

DOI: 10.18721/JE.13102

УДК 338.22.021.2

## ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ИНДУСТРИИ 4.0: БАЗОВЫЕ ПОДХОДЫ

**В.Л. Баденко, Н.С. Большаков, А.А. Федотов, В.К. Ядыкин**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Развитие цифровых технологий захватывает значительную часть экономики и производства, а также бизнес-процессов и процессов управления. Владельцы активов сегодня получают возможность стать дополнительно владельцами цифровых активов, при этом возрастает потребность в концептуальных подходах к цифровому управлению активами, увеличивающаяся с все более стремительным развитием технологий, инструментов и программного обеспечения, связанных с цифровизацией промышленности и недвижимости. При этом существующая в текущей парадигме проектирования и производства проблема, связанная с несоответствием фактически созданного и спроектированного объекта или сложной технической системы, может быть решена за счет внедрения информационного моделирования на стадиях жизненного цикла. В ходе прохождения стадий проектирования, строительства и эксплуатации фактически изготовленный (то есть as-built) сложный технический объект (или производственная инфраструктура) отличается, иногда существенно, от запроектированного (as-designed), и одновременно с этим проявляется несогласованность между создаваемым производством и производственной инфраструктурой, в рамках которой оно должно функционировать. Решение проблемы несоответствия фактического созданного и спроектированного объекта или сложной технической системы в отсутствие цифровых технологий требует значительного времени на так называемую «опытную эксплуатацию», в ходе которой устраняются несоответствия и вырабатывается механизм управления производством и производственной инфраструктурой в реальных условиях. В статье обоснованы базовые подходы к организации управления жизненным циклом сложных технических систем, производства и производственных инфраструктур в условиях глобальной цифровизации. Формулируется роль технологий BIM (информационное моделирование зданий) не только на стадиях жизненного цикла проектирования и строительства (где уже имеются определенные успехи), но и на стадии эксплуатации. Показаны направления дальнейших исследований, в том числе совмещение экономических подходов и информационных технологий в области BIM и SIM (системы информационного моделирования), а также представляющий интерес анализ изменения времени опытной эксплуатации в зависимости от степени внедрения и проработки цифрового актива на стадиях жизненного цикла.

**Ключевые слова:** Управление активами, цифровой актив, цифровой двойник, информационное моделирование существующих зданий, индустрия 4.0, эксплуатация, управление недвижимостью

**Ссылка при цитировании:** Баденко В.Л., Большаков Н.С., Федотов А.А., Ядыкин В.К. Цифровые двойники сложных технических систем в индустрии 4.0: базовые подходы // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2020. Т. 13, № 1. С. 20–30. DOI: 10.18721/JE.13102

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## DIGITAL TWINS OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS IN INDUSTRY 4.0: BASIC APPROACHES

V.L. Badenko, N.S. Bolshakov, A.A. Fedotov, V.Y. Yadykin

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

The development of digital technologies capture a significant part of the economy and production, as well as business and management processes. Asset owners are given the opportunity to become additionally owners of digital assets, while the need for conceptual approaches and digital asset management is growing. The problem associated with the development and production of facilities is related to the discrepancy between as-built and as-designed facilities or complex technical systems. During the stages of design, construction and operation, the actually manufactured (i.e. as-built) complex technical object (or production infrastructure) differs, sometimes significantly, from the designed (as-designed), and at the same time inconsistency between the created production and production infrastructure within which it should operate grows. Solving the problem of discrepancy between the actually created and designed facility or the complex technical system, in the absence of digital technologies, requires considerable time for the so-called “trial operation”, during which the discrepancies are eliminated and a mechanism for managing production and production infrastructure in real conditions is developed. With the development of the digital economy, the need for digitalization of asset management is growing. An analysis of existing information technologies shows that there is a possibility of reducing the cost of production and operation of an asset by concentrating the main costs at the design stage. The article discusses basic approaches to organizing the life cycle management of technical systems, production and infrastructure in the context of global digitalization which become a useful tool for reduction of trial operation time. Further directions of research are formulated.

**Keywords:** Asset management digital asset, digital twin, as-built BIM, industry 4.0, maintenance, real estate management

**Citation:** V.L. Badenko, N.S. Bolshakov, A.A. Fedotov, V.Y. Yadykin, Digital twins of complex technical objects in industry 4.0: basic approaches, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics, 13 (1) (2020) 20–30. DOI: 10.18721/JE.13102

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*Введение.* Внедрение передовых производственных технологий в условиях цифровизации производства и производственной инфраструктуры сталкивается с наличием большого количества разрывов в информационных потоках и соответствующих потерь информации при переходах между стадиями жизненного цикла цифрового актива, что связано, в первую очередь, с отсутствием целостной системы управления и адекватных базовых подходов, которые и будут рассмотрены в статье.

При этом имеют место разрывы как «вертикальные», так и «горизонтальные», т. е. в ходе

прохождения стадий проектирования, строительства и эксплуатации фактически изготовленный (as-built) сложный технический объект (или производственная инфраструктура) отличается, иногда существенно, от запроектированного (as-designed), и одновременно с этим проявляется несогласованность между создаваемым производством и производственной инфраструктурой, в рамках которой оно должно функционировать [1]. Решение проблемы несоответствия фактического созданного и спроектированного объекта или сложной технической системы в отсутствие цифровых технологий требует значи-

тельного времени на так называемую опытную эксплуатацию, в ходе которой устраняются несоответствия и вырабатывается механизм управления производством и производственной инфраструктурой в реальных условиях.

