут быть отправлены обратно производителю для оценки и обучения при разработке новых продуктов). Пример комплекта датчиков, который мог бы обеспечить это трехфазное распознавание использования и интеллектуальную обработку данных на месте в модульном компоненте здания можно найти в [18].

В стремлении оцифровать различные строительные проекты с целью улучшения контроля и управления, в настоящее время все более популярными становятся модели информационного моделирования зданий (BIM), ставшие, практически, центральным звеном в технологиях современного строительства, в том числе, в области транспортных инфраструктур. BIM - это цифровое факсимиле здания или транспортного сооружения с подробным описанием его физических размеров и функциональных характеристик [18]. BIM также рассматривается как средство достижения цели нулевого уровня выбросов углерода для новых построек, что позволяет использовать BIM как основой инструмент устойчивого стратегического развития,

чтобы обеспечить связанные с проектированием оценки воздействия проектов на окружающую среду до начала строительства. Заметим, что BIM или, точнее, его независимые от производителя открытые, машиночитаемые стандарты группы IFC, имеющее общие онтологические корни через языки моделирования STEP,EXPRESS с производственными стандартами INDUSTRY 4.0, служит эффективным мостиком соединения строительного и производственного доменов в новую индустриальную экосистему строительства и си управления ею.

Для того чтобы реализовать такую экономически целесообразную систему строительный сектор сталкивается с серьезными вызовами, которые характеризуются внедрением цифровых технологий, сенсорных систем, роботизированных систем, интеллектуальных машин и интеллектуальных материалов. Эта трансформация, которая по аналогии с производственным сектором получила название «Строительство 4.0» (Construction 4.0), позволит строительному сектору улучшить ситуацию в отрасли с точки зрения инноваций, производительности, эффективности и качества, сократив задержки в реализации проектов и перерасход средств.

Появление концепции Construction 4.0, интегративной концепции, научные контуры которой еще не являются предметом какого-либо консенсуса, представляет собой уникальную возможность найти согласованную взаимодополняемость между основными технологическими подходами, создавая при этом среду, необходимую для повышения производительности и более экологичных зданий и транспортных сооружений с точки зрения энергозатрат и материалов. Мы подобрали три литературных обзора по теме Строительство 4.0 [34, 35, 36] и далее рассмотрим возможные направления интеграции BIM (его в работе [35] уже называют BIM 4.0), как лидера цифровых решений строительного рынка [37-43] и бережливого строительства Lean, как ведущую методологию и практику современной промышленности. Полагаем, что высказанные соображения могут быть полезными в контексте развития обсуждений вокруг концепции Строительства 4.0 .

Текущие рыночные условия, характеризующиеся технологическими изменениями, повышением нормативных требований и низким уровнем финансирования, делают существующие модели управления строительством устаревшими. Эта тенденция затрагивает не только рынок частного жилья, но и проекты государственного управления, которые имеют большие временные и бюджетные отклонения по всем направлениям. В результате, необходимы новые подходы для повышения эффективности процесса строительства, устранения дополнительных затрат и своевременной реализации проектов. Наиболее характерными тенденциями в строительной отрасли, которые позволяют такие улучшения, являются, как парадигма информационного моделирования зданий (BIM), так и философия бережливого строительства с одним из связанных с ней инструментов в области управления строительством - системой Last Planner. Однако обзор литературы [22] показывает нехватку работ по синергии обеих парадигм, принимая во внимание обширную литературу по темам Lean и BIM по отдельности.

Для подтверждения высказанной выше позиции об индустриализации строительства, которую называют часто уже Строительство 4.0, мы приведем небольшой обзор публикаций по теме BIM и Lean. Так уже есть значительное число работ, которые исследуют использование BIM с бережливым строительством для оптимальной сборки строительных проектов на месте. Вклад бережливых технологий (Lean) в процессы BIM рассматривается в работе [19] на примере управления конфликтами при проектировании автомобильных дорог. Бережливое мышление для перехода от традиционной логистики к физическому Интернету [21] анализируется в [20]. Практики бережливого производства с использованием информационного моделирования зданий (BIM) и цифровых двойников для устойчивого строительства можно увидеть в публикации [22]. Пути к интеграции данных BIM и LPS для управления проектами бережливой строительной площадки (Lean Site) в части современного обзора и рекомендаций можно посмотреть в работе [23]. Интеграция бережливого строительства, BIM и качества, как новой парадигмы для улучшения качества строительства в Китае, описана в работе [24]. Проектирование для деконструкции, с использованием интегрированных принципов бережливого производства и подхода BIM, представлены в публикации [25]. Подходы BIM-LEAN, как методология экономии затрат на исполнение в строительстве - опыт в рамках испанской концепции изложены в статье [26].

Кроме отдельных статей по теме BIM и Lean есть также специальный выпуск издания Sustainability в 2020 «Бережливое проектирование и информационное моделирование зданий» [27], в предисловии редактора к которому приводится интересные рассуждения по этой тематике:

«На протяжении многих лет исследователи и практики стремились повысить эффективность проектирования и производства в строительстве. Это было основным направлением инициатив в области бережливого проектирования и строительства и остается таким же актуальным сегодня, как и более 25 лет назад, в начале исследований в области бережливого строительства.

Бережливое производство рассматривает дизайн как производственный процесс, в котором информация постоянно преобразуется, добавляется к ней добавленная стоимость, об этом сообщают клиенты и другие заинтересованные стороны. В концепции бережливого производства дизайн был выделен как главное средство создания ценности для клиентов. Однако внедрение бережливого мышления по-прежнему остается скромным в дизайне. Сложность определения требований и управления ими, множественные, а иногда и конкурирующие требования к эффективности, устойчивости и стоимости, передача функций между

профессионалами и организациями, временный характер строительных бригад и постоянно меняющаяся технологическая повестка дня делают проектирование все более сложным.

Бережливое проектирование и информационное моделирование зданий (BIM) являются центральными средствами текущих преобразований в строительной отрасли. Однако основное внимание в исследованиях BIM уделяется технологиям, хотя результаты внедрения зависят, по крайней мере, в такой же, если не в большей степени, от деловой среды и социальных явлений. Связи между бережливым производством и BIM обсуждаются в течение 10 лет, и существует очевидная необходимость и возможность продолжать распутывать эти связи и рассматривать в этом контексте перспективу социальных наук.

Текущая трансформация бережливого производства и BIM - это отличная возможность для исследователей наблюдать такие интересные явления, как творчество, решение проблем, сотрудничество, совместное творчество, приверженность и доверие, которые могут привести к усовершенствованию методов и моделей управления».

Кроме авторов статей довольно много исследователей выбрали тему BIM и Lean для своих диссертационных работ. Задержки и перерасход средств в строительных проектах - внедрение бережливых методов для минимизации рисков по срокам и затратам рассмотрены в тезисах [20]. Связь и рабочего процесса на основе Lean BIM на этапах проектирования можно посмотреть в диссертации [29]. Интеграцию смешанной реальности и бережливого строительства на этапе реализации: чтобы лучше понять процесс выполнения строительных проектов и их участников изучают в работе [30]. Входные данные для бережливого строительства и анализа задержек для уменьшения задержек исследуют в тезисах [31]. Одна из самых ранних диссертационных работ по теме была выполнена в 2016 году в Швеции [32] и она называлась: «Взаимодействие бережливого строительства и BIM. Как можно повысить эффективность производства, если на этапе проектирования объединить бережливое производство и BIM. Обзор литературы».

Особо стоит остановиться на профильной для бетона диссертации «Интеграция информационного моделирования зданий (BIM) и сборных конструкций: повышение эффективности среды, основанной на принципах бережливого производства» [33]. В ней, как нам представляется, конструктивно описаны рабочие отношения рассматриваемых систем технологий, и мы проиллюстрируем эту позицию цитатой из упомянутой работы и рисунком 3 , на котором показана интеграция BIM с системой Last Planner:

«Бережливое строительство, заимствованное из производства, направлено на сокращение отходов, удовлетворение потребностей клиентов и постоянное совершенствование. Однако его Last Planner System (LPS) не хватает автоматизации, необходимой для управления сложными проектами. С другой стороны, информационное моделирование зданий (BIM) способно разрабатывать модели, соответствующие уровням планирования LPS, и ускорять визуализацию ошибок. Предварительное изготовление способствует своевременной доставке, используя возможности модели BIM. Цель исследования - создать основу для интеграции системы Last Planner с BIM и сборными конструкциями. Изучение литературы и выводы опроса использовались для определения потенциала интеграции. Эта структура направлена на разработку бесперебойных рабочих процессов и современных LPS, что способствует развитию бережливой среды. Это может иметь большое значение для пользователей как BIM, так и сборных конструкций, поскольку они имеют возможность управлять и координировать прогрессивные модели BIM и менее изменчивые рабочие процессы для сборных конструкций».

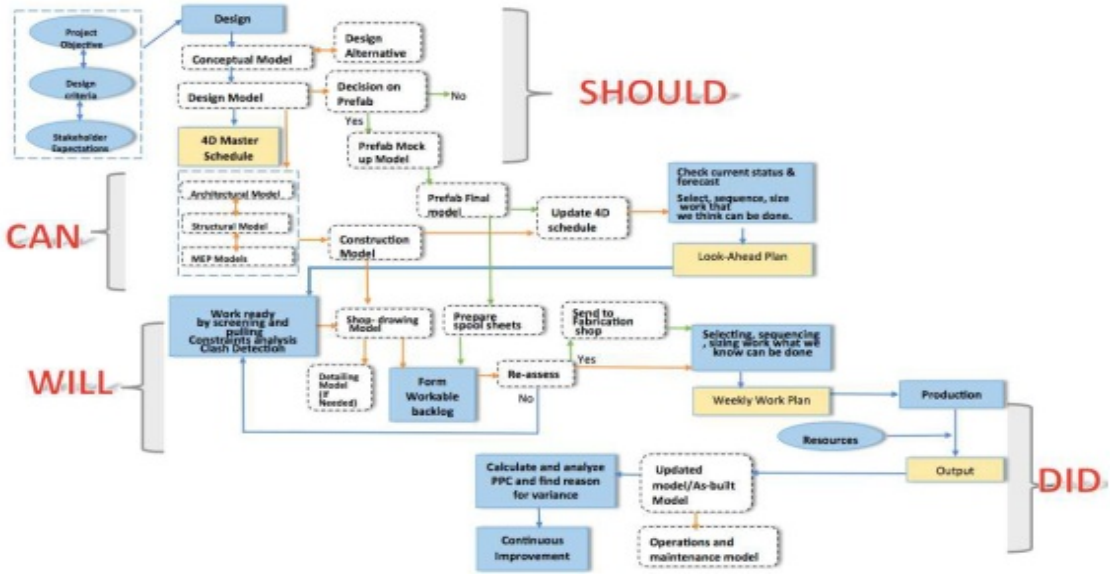

Рис. 3. Интеграция BIM с системой Last Planner [22]

Завершая этот раздел и следуя индустриальным

решениям, ведущим к цифровому двойнику, мы решили привести еще две иллюстрации по теме, показывающие перспективы развития распределенных строительных производств при правильном сочетании технологий BIM и Lean. Рисунок 3 показывает, как может выглядеть интеграция BIM с системой Last Planner, представляющей бережливое строительство. На рисунке 4 приведен набор критически важных компонентов для бережливого строительства и будущих направлений бережливого цифрового двойника. О цифровых двойниках мы будем говорить далее.

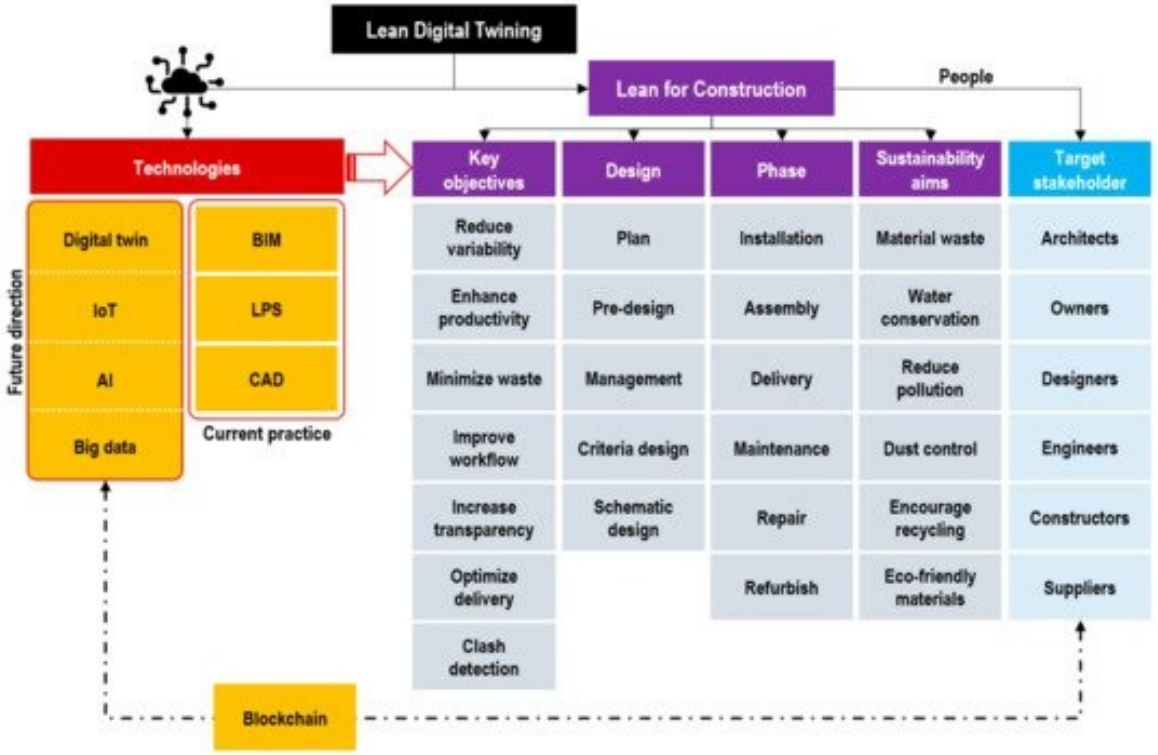

Рис. 4. Цифровой двойник и соответствующие инструменты и компоненты бережливого строительства. Примечание: BIM: информационное моделирование зданий; LPS: система Last Planner®; CAD: автоматизированное проектирование; IoT: Интернет вещей; AI: искусственный интеллект [22].

III Монолитный бетон и BIM

Бетон и сталь, два материала, которые были симбиотически объединены, чтобы сформировать композитный материал, армированный бетоном с одинаковым коэффициентом теплового расширения, на протяжении десятилетий доминировали в строительных работах. В то время как метод строительства из железобетона изначально ассоциировался с оригинальными конструкциями корпусов, смелыми конструкциями крыш и элегантными конструкциями мостов, сегодня железобетон - это материал, который используется массово и тесно связан с высокими выбросами CO2, вызванными строительством. Гениальные конструкции мостов, крыш и корпусов прошлого века были спроектированы на основе понимания взаимосвязанного взаимодействия двух материалов - бетона и стали. На сегодняшний день железобетон - самый распространенный материал в строительстве. Использование системной опалубки и простых в установке арматурных опорных конструкций, которые оптимизированы с точки зрения затрат на рабочую силу, существенно упростило работу с ним, но часто имеют неэффективное использование материала. Цифровые технологии в основе которых технологии BIM, базирующиеся на экономических обоснованиях, сегодня позволяют получать существенную выгоду как по затратам так и по времени.

Есть много примеров того, как положительный опыт применения таких технологий становился государственной политикой, расширяя ранее принятые решения о внедрении BIM. Так, в Китае в 2019 году, Главное управление Государственного совета опубликовало политику, направленную на продвижение интегрированного применения BIM (информационное моделирование зданий), больших данных, мобильного Интернета, облачных вычислений, IoT (Интернет вещей), искусственного интеллекта и других технологий на протяжении всего процесса проектирования, строительства, эксплуатации и технического обслуживания, чтобы способствовать доставке и применению цифровых достижений в инженерном строительстве, а также повышать информационный уровень строительной отрасли. Кроме того, в «Концепции национальной стратегии развития информатизации» предложена акция «Интернет +», необходимая для повышения уровня информатизации строительной отрасли [44].

Конечно, все это относится и к монолитному бетону, в производстве которого помимо бетонных смесей, о прогрессе которых мы говорили выше, огромную роль играют опалубка, арматура и логистика доставки всех компонент к месту производства монолитного бетона.

Выше мы уже говорили об особенностях рынка США в части широкого использования стали в строительстве. Отчасти благодаря этому, Американский институт стальных конструкций утверждает, что [48]:

«До того, как термин «BIM» был придуман, промышленность металлоконструкций была лидером в области передового трехмерного моделирования. Спустя более трех десятилетий пионеры в области производства металлоконструкций использовали 3D-моделирование, чтобы сделать конструкционную сталь предпочтительным материалом. Это нашло свое отражение сегодня, поскольку отрасль металлоконструкций широко рассматривается как лидер и задающая темп в мире BIM. Сегодня промышленность металлоконструкций считается наиболее компетентными пользователями BIM среди всех профессий».

Так же Американский институт стальных конструкций выпустил руководство по BIM [49], а IFC стал стандартом для обработки на заводах изделий из стали для строительства. Конечно, все сказанное относится и к арматурным стержням, работа с которыми имеет свои особенности, но достаточно широко представлена в ПО для BIM (пример BIM модели арматуры представлен на рисунке 5). Эти особенности и текущее состояние дел по теме «Арматура и BIM» обсуждаются далее.

Арматурные стержни являются неотъемлемой частью железобетонного здания, но использование технологии BIM для моделирования конфигураций арматурных стержней в трехмерной среде может занять много времени, если делать его старыми методами. Однако с развитием технологий 3D BIM теперь становится быстрее и проще проектировать, моделировать, документировать, отслеживать и контролировать арматурные стержни. Использование этих технологий 3D BIM значительно улучшает общую производительность и управление затратами для всего проекта. Изменения в конструкции и размещении арматурных стержней могут быть мгновенно интегрированы в 3D-модель, а планы могут быть изменены соответствующим образом. Отчеты по проектированию, чертежи и графики можно составлять из 3D-моделей гораздо эффективнее, чем при использовании 2D-проектов. Они также более надежны и полностью отслеживаются для аудита [50].

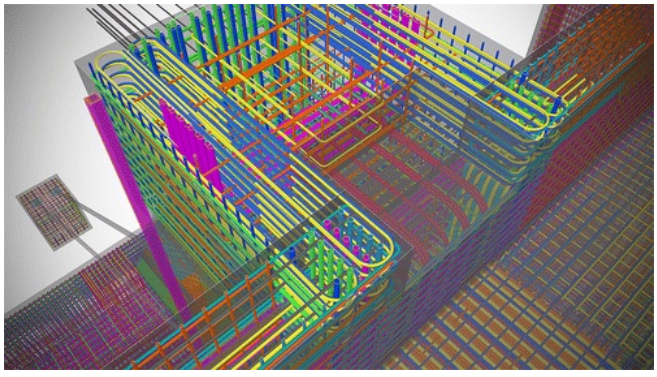

Рис. 5. BIM модель арматуры (источник: Trimble)

Применение процессов обнаружения коллизий в информационном моделировании зданий для арматуры является одной из приоритетных задач и этому посвящена работа [50].

Систематический обзор литературы по очень важной теме «Сведение к минимуму отходов арматуры для устойчивых строительных работ « можно найти в [51] . В этой работе сказано что

«Арматура, основной ресурс железобетонных конструкций, выделяет больше углекислого газа на единицу веса, чем любой другой строительный ресурс. Таким образом, сокращение отходов резки арматуры в значительной степени способствует снижению выбросов парниковых газов (ПГ). За последние десятилетия было проведено множество исследований по минимизации отходов резки, и были предложены различные алгоритмы оптимизации. Однако на самом деле от 3 до 5% отходов резки все еще образуются. В этой статье систематическим методом с мета-анализом рассматриваются тенденции в исследованиях по минимизации отходов резки (CWM) арматуры для устойчивых работ».

Арматура, как «токсичный» с точки зрения CO2 материал, должна иметь возможности повторного использования в соответствии с новыми зелеными нормами. Возможности использования данных информационной модели здания на заводе по переработке арматуры можно узнать из статьи [52], но эти возможности ограничены. Индустриализация работ с арматурой и распределенное производство дают шансы развивать экологию и экономику совместно и самый важный вопрос в этом дальнейшее расширение IFC в промышленной сфере изготовления арматуры как сказано в работе «Интеграция BIM-BVBS со стандартами openBIM для автоматического изготовления стальной арматуры» [53]. Приведем из нее цитату, характеризующую состояние дел:

«Обработка стальной арматуры - это работа на месте, включающая резку и изгибы, которые требуют много времени и неэкономичны. При переходе к автоматизации строительства, важное значение имеет сборка за пределами объекта с помощью информационного моделирования зданий (BIM) и отраслевых фундаментальных классов (IFC), которые используются в качестве совместного подхода для облегчения рабочего процесса изготовления и взаимодействия данных. В этой статье представлена интеграция BIM и кодов станков для производства стали (BVBS) со стандартами openBIM для взаимодействия компьютеризированного проектирования и автоматизации заводского изготовления стальной арматуры. Интеграция начинается со ссылки на Руководство по доставке информации (IDM), которое включает идентификацию требований к информации в карте процесса для определения необходимого обмена данными в процессе заводского изготовления. Определение представлений модели IFC проводится для обеспечения того, чтобы обмен данными соответствовал потребностям конечного пользователя и был реализован для программных приложений. Затем создается

информационная модель процесса изготовления стальной арматуры путем соединения объектов IFC с отношениями между конкретными задачами. Разработан новый подход к расширению схемы данных IFC с помощью объектов, связанных со сборными объектами. Предлагаемая интеграция BIM-BVBS демонстрируется с использованием средств просмотра IFC и средств визуального программирования (Dynamo) в иллюстративных примерах, результаты которых показывают, что связанные с префабами объекты и атрибуты в моделях BIM на основе IFC могут быть эффективно извлечены для обслуживания данных BVBS. переход к автоматическому сборному производству».

Опалубка составляет от 35% до 60% общей стоимости структурного каркаса бетонного здания [45] и всегда является частью критического пути проекта. Информационное моделирование зданий (BIM) быстро растет во всем мире для строительных проектов. Однако моделирование временных конструкций с помощью BIM не очень распространено. Текущая практика управления опалубкой основана на использовании традиционных инструментов, таких как САПР, редакторы PDF и электронные таблицы. Модель опалубки BIM на этапах предварительного строительства предоставляет мощный инструмент для принятия решений по управлению опалубкой (выбор системы опалубки, поставщика опалубки и определение количества для закупки систем опалубки) [45]. Если полагаться только на приблизительную оценку затрат и практический опыт работы с опалубкой, это может привести к завышению бюджета на опалубку, аренде излишков опалубки и оплате дополнительных элементов / систем опалубки, которые могут быть потеряны, повреждены или даже украдены. Обзор современного состояния, практики и результатов опроса, использованного для сбора данных о практиках AEC в отношении предпочтений в области управления опалубкой, показал [45], что: (1) BIM-моделирование опалубки с LOD 100 и 200 является предпочтительным подходом практикующих специалистов, (2) аренда опалубки является предпочтительным режимом, учитывая контактную площадь системы вместо аренды частей опалубки, и (3) использование традиционных инструментов, таких как CAD, редакторы PDF и электронные таблицы с минимальным уровнем автоматизации, является общей практикой. в управлении опалубкой[45]. Основываясь на этих выводах, диссертация [45] фокусируется на проектировании, разработке и тестировании инструмента управления опалубкой на основе BIM. Инструмент на основе BIM по предложению [45] применяется на двух этапах: (1) автоматизация моделирования опалубки BIM контактной поверхности систем опалубки и заполнение параметров BIM, связанных с опалубкой (типы опалубки, вес опалубки, производительность и время) во входной модели BIM, и (2) использование полученной модели BIM, разработанной на этапе 1, для задач управления опалубкой (количество вылетов, профили спроса на опалубку, анализ затрат, оценка ключевых показателей эффективности (KPI), таких как коэффициент повторного использования и эффективность опалубки, а также отслеживание снятия опалубки). Инструмент был протестирован на двух тематических исследованиях (20-этажное здание и 5-этажное здание) с 80 рабочими зонами и 46 650 м^2 общей застроенной площади [45]. Результаты KPI для обоих тематических исследований были аналогичными, как и ожидалось, поскольку оба здания имеют одинаковую модульную архитектуру. Основанный на BIM инструмент для управления опалубкой, представленный в этой диссертации, обеспечивает следующие преимущества: (1) Реализуется независимо от выбранных систем опалубки или поставщика опалубки, (2) Экономия времени за счет автоматизации повторяющихся задач в Revit и сосредоточения внимания на моделировании поверхности опалубки. контактная зона (вместо моделирования всех компонентов опалубки) и (3) сокращение человеческих ошибок, поскольку процессы BIM (моделирование опалубки, управление параметрами и обмен данными между различными платформами) автоматизированы, что снижает необходимость ручного ввода значений параметров или ручное 3D моделирование [45]. Положительные результаты, описанные в [45], и представления авторов о правильности предложенных подходов, позволили предложить нашим читателям три рисунка дающие представления об этом подходе. Так, на рисунке 6 показана карта управления опалубкой (PRES), на рисунке 7 есть планировка опалубки и рабочих зон, а карта типов опалубочных систем приведена на рисунке 8.

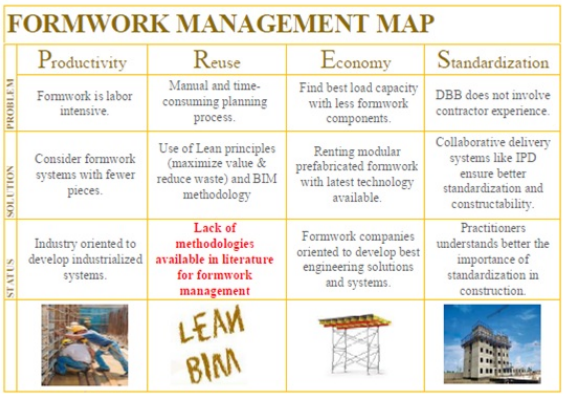

Рис. 6. Карта управления опалубкой (PRES) [45]

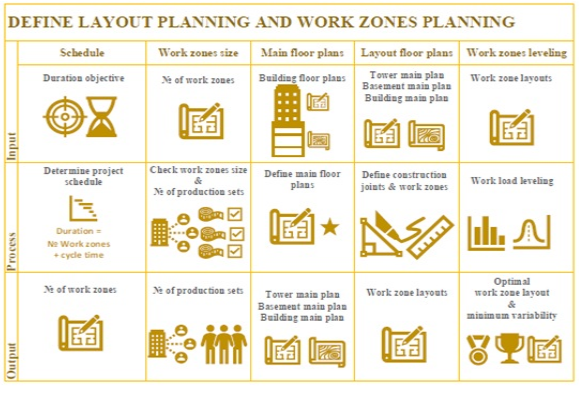

Рис. 7. Планировка опалубки и рабочих зон [45]

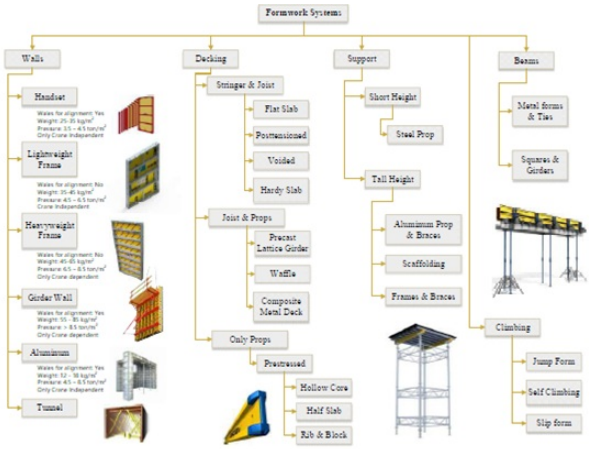

Рис. 8. Карта систем опалубки [45]

Для иллюстрации высказанной выше позиции применимости программного обеспечения на базе BIM в целях автоматизации проектирования опалубки, например, для алюминиевой опалубки приведем примеры из работы корейских авторов [46]. Они исходили из того, что временные работы, которые включают временные конструкции, используемые для поддержки строительства здания, такие как опалубка, являются одним из важнейших факторов стоимости строительных работ [46]. Чтобы применить программное обеспечение для автоматизации проектирования опалубки, они создали библиотеку алюминиевой опалубки, основанную на преобразовании двухмерных (2D) данных автоматизированного проектирования (CAD) в данные трехмерного информационного моделирования зданий для всех компонентов алюминиевой опалубки. Результаты автоматизированной разметки опалубки на целевые конструкции с использованием программного обеспечения для автоматизации проектирования опалубки подтвердили, что элементы стены и настила были выложены по заданному алгоритму в соответствии с размером и направлением опалубки [46].

Программное обеспечение для автоматизации опалубки было разработано [46] в среде Unity3D, которая широко используется в промышленных приложениях. Кроме того, было разработано программное обеспечение в среде разработки Blender3D для предварительной обработки сетки данных 3D-рендеринга BIM, а также использовали скрипт Python для автоматизации компоновки опалубки. На рисунке 9 показаны данные двумерного (2D) автоматизированного проектирования (CAD) и данные трехмерного информационного моделирования зданий (BIM) целевых структур: (a) типы A, (b) и C (c); а на рисунке 10 как выглядит визуально библиотека алюминиевой опалубки: (a) данные 2D CAD и (b) данные 3D.

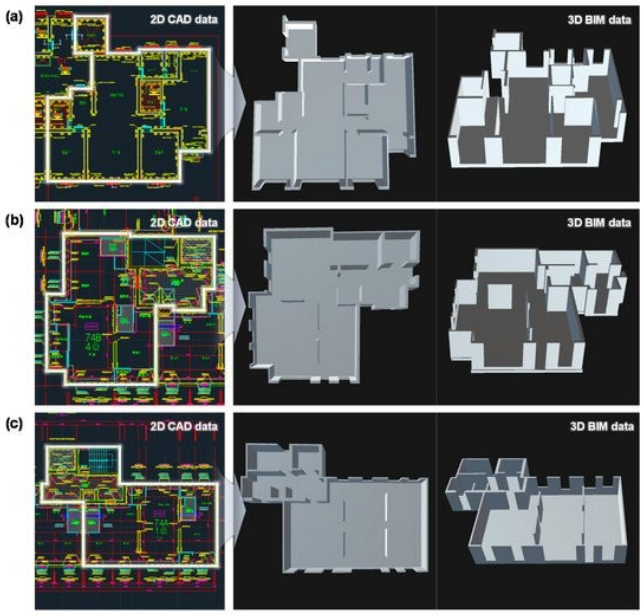

Рис. 9. Данные двумерного (2D) автоматизированного проектирования (CAD) и данные трехмерного информационного моделирования зданий (BIM) целевых структур: (a) типы A, (b) и C (c) [46]

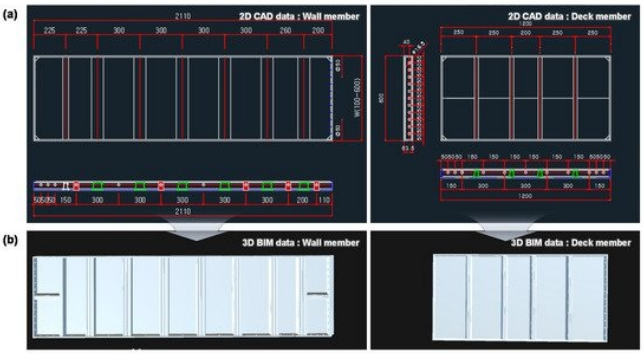

Рис. 10. Библиотека алюминиевой опалубки: (a) данные 2D CAD и (b) данные 3D BIM [46]

Подход к зрелости бетона обычно предполагает, что прочность и долговечность бетона зависят от его температуры и влажности. Эти параметры существенно влияют на то, как свойства бетона (такие, как прочность, модуль упругости, деформация и усадка) развиваются на ранних этапах опалубки [47]. Поскольку зрелость бетона рассчитывается на основе температуры бетона между его местом и формой, прочность монолитного бетона и время удаления можно оценить в режиме реального времени, если есть возможность собирать данные о температуре на строительной площадке [47]. Среди различных свойств бетона прочность особенно важна для измерения и оценки его качества и характеристик [47]. Чтобы измерить производительность, образец испытывается, чтобы увидеть, может ли бетон выдержать максимальную нагрузку, которую он должен выдерживать. Однако этот метод прямого измерения требует как времени, так и денег, поскольку для этого требуется несколько образцов, и испытание необходимо повторять до тех пор, пока не будет достигнута допустимая прочность. Процесс также может игнорировать время и температуру созревшего бетона.

Более того, на результаты, основанные на этом типе ручного тестирования, могут влиять внешние факторы или факторы окружающей среды, такие как человеческие ошибки, ошибки в характеристиках образцов и проблемы с загрузкой конфигураций и настроек [47]. Чтобы решить эту проблему, можно использовать индекс зрелости для расчета прочности монолитного бетона во время строительства для испытания бетонных цилиндров, отвержденных в полевых условиях. Также важно прогнозировать и документировать прочность бетона на ранних этапах работы, чтобы сократить время на снятие бетонной опалубки [47]. Для того чтобы решить эти вопросы в рамках построения IT системы в работе [47] было предложено расширение функциональной совместимости BIM для мониторинга процесса бетонной опалубки в режиме реального времени или по сути применение подходов цифрового двойника для монолитного бетона. Построенная система работает на строительной площадке и выводит данные на оговоренные смартфоны (рисунок 11).

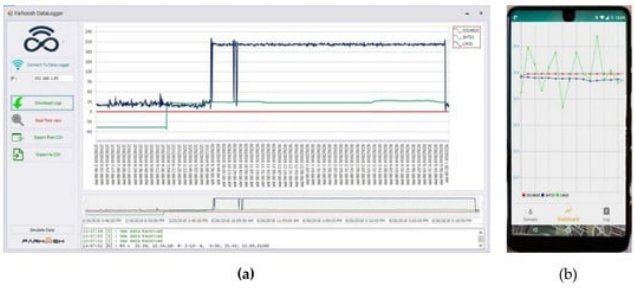

Рис. 11. Пользовательский интерфейс ((a) регистратор данных; (b) мобильное приложение) [47].

Процесс связывания информационного моделирования зданий (BIM) и датчиков IoT, установленных в бетоне показан на рисунке 12.

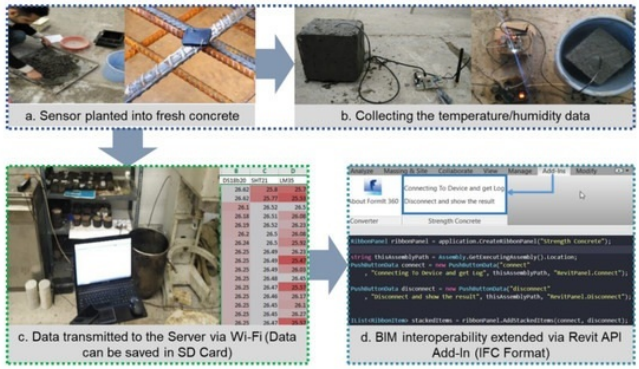

Рис. 12. Процесс связывания информационного моделирования зданий (BIM) и датчиков IoT, установленных в бетоне [47].

Беспроводное зондирование процесса схватывания бетона описано в работе [65]. В этой статье представлена беспроводная система на основе RFID для измерения эволюции процесса схватывания материалов на основе цемента. Система состоит из беспроводного датчика температуры RFID, который встроен в бетон, и внешнего считывателя RFID, который связывается со встроенным датчиком для получения результатов измерения температуры, проводимых встроенным датчиком. Температурно-временная эволюция - это хорошо известный показатель, позволяющий контролировать процесс схватывания бетона.

В качестве примера развития применения концепции цифрового бетона для монолитного бетона мы выбрали строительство автомобильных дорог. Сам процесс строительства показан на рисунке 13. Смесительная установка производит бетон путем смешивания таких сырьевых материалов, как цемент, вода, а также крупнозернистые и мелкие заполнители. Материал загружается на самосвалы. Если дорога вымощена двухслойным покрытием, бетон, как нижнего, так и верхнего слоя необходимо перемешать и доставить на строительную площадку. В этом случае два смежных бетоноукладчика со скользящими формами, как показано на Рисунке 13, заливают (устанавливают) бетон. Сначала мостится нижний слой, затем верхний слой. В конце, на поверхность распыляется замедлитель, замедляющий затвердевание. Кроме того, дюбели помещаются в бетон или вибрируют [69]. Поверхность дополнительно очищается щеткой и режется для обеспечения надлежащего сцепления с поверхностью, снижения уровня шума и предотвращения растрескивания дороги. После того, как все последующие операции будут завершены, и бетон наберет достаточную прочность, дорогу можно будет открыть для движения транспорта [69]. По сути, асфальтоукладчик (рисунок 13) - это передвижной бетонный завод, использующий интеллектуальную опалубку, к которому применимы все принципы Индустрии 4.0 , включая бережливый подход и решения цифрового двойника.

Рис. 13. Двухслойное бетонное покрытие и напыление асфальтоукладчиком [69]

На окончательное качество дороги могут влиять вариации и проблемы на каждом этапе процесса. В этом случае основное внимание уделяется оценке окончательно созданной дороги и особенно качеству покрытия. Возможные факторы влияния во время укладки могут быть отнесены к категориям качества бетона и особенно фактор удобства его укладки, непрерывность процесса укладки, точность размещения

стержней, средства контрольного отслеживания для достижения постоянных показателей толщины и поверхности, условий окружающей среды и логистики, а также предварительного распределения бетона [69]. Например, если процесс затвердевания бетона слишком развит, асфальтоукладчику будет сложно обеспечить ровную поверхность, или могут возникнуть полости. Если качество бетона находится в установленных пределах, непрерывное уплотнение с использованием вибраторов влияет на свойства бетонной дороги, как, например, описано в [24]. Постоянная скорость во время укладки ведет к быстрому расходу материала и может улучшить качество поверхности за счет меньшего количества простоев. Следовательно, логистика (смешивание, транспортировка) должна хорошо функционировать. Неблагоприятные погодные условия во время укладки, например, чрезвычайно низкие или высокие температуры или сильный ливень, могут помешать процессу отверждения, изменить консистенцию бетона или даже привести к дефектам поверхности. Задержки с подачей бетона ухудшают удобство укладки бетона или вынуждают асфальтоукладчик снижать свою производительность [69].

Точное отслеживание местоположения дороги, например, с использованием струн или высокоточного GPS, необходимо для сохранения точного курса дороги и постоянного профиля высоты. Ровность и текстура поверхности играют важную роль в комфорте и безопасности езды. Неровная поверхность вызывает вибрацию или периодическое возбуждение, которые влияют на качество вождения и увеличивают нагрузку на дорогу. На качество поверхности, например, влияет процесс укладки, неровности во время процесса строительства, например, когда требуется ручная работа или при переходах между разными типами дорожного покрытия, а также последующая обработка поверхности путем чистки щеткой, резки, а иногда и шлифовки [69].

Кроме того, необходимо поддерживать постоянную толщину дороги. Различия в толщине дороги могут привести к различным свойствам дороги, таким как несущая способность, и снизить долговечность, особенно если некоторые участки дороги станут слишком тонкими. Небольшие отклонения толщины дороги возникают естественным образом, поскольку поверхность основного слоя обычно менее ровная. Однако, если эти отклонения станут слишком большими, они могут либо привести к уменьшению толщины дороги на некоторых участках, либо к аналогичной большой неровности конечной поверхности дороги, если толщина дороги должна оставаться постоянной. Поскольку эти отклонения могут возникать случайным образом и на небольшой площади, стандартные методы оценки дорожного покрытия и кузова могут их не распознать. Таким образом, возможные отказы из-за этих эффектов обнаруживаются только через годы эксплуатации [69].

Четвертая промышленная революция (например, Индустрия 4.0) отражает растущую тенденцию ко все большей оцифровке и автоматизации производственных сред, где становится возможным обмен данными между физическими продуктами, их средой и деловыми партнерами. Ключевая концепция Индустрии 4.0 касается цифрового двойника (DT), видение которого связано с бесшовной конвергенцией между физическим и виртуальным миром. В свете Индустрии 4.0, DT широко освещались в последние годы, и было доказано, что они предлагают преимущества для бизнеса в различных отраслях, включая строительство автомобильных дорог. Заказчик исследования [70] компания Heijmans, специализирующаяся на строительстве инфраструктур Heijmans, поставила перед собой амбициозную цель иметь DT для каждого своего проекта к 2023 году, что послужило мотивацией для проведения этого исследования.

По сути, вариант использования, разработанный в [70] для Heijmans связан с обеспечением точного представления существующей ситуации на строительной площадке автодороги в виртуальном пространстве с использованием облака точек и сравнением этого с запланированной ситуацией (BIM), которая формирует основу для принятия решения. Общая схема построения DT для строительства автодорог, включая возможности использования БПЛА, показана на рисунке 14.

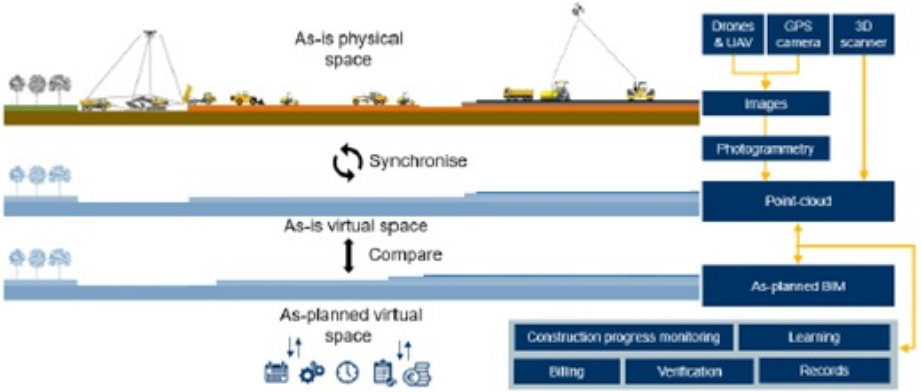

Рис. 14. Общая схема построения DT для строительства автодорог [70]

В работе [71], которая называется “Поток данных от BIM к Digital Twins” развивается такой подход, что он может создать экосистему, в которой интеграция данных будет отображать не только статические данные, полученные при проектировании и строительстве, но также и реальные данные с датчиков, которые будут способствовать моделированию и оптимизации среды

построек / объектов. Объединение нескольких DT и размещение их в среде Connected Data Environment (CDE) потенциально увеличит способность прогнозировать и адаптировать планирование в соответствии с условиями проекта и площадки, учитывая, что гравитация, ультрафиолетовые лучи, яркость и другие параметры будут влиять на актив автоматически. Это станет прогнозной перспективой, которая повлияет на будущие и настоящие проекты за счет использования больших данных, машинного обучения (ML), искусственного интеллекта (AI) и т. д. в контексте сред BIM и DT [71].

Хотя по концепции DT имеется много литературы, его единое определение и справочная модель отсутствуют [70]. Сочетая необходимость консолидации концепции в свете существующих исследовательских и строительных приложений, цель этого исследования заключалась в том, чтобы внести вклад в интеграцию DT в операции подрядчиков по инфраструктуре путем изучения того, что концепция влечет за собой для строительства, и разработки функционального проекта для DT, чтобы оценить потенциальную ценность, которую могут предложить их приложения. Исследование [70] было сосредоточено на начальных этапах жизненного цикла активов, от начала проектирования до конца этапа строительства. Для проведения этого исследования [70] использовалась методология науки о дизайне. С помощью этого метода были решены вопросы о знаниях и проблемы проектирования. Вопросы о знаниях позволили сформулировать DT в контексте строительной отрасли и определить потенциальные области применения [70]. Задача проектирования была сосредоточена на разработке функционального проекта для двух сценариев использования DT в строительстве, которые использовались для проверки потенциальных преимуществ для специалистов-практиков в строительстве [70].

Чтобы классифицировать DT в строительстве, было проведено исследование литературы, которое показало, что на интерпретацию DT влияют четыре переменные: аспект моделирования, фаза жизненного цикла, содержание и физический двойник [70]. Это привело к тому, что DT является виртуальным эквивалентом физической системы, которая эволюционирует на протяжении своего жизненного цикла синхронно. Кроме того, было обнаружено, что DT можно классифицировать по нескольким типам, и что несколько авторов предприняли инициативы по классификации DT по типологиям, основанным на различных измерениях. В этом исследовании была разработана структура, которая объединяет три существующие типологии DT и позволяет сформировать DT на основе трех измерений [70]:

• Атрибут (актив, процесс, парк);

• Фаза жизненного цикла (начало жизни [BOL], середина жизни [MOL], конец срока службы [EOL]);

• Степень интеграции данных (цифровая модель, цифровая тень, цифровой двойник [70]).

Оптимизация операций по укладке бетона и асфальта на основе моделирования представляет собой практический пример того, как DT могут использоваться на этапе BOL с упором на область процесса. Это приложение позволяет виртуально исследовать несколько конфигураций процессов в среде моделирования, управляемой данными. На основе результатов моделирования можно выбрать наиболее экономичную альтернативу. Проверка этого варианта использования продемонстрировала, что это может привести к повышению предсказуемости процесса, снижению затрат и улучшению коммуникации [70].

Мониторинг прогресса с использованием технологий сбора полевых данных для фундаментальных работ представляет собой практический пример услуги мониторинга, которую DT может предложить на этапе MOL. Основываясь на геометрических сравнениях между запланированной моделью и облаками точек реального состояния на исходный момент, это приложение позволяет отслеживать прогресс, достигнутый на строительной площадке, и выделять несоответствия в ходе выполнения. Кроме того, данные мониторинга могут быть проанализированы для выявления действий, которые регулярно вызывают задержки или перерасход средств. Валидация этого варианта использования продемонстрировала, что реализация этого варианта использования может привести к более раннему выявлению отклонений в отношении графика, лучшему финансовому контролю и лучшей прослеживаемости отклонений от проекта [70].

В целом, это исследование показало, что DT могут предложить добавленную стоимость в основном бизнес-процессе инфраструктурных подрядчиков. Таким образом, DT в основном влияют на то, как заинтересованные стороны взаимодействуют с информацией на протяжении всего жизненного цикла актива. Основные области трансформации можно ожидать в контурах управления и обратной связи, где заинтересованные стороны могут извлечь выгоду из принятия более информированных решений благодаря наличию количественных данных о ходе работ и возможностей моделирования [70].

Рекомендации, основанные на результатах этого исследования, касаются того, что в свете амбиций Heijmans на 2023 год для относительно простых проектов, в объем которых не входит эксплуатация и техническое обслуживание, два типа приложений процессов DT, скорее всего, могут предложить наибольшую добавленную стоимость [70].

В работе [70] речь также не идет о наблюдении за производительностью отдельного персонала или оборудования. Следовательно, наблюдаемые объекты «Оборудование, персонал и материалы» не имеют отношения к этому варианту использования. Вместо этого речь идет об обратной связи относительно измерения прогресса, таким образом наблюдая за тем, в какой степени незавершенное строительство продвигается. Таким образом, наблюдаемые объекты - это объекты незавершенного строительства, такие как въезд и выезд на шоссе или подземный переход в рассматриваемом проекте, как показано на рисунке 15.

Рис. 15. Наблюдаемые объекты - это объекты незавершенного строительства [70]

Кроме того, аналитика данных может быть добавлена на уровень данных, где ее можно использовать для выполнения диагностического и прогнозного анализа на основе данных о ходе выполнения. На рисунке 16 схематически представлена концепция, лежащая в основе включения аспекта бюджета и аналитики [70]. На этом рисунке фактические затраты отражают затраты, зафиксированные в Project Management Tool, а блок анализа данных отражает аналитические возможности, которые могут быть включены в DT, они могут принимать форму как диагностической, так и прогнозной аналитики [70].

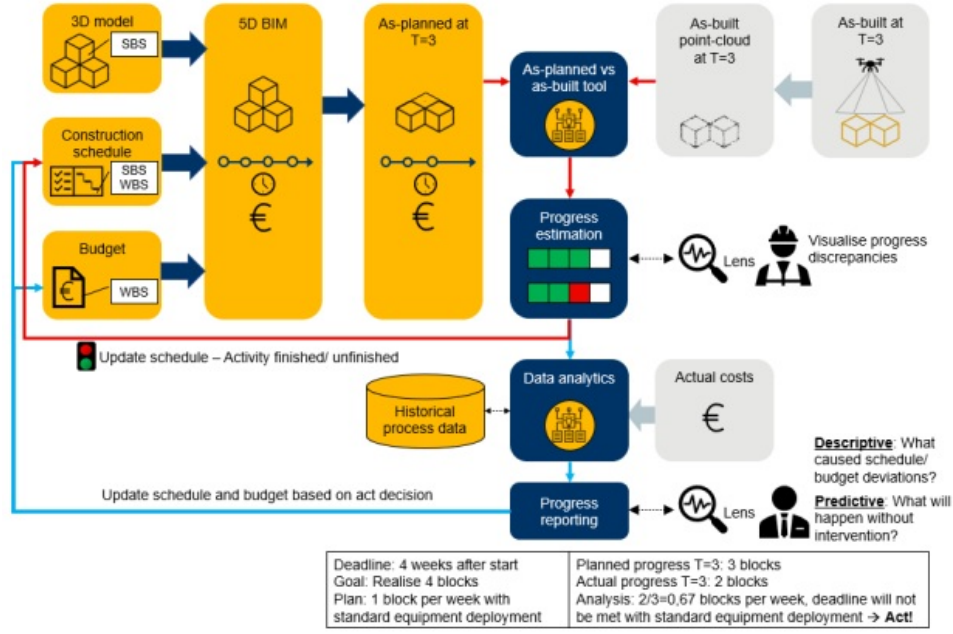

Рис. 16. Автоматический мониторинг процесса в условиях ограничений расписания и бюджета [70]

Для анализа информации рисунка 16, следует отметить, что цикл, представленный красными стрелками, отражает концепцию описанных приложений в литературе, связанной с BIM. Этот цикл позволяет визуально оценить несоответствия в ходе выполнения работ, что может дать прорабу здания лучшее понимание работ, выполняемых не по плану. Однако, поскольку этот цикл уже несколько раз описывался в литературе BIM, можно сомневаться, следует ли рассматривать его как истинный DT [70]. Тем не менее, синяя петля является расширением большинства предыдущих исследований и добавляет возможности рассуждений и интеллекта в форме анализа данных. Следовательно, можно утверждать, что когда это будет реализовано, оно будет являться отражением реальных DT [70]. Систематический обзор оценки жизненного цикла и анализа стоимости жизненного цикла дорожных покрытий можно найти в и тематическом исследовании [72].

В то время, как обычные бесконтактные методы измерения регистрируют только отдельные продольные профили высоты вдоль линии движения, современные инструменты LiDAR могут использоваться для записи высокоточных топографий дорожной поверхности на большой площади при высоких скоростях движения, даже в движущемся транспортном потоке. Кинематическая мультисенсорная система S.T.I.E.R компании Lehmann + Partner [69] представляет собой измерительную систему для измерения продольной и поперечной ровности, трехмерной поверхности, а также внешнего вида дорог и проезжей части. На рисунке 17 показан мобильный картографический аппарат S.T.I.E.R. Основными компонентами S.T.I.E.R являются инерциальная система позиционирования, лазерные датчики расстояния для измерения продольного профиля высоты в правой полосе движения (HRM), поверхностная система LiDAR и различные системы камер для записи окружающей среды транспортного средства и поверхности дороги. По желанию, модульная мобильная картографическая система также может быть расширена за счет дополнительных сенсорных технологий, таких как лазерный сканер окружающей среды. Для этого исследования соответствующими источниками данных являются лазерный сканер дорожного покрытия (LiDAR), сканер окружающей среды (LiDAR) и инерциальная система позиционирования [69].

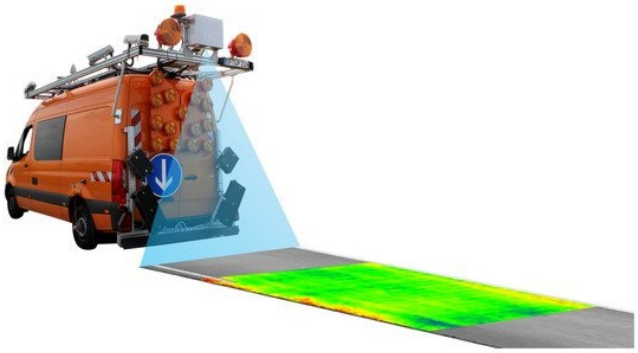

Рис. 17. Измерительная машина S.T.I.E.R и схематическое изображение лазерного сканирования [69].

Система позиционирования S.T.I.E.R - это интегрированная система, состоящая из глобальной навигационной спутниковой системы (GNSS), инерциального измерительного блока (IMU) и дальномера (DMI) [69]. Комбинация этих компонентов позволяет определять как абсолютное положение, так и относительное изменение положения, включая все телесные углы и ускорения. Абсолютная точность траектории после постобработки данных инерциальной системы позиционирования определена как 20 мм для положения x-y и 50 мм для высоты [69]. Лазерный сканер поверхности представляет собой сканер профиля дорожного покрытия Plus (PPS) от Института физических методов измерения им. Фраунгофера [69]. PPS измеряет 1 миллион точек в секунду. Точность измерения PPS, усредненная по элементу поверхности 10 см × 10 см, находится в субмиллиметровом диапазоне. Для обеспечения этой чрезвычайно высокой точности при высоких скоростях измерения и одновременной безопасности глаз PPS использует технологию фазового сдвига и длину волны в ближнем инфракрасном диапазоне в качестве принципа измерения [69]. Именно такого рода объективные измерения позволяют наладить необходимый контроль качественных и количественных показателей при работе с цифровым бетоном в строительстве автомобильных дорог, которые были описаны выше.

Для того чтобы у читателя была возможность представить уровень возможностей применения цифрового двойника в строительстве мы подобрали несколько публикаций на эту тему и с краткими описаниями и ссылками предоставляем их для возможных исследователей этой темы.

Предметы цифровые двойники и строительство дорог с использованием вторичного сырья изложены в работе [73]. Недорогой цифровой двойник на базе смартфона и IFC, что может быть важным для строительства автомобильных дорог, имеющих местное значение, представлены в [74]. Вопросы применения семантического строительного цифрового двойника и направления будущих исследований можно посмотреть в [75]. Дополненная реальность и система цифровых двойников для взаимодействия со строительной техникой представлены в работе [76]. Выявление строительных объектов в рамках Digital Twin и что то нужно учитывать в этом процессе представлены в [77]. И, наконец, обзор литературы по теме «Применение цифрового двойника в строительной отрасли» можно найти в [78].

Особо стоит отметить то, как цифровой двойник может помочь безопасности строительных рабочих. На протяжении многих десятилетий безопасность в строительном секторе была проблемой. Несмотря на активные усилия по повышению общей безопасности, количество несчастных случаев в этом секторе все еще остается высоким. На практике динамичные и сложные строительные процессы могут привести к тому, что риски на месте и планы безопасности будут упущены, что может привести к множеству аварий. В настоящее время, под руководством концепции цифровых двойников (DT) появление современных технологий зондирования и визуализации предоставило возможность улучшить здоровье и безопасность на рабочем месте. Чтобы понять достижения этих технологий в исследованиях, выявить их пробелы и проблемы и предложить решения для дальнейшего повышения безопасности в отрасли, был проведен подробный обзор современных технологических исследований [79]. В целом, этот обзор дает представление о технологической кластеризации, стратегиях улучшения, а также о безопасности персонала, которые могут извлечь выгоду из формулирования эффективных парадигм цифровых технологий [79].

Подводя итоги этому разделу, стоит сказать о работах по стандартизации немецкой Ассоциации производителей опалубки. Ассоциация производителей опалубки Güteschutzverband Betonschalungen Europa e.V. (GSV) совместно с ведущими компаниями в строительной отрасли, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein eV, представителями производителей программного обеспечения из строительного сектора и Institut für Baubetrieb при Техническом университете Дармштадта (TU Darmstadt) в рамках соответствующей стандартизации buildingSMART сформировала проектную группу с целью создания модели дисциплины по опалубке BIM Formwork Technologies для монолитного строительства [54]. Цель проектной группы заключалась в согласовании стандартизированного интерфейса для передачи данных и информации между участниками проекта на определенных этапах проекта, включая использование опалубки и несущих, рабочих и защитных лесов в процессах планирования и реализации бетонных конструкций в монолитном бетоне. Согласование интерфейса, такого как этот, является предпосылкой для реализации компьютеризированных сетевых совместных форм работы, используемых в BIM [54]. Опалубка и несущие, рабочие и защитные леса - это не только временные конструкции для строительных работ, они также являются рабочим материалом, который может оказать значительное влияние на здоровье и безопасность на работе, затраты на строительство, время и качество. Работая вместе в атмосфере открытости и взаимного доверия, проектная группа успешно согласовала стандартизированный интерфейс и теперь

публикует результаты в Руководстве GSV «Дисциплинарная модель технологий опалубки BIM (строительство из бетона на месте)» [54].

Модель дисциплины в опубликованных руководствах соответствует стандартам buildingSMART для статуса Руководства по доставке информации (IDM). Она объединяет традиционные структуры процессов строительных компаний и имеет пять уровней развития, которые называются уровнями развития технологий опалубки LODFW, LODFW 100 - LODFW 450. Отдельные документы LODFW динамически интегрируются в различные фазы строительного проекта, что означает, что между участниками проекта рекомендуется заключать конкретные соглашения о потоках данных и информации [54] . Структура процесса строительной компании в терминах LODFW приведена на рисунке 18.

Используя Руководство по доставке информации в качестве основы, группа проекта в настоящее время продолжает разработку модели дисциплины в определение представления модели (MVD). MVD представляет собой фокусировку IDM на нормативном формате данных, чтобы обеспечить выполнение требований, касающихся доступности параметров и спецификации параметров. Это необходимо для дальнейшей разработки программного обеспечения и для того, чтобы иметь возможность делать это в определенной нотации, которая, в соответствии с текущим состоянием разработки, соответствует требованиям IFC. Первым шагом в разработке MVD на основе модели дисциплины BIM Formwork Technologies (строительство из бетона на месте) является определение компонентов конструкции, необходимых для процессов проектирования опалубки и строительных лесов, в качестве объектов модели схемы данных IFC. Кроме того, идентифицированная ориентированная на процесс информация из IDM будет преобразована в параметры объекта модели [54].

Стоит отметить, что членам проектной группы удалось согласовать теоретически обоснованную модель дисциплины, подходящую для использования в строительной практике в соответствующих областях опалубки и несущих, рабочих и защитных лесов [54]. Подробные специальные знания и культура открытости и доверия характеризовали совместные усилия группы. Используя дисциплинарную модель, стало возможным интегрировать и систематизировать проектирование опалубки и строительных лесов для железобетонных конструкций и конструкций из предварительно напряженного бетона (монолитные бетонные конструкции) посредством иерархической и связанной с процессом атрибуции входных и выходных параметров, которые можно вводить и выводить из ядра центральной базы данных [54]. Руководство GSV «Дисциплинарная модель технологий опалубки BIM (строительство из бетона на месте)» можно просмотреть, посетив веб-сайт GSV по адресу www.gsv-betonschalungen.de

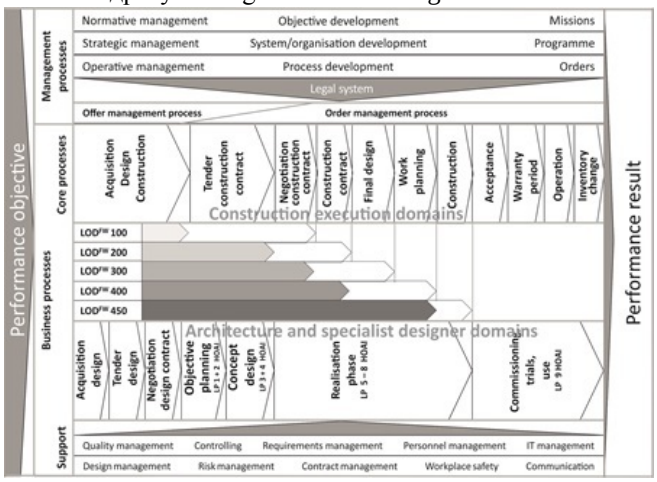

Рис. 18 . Структура процесса строительной компании в терминах LODFW [54]

IV Состояние практики автоматизации производства сборного железобетона

Согласно [55] степень автоматизации в производстве сборных железобетонных изделий выше, чем в любой другой части строительной отрасли. Поскольку бетон является наиболее часто используемым строительным материалом во всем мире, о чем мы говорили выше, все еще имеется высокий экологический потенциал с точки зрения ресурсоэффективного проектирования и производства за счет автоматизации.

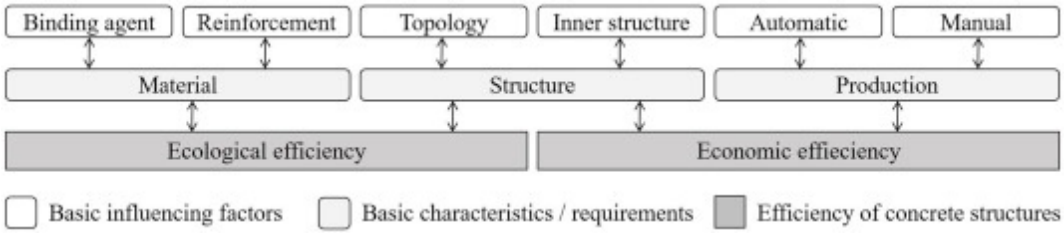

Рис. 19. Категоризация существенных взаимозависимостей в производстве сборного железобетона [55].

Автоматизированные процессы оптимизации не только продукта, но и производства уже начали внедряться во всей бетонной промышленности, а в [55] описывается взаимозависимость между материалом, структурой и производством сборных железобетонных элементов, как показано на рисунке 19, и [55] называет их вышестоящими стратегиями для возможной экологической и экономической оптимизации бетонных компонентов. Помимо оптимизации используемых материалов, например, состав бетонной смеси или

арматуры, а также оптимизации конструкции в [55] считают что, следует рассмотреть оптимизацию производства.

Железобетонные заводы, широко распространенные в России, давно имеют опыт масштабного производства различных изделий, которые применялись и применяются для сборки типовых домов определённых серий, а также объектов транспортной инфраструктуры. Классически связь с массовыми производствами изделий для строительства осуществляется в технологиях BIM через механизмы BIM библиотек. Однако сегодня этот механизм уже нуждается в серьезной модернизации из-за быстрого расширения горизонтов применения BIM на инфраструктуры [37-43].

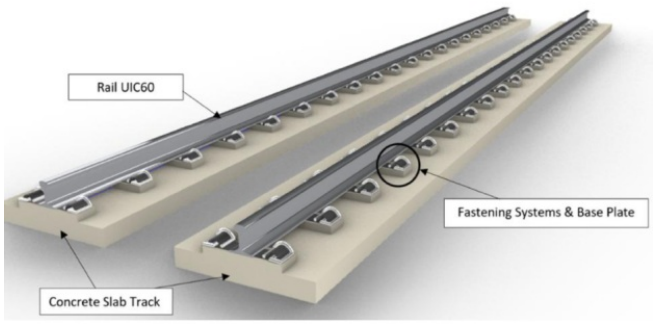

Рис. 20. Трехмерные компоненты пути без балласта с высокой изоляцией (NBHI) [56]

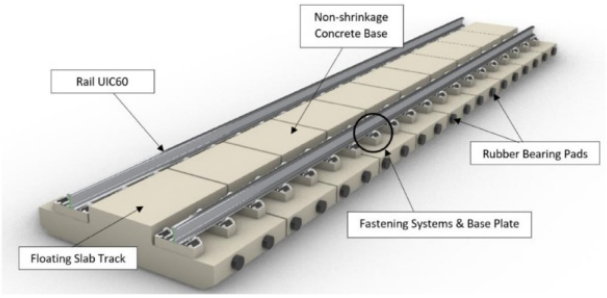

Рис. 21. Трехмерные компоненты пути с плавающей плитой (FST) [56]

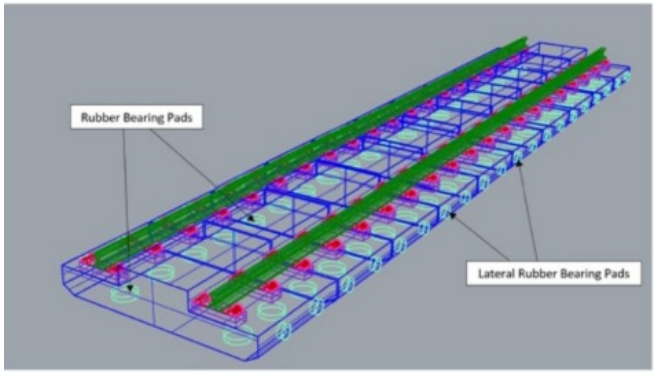

Рис. 22. Положение опорных подушек направляющей с плавающей плитой (FST) [56]

Так, всем известные шпалы превратились в важнейшие конструктивные бетонные элементы железных дорог [56] и оснащенные IoT, RFID устройствами стали цифровыми двойниками или умными шпалами, преобразуясь в целые системы железнодорожных плит (рисунки 20,21,22).

Так, в Китае, имеющем больше скоростных железных дорог, чем все остальные вместе взятые страны мира, определение размеров плит железнодорожного пути высокоскоростных железных дорог является одной из важнейших задач перед доставкой плит на пути [57]. Основываясь на характеристиках 3D-сканера, который может получать большой объем данных измерений непрерывно и быстро за короткое время, в статье [57] описывается, как используется интеграция 3D-сканера и интеллектуального робота для обнаружения элементов опорных плит железнодорожной системы Китая (CRTSIII) в блочной плоскости. Затем получаются плотные и точные данные облака точек опорной плоскости блока, и данные облака точек регистрируются с и сверяются установленной BIM моделью [57].

Базовая единица модели детали такой плиты - это элемент, и создание элементов основывается на эскизе. Устанавливается модель опорного блока и части нижней плиты пути, соответственно, и затем собирается вся плита пути, чтобы завершить построение модели плиты пути [57].

Параметры модели плиты пути получаются с помощью чертежа проекта и обратного проектирования облака точек. Конструкция включает такие параметры, как длина, ширина, толщина и расстояние между крепежными элементами каждого типа плиты пути. Трехмерная модель строится согласно геометрическому соотношению проектных параметров, для которых и устанавливаются основные геометрические особенности [57]. Общая конструкция и работа системы обнаружения показана на рисунке 23.

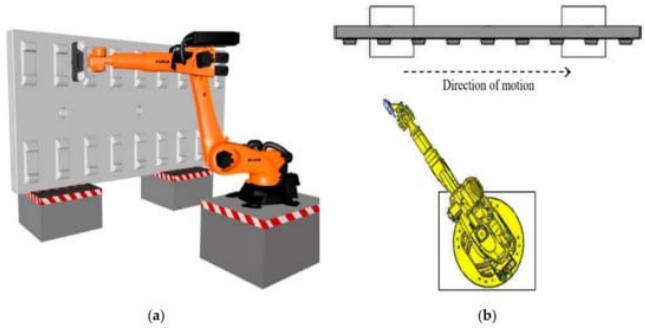

Рис. 23. Общая конструкция и работа системы обнаружения: a) общая архитектура системы обнаружения; (b) Направление движения системы [57].

Робот KUKA KR 90 R3700 prime K используется в качестве автоматического исполнительного механизма. Рабочий радиус робота составляет 3700 мм, а точность его повторяющегося позиционирования составляет 0,06 мм, и он полностью удовлетворяет требованиям по дальности обнаружения и точности [57]. FARO Cobalt Array Imager 5MP выбран в качестве оборудования для сбора данных с поверхности путевой плиты. Точность сканирования сканера составляет 0,05 мм, а расстояние между облаками точек составляет 0,255 мм. Количество данных облака точек, получаемых каждый раз, составляет около 5 миллионов. Диапазон измерения сканера составляет 500,0 (длина) × 350,0 (ширина) ×

300,0 мм (глубина резкости), что в основном может охватывать весь поддерживающий блок [57].

На каждой плите пути имеется 18 опорных блоков, и были получены данные об облаке точек плоскости всех опорных блоков [57]. Работа системы обнаружения и сбор данных в рабочем поле показаны на рисунке 24.

Рис. 24. Операционное поле: (a) Работа системы обнаружения; (b) Сбор данных [57].

Сегодня проблема шпал и опорных плит для железных дорог стала актуальной не только в Китае Скорости «обычных» железных дорог уже могут превышать 200 км в час и напряжения и нагрузки на железнодорожные пути, например, в ЕС будут только расти в связи с планами достичь 50% рубежа для железных дорог по объемам пассажирских и грузовых перевозок по всем видам транспорта в Европе к 2050 году и невозможности решить эту задачу удвоения перевозок за счет строительства новых линий. К тому использование деревянных шпал в ЕС также недавно запрещено, и их замена открывает огромный шпально-блочный рынок для железных дорог.

Поэтому неудивительно растущее число исследований посвященных шпально-блочной тематике. Приведем только некоторые [58,59,60]. Кроме того, в университетах уже защищаются диссертации на эту тематику. Оптимальному подбору датчиков IoT для шпал посвящена работа [61], а возможностям использования пластиковых шпал и блоков посвящена диссертация [62]. В последнее время пути из сборных плит широко используются на железных дорогах, особенно на обычных городских железнодорожных линиях. Эти типы путей строятся быстро и ограничивают перерывы в работе поездов. Метро Сеула в Южной Корее разработало безбалластную железобетонную систему железобетонных плит, использующую тип обычного бетона [66]. На рисунке 25 показан процесс изготовления этих панелей B2S: (a) сборка арматуры, (b) заливка бетона, (c) отверждение и (d) прототип панелей B2S. Процесс установки панелей B2S можно увидеть на рисунке 26: (a) перед снятием балласта, (b) установка панелей, (c) заливка наполнителей и (d) завершение установки.

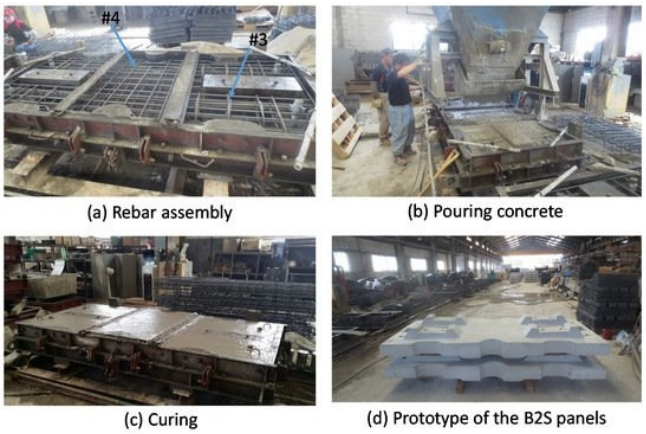

Рис. 25. Процесс изготовления панелей B2S: (a) сборка арматуры, (b) заливка бетона, (c) отверждение и (d) прототип панелей B2S [66].

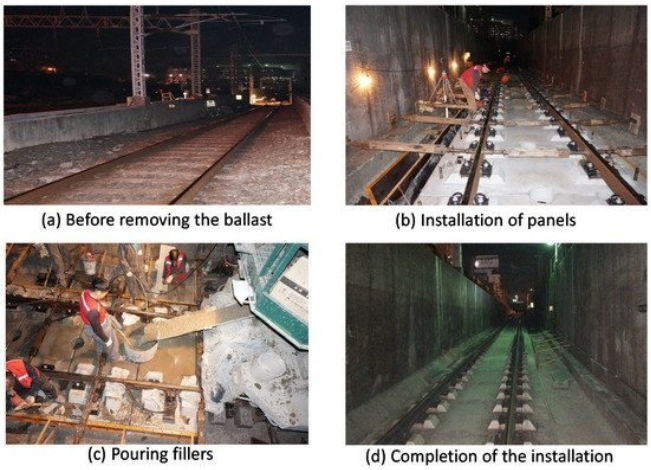

Рис. 26. Процесс установки панелей B2S: (a) перед снятием балласта, (b) установка панелей, (c) заливка наполнителей и (d) завершение установки [66]

Отрицательные свойства бетонных плит и методы их устранения для шпал также тщательно изучаются. Так, исследование по влиянию дифференциальной осадки земляного полотна на деформацию плит железнодорожного пути на основе комбинированного подхода DEM-FDM для железных дорог Китая можно посмотреть в работе [67] .

Заводское производство сборных бетонных изделий и шпал и плит для железных дорог и метро позволяет превратить эти изделия в «умные» и получит существенные выгоды на этапе эксплуатации. Приведем примеры про умные шпалы и другие конструкции из практики строительства новых линий метро в Париже [98]:

«Использование BIM во всех измерениях требует большей мощности для преобразования необработанных данных с датчиков и устройств, подключенных к IoT, в полезную информацию, что Consolis делает на крупных строительных проектах. Grand Paris Express - это масштабный инфраструктурный проект по модернизации системы общественного транспорта в районе Большого Парижа. С 200 км новых железнодорожных линий Consolis является ведущим поставщиком сборных сегментов туннелей и железнодорожных шпал. Решение Consolis Connect

Track & Trace включает в себя чипы RFID, встроенные в каждый сегмент сборного туннеля, которые можно идентифицировать как отдельные продукты на протяжении всего их жизненного цикла. В том же проекте Grand Paris Express в сборные «умные шпалы» Consolis встроены надежные оптоволоконные датчики, позволяющие операторам точно определять долгосрочное воздействие подвижного состава на шпалы. Эта технология поможет Consolis оптимизировать проект в долгосрочной перспективе, в то время как операторы могут использовать информацию для создания графиков профилактического обслуживания, которые увеличивают жизненный цикл активов, гарантируя безопасность и оптимизируя долгосрочные затраты».

Не следует полагать что требования к бетонным шпалам и плитам растут только на железных дорогах Аналогичная ситуация складывается н на автодорогах и в аэропортах. Возможности управления дорожным покрытием в аэропортах и интеграции BIM, IoT и DLT для этих целей посвящена статья [63].

Как уже говорилось выше, мы используем в этой статье термин цифровой бетон. Рассмотрим развитие понятия цифрового бетона в наиболее массовом рынке бетона – сборного железобетона. Сборные железобетонные элементы производятся в регулируемых и контролируемых условиях, что приводит к продукции более высокого качества с точки зрения точности производства и качества отделки. Сегодня заводы сборного железобетона это практически заводы автоматы, впрочем, имеющие некоторые особенности на влияющие на очень высокий уровень их оценки как производителей цифрового бетона. Различают массовое производство, производство по индивидуальному заказу и массовую настройку. Дополнительными преимуществами строительства из сборного железобетона являются сокращение времени строительства, более чистые и безопасные строительные площадки, больший беспрепятственный пролет и более низкие общие затраты на строительство [55]. Недостатками сборного железобетона являются сложные работы по его подключению, трудности транспортировки и погрузочно-разгрузочных работ, а также ограничения на модификации [55].

Массовое производство предполагает изготовление элементов в больших количествах в короткие сроки. Производственные предприятия специализируются на производстве одного вида продукции. Для производства сборного железобетона в основном используются стальные сборные формы. Стандартизация бетонных изделий снижает затраты, увеличивая долю рынка за счет получения максимального количества отливок любой формы [55]. Многократная работа в контролируемых климатических условиях позволяет оптимально использовать сырье и, следовательно, приводит к снижению расхода материала. На крупных заводах ограничения на производимые элементы устанавливаются в отношении размера, веса и конструкции, чтобы обеспечить рентабельное массовое производство [55]. Поскольку произведенные элементы необходимо поднимать и транспортировать на строительную площадку, ограничения, как по размеру, так и по весу, зависят от имеющейся инфраструктуры. Большинство заводов имеют запасы стандартной готовой продукции, доступные для немедленного распространения [55].

Индивидуальный дизайн и производство в большинстве случаев влекут за собой медленное, но стабильное производство элементов в соответствии с конкретными потребностями. В этом виде производства большая часть продукции является единственной в своем роде. Производственные чертежи составляются для каждого элемента индивидуально, как и пресс-формы. В отличие от продуктов массового производства, элементы изготавливаются на заказ, поэтому у них более длительные сроки производства и доставки и, естественно, более высокие затраты [55].

Но все больше и больше компаний начали предлагать индивидуальные продукты по цене, близкой к массовому производству, стратегия, также известная как массовая настройка [55]. Несмотря на то, что производственные предприятия имеют определенные граничные условия, которые нельзя изменить, компании нашли возможность разрешить заказчику выбирать из определенных вариантов конструкции, что приводит к большим отклонениям и, следовательно, к единственному в своем роде производству. Массовая индивидуализация возможна не только для окон, дверей, кухонных и банных принадлежностей, но и при производстве, например, целой бетонной стены [55]. Кроме того, шпальные блоки для железных дорог, о которых мы говорили выше очень часто стали относиться к этой категории из-за необходимости очень точного учета особенностей железнодорожного пути. Чтобы компании могли массово настраивать свои продукты, должны применяться следующие три возможности: (1) Разработка пространства решений, способность определять потребности клиента и разрабатывать продукты, способные к адаптации (фундаментальное отличие от массового производства, которое определяет универсальные потребности, разделяют все клиенты); (2) Надежный технологический дизайн, способность эффективно производить предлагаемую продукцию, например, с помощью гибкой автоматизации или модульности процесса; и (3) Навигация по выбору, возможность перемещать покупателя по поддону продукта, сводя к минимуму сложность [55].

Для того чтобы получить сборный бетон в массовой настройке приходится применять различные цифровые технологии. На рисунке 27 показано как средства дополненной реальности или AR проецирует плоскую плиту на форму.

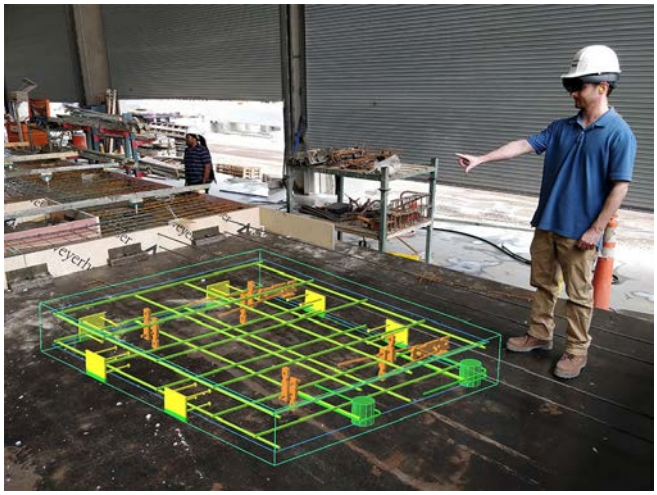

Рис. 27. AR проецирует плоскую плиту на форму [64]

Из многочисленных направлений автоматизации и механизации сегодня на заводах по производству железобетонных конструкции с соответствующими уровнями автоматизации и механизации (LoAm), замечательно представленных в [55], мы выбрали только два: Автоматическая опалубка и формование и Автоматическое армирование.

A. Автоматическая опалубка и формование

Возможности опалубки известны и ее использование широко распространено. Есть прямая связь: чем сложнее геометрия, тем сложнее конструкция опалубки [55]. Производственные предприятия, специализирующиеся на серийном производстве определенной продукции, имеют полный ассортимент опалубки (в основном из стали). Для крупных сборных элементов, таких как лестницы или сегменты башни ветряных турбин, опалубка и, следовательно, все производство являются стационарными. На производственных предприятиях, которые производят более мелкие элементы, такие как элементы перекрытий, двойные стены, массивные перекрытия, сплошные стены и многослойные элементы, конвейерное производство перемещает опалубку с одного этапа производства на другой. Эти заводы часто оснащены автоматизированными машинами или роботами для опалубки (пример машины показан в [55] и на рисунке 23 слева), на которых устанавливаются элементы опалубки. Роботы получают информацию о том, где разместить элементы, из данных САПР, передаваемых системой управления, и подбирают из опалубки необходимые ставни, а перед активацией встроенных магнитов (LoAm 5, LoAc 7) размещают их на поверхности формы. В конце производственного процесса, когда сборные элементы извлекаются из формы, форма и опалубка автоматически очищаются. Робот-расщепитель идентифицирует ставни, сканируя форму, прежде чем снимать все автоматически (LoAm 5, LoAc 7) [55]. Большинство компаний, использующих роботов для опалубки, решили свести к минимуму количество секций опалубки разной длины, что привело к необходимости в элементах заполнения. Эти элементы заполнения (например, элементы из пенопласта) впоследствии вручную вставляются и приклеиваются к форме. Чтобы направлять рабочих, лазеры проецируют файлы CAD на формы (LoAc 7), позволяя быстро разместить оставшиеся элементы заполнения (LoAm 1, LoAc 3). Некоторые компании используют плоттеры, которые наносят контур поверхности поддона водорастворимой краской вместо лазера [55].

Рис. 28. Слева: полностью автоматический опалубочный робот © Progress Group; справа: Адаптивная форма, в данном случае для композитов, также доступна для бетонных форм, но в большем масштабе © Adapa A / S. [55].

Другой подход к автоматизированному формованию заключается не в том, чтобы роботы устанавливали опалубку, а в том, чтобы сама форма могла изменять свою форму (также известная как адаптивная форма или процесс гибкой формы (FMP) [34]). Основная идея адаптивного формования или FMP (LoAm 5, LoAc 7) состоит в том, чтобы иметь адаптируемую опалубку, опалубку или форму, которые могут придать заливному бетону любую желаемую сложную геометрию [55]. Ярким примером адаптивной формы является ADAPA Adaptive MouldTM, показанная на рисунке 28 справа, которая дает возможность изготавливать поверхности с одинарной и двойной кривизной не только из бетона, но также из гипса, термопластов, композитов и стекла. Стеллажи для разливки сборного железобетона (включая бетон с высокими эксплуатационными характеристиками и бетон, армированный стекловолокном), которые могут достигать размеров 10 м на 10 м, состоят из полугибкой мембраны с точками крепления поршня, образующими интерполированную поверхность. Проекты берутся непосредственно из файла дизайна САПР без каких-либо установленных ограничений, поскольку можно создавать бесконечное количество дизайнов с достижимой кривизной поверхности от 1800 мм до любого желаемого радиуса. Эта технология также устраняет необходимость в одноразовом инструменте, тем самым сокращая ненужные траты энергии и материалов [55].

Также возможно напечатать опалубку на 3D-принтере, как описано в [55]. Для строительства опалубки может использоваться роботизированная система, которая захватывает, манипулирует и позиционирует компоненты в соответствии с чертежами, позволяя собирать нестандартные деревянные конструкции (LoAm 6) [55]. Следует отметить, что роботизированная система, о которой идет речь, специализируется на строительстве современных деревянных конструкций, а не на опалубке, тем не менее, это возможная область применения.

B. Автоматическое армирование

Сборные арматурные каркасы укладываются в формы или опалубку с помощью кранов. Если используются автоматические сварочные аппараты для сетки, готовая сетка может храниться над конвейерной системой и опускаться в форму, как только форма перемещается ниже единицы хранения (LoAm 5). Если необходимы решетчатые балки (например, для производства двойных стен), возможна автоматическая резка и опускание необходимых элементов (LoAm 5). Размещение распорок, точное позиционирование арматуры в опалубке, а также привязка решетчатых балок или арматурных каркасов к сеткам по-прежнему в основном выполняется вручную (иногда с помощью гибкого инструмента для связывания) (LoAm 1–3). Что касается размещения арматуры, то к 2021 году на рынке появится робот, предназначенный для переноски и укладки арматуры [55]. Он сможет работать вместе с автономным роботом для связывания арматуры, способным связывать 1000 галстуков в час [55]. Прогнозируется, что эта комбинация (LoAm 5) позволит увеличить производительность на 400% [55] при размещении арматуры для настилов моста.

В целом, состояние автоматизации производства сборного железобетона подробно представленное в [55], как и всю тему, можно дополнить публикациями, кратко описанными ниже. Возможность экономии питьевой воды за счет использования дождевой воды на заводе по производству сборного железобетона изложена в [80]. Отображение областей знаний о новых передовых технологиях в управлении сборным строительством представлено в работе в [81]. Циркулярная экономика и виртуальная реальность в передовом сборном строительстве на основе BIM, а это, собственно, та тема, к которой мы и переходим, изложена в [82].

Изначально технология BIM задумывалась как средство соединения строительства с производством для индустриализации сооружения домов и других объектов, с целью снижения стоимости и времени строительства. Легким соединением с производством являются BIM библиотеки, в которых можно найти нужные части для строительства требуемого качества и приемлемые по цене. Однако, эта крайне необходимая часть практической реализации BIM, не является достаточной для многих случаев.

Нужна связь прямого рода от проекта к производству. С повсеместным использованием IFC , такая возможность стала реализовываться, так как средства его создания STEP и EXPRESS имеют очень крепкие промышленные корни и использовались для разработки стандартов для производства. Одной из первых таких связей стала сталелитейная промышленность (о чем шел разговор выше), которая в лице своей ассоциации приняла стандарт IFC, и сегодня по данным в этом стандарте работают ЧПУ, подготавливая в необходимых геометрических размерах стальные заготовки для строителей. Более богатая связь возникла сегодня по сборным бетонным изделиям для строительства, когда расширения IFC в этой части сделали возможным использовать данные в формате IFC как исходные для производства на заводах автоматах нужных в проекте изделий из сборного бетона.

В 2021 году вышел второй, более расширенный вариант улучшенного кандидата в стандарты buildingSMART [83] под названием IFC4precast для производства сборного железобетона. Так как публикация кандидата в стандарты это, фактически, финальный этап многолетней работы, которая включает, в том числе, разработку и практическое опробование программных средств, то неудивительно, что в 2021 году в Финляндии уже была защищена практическая диссертация на эту тему [84].

Основная цель этой диссертации - служить руководством для моделирования сборной стены и создания необходимых чертежей, необходимых для изготовления этих элементов с использованием конструкций Tekla. Этот тезис подробно объясняет каждый шаг работы программного обеспечения настроенного на IFC4precast. Практическая часть диссертации состоит из использования Tekla Structures для моделирования элемента стены и объяснения всех методологий, используемых при создании моделируемого элемента стены. При моделировании учитывалась каждая деталь, такая как тип бетона, арматура, изоляция, соединение, подъемные вставки, вставки в стену.

Опубликованный кандидат в стандарты IFC4precast - это совершенно новая концепция, которая наилучшим образом поддерживает процесс информационного моделирования зданий (BIM), в частности для сборной ж/б промышленности. Цифровизация отрасли сборного железобетона развивается быстрыми темпами благодаря поддержке программных систем, как CAD, MES, PPS и ERP для интеграции и создания сетей. Несколько крупных и известных поставщиков программного обеспечения в этой отрасли объединились и основали рабочую группу buildingSMART IFC4precast . Текущая разработка BIM фокусируется на документации процесса наращивания и стандартизации архитектурных и технических моделей зданий. Процесс заводского изготовления сборных ЖБИ в настоящее время не имеет надежной привязки к этой разработке. IFC уже используется в стандартном формате обмена между системами архитектурного программного обеспечения, но содержащаяся в нем информация теряется при последующем обмене данными со специализированными программными системами программного обеспечения для производства сборного железобетона (CAD, MES, PPS, ERP). Текущие интерфейсы между программами CAD и MES для сборного железобетона инертны, и их трудно адаптировать к новым требованиям. Целью проекта является создание международного стандартизированного интерфейса, поддерживаемого отраслью. Потребности в более мощном интерфейсе для обмена данными моделей BIM сегодня возрастает. В конце 1960-х годов цифровизация в строительной отрасли способствовала переходу от чертежной доски к рабочему месту САПР. Исходя из этого, многие

процессы и процедуры прочно закреплены в системах САПР. Двунаправленный обмен данными между системами ERP, MES и CAD позволяет перемещать и управлять проектами и ноу-хау там, где они необходимы.

Промышленность сборного железобетона движется вперед полным ходом. Фактически, многие бетонные конструкции сегодня настолько сложны и красивы, что большинство людей даже не догадываются, что они были построены из сборного железобетона [85]. Однако современные проекты требуют современных методов работы, что не всегда является легкой задачей в такой традиционной отрасли, как сборный железобетон. Вот тут-то и появляется инициатива IFC4 по сборному железобетону , ставшая кандидатом в стандарты [83].

По мере того, как проекты, процессы и улучшения, связанные с производством, становятся все более и более сложными, неизбежно возникают узкие места. Одним из аспектов миссии сборного железобетона IFC4 является устранение этих узких мест для создания улучшенных, более современных методов работы, характерных для отрасли сборного железобетона [85]: «Хотя IFC4 - это современный формат файлов, очень компактный и интеллектуальный, он не предназначен для производства. Это был большой вызов. Нам нужно было найти способ заставить его работать в рамках спецификации формата файла», - говорит один из разработчиков [85] Хертель. «Вот почему мы сформулировали на основе IFC4 больше стандартов в рамках стандарта, чтобы также превратить его в производственный формат файла».

Поскольку фабрики ЖБИ могут более легко получать доступ, читать и использовать данные, проектировщикам больше не нужно учитывать ограничения, связанные с производством, на этапе проектирования и детализации. «С помощью IFC4 дизайнеры и разработчики могут сосредоточиться на своей основной задаче: проектировании и детализации здания. Вся важная и необходимая информация о конструктивной модели передается с помощью сборного железобетона IFC4. «Нет необходимости беспокоиться о том, какая машина в дальнейшем, что и как делает и на каком заводе», - говорит Хертель [85].

«Это значительно упрощает все усилия от детализации до изготовления и снимает ограничения заводских и конструкторских бюро. Те, кому следует сконцентрироваться на дизайне, сосредотачиваются на дизайне, а те, кто на заводе, теперь могут сосредоточиться на производственных процессах. Мы выбрали правильный формат файла, чтобы осмысленно адресовать аспекты друг друга» [85].

С одним форматом файла, содержащим информацию для производства, ERP (планирование ресурсов предприятия) и MES (системы управления производством), сборный железобетон будет иметь единую информационную магистраль, что сделает устаревшим старый способ работы с различными конкретными форматами файлов. «Это будет грандиозно, потому, что это упрощает способ работы», - говорит Хертель [85]. «Графики проекта становятся все жестче. Чем более целеустремленно вы можете работать над чем-то, тем более целеустремленным, правильным и продуктивным будет результат» [85].

В будущем IFC4precast сможет еще больше расширить функциональность IFC4. С другими заинтересованными сторонами, такими как поставщики встраивания и поставщики арматуры, это расширение создаст более централизованный способ работы с информацией друг друга в компактном и оптимизированном виде. Интеграция фабрики по производству сборного железобетона на основе технологий BIM показана на рисунке 29.

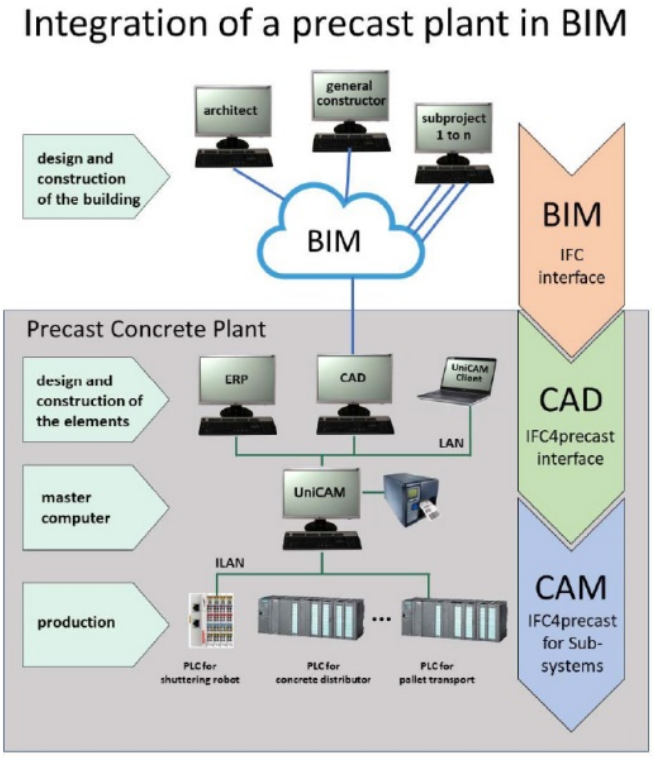

Рис. 29. Интеграция фабрики по производству сборного железобетона в BIM [86]

V 3D ПЕЧАТЬ БЕТОНОМ

Начиная раздел по технологии 3D печати бетонными смесями в основе которого экструзия с подвижной матрицей, обеспечивающей скользящее формование результатов, стоит сказать что этот метод также применяется для создания сборного железобетона , что связывает тему 3D печати бетонными смесями с предыдущим разделом. Предварительно напряженные элементы перекрытия (например, пустотелые элементы, сплошные предварительно напряженные доски, балочные элементы) часто производятся путем экструзии (с подвижной матрицей), также называемой скользящей формовкой (LoAm 5) [55]. Предварительное напряжение проволоки для конструкции предварительно натягивается перед началом процесса литья. Литейная машина, состоящая из бункера, экструзионной матрицы или трафарета, стержневых форм и оборудования для виброуплотнения, перемещается по столу предварительного напряжения при экструзии бетона. Станина предварительного напряжения может достигать

длины 150 м. Как только бетон достигнет желаемой формы, бетон должен поддержать себя, так как не используется внутренняя опалубка. Для обеспечения высокого качества продукции к составу бетонной смеси предъявляются высокие требования. Если вязкость слишком высока, желаемая форма не сохраняется, если вязкость слишком низкая, могут возникнуть проблемы с качеством продукта (полости в бетонной массе) [55]. Некоторые машины формируют элементы по длине мокрым способом, в то время как другие производят элементы по всей длине станины предварительного напряжения, которые распиливаются до необходимой длины после того, как изделие затвердеет и передается усилие предварительного напряжения [55].

Адаптивное литье - это особый вид экструзии. Это новый производственный процесс, сочетающий скользящую опалубку с цифровыми технологиями изготовления, позволяющий выдавливать самонесущие бетонные элементы из самоуплотняющегося бетона, который был сильно замедлен и смешан с ускорителем непосредственно перед входом в опалубку, для экструзии, как Play-Doh (LoAm 7, LoAc 7) [55], как показано на рисунке 25. Процесс строительства основан на традиционной скользящей опалубке, которая обычно используется для возведения основных элементов высотных зданий или опор для мостов. Единственное отличие состоит в том, что адаптивное литье работает в меньшем масштабе и создает более разнообразные формы, такие как нестандартные колонны с изменяющимися поперечными сечениями или структуры с тонкими компонентами, похожими на оболочку. Чтобы процедура работала, необходимо тщательно контролировать период, в течение которого материал меняется от мягкого к твердому. Несмотря на то, что этот метод строительства все еще находится в зачаточном состоянии [55], многообещающая разработка была отмечена в исследованиях ETH Zurich [55], которая запатентовала технологию Smart Dynamic Casting.

3D печати бетонными смесями или 3DCP сегодня находится на пике популярности. 3DCP это часть аддитивного производства (AM) и включает помимо бетона печать металлом, пластиком и другими материалами.

Интерес строительной отрасли к 3DCP в 2012 году возрос в геометрической прогрессии [63], при этом разница между 3DCP на основе экструзии, 3DCP на основе частиц и 3D-печатью торкрет-бетоном только расширяет возможности строителей. Согласно [27], более чем в половине разрабатываемых процессов используется экструзия, преимуществами которой являются высокая скорость печати, простота реализации для очень больших приложений и эффективное использование материалов. Текущие проблемы и недостатки состоят в высоких требованиях к адгезии слоев, низком разрешении и неровности поверхности в зависимости от выбранного сопла и низкой точности размеров.

Рис. 30. Интеллектуальное динамическое литье © gramazio kohler research [55]

В 3DCP на основе экструзии (LoAm 7, LoAc 7) бетон экструдируется в виде непрерывной нити через сопло различной формы (круглой, овальной, прямоугольной), установленное на портале или роботе со скоростью печати в приблизительном диапазоне от 50 мм / до 500 мм / с (рисунок 31). Бетон укладывается слоями в соответствии с файлом САПР и предлагаемой нарезкой с различными возможными вариантами слоев (преимущественно вертикальными или горизонтальными). Этот метод производства не устанавливает границ для конструкции, позволяя изготавливать объемные компоненты с выступающими элементами или пустотами [55]. Используемый материал представляет собой раствор с высоким содержанием цемента, с типичным максимальным размером частиц от 2 мм до 3 мм. Он должен протекать и выдавливаться через сопло, связываться с предыдущим слоем и сохранять свою форму под действием возрастающего гидростатического давления, создаваемого последующими добавленными слоями. На практике различают экструзию с подачей влажного материала и подачей сухого материала [55]. При подаче влажного материала предварительно смешанный бетон транспортируется по шлангу к форсунке, где к смеси добавляется ускоритель. Этот процесс выгоден с точки зрения обращения (с точки зрения машиностроения), однако высокая усадка и повышение температуры,

вызванные добавлением ускорителя, считаются основными недостатками. Во время производства с подачей сухого материала сухая смесь подается по шлангу к форсунке, где она вступает в контакт с водой. Весь процесс смешивания происходит в форсунке, что часто приводит к отсутствию необходимости в ускорителе и дает преимущества меньшей усадки и более легкой очистки оборудования (только форсунка). Недостатки сухого материала - более сложные и, следовательно, более дорогие машины.

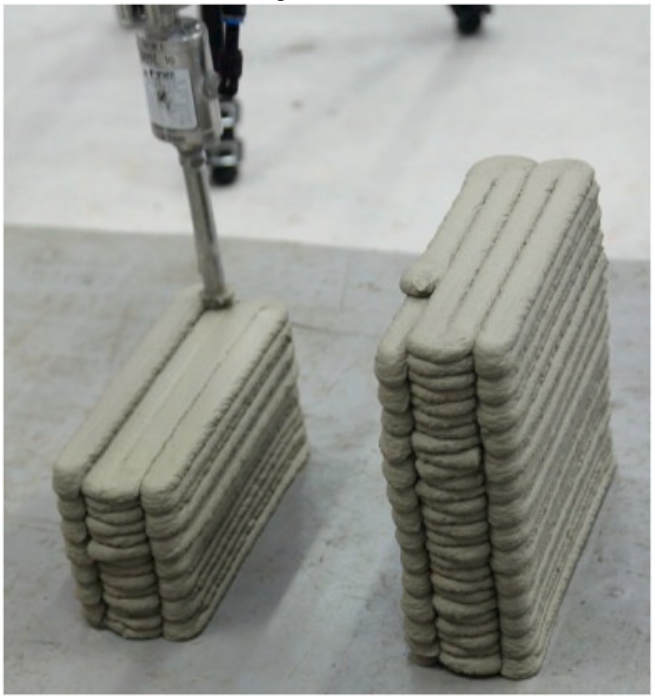

Рис. 31. 3DCP на основе экструзии [55]

В отличие от заводов по производству сборных конструкций, которые полагаются на множество машин и нуждаются в большом количестве места для накопления форм и процесса отверждения, строительство с использованием 3DCP полагается просто на одну машину (и постоянную доступность бетона). Таким образом, производство строительных элементов или даже целых конструкций больше не зависит от строительной площадки.

Как уже говорилось выше аддитивное производство (АМ) или 3D печать явление более широкое, чем 3DCP, и изделия АМ уже применяются на транспорте и их список растет. Поэтому мы решили привести несколько примеров успешности аддитивное производства для железнодорожной отрасли. Так в проекте ЕС RECET4Rail (Надежная энергетическая и экономичная тяговая система для железных дорог https://cordis.europa.eu/project/id/101015423, https://recet4rail.eu/) объявлен Рабочий поток 1 - 3D-аддитивное производство и новые производственные технологии. Основная его глобальная цель - изучить преимущества, которые технологии 3D-печати могут принести тяговым системам, такие как:

Повышение производительности и надежности тягового привода и силовой цепи в целом. Уменьшение объема и / или веса деталей при одновременном повышении производительности детали приведет к более стабильному и контролируемому поведению детали, увеличению ее надежности, срока службы и, таким образом, снижению общих затрат на обслуживание детали и всей системы.

Сокращение сроков и затрат на создание прототипа

Содействовать сокращению затрат на производство и обслуживание серийных деталей

В работе [87] проекта ЕС RECET4Rail приводятся изображения детали АМ, уже изготовленные для железнодорожной промышленности (рисунки 32 и 33).

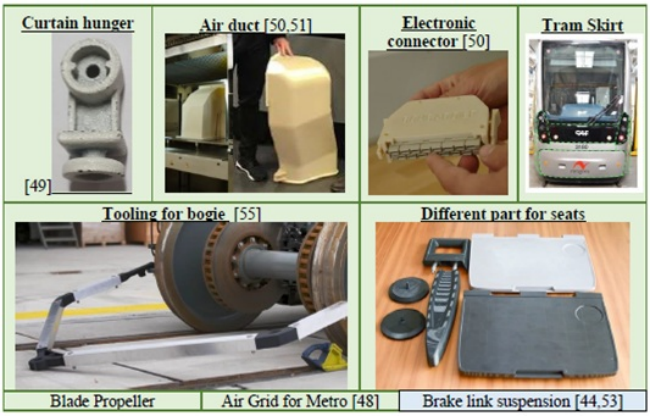

Рис. 32. Детали АМ, уже изготовленные для железнодорожной промышленности [87]

Рис. 33. Часть буксы производства АМ SLM. Проект RUN2Rail [87]

Аддитивное производство как единое целое вызывает все больший интерес в строительной отрасли в течение последних десяти лет. Предмет исследования - печать на бетоне, металлах и пластмассах. В анализе исследований авторы работы [90] сосредоточили свое внимание на пластике для печати. 3D-печать армирования бетонных элементов из пластмасс позволяет значительно повысить эффективность их возведения, уменьшить количество отходов и оптимизировать их форму [90]. Различные варианты армирование в 3D печати рассматриваются [91], а модульный подход к армированию сталью бетона с 3D-печатью можно посмотреть в статье [92]. Полиуретановые нанокомпозиты на основе целлюлозы и графена для 3D-печати FDM- свойства нити и их пригодность для печати исследуются в [93] и хотя 3D-печать FDM это не строительная тема а медицинская (печать органов человека), но мы ее приводим чтобы показать широту исследований по графену, связанных между собой, а применение графена с композитами уже вызвало грандиозные изменения в строительстве. Примеры применения графена для строительства транспортных инфраструктур мы приведем позже, ограничившись пока ссылками на научные исследования [94, 95, 96].

Возвращаясь к 3D-печать бетоном, стоит сказать, что это новая технология строительства зданий и объектов транспортной инфраструктуры. В этом методе трехмерная модель объекта создается в программном обеспечении автоматизированного проектирования (САПР), которая затем разделяется на фрагменты, и создается G-код для движения печатающей головки для выдавливания бетона. Выдавливание бетона через сопло и движение печатающей головки контролируются компьютером [88]. Бетон, используемый в 3D-печати, проходит стадии перекачивания, экструзии через сопло и точного осаждения в последовательных слоях для получения трехмерного объекта [88]. Экструдированный бетон поддерживает собственный вес и сохраняет свою форму без использования опалубки и скреплений с последующими слоями [88]. Эту послойную экструзию бетона также называют аддитивным производством бетона и печатью на бетоне.

Применение технологии 3D-печати на бетоне в строительстве считается новым периодом для отрасли из-за ее способности нарушить традиционные методы строительства [88,89]. Она получила огромное признание благодаря своим уникальным характеристикам, таким как строительство без использования опалубки, меньшее участие человека, минимальные потери материала и массовая настройка [88]. Эта технология полностью экономит затраты на опалубку, снижает трудозатраты на 50–80% и снижает потери строительных материалов на стройплощадке на 30–60% [88]. Кроме того, за счет увеличения производительности на строительной площадке и сокращения времени строительства это может еще больше снизить затраты на строительство [88]. Предполагается, что это перспективный метод для создания структурно-космических сред обитания на Луне и Марсе, а также в военных целях [88]. Обещанная свобода дизайна может позволить архитекторам и инженерам изготавливать сложные формы и эстетически привлекательные бетонные элементы и фасады [88]. Многочисленные бетонные конструкции были построены с использованием технологии 3D-печати из бетона. Например, двухэтажное здание муниципалитета в Дубае компанией Apis Cor , деревня в Остине компанией ICON , бетонные арки, закрывающие автомобиль, в Калифорнии Корпусом морской пехоты США, дома COBOD и Peri Group в Берлине, ограждающая стена реки в Сучжоу у Winsun, предварительно напряженный велосипедный мост в Эйндховене (рисунок 34), пешеходный арочный мост в Шанхае и оптимизированные железобетонные балки в Генте и Неаполе [88,89]. Однако, несмотря на такое разнообразие демонстрационных строительных проектов, использование бетонной 3D-печати для рутинного строительства является редкостью из-за технических проблем. В настоящее время понимание реологических требований, механических характеристик и долговечности 3D-печати бетоном находится на стадии разработки. Обычные и высокоэффективные бетонные смеси нельзя напрямую использовать для бетонных конструкций с помощью 3D-печати из-за несовместимости их реологических характеристик с требованиями процесса печати на разных этапах. Поэтому исследователи тщательно исследуют альтернативные бетонные смеси для выполнения требований к транспортировке и повышению жесткости в процессе печати. Параметры, влияющие на долговечность бетона, напечатанного на 3D-принтере приведены на рисунке 35 , наглядное сравнение процесса аддитивного производства строительства из бетона со старыми методами, объясняющее суть революционности технологии можно увидеть на рисунке 36.

Рис. 34. Напечатанный на 3D-принтере велосипедный мост, разработанный Технологическим университетом Эйндховена [89].

Рис. 35. Параметры, влияющие на долговечность бетона, напечатанного на 3D-принтере [88]

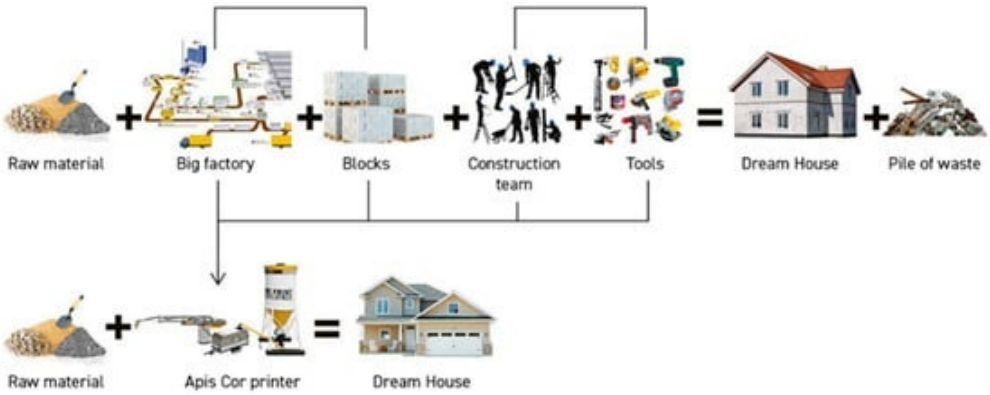

Рис. 36. Сравнение процесса аддитивного производства строительства из бетона со старыми методами [89].

Стоит отметить, что кроме технологий 3D печати 3DCP применяется также и технология SC3DP [97]. Технология SC3DP - это управляемый роботом процесс аддитивного производства, при котором бетонные компоненты строятся слой за слоем за счет контролируемого добавления сжатого воздуха. В процессе SC3DP реология и характеристики схватывания и, следовательно, несущая способность слоев регулируются, среди прочего, путем добавления в бетонную струю добавок к бетону. Преимуществом SC3DP является ускорение материала сжатым воздухом. Высокая кинетическая энергия при ударе вызывает уплотнение бетона, а также хорошую механическую связь между двумя последовательными слоями. В результате, с помощью процесса SC3DP могут быть достигнуты высокие объемные плотности, то есть низкая пористость [97]. Это приводит к хорошим прочностным свойствам компонентов, изготовленных с помощью добавок. Благодаря высокой норме внесения и высокой скорости процесса процесс SC3DP очень хорошо подходит для производства крупногабаритных компонентов. Еще одним преимуществом технологии SC3DP является комбинация с производственным блоком, поддерживаемым роботами. Пространственные степени свободы роботов обеспечивают огромную геометрическую свободу при формировании бетонных компонентов. На рисунке 37 показана гибридная сборная деталь для колонны с точечной опорой, состоящая из бетонной плиты толщиной 8 см (4 м × 4м) и свежеотпечатанные бетонные ребра шириной 12 см. По сравнению с плоской плитой толщиной более 25 см, это дает экономию массы примерно на 60%. Ребра были напечатаны менее чем за 30 минут [97].

Решения по габаритным деталям позволило сделать следующий огромный шаг в транспортном строительстве. Реализующийся проект второй очереди высокоскоростных железных дорог Великобритании (HS2) объявил что будет использовать 3D-печать на бетоне, чтобы сократить выбросы углекислого газа на проекте до 50% [98]. Впервые, как сказано в [100], в Великобритании трехмерная печать на железобетоне на месте призвана обеспечить экологические, финансовые и общественные выгоды для новой британской сети высокоскоростных железных дорог. Эта передовая технология, получившая название «Printfrastructure», будет внедряться лондонским подрядчиком по туннелям HS2 Ltd [100].

Рис. 37. Элемент верхней плиты гибридного производства, изготовленный из тонкой бетонной плиты и ребер с надрезом по методу SC3DP [97].

Печать бетона роботами с компьютерным управлением позволит СП SCS изготавливать конструкции на месте, вместо того, чтобы транспортировать их в виде сборных плит по дороге до сборки и опускания на место с помощью больших кранов. Как гибкая мобильная технология, 3D-печать бетоном позволяет применять эту технику в физически ограниченных областях, избегая необходимости разрабатывать сложные и потенциально дорогостоящие логистические планы [100].

Кроме того, там, где строительство HS2 происходит помимо действующей железной дороги, она дает возможность выполнять работы, не отвлекая путешественников. Это связано с тем, что робот будет печатать железобетон, позволяя продолжать строительство и одновременно работать поездам. Раньше работа велась в течение ночи после остановки поездов, что потенциально мешало местному сообществу, или требовало приостановки работы для обеспечения безопасной работы. Использование робота с компьютерным управлением позволяет печатать железобетонные конструкции с уникальной укрепляющей внутренней решетчатой структурой, которая не только значительно снижает количество необходимого бетона, но и сокращает количество

отходов [100].

Но этот прорыв подчеркивается технологией, разработанной партнером SCS JV в Вустершире, ChangeMaker 3D. Сотрудничая со специалистом по передовым материалам из Великобритании, Versarien, это высокотехнологичное МСП представляет инновационный процесс 3D-печати бетона, сочетающий его с самым прочным из когда-либо испытанных материалов: графеном [100]. Бетон с микроскопическими нитями графена толщиной всего в несколько атомов, проходящими через него, как полосы в каменной палке, заменяет традиционную сталь, чтобы обеспечить повышенную безопасность на стройплощадке, большую гибкость конструкции, более короткое время сборки и меньший углеродный след [100]. По оценкам СП SCS, процесс, который он разрабатывает с фирмой Мидлендс, может сократить количество используемого бетона и способствовать сокращению выбросов углерода до 50 процентов. За счет удаления стали и упрощения процесса строительства, при котором больше не потребуются подъемные краны и значительно меньшее количество грузовых автомобилей, сокращение выбросов углерода может быть еще больше [100].

Менеджер по инновациям HS2 Роб Кэрнс сказал: «Проект, над которым совместно работают совместное предприятие SCS и ChangeMaker 3D, является фантастической демонстрацией тех далеко идущих инноваций, которые обеспечивает HS2. Благодаря программе строительства, охватывающей десятилетие и по всей стране, проект создает идеальную среду для разработки технологий, способных изменить построение основной инфраструктуры» [100].

Бетон на основе графена впервые использовался в коммерческих целях, судя по сообщениям прессы, в мае 2021 года [99]. Именно тогда строительная компания Nationwide Engineering сообщила об укладке первой в мире бетонной плиты с улучшенным графеном, спроектированной для обеспечения устойчивости в коммерческих условиях [99]. В публикации [99] сказано:

«Добавление крошечного количества графена, как сообщается, усиливает новый продукт Nationwide Engineering, Concretene, примерно на 30% по сравнению со стандартным бетоном, что означает, что для достижения эквивалентных структурных характеристик требуется значительно меньше материала, что снижает углеродный след и затраты. Дополнительная прочность также снижает потребность в стальной арматуре, экономит материал и время на строительной площадке и способствует дальнейшему продвижению экологических характеристик этого метода строительства. Этот революционный материал был разработан для того, чтобы значительно снизить выбросы CO2 при строительстве. Производство цемента - «клея» для бетона - является одной из основных причин глобальных выбросов двуокиси углерода, на которого приходится около 8% мировых выбросов CO2».

Базу этого начавшегося внедрения 3D печати бетоном с графеном заложили многочисленные научно-технические разработки представителей разных стран, о которых мы говорили выше. Так в работе [94] сказано, что:

«В исследовательском сообществе существует широкий консенсус в отношении того, что бетон, наиболее используемый строительный материал во всем мире, должен разрабатываться в наномасштабе, где его химические и физиомеханические свойства могут быть действительно улучшены». В работе [94] сообщается об инновационном многофункциональном наноинженерном бетоне, демонстрирующем беспрецедентный диапазон улучшенных свойств по сравнению со стандартным бетоном. Сюда входит увеличение прочности на сжатие до 146% и прочности на изгиб на 79,5%, в то же время обнаружены улучшенные электрические и тепловые характеристики. Неожиданное снижение водопроницаемости почти на 400% по сравнению с обычным бетоном делает этот новый композитный материал идеально подходящим для строительства в районах, подверженных затоплению. Беспрецедентный спектр функциональных возможностей, о которых сообщается в этой статье [94], достигается за счет добавления водостабилизированных графеновых дисперсий, что является достижением в развивающейся области наноинженерного бетона, который может быть легко применен в более устойчивой строительной отрасли».

Несмотря на большое количество исследовательских работ в области цифровой печати на бетоне за последнее десятилетие, мало исследований изучали метод автоматического проектирования траектории печати, в частности, проектирование траектории печати путем прямого извлечения информации информационного моделирования зданий (BIM) из платформы BIM в 3DCP. Для получения информации BIM и автоматического проектирования пути печати был разработан пакет сценариев с использованием единой среды сценариев под названием Dynamo, подключаемого модуля Revit был предложен недавно в нескольких статьях [101,102,113]. Предлагаемый метод [101]был оценен с использованием результатов моделирования и печати в реальном времени. По сравнению с традиционным методом результаты моделирования показывают, что предлагаемый подход может уменьшить потерю данных от 3D-модели BIM до создания пути печати. Тест печати в реальном времени подразумевает, что предложенный подход идеально подходит для интеграции BIM с 3DCP. Учитывая большую важность этого направления, приводим некоторые иллюстрации из работы [101]. На рисунке 38 показаны этапы и платформы 3D-печати в традиционном и предлагаемом (с BIM) подходах. Блок-схема пакета сценариев, разработанного для выполнения процесса от BIM до 3D-печати бетона приводится на рисунке 39. Унифицированный цифровой процесс, сочетающий проектирование, оптимизацию и изготовление с платформой BIM и 3DCP можно увидеть на рисунке 40.

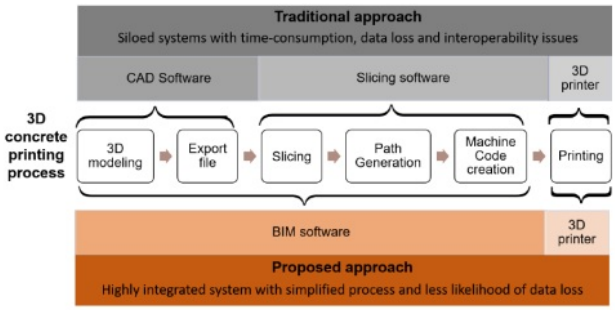

Рис. 38. Этапы и платформы 3D-печати в традиционном и предлагаемом подходах [101]

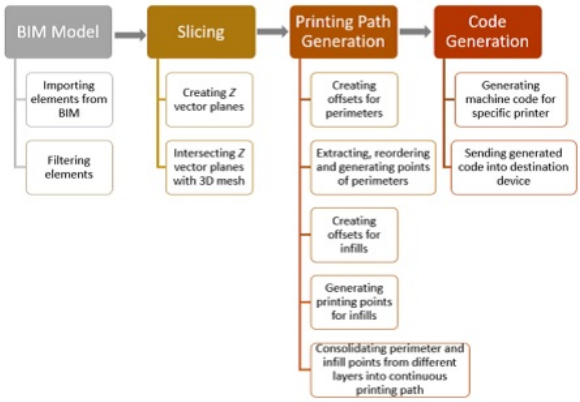

Рис. 39. Блок-схема пакета сценариев, разработанного для выполнения процесса от BIM до 3D-печати бетона [101]

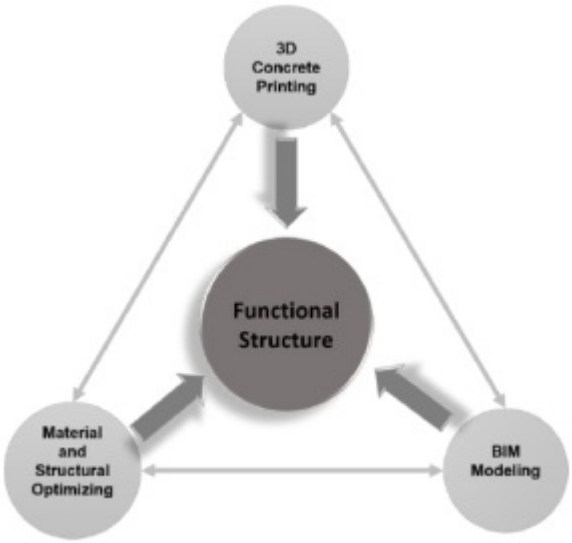

Рис. 40. Унифицированный цифровой процесс, сочетающий проектирование, оптимизацию и изготовление с платформой BIM и 3DCP [101]

В исследовании [102], в котором описана практическая реализация соединения 3DCP и BIM, использовался немецкий робот KUKATM. Компания, производящая это оборудование, в настоящее время является одним из основных поставщиков решений интеллектуальной автоматизации для мировой промышленности, даже производя чувствительных роботов, способных работать в сотрудничестве со своими операторами [102].

Робот KUKATM работает через SmartPAD, подключенный к блоку управления, который, в свою очередь, подключается к роботу с помощью соединительных кабелей. Флеш-накопитель, содержащий файл для печати, вставляется в SmartPAD, отправляя роботу инструкции по движению. Перед выполнением этих инструкций контроллер перемещает робота в начальную точку, чтобы начать движение по траектории. С помощью SmartPAD можно управлять скоростью движения. Кроме того, скорость ограничена количеством точек отслеживаемого элемента на пути слежения. На рисунке 41 показаны все ранее описанные инструменты.

Рис. 41. (a) Блок управления; (b) робот КУКАТМ; (c) SmartPAD [102]

В этом исследовании [102] используется модель робота KUKATM Quantec KR120 R2500. Серия Quantec предлагает универсальный дизайн, предназначенный для работы в любом сегменте рынка [102]. Эта роботизированная рука будет иметь трубу, соединенную с винтовым насосом, который будет подаваться непрерывным потоком бетона, а на исполнительном конце роботизированной руки будет установлено металлическое сопло перпендикулярно платформе, на которой предназначена печать, как показано на рисунке 42.

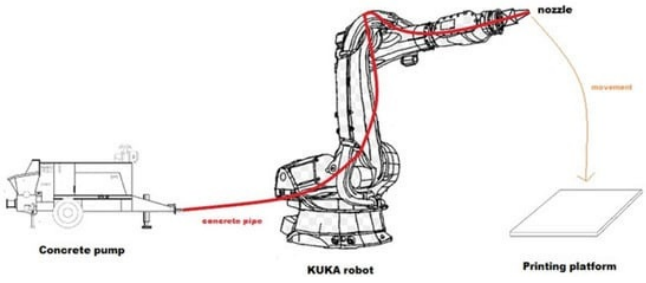

Рис. 42. Соединение бетононасоса и печатного робота [102]

Затем, как указано в [102], необходимо связать инструменты, которые включают методологию BIM (как в случае RevitTM), с центральной системой управления базами данных, способной передавать данные в двух направлениях с компьютеризированными системами управления техническим обслуживанием (CMMS). Процесс сканирования в BIM состоит из трех основных этапов: сканирование, регистрация и моделирование.

Сканирование включает установку тахеометра, лазерного 3D-сканера и набора целевых артефактов.

Регистрация - это процесс преобразования двух или более сканов одной и той же сцены из разных положений в единое и уникальное облако точек для общей системы отсчета. Лазерный 3D-сканер

устанавливает новую систему координат для каждого сканирования и присваивает координаты отсканированным точкам; этот шаг важен, чтобы не потерять ориентацию точек [102].

Моделирование - это процесс экспорта облака точек в среду САПР для его моделирования в BIM. После регистрации облака точек разработчик моделей экспортирует его в среду САПР и назначает ему примитивные объекты САПР с помощью алгоритмов корректировки или ручной корректировки. Из-за сложности отслеживания точек в трехмерном пространстве разработчикам моделей может потребоваться подготовить плоские участки облака, параллельные плоскостям высот, как утверждается в [102]. Затем создается BIM на основе измерений, выполненных на модели САПР. На рисунке 43 показан процесс моделирования [102]:

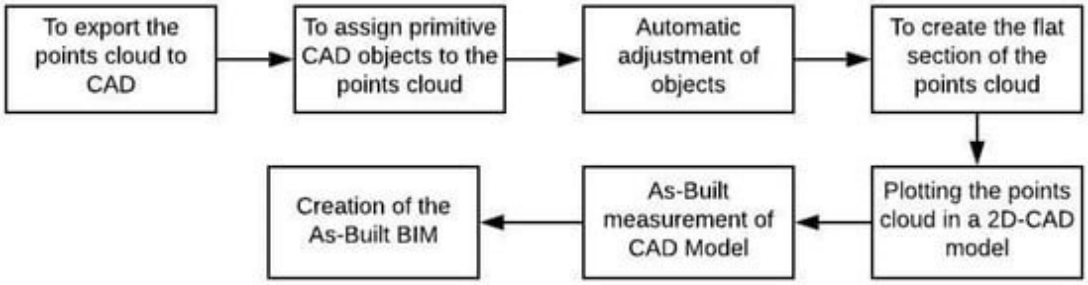

Рис. 43. Экспорт облака точек в САПР для моделирования BIM [102]

На рисунке 44 схематично показаны этапы, необходимые для взаимодействия между BIM-моделями и 3D-печатью бетона. Эти этапы подразделяются на проектирование исходного конструктивного элемента, смоделированного в RevitTM, процесс экспорта конструктивного элемента из RevitTM в программное обеспечение DynamoTM (которое интегрировано в интерфейс RevitTM) и создание кода управления процессом печати в DynamoTM, для манипулятора КУКАТМ [102].

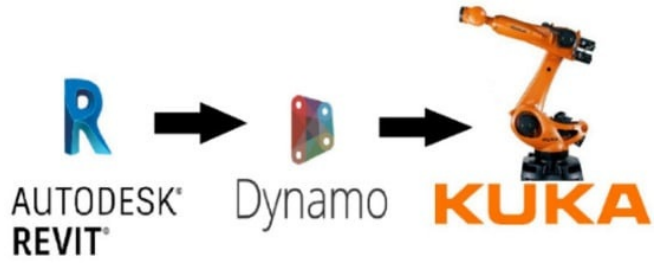

Рис. 44. Связь RevitTM, DynamoTM и KUKATM [102]

В настоящее время мы наблюдаем очень быстрое развитие дополнительных технологий в строительной отрасли. Системы, применяемые для 3D-печати с применением строительных материалов, позволяют формировать несъемную опалубку ленточных фундаментов, возводить несущие стены и перегородки, а также сборные элементы, такие как лестницы, перемычки и потолки. Системы 3D-печати не предусматривают армирования грунта с помощью свай, но в статье [103], например, представлена возможность изготовления бетонных фундаментных свай в лабораторных условиях на 3D-принтере по бетону. Поэтому соединение BIM и 3DCP в одном процессе нам представляется очень значимым.

Последнее время появилось значительное количество обобщающих и диссертационных работ по опыту применения 3D-печати на бетоне. Так архитектурная оценка зданий, напечатанных на 3D-принтере, рассматривается в [104], аддитивное производство в строительной отрасли и сравнительная конкурентоспособность 3D-печати на бетоне исследуются в [105]. В целом облачное производство, производство с использованием Интернета вещей и технология 3D-печати рассматриваются как надежные инструменты для устойчивого строительства и выполнения соответствующих целей ООН изучаются в [106]. В этой статье также исследуются и анализируются ограничения существующих исследований, и, кроме того, в статье приводятся ключевые рекомендации, такие как автоматизация с помощью робототехники, прогнозная аналитика в 3DP, экологически чистая 3DP и CM на базе IoT на основе технологии 5G для будущих улучшений. Сошлемся также на две диссертации [107,108], которые нам представляются важными в контексте настоящей статьи.

VI Логистика 4.0 и цифровой двойник для распределенных производств бетона

Промышленное строительство предполагает использование заводского производства и экономичной сборки для достижения более высокой производственной эффективности. Информационное моделирование зданий (BIM) предлагает новые возможности для поддержки компьютеризированного проектирования и изготовления промышленных зданий, обеспечивая большую производительность и экономическую эффективность. В исследовании [109], например, предпринимаются попытки рассмотреть современные BIM-приложения для автоматизации проектирования и сборки промышленных объектов и зданий с уделением особого внимания последним достижениям в технологии 3D-печати из бетона, что связывает нас с предыдущим разделом, но кроме того требует рассмотрения роли логистики для распределенных производств бетона.

В последние десятилетия строительная отрасль была привлечена к модульному строительству из-за его преимуществ, связанных с сокращением сроков выполнения проекта и сокращением затрат и соответствующему распределенному производству. Однако риски отклонения от графика в логистическом процессе модульного строительства могут свести на нет

его преимущества и, таким образом, помешать его широкому применению. Чтобы решить эту проблему, компании и ученые стремятся разработать структуру цифрового двойника для моделирования логистики в реальном времени, которая может прогнозировать потенциальные логистические риски и точное время прибытия модуля [110]. Пример разработки логистического цифрового двойника для Scania Logistics изложен в диссертации [111]. Для цифрового двойника логистики известной всем в мире пивоваренной компании Heineken Company было сделано большое исследование, завершившееся диссертацией [112].

Цифровой двойник, виртуальная копия физического модуля, обновляет свой виртуальный актив на основе информационного моделирования зданий (BIM) практически в реальном времени с помощью датчиков Интернета вещей (IoT). Затем виртуальный актив переносится и используется для моделирования логистики в приложении маршрутизации на основе географической информационной системы (ГИС). В работе [110] протестировали эту структуру в случае проекта, когда модули производятся на заводе, доставляются на место на грузовике и собираются на месте. Результаты показывают, что потенциальные логистические риски и точное время прибытия модуля могут быть обнаружены с помощью предлагаемой структуры цифрового двойника [110]. Основным вкладом этой статьи [110] является разработка структуры, которая объединяет IoT, BIM и GIS для надежного моделирования, которое прогнозирует потенциальные логистические риски и точное время доставки модулей. Такое надежное прогнозирование рисков обеспечивает эффективную координацию цепочки поставок, что может улучшить производительность проекта и повсеместное применение модульного строительства и распределенного производства бетона для транспортных инфраструктур.

Преимущества модульного строительства заключаются в том, что строительный модуль предварительно изготавливается на заводе, находящемся за пределами площадки, при одновременном выполнении фундаментов и сборок на месте [110]. Чтобы получить максимальную выгоду (например, избежать простоев для одновременной работы), модуль должен быть изготовлен и доставлен на строительную площадку вовремя. Таким образом, модульное строительство требует эффективной координации цепочки поставок между производством, логистикой и процессом строительства на месте [110]. Однако модульное строительство обычно включает сложные, объемные и большие компоненты сооружения или здания, которые могут вызвать риски отклонения от графика в процессе цепочки поставок [110]. Кроме того, поскольку многие проекты модульного строительства реализуются в густонаселенных городских районах с ограниченным пространством для хранения модулей, такие отклонения увеличивают время простоя [110]. Например, если модуль прибывает на место раньше, чем планировалось, у транспортера наступает простой; если он приходит с опозданием, у полевых рабочих и оборудования образуются простои. Следовательно, важно, чтобы планирование цепочки поставок между участниками проекта было точным, чтобы максимизировать преимущества модульного строительства для транспортных инфраструктур.

В процессе цепочки поставок цифровой двойник может представлять производственные машины, компоненты модулей, транспорт, склады, грузовики для доставки, сборщиков и краны, чтобы визуально контролировать текущее состояние и ход проекта. Кроме того, цифровой двойник моделирует различные сценарии «что, если» из реального мира для точного прогнозирования потенциальных рисков цепочки поставок, таких как отклонение от графика [110]. Если цифровой двойник собирает данные датчика в реальном времени (например, глобальной системы позиционирования (GPS)), анализирует их соответствующим образом и предоставляет все полезные сведения (например, оптимальный маршрут доставки, точное время доставки и оптимальное время заказа модуля) в цепочке поставок в модульном строительстве, то участники проекта могут иметь эффективную координацию и, как следствие, более высокую производительность проекта [110].

Архитектура предлагаемой в [110] структуры цифрового двойника показана на рисунке 45. Архитектура системы подробно показывает общую схему системы и ее поток транзакций данных; он также показывает, как можно выполнять аналитику данных для моделирования логистики без объединения BIM и ГИС в одном формате данных.

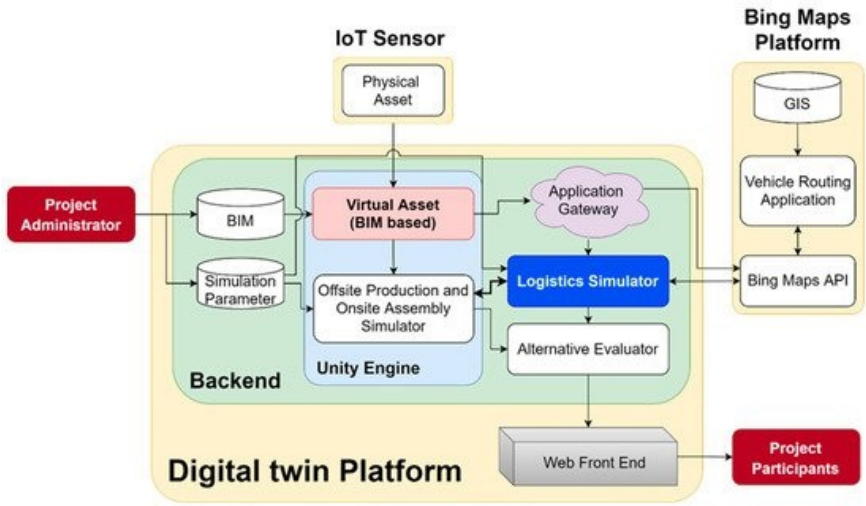

Рис. 45. Системная архитектура платформы цифрового двойника для моделирования логистики [110]

Теме совместной работы BIM и 3DCP посвящена работа [113] и в ней приводится наиболее удачная из нам известных иллюстрация (рис. 46) на тему визуализация цепочки поставок на основе цифровых двойников в логистике, как отражение новой парадигмы логистики будущего или Логистики 4.0.

Рис. 46. Визуализация цепочки поставок на основе цифровых двойников в логистике: новая парадигма логистики будущего [113]

С иерархической точки зрения строительные и логистические DT также можно разделить на три различных уровня (рис. 47) в зависимости от масштабов производства [114]:

Уровень единицы: это наименьшая участвующая в производстве единица, которая может быть единицей оборудования, материала или факторов окружающей среды. DT на уровне единицы основано на геометрической, функциональной, поведенческой и операционной модели физического двойника на уровне единицы.

Системный уровень: это объединение нескольких DT на уровне единиц в производственной системе, такой как производственная линия, цех, завод и т. д Взаимосвязь и сотрудничество между несколькими DT на уровне единиц приводят к более широкому потоку данных и лучшему распределению ресурсов. Сложный продукт, например самолет, также можно рассматривать как DT системного уровня.

Уровень системы систем (SoS): ряд DT системного уровня соединены вместе, чтобы сформировать DT уровня SoS, что помогает в сотрудничестве различных предприятий или различных отделов с предприятием, например, в цепочке поставок, проектировании, обслуживании, техническом обслуживании и т. д. Другими словами, DT уровня SoS объединяет различные фазы продукта на протяжении его жизненного цикла.

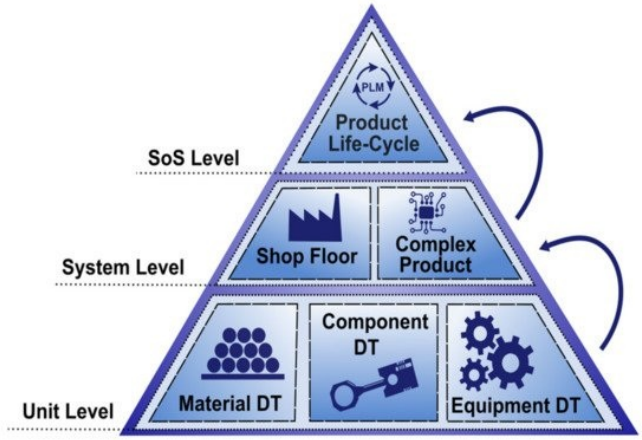

Рис. 47. Иерархические уровни DT в производстве и строительстве [114].

Иерархия DT также может быть классифицирована как (i) двойник детали / компонента, (ii) близнец продукта / актива, (iii) двойник системы и (iv) двойник процесса [114], причем частичный двойник является самым простым. Более сложные и всеобъемлющие системы / процессы могут быть достигнуты путем объединения близнецов нижнего уровня. Иерархические уровни DT в производстве и строительстве можно увидеть на рисунке 47.

Цифровые близнецы в будущей логистике [115] - это

форма киберфизического устройства, в котором используются многочисленные датчики Интернета вещей и которые создают высококачественное визуальное изображение физического актива. Затем множество данных, полученных цифровыми близнецами, агрегируется и анализируется с использованием алгоритмов машинного обучения для содействия принятию стратегических и организационных решений. Их технология, которая включает использование цифровых моделей для лучшего понимания физических активов и управления ими, уже хорошо зарекомендовала себя в некоторых отраслях и может существенно изменить логистические операции [115]. Для графического отображения их можно представить в виде двух строительных площадок: физической и цифровой (рис. 48).

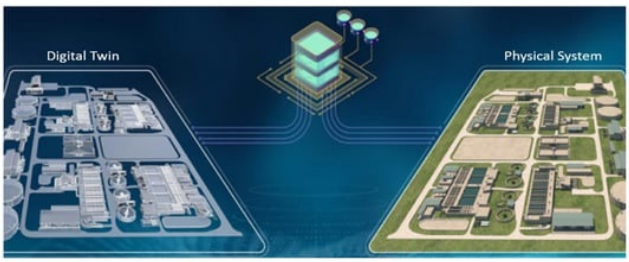

Рис. 48. Визуальное представление цифровых двойников [115].

Когда дело доходит до оптимизации видимости цепочки поставок в Логистике 4.0 для внутреннего контроля, цифровые двойники помогут компании быстрее распознавать улучшение спроса в своих потоках поставок [115]. С введением цифровых двойников для подготовки контента компания сможет более точно понимать, сколько строительных товаров следует заказывать, что приведет к заметному улучшению восприятия воздействия, когда речь идет о повышении прозрачности цепочки поставок для внешнего контроля. Использование цифровых двойников при подготовке материалов поможет планированию упаковки получить большую наглядность, поскольку упаковку можно будет заказывать вместе с заказами на материалы цифровых двойников [115]. На рисунке 49 показаны видимость цепочки поставок и диспетчерская информационная комната для Логистики 4.0.

Высокая степень видимости возможна только тогда, когда ключевые элементы - люди, технологии и процессы - работают в тандеме. Хотя прозрачность во многом связана с обменом информацией, важно различать эти два аспекта, поскольку обмен информацией - это операция. Напротив, видимость - вероятный результат практики обмена информацией [115]. Ключевыми преимуществами присутствия в цепочке поставок являются общее повышение рыночной эффективности, предлагающее основу для принятия более эффективных решений, как на стратегическом, так и на организационном уровнях.

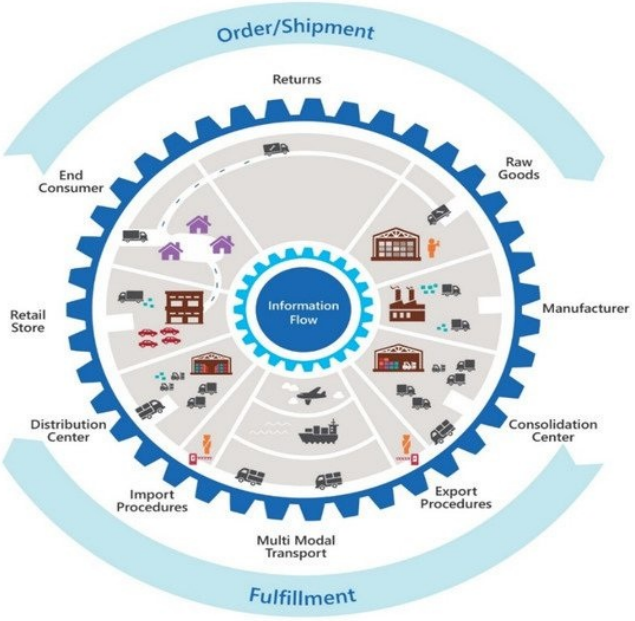

Рис. 49. Видимость цепочки поставок и диспетчерская информационная комната [115].

VII Заключение

В условиях жесткой конкуренции, экологических требований и меняющихся ожиданий потребителей производство использовало технологии для повышения производительности труда на невероятные 75% за последние 25 лет [98]. В тот же период и столкнувшись с аналогичными проблемами, строительный сектор практически не двигался. Но возможности есть. От BIM до интеллектуальных датчиков и подключения к Интернету вещей - огромный потенциал для повышения эффективности продуктов и процессов, управления проектами и инноваций, особенно в сфере строительства транспортных инфраструктур, характер которых близок к промышленным подходам, а недавно начавшееся успешное внедрение открытых машиночитаемых стандартов BIM этому процессу только помогает. Реализация описанного потенциала требует долгосрочного видения и духа сотрудничества между всеми заинтересованными сторонами промышленных подходов в инфраструктурном строительстве, которые все выиграют от повышения безопасности, эффективности, прозрачности и снижения выбросов углекислого газа.

Кажется очевидным, что «рост цифровых двойников (DT) совпадает с подъемом Интернета вещей» [116], поскольку только огромный объем данных датчиков и метаданных устройств из Интернета вещей создает потребность в организации и управлении всей этой информацией адекватным образом, что реализуется концепцией DT. Хотя связь между DT и IoT на первый взгляд кажется очевидной - IoT подключает устройства к Интернету и собирает данные, в то время как концепция DT используется для структурирования и управления этими данными для дальнейшего использования для оптимизации и автоматизации с помощью ИИ и алгоритмы машинного обучения - они

частично пересекаются и поэтому не могут быть четко разделены в некоторых аспектах [116].

Фундаментальным аспектом как IoT, так и DT является тот факт, что они сосредоточены на ресурсах и требуют формального и машиночитаемого представления этих ресурсов в виде открытых стандартов. Ресурсы могут быть устройствами, датчиками, исполнительными механизмами или машинами в контексте IoT или активами, процессами или системами в контексте DT. На рисунке 50 представлено визуальное представление дополнительных функций, связанных с ресурсами, которые являются частью обоих доменов. Помимо формального и машиночитаемого описания ресурса, созданного поставщиком, они совместно используют функциональные возможности, позволяющие потенциальным потребителям обнаруживать такие описания ресурсов и получать доступ к ресурсам [116].

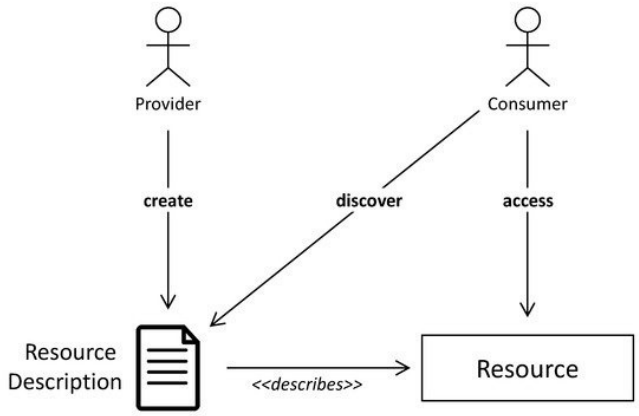

Рис. 50. Функциональное перекрытие между Интернетом вещей и цифровыми двойниками, которое подлежит стандартизации в обеих областях [116]

Наличие формального и машиночитаемого описания ресурса важно для IoT и DT, поскольку оно позволяет потребителям (в том числе и в цифровом двойнике) получать знания о доступных ресурсах и определяет, как с ними взаимодействовать. Описания ресурсов обычно определяются с использованием определенного языка или (мета) модели, которые могут различаться по многим аспектам, например, по сложности, форматам сериализации и т. д. [116].

Например, в статье [116] обсуждали следующие различные критерии классификации в контексте описания ресурсов.

Срок действия ресурса

Какой термин является центральным элементом языковой / (мета) модели? Строго говоря, это не настоящий критерий классификации, а полезный факт, позволяющий ориентироваться в различных терминологиях, используемых в разных стандартах и платформах.

Тип модели

Описание ресурсов выражается в терминах модели (иногда также называемой языком). В зависимости от выразительности и обобщаемости эту модель можно отнести к разным уровням, следуя базовой концепции многоуровневого метамоделирования Object Management Group (OMG) [116]. Подробная иерархия метамоделей для IoT и DT представлена на рисунке 44. Для каждого уровня его содержимое описывается в терминах уровня выше, тогда как верхний уровень (M3) обычно самоописывается. Например, основанием в M3 может быть RDF (S) (схема формата описания ресурсов, необязательно в сочетании со схемой RDF), M2 может быть языком веб-онтологий (OWL), M1 может содержать несколько (перекрестных) моделей домена или приложений. Например, онтология сети семантических датчиков (SSN) и M0 будет содержать фактические данные приложения. M1 и M2 часто представляют собой иерархию или сеть, построенную путем повторного использования существующих (и обычно стандартизованных) моделей в сочетании с настраиваемым расширением. На рисунке 51 это показано для M1 в качестве примера, чтобы отразить иерархическую организацию моделей, обычно используемых в IoT и DT [15,116].

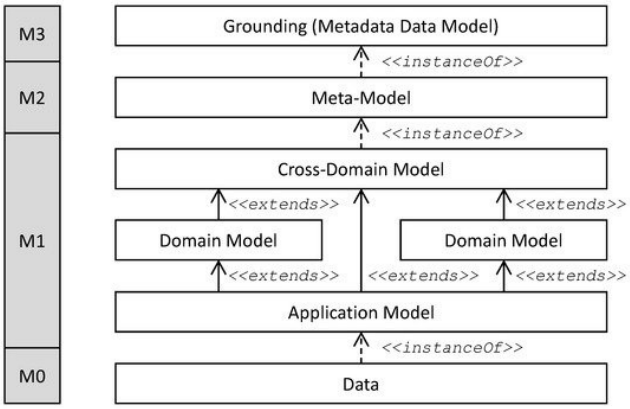

Рис. 51. Иерархия метамоделей, основанная на основной идее многоуровневого метамоделирования Object Management Group [28] с расширенным слоем M1, отражающим иерархическую организацию моделей, типичную для Интернета вещей и цифровых двойников [116]

Идентификация ресурсов

Уникальная идентификация любого ресурса через границы системы важна в таких сильно распределенных средах, как IoT и DT (DT могут передаваться по цепочке поставок вместе с (промежуточными) продуктами). Создание и отслеживание глобально уникальных идентификаторов - нетривиальная задача, которая сама по себе подлежит стандартизации. Поддержка различных типов идентификаторов ресурсов также важна при добавлении семантики посредством ссылки на внешние ресурсы. Интернационализированные идентификаторы ресурсов (IRI) необходимы при работе с онтологиями, поскольку они являются одним из основных строительных блоков семантической паутины. Другими важными внешними источниками семантики являются международные стандарты, например, eCl @ ss [29], которые часто используют идентификаторы международных регистрационных данных (IRDI) для идентификации терминов или понятий [15,116].

Авторы прогнозной работы [117] «Информационное

моделирование зданий как эффективный процесс устойчивого преобразования искусственной среды» видят рабочий процесс преобразований BIM (рисунок 45) именно на базе открытых машиночитаемых стандартов buildingSMART, недавно успешно завершившей важные этапы в стандартизации транспортных инфраструктур [37-41].

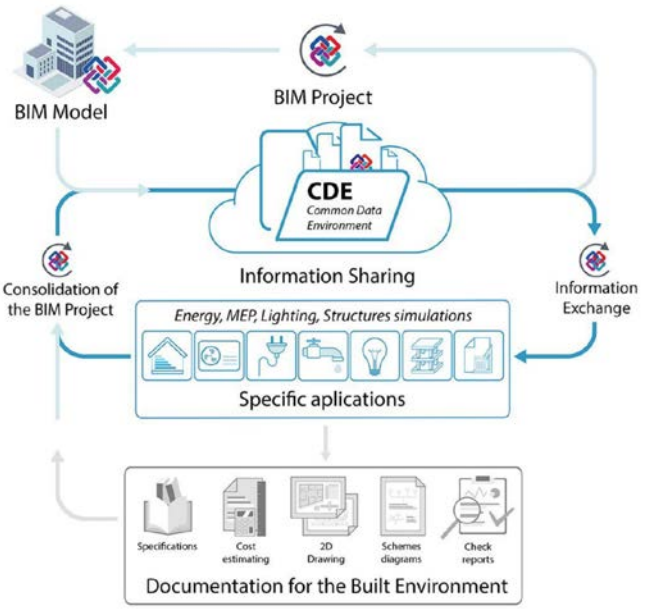

Рис. 52. Рабочий процесс преобразований BIM [117].

Дальнейшее развитие формализации применения открытых машиночитаемых стандартов buildingSMART можно найти в работе «4D-информационная модель сборных зданий для управления строительством на основе IFC и ее применение в графовой базе данных» [118]

В ней утверждается, что эффективная совместимость данных и анализ расписания играют важную роль в улучшении управления сборными зданиями. Однако отсутствуют эффективные стратегии и комплексные подходы к взаимодействию данных и автоматизированному анализу расписания на основе данных. Подходы, изложенные в [118], призваны способствовать управлению сборными домами путем решения этих двух проблем путем разработки структуры на основе IFC, состоящей из нескольких частей. Во-первых, эта структура предложила механизм для создания основанной на IFC 4D информационной модели управления строительством сборных домов. Более того, не реляционная база данных - база данных графов - вводится для объединения этой модели в сеть, ориентированную на задачи, для реализации взаимодействия информации о построении между различными участниками. Наконец, описаны стратегии на основе графовых баз данных для обновления данных, автоматического анализа графиков строительства и визуализации 4D информационной модели управления строительством. Предлагаемая структура проверена в сборном инженерном корпусе. В этом случае 4D информационная модель управления строительством на основе IFC и графовой базы данных создается с помощью расширения стандарта IFC [118]. Анализ модели на основе графовой базы данных автоматически распознает информацию о критическом пути инженерного дела, информацию анализа задержек и информацию о запланированном сетевом анализе. Показано, что эта структура может успешно создать единую информационную модель на основе IFC для управления строительством сборных зданий, чтобы обеспечить эффективное взаимодействие данных. Кроме того, применение этой информационной модели на основе IFC в базе данных графов может автоматически анализировать графики строительства, чтобы заранее предотвратить возможные задержки. Короче говоря, значение этой статьи состоит в том, чтобы предложить новаторскую информационную модель на основе IFC и графовых данных для решения проблем неэффективного взаимодействия данных и неавтоматизированного анализа графика в управлении строительством сборных зданий. Это исследование [118] может стать цифровой основой для дальнейшего создания цифрового двойника на основе IFC. Так как сборные дома и строительство транспортных инфраструктур имеют организационно и онтологически много общего (типовые повторяющиеся элементы, произведенные в заводских условиях, например), то применение положений этой статьи к строительству транспортных инфраструктур нам представляется вполне уместным.

Впрочем, уже есть работы расширяющие применение IFC в жизненном цикле автомобильных дорог [119] и применяющие совместимость данных о которой шла речь выше на практике.

Стоит отметить, что развитие разработок строительного цифрового двойника достигло определенного высокого уровня. В этом можно убедиться, прочитав обзор применения цифрового двойника в строительной отрасли [120]. Из значительного числа публикаций о строительном цифровом двойнике, появившихся после публикации [120], на наш взгляд, серьезно выделяется работа о когнитивном цифровом двойнике (CDT) для жизненного цикла зданий и сооружений [121]. В ней сказано:

«В эпоху цифровой трансформации в отрасли архитектуры, проектирования и строительства (AEC) Cognitive Digital Twins (CDT) представлены как часть следующего уровня автоматизации процессов и управления в направлении Construction 4.0. CDT включает в себя когнитивные способности для обнаружения сложных и непредсказуемых действий и обоснования стратегий динамической оптимизации процессов для поддержки принятия решений при управлении жизненным циклом здания (BLM). Тем не менее, отсутствует понимание реального влияния интеграции CDT, машинного обучения (ML), киберфизических систем (CPS), больших данных, искусственного интеллекта (AI) и Интернета вещей (IoT), которые все связаны с самообучающиеся гибридные модели с проактивными когнитивными возможностями для различных фаз жизненного цикла строительных активов. В этом исследовании изучается применимость, совместимость и интегрируемость

адаптированной модели CDT для BLM с целью выявления и устранения этого пробела. Были проведены опросы отраслевых экспертов с акцентом на применимость, ориентированную на жизненный цикл, функциональную совместимость и интеграцию модели CDT на практике, помимо возможностей поддержки принятия решений и отраслевого понимания AEC. Оценка адаптированной модели поддержки модели CDT при приближении к разработке CDT для оптимизации процессов и принятия решений, а также средств обеспечения интегрируемости подтверждает прогресс в направлении Construction 4.0».

CDT могут обладать высокой степенью интеллекта, что позволяет им имитировать человеческие когнитивные процессы и выполнять сознательные действия с минимальным вмешательством человека или без него [121]. Ядро знаний CDT имеет семантически управляемое распознавание, обучение, вывод, оценку и квалификацию принятия решений, состоящую из серии моделей прогнозирования и машинного обучения, разработанных с использованием данных из нескольких источников, таких как физические эквиваленты и датчики, из всех аспектов рабочих условий промышленные системы. Кроме того, он включает временные данные и процессы цепочки поставок, а также знания экспертов в предметной области. В результате, CDT может обучаться и совершенствоваться для представления и отображения текущего состояния физического актива и условий эксплуатации в режиме реального времени. Кроме того, как в цифровом, так и в физическом мире CDT может идентифицировать, анализировать, делать выводы, прогнозировать настоящие и потенциальные действия двойной физической системы и принимать решения с помощью взаимосвязанных машин и людей [121].

На рисунке 53 изображена концептуальная архитектура CDTsBLM, построенная на конвейерах обслуживания, из которых доступны потоки данных. Использование потоков данных реализует когнитивный центр CDT через один конвейер, который обеспечивает обучение, идентификацию событий, а также навыки прогнозирования и рассуждения. Второй конвейер для каждого CDT позволяет анализировать и обосновывать огромное количество необработанных данных из разных источников. Мета-структура улучшает CDT, обеспечивая совместимость потоков данных с несколькими источниками, более высокий уровень рассуждений и конвейеры познания, поскольку они соединяются через KG [121].

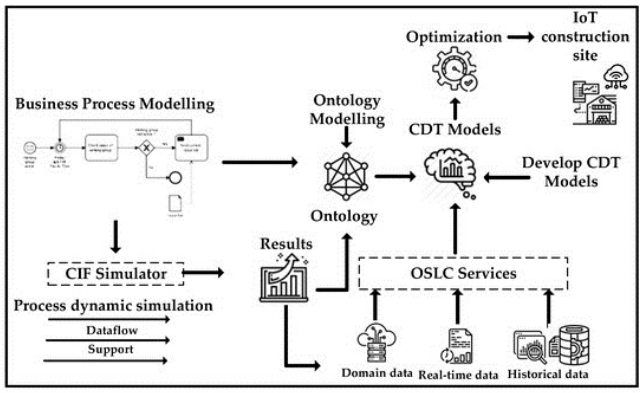

Рис. 53. Схема процесса когнитивного цифрового двойника для управления жизненным циклом здания (CDTsBLM) [121].

Между тем теоретические построения подгоняют быстро развивающиеся технологии, имеющие непосредственное отношение к строительному цифровому двойнику. Так в статье [122] 5G для строительства - сценарии использования и решения можно увидеть, как 5G изменит ситуацию на строительной площадке (рисунок 54)

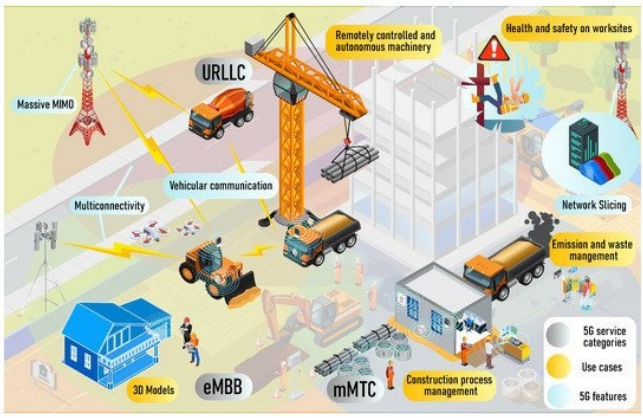

Рис. 54. 5G на строительной площадке [122].

Прогнозируют [123], что изменится облик строительного рабочего, и он, как и очень многое, станет Строительным рабочим 4.0 (Worker 4.0) на будущих сенсорных строительных площадках [123]. По утверждениям авторов [123], Строительные задачи будут определяться формулой «рабочие + продукция + техника» (рисунок 55), а рабочий 4.0 будет окружен датчиками (IoT) строительных площадок (рисунок 56).

Рис. 55. Строительные задачи: рабочие + продукция + техника [123].

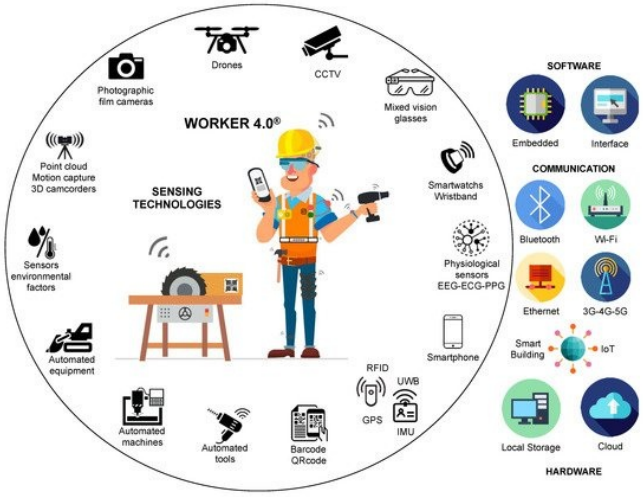

Рис. 56. Рабочий 4.0: Датчики строительных площадок [123].

Библиография

[1] Special Issue "Concrete Structures with Fiber-Reinforced Cementitious and Composite Materials" https://www.mdpi.com/journal/materials/special_issues/concrete_cementitious Retrieved: Aug, 2021

[2] Special Issue "Structural Concrete Material: New Trends for Eco-Efficiency and Performance" https://www.mdpi.com/journal/materials/special_issues/structural_concrete_material Retrieved: Aug, 2021

[3] Special Issue "Sustainable Concrete Materials and Technologies" https://www.mdpi.com/journal/sustainability/special_issues/Sustainable_Concrete_Materials_Technologies Retrieved: Aug, 2021

[4] Reichenbach, Sara, and Benjamin Kromoser. "State of Practice of Automation in Precast Concrete Production." Journal of Building Engineering (2021): 102527.

[5] Куприяновский В. П. и др. Интернет Вещей на промышленных предприятиях //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4. – №. 12. – С. 69-78.

[6] Kupriyanovsky V. et al. Industries transformation in the digital economy–the design and production //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 1. – С. 50-70.

[7] Kupriyanovsky V. et al. Industries transformation in the digital economy–the ecosystem and life cycle //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 1. – С. 34-49.

[8] Kupriyanovsky V. et al. Web of Things and Internet of Things in the Digital Economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 5. – С. 38-45.

[9] Куприяновский В. П. и др. О работах по цифровой экономике //Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2016. – Т. 12. – №. 1. – С. 243-249.

[10] Синягов С. А. и др. Строительство и инженерия на основе стандартов BIM как основа трансформаций инфраструктур в цифровой экономике //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 5. – С. 46-79.

[11] Соколов И. А. и др. Государство, инновации, наука и таланты в измерении цифровой экономики (на примере Великобритании) //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 6. – С. 33-48.

[12] Kupriyanovsky V. et al. Digital sharing economy: technologies, platforms and libraries in industry, construction, transport, and logistics //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 6. – С. 56-75.

[13] Kupriyanovsky V. et al. On mobile production based on a shared economy, digital technologies, and logistics //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 8. – С. 47-69.

[14] Kupriyanovsky V. et al. Digital supply chains and blockchain-based technologies in a shared economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 8. – С. 80-95.

[15] Kupriyanovsky V. et al. On the new IoT generation-ETSI ontology standards and specifications //International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – Т. 7. – №. 9. – С. 73-81.

[16] Kupriyanovsky V. et al. Digital twins based on the development of BIM technologies, related ontologies, 5G, IoT, and mixed reality for use in infrastructure projects and IFRABIM //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – №. 3. – С. 55-74.

[17] Tsui, Tanya, et al. "The Role of Urban Manufacturing for a Circular Economy in Cities." Sustainability 13.1 (2021): 23.

[18] Turner, Chris, John Oyekan, and Lampros K. Stergioulas. "Distributed Manufacturing: A New Digital Framework for Sustainable Modular Construction." Sustainability 13.3 (2021): 1515.

[19] Pedo B. et al. Lean Contributions to BIM Processes: The Case of Clash Management in Highways Design //29th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. – The International Group for Lean Construction, 2021. – С. 116-125.

[20] Rodríguez Cornejo V. et al. Lean Thinking to Foster the Transition from Traditional Logistics to the Physical Internet //Sustainability. – 2020. – Т. 12. – №. 15. – С. 6053.

[21] Kupriyanovsky V. et al. Towards a physical Internet: industrial and logistics clusters, standardization of the digital container and implementation timeline //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – №. 4. – С. 74-88.

[22] Sepasgozar, Samad ME, et al. "Lean practices using building information modeling (Bim) and digital twinning for sustainable construction." Sustainability 13.1 (2021): 161.

[23] Sbiti, Maroua, et al. "Toward BIM and LPS Data Integration for Lean Site Project Management: A State-of-the-Art Review and Recommendations." Buildings 11.5 (2021): 196.

[24] Zhang, Xingchen. Integrating Lean Construction, BIM and Quality: A New Paradigm for the Improvement of Chinese Construction Quality. Diss. University of Bath, 2019.

[25] Marzouk M., Elmaraghy A. Design for Deconstruction Using Integrated Lean Principles and BIM Approach //Sustainability. – 2021. – Т. 13. – №. 14. – С. 7856.

[26] Andújar-Montoya M. D. et al. BIM-LEAN as a Methodology to Save Execution Costs in Building Construction—An Experience under the Spanish Framework //Applied Sciences. – 2020. – Т. 10. – №. 6. – С. 1913.

[27] Special Issue "Lean Design and Building Information Modelling" https://www.mdpi.com/journal/sustainability/special_issues/ld_sus Retrieved: Aug, 2021

[28] Gaurang, Ghule. "Delay & Cost Overrun in Construction Projects: Implementation of Lean Techniques for minimizing the risks on Time & Cost." (2020).

[29] Rakic, Marija. "Lean BIM-based communication and workflow during design phases." (2019).

[30] Shahmehr, Babak. "Integration of Mixed Reality and Lean construction in the execution phase: To perceive better execution process for construction projects and participants." (2020).

[31] Maidi, Mohamed Nassim. "Lean Construction and Delay Analysis Input in delay mitigation." (2020).

[32] Allan Fred, Onyango. "Interaction between Lean Construction and BIM: How effectiveness in production can be improved if lean and BIM are combined in the design phase A literature review." (2016).
[33] Goyal, Manisha, and Zhili Gao. "Integration of building information modeling (BIM) and prefabrication for lean construction." ICCREM 2018: Innovative Technology and Intelligent Construction. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2018. 78-84.
[34] Kozlovska M., Klosova D., Strukova Z. Impact of Industry 4.0 Platform on the Formation of Construction 4.0 Concept: A Literature Review //Sustainability. – 2021. – Т. 13. – №. 5. – С. 2683.
[35] Begić, Hana, and Mario Galić. "A Systematic Review of Construction 4.0 in the Context of the BIM 4.0 Premise." Buildings 11.8 (2021): 337.
[36] Forcael, Eric, et al. "Construction 4.0: A literature review." Sustainability 12.22 (2020): 9755.
[37] Куприяновский В. П. и др. Bim на железных дорогах мира-развитие, примеры, стандарты //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – №. 5. – С. 57-80.
[38] Pokusaev O. et al. BIM, Ontology and Asset Management Technologies on European Highways //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – №. 6. – С. 108-135.
[39] Kupriyanovsky V. et al. 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. – 2020. – Т. 8. – №. 8. – С. 69-78.
[40] Куприяновский В. П. и др. ТЕХНОЛОГИИ BIM ДЛЯ ТУННЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В МЕТРОПОЛИТЕНАХ, НА ЖЕЛЕЗНЫХ И АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ И НА HYPERLOOP-СИСТЕМЫ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НА БАЗЕ IFC И ПОДРЫВНЫЕ ИННОВАЦИИ //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – №. 9.
[41] Kupriyanovsky V. et al. Information modeling (BIM), subways, urban railways, and stations in the transport and urban environment in the ideology of transit orientation of urban development //International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – Т. 9. – №. 3. – С. 62-90.
[42] Kupriyanovsky V. et al. The ontologies of cyber-physical systems of the national digital twin of Great Britain and BIM on the examples of smart cities, railways, and other projects //International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – Т. 9. – №. 3. – С. 91-130.
[43] Куприяновский В. П. и др. Цифровая трансформация экономики, железных дорог и умных городов. Планы и опыт Великобритании //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4. – №. 10. – С. 22-31.
[44] Chen S., Wu J., Shi J. A BIM Platform for the Manufacture of Prefabricated Steel Structure //Applied Sciences. – 2020. – Т. 10. – №. 22. – С. 8038.
[45] Rojas Rondán, Jorge Alfredo. "A BIM Based-Tool for Formwork Management in Building Projects." (2021).
[46] Lee B. et al. Applicability of Formwork Automation Design Software for Aluminum Formwork //Applied Sciences. – 2020. – Т. 10. – №. 24. – С. 9029.
[47] Hamooni M. et al. Extending BIM interoperability for real-time concrete formwork process monitoring //Applied Sciences. – 2020. – Т. 10. – №. 3. – С. 1085.
[48] WHY STEEL https://www.aisc.org/why-steel/resources/bim/
[49] BIM & VDC for Structural Steel, American Institute of Steel Construction AISC 2019 https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/references/f201-19.pdf Retrieved: Aug, 2021
[50] Chidambaram, Saminathan. "The application of clash-detection processes in building information modelling for rebars." Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Smart Infrastructure and Construction 172.2 (2020): 53-69.
[51] Kwon K., Kim D., Kim S. Cutting Waste Minimization of Rebar for Sustainable Structural Work: A Systematic Literature Review //Sustainability. – 2021. – Т. 13. – №. 11. – С. 5929.
[52] Pupeikis D. et al. Possibilities of Using Building Information Model Data in Reinforcement Processing Plant //Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering. – 2021. – Т. 28. – №. 1. – С. 80-93.
[53] Liu Y. et al. BIM-BVBS integration with openBIM standards for automatic prefabrication of steel reinforcement //Automation in Construction. – 2021. – Т. 125. – С. 103654.
[54] BIM Formwork Technologies Discipline Model (In situ concrete construction) https://www.gsv-betonschalungen.de/en/bim-formwork-technologies-discipline-model.html Retrieved: Aug, 2021
[55] Reichenbach, Sara, and Benjamin Kromoser. "State of Practice of Automation in Precast Concrete Production." Journal of Building Engineering (2021): 102527.
[56] Kaewunruen S., Sresakoolchai J., Lin Y. Digital twins for managing railway maintenance and resilience //Open Research Europe. – 2021. – Т. 1. – №. 91. – С. 91.
[57] Chen X. et al. An Innovative Detection Method of High-Speed Railway Track Slab Supporting Block Plane Based on Point Cloud Data from 3D Scanning Technology //Applied Sciences. – 2019. – Т. 9. – №. 16. – С. 3345.
[58] Sysyn, Mykola, et al. "Mechanism of Sleeper–Ballast Dynamic Impact and Residual Settlements Accumulation in Zones with Unsupported Sleepers." Sustainability 13.14 (2021): 7740.
[59] Sysyn M. et al. Identification of Sleeper Support Conditions Using Mechanical Model Supported Data-Driven Approach //Sensors. – 2021. – Т. 21. – №. 11. – С. 3609.
[60] Choi J. Y., Ahn D. H., Kim S. H. Behavior Characteristics of a Booted Sleeper Track System According to Substructure Deformation //Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – №. 10. – С. 4507.
[61] Bolhuis, Remco. "Design of a Measurement Sleeper: For the purpose of validating models of ballasted railway tracks." (2021).
[62] Griemink, Andre. "Plastic railway sleepers: Creating a finite element model for hybrid plastic railway sleepers." (2021).
[63] Alvarez A. P. et al. Opportunities in airport pavement management: Integration of BIM, the IoT and DLT //Journal of Air Transport Management. – 2021. – Т. 90. – С. 101941.
[64] Debbie Sniderman, BIM AND PRECAST: WHERE PHYSICAL AND DIGITAL MEET https://precast.org/2018/05/bim-and-precast-where-physical-and-digital-meet/
[65] González-López, Giselle, et al. "Wireless Sensing of Concrete Setting Process." Sensors 20.20 (2020): 5965.
[66] Koh T., Shin M. Field tests on Eco-friendly railway precast concrete slab //Applied Sciences. – 2020. – Т. 10. – №. 12. – С. 4140.
[67] Cui, Xuhao, et al. "Effects of Differential Subgrade Settlement on Slab Track Deformation Based on a DEM-FDM Coupled Approach." Applied Sciences 11.4 (2021): 1384.
[68] Куприяновский В. П. и др. Цифровая железная дорога-прогнозы, инновации, проекты //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4. – №. 9. – С. 34-43.
[69] Skalecki P. et al. Process Evaluation for Smart Concrete Road Construction: Road Surface and Thickness Evaluation Using High-Speed LiDAR Technology //Automation. – 2021. – Т. 2. – №. 1. – С. 31-47.
[70] J.F.A. (Jeffrey) Hokkeling Towards construction 4.0: An assessment on the potential of Digital Twins in the infrastructure sector, http://essay.utwente.nl/81929/1/MSc_thesis_Jeffrey_Hokkeling.pdf
[71] André Malheiro Data flow from BIM to Digital Twins https://bimaplus.org/wp-content/uploads/2020/10/2020-AndreMalheiro-Dissertation.pdf
[72] Alaloul, Wesam Salah, et al. "Systematic Review of Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis for Pavement and a Case Study." Sustainability 13.8 (2021): 4377.
[73] Meža, Sebastjan, et al. "Digital twins and road construction using secondary raw materials." Journal of Advanced Transportation 2021 (2021).
[74] Wu, Yijie, Jianga Shang, and Fan Xue. "RegARD: Symmetry-Based Coarse Registration of Smartphone's Colorful Point Clouds with CAD Drawings for Low-Cost Digital Twin Buildings." Remote Sensing 13.10 (2021): 1882.
[75] Boje, Calin, et al. "Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research." Automation in Construction 114 (2020): 103179.
[76] Hasan, Syed Mobeen, et al. "Augmented reality and digital twin system for interaction with construction machinery." Journal of Asian Architecture and Building Engineering (2021): 1-12.
[77] Identifying construction objects within the Digital Twin. What you need to consider https://cobuilder.com/en/construction-objects-digital-twin/
[78] Opoku, De-Graft Joe, et al. "Digital twin application in the construction industry: A literature review." Journal of Building Engineering (2021): 102726.
[79] Hou, Lei, et al. "Literature review of digital twins applications in construction workforce safety." Applied Sciences 11.1 (2021): 339.
[80] Bertuzzi, Giovanna, and Enedir Ghisi. "Potential for Potable Water Savings Due to Rainwater Use in a Precast Concrete Factory." Water 13.4 (2021): 448.

[81] Li, Clyde Zhengdao, et al. "Mapping the Knowledge Domains of Emerging Advanced Technologies in the Management of Prefabricated Construction." Sustainability 13.16 (2021): 8800.
[82] O'Grady, Timothy M., et al. "Circular Economy and Virtual Reality in Advanced BIM-Based Prefabricated Construction." Energies 14.13 (2021): 4065.
[83] IFC4precast Prefabricated concrete. Information Delivery Manual, Version: 2.4 Date: 19/04/2021Document ID:BR-2021-1023-PS, buildingSMART International ltd. https://app.box.com/s/knvbdnufdckvkeaslyh194gnu6a2c5pz Retrieved: Aug, 2021
[84] Tamang, Subarna. "A Complete Modelling Guide for Precast Element Wall Using Tekla Structures." (2021).
[85] THORSTEN HERTEL, How IFC4precast Plans To Modernize Data Exchange In The Precast Industry https://www.tekla.com/resources/blogs/how-ifc4precast-plans-to-modernize-data-exchange-in-the-precast-industry
[86] IFC4precast connects precast plant with construction project, WHITE PAPER, Digitalisation calls for interface standards 2021, https://www.en.unitechnik.com/info-center/brochures-and-white-papers.html Retrieved: Aug, 2021
[87] RECET4Rail D 1.1 States of the art review and KPI, 31/05/2021, https://recet4rail.eu/ Retrieved: Aug, 2021
[88] Rehman, Atta Ur, and Jung-Hoon Kim. "3D Concrete Printing: A Systematic Review of Rheology, Mix Designs, Mechanical, Microstructural, and Durability Characteristics." Materials 14.14 (2021): 3800.
[89] Valente M., Sibai A., Sambucci M. Extrusion-based additive manufacturing of concrete products: revolutionizing and remodeling the construction industry //Journal of Composites Science. – 2019. – Т. 3. – №. 3. – С. 88.
[90] Aneta Skoratko and Jacek Katzer, Harnessing 3D Printing of Plastics in Construction—Opportunities and Limitations, Materials 2021, 14(16), 4547
[91] Baz B. et al. Inter-layer reinforcement of 3D printed concrete elements //Asian Journal of Civil Engineering. – 2021. – Т. 22. – №. 2. – С. 341-349.
[92] Assaad J. J. et al. A Modular Approach for Steel Reinforcing of 3D Printed Concrete—Preliminary Study //Sustainability. – 2020. – Т. 12. – №. 10. – С. 4062.
[93] Larraza I. et al. Cellulose and Graphene Based Polyurethane Nanocomposites for FDM 3D Printing: Filament Properties and Printability //Polymers. – 2021. – Т. 13. – №. 5. – С. 839.
[94] Dimov, Dimitar, et al. "Ultrahigh performance nanoengineered graphene–concrete composites for multifunctional applications." Advanced functional materials 28.23 (2018): 1705183.
[95] Wu S., Qureshi T., Wang G. Application of Graphene in Fiber-Reinforced Cementitious Composites: A Review //Energies. – 2021. – Т. 14. – №. 15. – С. 4614.
[96] Ramírez C. et al. Applications of Ceramic/Graphene Composites and Hybrids //Materials. – 2021. – Т. 14. – №. 8. – С. 2071.
[97] Kloft H. et al. Reinforcement strategies for 3D-concrete-printing //Civil Engineering Design. – 2020. – Т. 2. – №. 4. – С. 131-139.
[98] Radboud Wijnen THE FULL POTENTIAL OF CONSTRUCTION TECHNOLOGY, https://www.consolis.com/the-full-potential-of-construction-technology/
[99] Graphene-based concrete used in a commercial setting for the first time https://www.graphene-info.com/graphene-based-concrete-used-commercial-setting-first-time Retrieved: Aug, 2021
[100] HS2 to use 3D concrete printing to help cut carbon on project by up to 50%, https://www.globalrailwayreview.com/news/126518/hs2-3d-concrete-printing/ Retrieved: Aug, 2021
[101] Weng Y. et al. Extracting BIM Information for Lattice Toolpath Planning in Digital Concrete Printing with Developed Dynamo Script: A Case Study //Journal of Computing in Civil Engineering. – 2021. – Т. 35. – №. 3. – С. 05021001.
[102] Forcael E. et al. Development of Communication Protocols between BIM Elements and 3D Concrete Printing //Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – №. 16. – С. 7226.
[103] Hoffmann M. et al. Foundation Piles—A New Feature for Concrete 3D Printers //Materials. – 2021. – Т. 14. – №. 10. – С. 2545.
[104] García-Alvarado R., Moroni-Orellana G., Banda-Pérez P. Architectural Evaluation of 3D-Printed Buildings //Buildings. – 2021. – Т. 11. – №. 6. – С. 254.
[105] Khajavi S. H. et al. Additive Manufacturing in the Construction Industry: The Comparative Competitiveness of 3D Concrete Printing //Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – №. 9. – С. 3865.
[106] Singh R. et al. Cloud Manufacturing, Internet of Things-Assisted Manufacturing and 3D Printing Technology: Reliable Tools for Sustainable Construction //Sustainability. – 2021. – Т. 13. – №. 13. – С. 7327.
[107] Kruger, Pienaar Jacques. Rheo-mechanics modelling of 3D concrete printing constructability. Diss. Stellenbosch: Stellenbosch University, 2019.
[108] Michalopoulos, Spyridon. "Printable Profile of Sustainable Modified Cementitious Materials for Additive Manufacturing Applications in Digital Construction." (2020).
[109] He, Rui, et al. "BIM-enabled computerized design and digital fabrication of industrialized buildings: A case study." Journal of Cleaner Production 278 (2021): 123505.
[110] Lee, Dongmin, and SangHyun Lee. "Digital Twin for Supply Chain Coordination in Modular Construction." Applied Sciences 11.13 (2021): 5909.
[111] BLOMKVIST, YLVA, and L. E. O. ULLEMAR LOENBOM. "Improving supply chain visibility within logistics by implementing a Digital Twin: A case study at Scania Logistics." (2020).
[112] Stuijt, L., Towards Digital Twins for Real-time Control in Reversed Supply Chain Operations , Delft University of Technology, Date 2021-01-12, https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A14ee57ca-0a20-475a-b936-436d0913a574
[113] Smarsly, Kay, et al. "BIM-based concrete printing." International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. Springer, Cham, 2020.
[114] Singh, Maulshree, et al. "Digital twin: origin to future." Applied System Innovation 4.2 (2021): 36.
[115] Moshood, Taofeeq D., et al. "Digital Twins Driven Supply Chain Visibility within Logistics: A New Paradigm for Future Logistics." Applied System Innovation 4.2 (2021): 29.
[116] Jacoby M., Usländer T. Digital twin and internet of things—Current standards landscape //Applied Sciences. – 2020. – Т. 10. – №. 18. – С. 6519.
[117] Mazzoli C. et al. Building Information Modeling as an Effective Process for the Sustainable Re-Shaping of the Built Environment //Sustainability. – 2021. – Т. 13. – №. 9. – С. 4658.
[118] Yang B. et al. IFC-Based 4D Construction Management Information Model of Prefabricated Buildings and Its Application in Graph Database //Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – №. 16. – С. 7270.
[119] Ait-Lamallam S. et al. Extending the IFC Standard to Enable Road Operation and Maintenance Management through OpenBIM //ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2021. – Т. 10. – №. 8. – С. 496.
[120] Opoku, De-Graft Joe, et al. "Digital twin application in the construction industry: A literature review." Journal of Building Engineering (2021): 102726.
[121] Yitmen I. et al. An Adapted Model of Cognitive Digital Twins for Building Lifecycle Management //Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – №. 9. – С. 4276.
[122] Mendoza J. et al. 5G for Construction: Use Cases and Solutions //Electronics. – 2021. – Т. 10. – №. 14. – С. 1713.
[123] Calvetti D. et al. Worker 4.0: The future of sensored construction sites //Buildings. – 2020. – Т. 10. – №. 10. – С. 169.
[124] Куприяновский В. П. и др. Оптимизация использования ресурсов в цифровой экономике //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4. – №. 12. – С. 86-96.
[125] Волков А. А., Намиот Д. Е., Шнепс-Шнеппе М. А. О задачах создания эффективной инфраструктуры среды обитания //International Journal of Open Information Technologies. – 2013. – Т. 1. – №. 7. – С. 1-10.

Digital concrete: open BIM, machine-readable standards, IoT, digital twins, logistics 4.0, lean building, and other industrial approaches using the examples of transport infrastructures

Vasily Kupriyanovsky, Oleg Pokusaev, Dmitry Namiot, Alexander Klimov, Mikhail Zhabitskii

***Abstract*— Concrete is one of the main building materials. Construction spending, which accounts for roughly 13% of gross domestic product, is up to $ 10 trillion worldwide, making the construction sector one of the largest in the global economy. However, productivity is exceptionally low compared to other sectors such as manufacturing and agriculture. The construction sector is also a major driver of environmental impact. The share of global CO2 emissions from concrete is between 8% and 9%. New concepts and techniques are needed throughout the entire process chain, from raw material production to planning, component manufacturing, and assembly, to ensure more efficient use of material throughout the construction process.**

To solve these pressing problems, a new term is being actively used - digital concrete. Digital concrete refers to all products manufactured using manufacturing technologies using digital models and machines with numerical control based on digital data. To some extent, the introduction of such an interpretation of the concept of "digital concrete" follows the already proven dimensions of the "digital economy". Both in the first and in the second case, both concepts are based on the share of digital technologies in real economic processes. This work is devoted to the discussion of the possibilities of digital technologies for transformations in technologies for working with concrete on the examples of transport infrastructures.

***Keywords*— BIM, Industry 4.0, Logistics 4.0, Internet of Things.**

REFERENCES

[1] Special Issue "Concrete Structures with Fiber-Reinforced Cementitious and Composite Materials" https://www.mdpi.com/journal/materials/special_issues/concrete_cementitious Retrieved: Aug, 2021

[2] Special Issue "Structural Concrete Material: New Trends for Eco-Efficiency and Performance" https://www.mdpi.com/journal/materials/special_issues/structural_concrete_material Retrieved: Aug, 2021

[3] Special Issue "Sustainable Concrete Materials and Technologies" https://www.mdpi.com/journal/sustainability/special_issues/Sustainable_Concrete_Materials_Technologies Retrieved: Aug, 2021

[4] Reichenbach, Sara, and Benjamin Kromoser. "State of Practice of Automation in Precast Concrete Production." Journal of Building Engineering (2021): 102527.

[5] Kuprijanovskij V. P. i dr. Internet Veshhej na promyshlennyh predprijatijah //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4. – #. 12. – S. 69-78.

[6] Kupriyanovsky V. et al. Industries transformation in the digital economy–the design and production //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 1. – S. 50-70.

[7] Kupriyanovsky V. et al. Industries transformation in the digital economy–the ecosystem and life cycle //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 1. – S. 34-49.

[8] Kupriyanovsky V. et al. Web of Things and Internet of Things in the Digital Economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 5. – S. 38-45.

[9] Kuprijanovskij V. P. i dr. O rabotah po cifrovoj jekonomike //Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie. – 2016. – T. 12. – #. 1. – S. 243-249.

[10] Sinjagov S. A. i dr. Stroitel'stvo i inzhenerija na osnove standartov BIM kak osnova transformacij infrastruktur v cifrovoj jekonomike //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 5. – S. 46-79.

[11] Sokolov I. A. i dr. Gosudarstvo, innovacii, nauka i talanty v izmerenii cifrovoj jekonomiki (na primere Velikobritanii) //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 6. – S. 33-48.

[12] Kupriyanovsky V. et al. Digital sharing economy: technologies, platforms and libraries in industry, construction, transport, and logistics //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 6. – S. 56-75.

[13] Kupriyanovsky V. et al. On mobile production based on a shared economy, digital technologies, and logistics //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 8. – S. 47-69.

[14] Kupriyanovsky V. et al. Digital supply chains and blockchain-based technologies in a shared economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 8. – S. 80-95.

[15] Kupriyanovsky V. et al. On the new IoT generation-ETSI ontology standards and specifications //International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – T. 7. – #. 9. – S. 73-81.

[16] Kupriyanovsky V. et al. Digital twins based on the development of BIM technologies, related ontologies, 5G, IoT, and mixed reality for use in infrastructure projects and IFRABIM //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – T. 8. – #. 3. – S. 55-74.

[17] Tsui, Tanya, et al. "The Role of Urban Manufacturing for a Circular Economy in Cities." Sustainability 13.1 (2021): 23.

[18] Turner, Chris, John Oyekan, and Lampros K. Stergioulas. "Distributed Manufacturing: A New Digital Framework for Sustainable Modular Construction." Sustainability 13.3 (2021): 1515.

[19] Pedo B. et al. Lean Contributions to BIM Processes: The Case of Clash Management in Highways Design //29th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. – The International Group for Lean Construction, 2021. – S. 116-125.

[20] Rodríguez Cornejo V. et al. Lean Thinking to Foster the Transition from Traditional Logistics to the Physical Internet //Sustainability. – 2020. – T. 12. – #. 15. – S. 6053.

[21] Kupriyanovsky V. et al. Towards a physical Internet: industrial and logistics clusters, standardization of the digital container and implementation timeline //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – T. 8. – #. 4. – S. 74-88.

[22] Sepasgozar, Samad ME, et al. "Lean practices using building information modeling (Bim) and digital twinning for sustainable construction." Sustainability 13.1 (2021): 161.

[23] Sbiti, Maroua, et al. "Toward BIM and LPS Data Integration for Lean Site Project Management: A State-of-the-Art Review and Recommendations." Buildings 11.5 (2021): 196.

[24] Zhang, Xingchen. Integrating Lean Construction, BIM and Quality: A New Paradigm for the Improvement of Chinese Construction Quality. Diss. University of Bath, 2019.

[25] Marzouk M., Elmaraghy A. Design for Deconstruction Using Integrated Lean Principles and BIM Approach //Sustainability. – 2021. – T. 13. – #. 14. – S. 7856.
[26] Andújar-Montoya M. D. et al. BIM-LEAN as a Methodology to Save Execution Costs in Building Construction—An Experience under the Spanish Framework //Applied Sciences. – 2020. – T. 10. – #. 6. – S. 1913.
[27] Special Issue "Lean Design and Building Information Modelling" https://www.mdpi.com/journal/sustainability/special_issues/ld_sus Retrieved: Aug, 2021
[28] Gaurang, Ghule. "Delay & Cost Overrun in Construction Projects: Implementation of Lean Techniques for minimizing the risks on Time & Cost." (2020).
[29] Rakic, Marija. "Lean BIM-based communication and workflow during design phases." (2019).
[30] Shahmehr, Babak. "Integration of Mixed Reality and Lean construction in the execution phase: To perceive better execution process for construction projects and participants." (2020).
[31] Maidi, Mohamed Nassim. "Lean Construction and Delay Analysis Input in delay mitigation." (2020).
[32] Allan Fred, Onyango. "Interaction between Lean Construction and BIM: How effectiveness in production can be improved if lean and BIM are combined in the design phase A literature review." (2016).
[33] Goyal, Manisha, and Zhili Gao. "Integration of building information modeling (BIM) and prefabrication for lean construction." ICCREM 2018: Innovative Technology and Intelligent Construction. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2018. 78-84.
[34] Kozlovska M., Klosova D., Strukova Z. Impact of Industry 4.0 Platform on the Formation of Construction 4.0 Concept: A Literature Review //Sustainability. – 2021. – T. 13. – #. 5. – S. 2683.
[35] Begić, Hana, and Mario Galić. "A Systematic Review of Construction 4.0 in the Context of the BIM 4.0 Premise." Buildings 11.8 (2021): 337.
[36] Forcael, Eric, et al. "Construction 4.0: A literature review." Sustainability 12.22 (2020): 9755.
[37] Kuprijanovskij V. P. i dr. Bim na zheleznyh dorogah mira-razvitie, primery, standarty //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – T. 8. – #. 5. – S. 57-80.
[38] Pokusaev O. et al. BIM, Ontology and Asset Management Technologies on European Highways //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – T. 8. – #. 6. – S. 108-135.
[39] Kupriyanovsky V. et al. 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. – 2020. – T. 8. – #. 8. – S. 69-78.
[40] Kuprijanovskij V. P. i dr. TEHNOLOGII BIM DLJa TUNNELEJ, ISPOL"ZUEMYH V METROPOLITENAH, NA ZhELEZNYH I AVTOMOBIL"NYH DOROGAH I NA HYPERLOOP-SISTEMY REAL"NOGO VREMENI NA BAZE IFC I PODRYVNYE INNOVACII //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – T. 8. – #. 9.
[41] Kupriyanovsky V. et al. Information modeling (BIM), subways, urban railways, and stations in the transport and urban environment in the ideology of transit orientation of urban development //International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – T. 9. – #. 3. – S. 62-90.
[42] Kupriyanovsky V. et al. The ontologies of cyber-physical systems of the national digital twin of Great Britain and BIM on the examples of smart cities, railways, and other projects //International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – T. 9. – #. 3. – S. 91-130.
[43] Kuprijanovskij V. P. i dr. Cifrovaja transformacija jekonomiki, zheleznyh dorog i umnyh gorodov. Plany i opyt Velikobritanii //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4. – #. 10. – S. 22-31.
[44] Chen S., Wu J., Shi J. A BIM Platform for the Manufacture of Prefabricated Steel Structure //Applied Sciences. – 2020. – T. 10. – #. 22. – S. 8038.
[45] Rojas Rondán, Jorge Alfredo. "A BIM Based-Tool for Formwork Management in Building Projects." (2021).
[46] Lee B. et al. Applicability of Formwork Automation Design Software for Aluminum Formwork //Applied Sciences. – 2020. – T. 10. – #. 24. – S. 9029.
[47] Hamooni M. et al. Extending BIM interoperability for real-time concrete formwork process monitoring //Applied Sciences. – 2020. – T. 10. – #. 3. – S. 1085.
[48] WHY STEEL https://www.aisc.org/why-steel/resources/bim/
[49] BIM & VDC for Structural Steel, American Institute of Steel Construction AISC 2019 https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/references/f201-19.pdf Retrieved: Aug, 2021
[50] Chidambaram, Saminathan. "The application of clash-detection processes in building information modelling for rebars." Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Smart Infrastructure and Construction 172.2 (2020): 53-69.
[51] Kwon K., Kim D., Kim S. Cutting Waste Minimization of Rebar for Sustainable Structural Work: A Systematic Literature Review //Sustainability. – 2021. – T. 13. – #. 11. – S. 5929.
[52] Pupeikis D. et al. Possibilities of Using Building Information Model Data in Reinforcement Processing Plant //Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering. – 2021. – T. 28. – #. 1. – S. 80-93.
[53] Liu Y. et al. BIM-BVBS integration with openBIM standards for automatic prefabrication of steel reinforcement //Automation in Construction. – 2021. – T. 125. – S. 103654.
[54] BIM Formwork Technologies Discipline Model (In situ concrete construction) https://www.gsv-betonschalungen.de/en/bim-formwork-technologies-discipline-model.html Retrieved: Aug, 2021
[55] Reichenbach, Sara, and Benjamin Kromoser. "State of Practice of Automation in Precast Concrete Production." Journal of Building Engineering (2021): 102527.
[56] Kaewunruen S., Sresakoolchai J., Lin Y. Digital twins for managing railway maintenance and resilience //Open Research Europe. – 2021. – T. 1. – #. 91. – S. 91.
[57] Chen X. et al. An Innovative Detection Method of High-Speed Railway Track Slab Supporting Block Plane Based on Point Cloud Data from 3D Scanning Technology //Applied Sciences. – 2019. – T. 9. – #. 16. – S. 3345.
[58] Sysyn, Mykola, et al. "Mechanism of Sleeper–Ballast Dynamic Impact and Residual Settlements Accumulation in Zones with Unsupported Sleepers." Sustainability 13.14 (2021): 7740.
[59] Sysyn M. et al. Identification of Sleeper Support Conditions Using Mechanical Model Supported Data-Driven Approach //Sensors. – 2021. – T. 21. – #. 11. – S. 3609.
[60] Choi J. Y., Ahn D. H., Kim S. H. Behavior Characteristics of a Booted Sleeper Track System According to Substructure Deformation //Applied Sciences. – 2021. – T. 11. – #. 10. – S. 4507.
[61] Bolhuis, Remco. "Design of a Measurement Sleeper: For the purpose of validating models of ballasted railway tracks." (2021).
[62] Griemink, Andre. "Plastic railway sleepers: Creating a finite element model for hybrid plastic railway sleepers." (2021).
[63] Alvarez A. P. et al. Opportunities in airport pavement management: Integration of BIM, the IoT and DLT //Journal of Air Transport Management. – 2021. – T. 90. – S. 101941.
[64] Debbie Sniderman, BIM AND PRECAST: WHERE PHYSICAL AND DIGITAL MEET https://precast.org/2018/05/bim-and-precast-where-physical-and-digital-meet/
[65] González-López, Giselle, et al. "Wireless Sensing of Concrete Setting Process." Sensors 20.20 (2020): 5965.
[66] Koh T., Shin M. Field tests on Eco-friendly railway precast concrete slab //Applied Sciences. – 2020. – T. 10. – #. 12. – S. 4140.
[67] Cui, Xuhao, et al. "Effects of Differential Subgrade Settlement on Slab Track Deformation Based on a DEM-FDM Coupled Approach." Applied Sciences 11.4 (2021): 1384.
[68] Kuprijanovskij V. P. i dr. Cifrovaja zheleznaja doroga-prognozy, innovacii, proekty //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4. – #. 9. – S. 34-43.
[69] Skalecki P. et al. Process Evaluation for Smart Concrete Road Construction: Road Surface and Thickness Evaluation Using High-Speed LiDAR Technology //Automation. – 2021. – T. 2. – #. 1. – S. 31-47.
[70] J.F.A. (Jeffrey) Hokkeling Towards construction 4.0: An assessment on the potential of Digital Twins in the infrastructure sector, http://essay.utwente.nl/81929/1/MSc_thesis_Jeffrey_Hokkeling.pdf
[71] André Malheiro Data flow from BIM to Digital Twins https://bimaplus.org/wp-content/uploads/2020/10/2020-AndreMalheiro-Dissertation.pdf
[72] Alaloul, Wesam Salah, et al. "Systematic Review of Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis for Pavement and a Case Study." Sustainability 13.8 (2021): 4377.
[73] Meža, Sebastjan, et al. "Digital twins and road construction using secondary raw materials." Journal of Advanced Transportation 2021 (2021).
[74] Wu, Yijie, Jianga Shang, and Fan Xue. "RegARD: Symmetry-Based Coarse Registration of Smartphone's Colorful Point Clouds with CAD Drawings for Low-Cost Digital Twin Buildings." Remote Sensing 13.10 (2021): 1882.

[75] Boje, Calin, et al. "Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research." Automation in Construction 114 (2020): 103179.
[76] Hasan, Syed Mobeen, et al. "Augmented reality and digital twin system for interaction with construction machinery." Journal of Asian Architecture and Building Engineering (2021): 1-12.
[77] Identifying construction objects within the Digital Twin. What you need to consider https://cobuilder.com/en/construction-objects-digital-twin/
[78] Opoku, De-Graft Joe, et al. "Digital twin application in the construction industry: A literature review." Journal of Building Engineering (2021): 102726.
[79] Hou, Lei, et al. "Literature review of digital twins applications in construction workforce safety." Applied Sciences 11.1 (2021): 339.
[80] Bertuzzi, Giovanna, and Enedir Ghisi. "Potential for Potable Water Savings Due to Rainwater Use in a Precast Concrete Factory." Water 13.4 (2021): 448.
[81] Li, Clyde Zhengdao, et al. "Mapping the Knowledge Domains of Emerging Advanced Technologies in the Management of Prefabricated Construction." Sustainability 13.16 (2021): 8800.
[82] O'Grady, Timothy M., et al. "Circular Economy and Virtual Reality in Advanced BIM-Based Prefabricated Construction." Energies 14.13 (2021): 4065.
[83] IFC4precast Prefabricated concrete. Information Delivery Manual, Version: 2.4 Date: 19/04/2021Document ID:BR-2021-1023-PS, buildingSMART International ltd. https://app.box.com/s/knvbdnufdckvkeaslyh194gnu6a2c5pz Retrieved: Aug, 2021
[84] Tamang, Subarna. "A Complete Modelling Guide for Precast Element Wall Using Tekla Structures." (2021).
[85] THORSTEN HERTEL, How IFC4precast Plans To Modernize Data Exchange In The Precast Industry https://www.tekla.com/resources/blogs/how-ifc4precast-plans-to-modernize-data-exchange-in-the-precast-industry
[86] IFC4precast connects precast plant with construction project, WHITE PAPER, Digitalisation calls for interface standards 2021, https://www.en.unitechnik.com/info-center/brochures-and-white-papers.html Retrieved: Aug, 2021
[87] RECET4Rail D 1.1 States of the art review and KPI, 31/05/2021, https://recet4rail.eu/ Retrieved: Aug, 2021
[88] Rehman, Atta Ur, and Jung-Hoon Kim. "3D Concrete Printing: A Systematic Review of Rheology, Mix Designs, Mechanical, Microstructural, and Durability Characteristics." Materials 14.14 (2021): 3800.
[89] Valente M., Sibai A., Sambucci M. Extrusion-based additive manufacturing of concrete products: revolutionizing and remodeling the construction industry //Journal of Composites Science. – 2019. – T. 3. – #. 3. – S. 88.
[90] Aneta Skoratko and Jacek Katzer, Harnessing 3D Printing of Plastics in Construction—Opportunities and Limitations, Materials 2021, 14(16), 4547
[91] Baz B. et al. Inter-layer reinforcement of 3D printed concrete elements //Asian Journal of Civil Engineering. – 2021. – T. 22. – #. 2. – S. 341-349.
[92] Assaad J. J. et al. A Modular Approach for Steel Reinforcing of 3D Printed Concrete—Preliminary Study //Sustainability. – 2020. – T. 12. – #. 10. – S. 4062.
[93] Larraza I. et al. Cellulose and Graphene Based Polyurethane Nanocomposites for FDM 3D Printing: Filament Properties and Printability //Polymers. – 2021. – T. 13. – #. 5. – S. 839.
[94] Dimov, Dimitar, et al. "Ultrahigh performance nanoengineered graphene–concrete composites for multifunctional applications." Advanced functional materials 28.23 (2018): 1705183.
[95] Wu S., Qureshi T., Wang G. Application of Graphene in Fiber-Reinforced Cementitious Composites: A Review //Energies. – 2021. – T. 14. – #. 15. – S. 4614.
[96] Ramírez C. et al. Applications of Ceramic/Graphene Composites and Hybrids //Materials. – 2021. – T. 14. – #. 8. – S. 2071.
[97] Kloft H. et al. Reinforcement strategies for 3D-concrete-printing //Civil Engineering Design. – 2020. – T. 2. – #. 4. – S. 131-139.
[98] Radboud Wijnen THE FULL POTENTIAL OF CONSTRUCTION TECHNOLOGY, https://www.consolis.com/the-full-potential-of-construction-technology/
[99] Graphene-based concrete used in a commercial setting for the first time https://www.graphene-info.com/graphene-based-concrete-used-commercial-setting-first-time Retrieved: Aug, 2021
[100] HS2 to use 3D concrete printing to help cut carbon on project by up to 50%, https://www.globalrailwayreview.com/news/126518/hs2-3d-concrete-printing/ Retrieved: Aug, 2021
[101] Weng Y. et al. Extracting BIM Information for Lattice Toolpath Planning in Digital Concrete Printing with Developed Dynamo Script: A Case Study //Journal of Computing in Civil Engineering. – 2021. – T. 35. – #. 3. – S. 05021001.
[102] Forcael E. et al. Development of Communication Protocols between BIM Elements and 3D Concrete Printing //Applied Sciences. – 2021. – T. 11. – #. 16. – S. 7226.
[103] Hoffmann M. et al. Foundation Piles—A New Feature for Concrete 3D Printers //Materials. – 2021. – T. 14. – #. 10. – S. 2545.
[104] García-Alvarado R., Moroni-Orellana G., Banda-Pérez P. Architectural Evaluation of 3D-Printed Buildings //Buildings. – 2021. – T. 11. – #. 6. – S. 254.
[105] Khajavi S. H. et al. Additive Manufacturing in the Construction Industry: The Comparative Competitiveness of 3D Concrete Printing //Applied Sciences. – 2021. – T. 11. – #. 9. – S. 3865.
[106] Singh R. et al. Cloud Manufacturing, Internet of Things-Assisted Manufacturing and 3D Printing Technology: Reliable Tools for Sustainable Construction //Sustainability. – 2021. – T. 13. – #. 13. – S. 7327.
[107] Kruger, Pienaar Jacques. Rheo-mechanics modelling of 3D concrete printing constructability. Diss. Stellenbosch: Stellenbosch University, 2019.
[108] Michalopoulos, Spyridon. "Printable Profile of Sustainable Modified Cementitious Materials for Additive Manufacturing Applications in Digital Construction." (2020).
[109] He, Rui, et al. "BIM-enabled computerized design and digital fabrication of industrialized buildings: A case study." Journal of Cleaner Production 278 (2021): 123505.
[110] Lee, Dongmin, and SangHyun Lee. "Digital Twin for Supply Chain Coordination in Modular Construction." Applied Sciences 11.13 (2021): 5909.
[111] BLOMKVIST, YLVA, and L. E. O. ULLEMAR LOENBOM. "Improving supply chain visibility within logistics by implementing a Digital Twin: A case study at Scania Logistics." (2020).
[112] Stuijt, L., Towards Digital Twins for Real-time Control in Reversed Supply Chain Operations , Delft University of Technology, Date 2021-01-12, https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A14ee57ca-0a20-475a-b936-436d0913a574
[113] Smarsly, Kay, et al. "BIM-based concrete printing." International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. Springer, Cham, 2020.
[114] Singh, Maulshree, et al. "Digital twin: origin to future." Applied System Innovation 4.2 (2021): 36.
[115] Moshood, Taofeeq D., et al. "Digital Twins Driven Supply Chain Visibility within Logistics: A New Paradigm for Future Logistics." Applied System Innovation 4.2 (2021): 29.
[116] Jacoby M., Usländer T. Digital twin and internet of things—Current standards landscape //Applied Sciences. – 2020. – T. 10. – #. 18. – S. 6519.
[117] Mazzoli C. et al. Building Information Modeling as an Effective Process for the Sustainable Re-Shaping of the Built Environment //Sustainability. – 2021. – T. 13. – #. 9. – S. 4658.
[118] Yang B. et al. IFC-Based 4D Construction Management Information Model of Prefabricated Buildings and Its Application in Graph Database //Applied Sciences. – 2021. – T. 11. – #. 16. – S. 7270.
[119] Ait-Lamallam S. et al. Extending the IFC Standard to Enable Road Operation and Maintenance Management through OpenBIM //ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2021. – T. 10. – #. 8. – S. 496.
[120] Opoku, De-Graft Joe, et al. "Digital twin application in the construction industry: A literature review." Journal of Building Engineering (2021): 102726.
[121] Yitmen I. et al. An Adapted Model of Cognitive Digital Twins for Building Lifecycle Management //Applied Sciences. – 2021. – T. 11. – #. 9. – S. 4276.
[122] Mendoza J. et al. 5G for Construction: Use Cases and Solutions //Electronics. – 2021. – T. 10. – #. 14. – S. 1713.
[123] Calvetti D. et al. Worker 4.0: The future of sensored construction sites //Buildings. – 2020. – T. 10. – #. 10. – S. 169.
[124] Kuprijanovskij V. P. i dr. Optimizacija ispol'zovanija resursov v cifrovoj jekonomike //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4. – #. 12. – S. 86-96.
[125] Volkov A. A., Namiot D. E., Shneps-Shneppe M. A. O zadachah sozdanija jeffektivnoj infrastruktury sredy obitanija //International Journal of Open Information Technologies. – 2013. – T. 1. – #. 7. – S. 1-10.