В данной статье раскрывается суть описанной проблемы, а также предлагаются базовые подходы к организации управления жизненным циклом сложных технических систем, производства и производственных инфраструктур в условиях глобальной цифровизации. Таким образом, объектом настоящего исследования является процесс управления жизненным циклом сложных технических систем, в частности, как их производственной, так и структурной составляющими. Основными задачами являются: 1) анализ природы несоответствия между фактическим производственным процессом и технической документацией на производственную систему на разных этапах жизненного цикла объектов; 2) на основе этого анализа формулирование базовых подходов к управлению сложными техническими системами в контексте цифровизации строительства и производства, и, наконец, 3) обоснование и формулировка направлений дальнейших исследований.

При этом, если речь идет о производственных активах, представляющих собой здания, сооружения и сложные технические системы, такие как нефтехимические комплексы, то цифровизация здесь связана с развитием технологий информационного моделирования зданий (building information modelling, BIM). BIM – это прежде всего процесс, связанный с управлением, передачей без потерь и сохранением информации об объекте со всеми ее взаимосвязями и зависимостями на протяжении всего жизненного цикла – от изысканий до непосредственной эксплуатации. Все технологии, которые поддерживают этот процесс носят название BIM-технологий, а модели, которые при этом используются, носят название BIM-моделей. В данной статье мы рассматриваем в первую очередь интеллектуальные 3D-модели объектов.

Развитие цифровых технологий, охватившее в том числе сферы строительства и производства

[2], влечет за собой изменение в подходах к проектированию и эксплуатации сложных технических систем.

Актуальность цифровизации строительной отрасли подтверждается поручением Президента РФ<sup>1</sup>, согласно которому в целях модернизации строительной отрасли и повышения качества строительства требуется обеспечить:

- переход к системе управления жизненным циклом объектов капитального строительства (далее – система управления) путем внедрения технологий информационного моделирования;
- применение типовых моделей системы управления (проектной, строительной, эксплуатационной и утилизационной) в первоочередном порядке в социальной сфере.

В контексте данной статьи ключевыми являются понятия «управление жизненным циклом» и «эксплуатационная модель системы управления». При этом по состоянию на начало 2020 г. в нормативных документах, упоминающих BIM или цифровое моделирование зданий, тема эксплуатации раскрывается слабо<sup>2,3</sup>, рассматриваются только требования к эксплуатационной документации исходя из проекта, т. е. as-designed.

Упомянутый ГОСТ Р. 57311-2016 управление активами определяет как «реализацию всех функций и инструментов, имеющихся у организации-собственника актива или эксплуатирующей организации, предназначенных для осуществления мониторинга состояния актива и принятия решений по осуществлению работ планового и/или внепланового обслуживания – от генерации заявок и нарядов на проведение работ до регистрации фактически осуществленных мероприятий; о реконструкции или техническом перевооружении; о выводе из эксплуатации».

<sup>1</sup> Поручение Президента РФ № 1235 от 19.07.2018 г.

<sup>2</sup> ГОСТ Р. 57311-2016 «Моделирование информационное в строительстве. Требования к эксплуатационной документации объектов завершенного строительства». URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200142711> (дата обращения: 10.01.2020).

<sup>3</sup> СП 404.1325800.2018 Информационное моделирование в строительстве. Правила разработки планов проектов, реализуемых с применением технологии информационного моделирования». URL: <http://docs.cntd.ru/document/553863489> (дата обращения: 10.01.2020).

С точки зрения классического разделения сфер управления недвижимостью на asset management, property management и facility management [3], определение, предложенное в ГОСТ, скорее подходит для описания facility, а не asset, поскольку делает упор на организацию технической эксплуатации объекта.

В данном контексте, на наш взгляд, более уместно понимание управления активами, предложенное стандартом ISO 55000<sup>4</sup>, который дает определение asset management как скоординированная деятельность по извлечению ценности из активов. Под управлением активами могут подразумеваться как управление стоимостью предприятий, его акциями так и управление стоимостью портфеля объектов недвижимости [4].

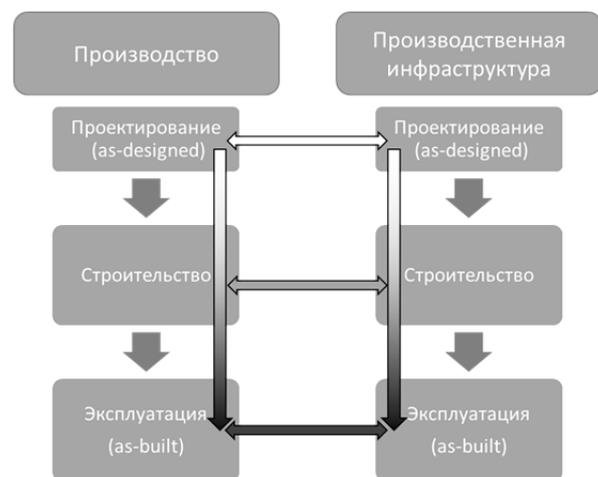
Как правило, доход владельца актива недвижимости зависит от времени сдачи или использования актива. При этом существуют как постоянные, так и переменные затраты в зависимости от времени сдачи или использования. Оперативное принятие решений и прогнозирование затрат на эксплуатацию играют ключевую роль для собственника или управляющей компании.

Предлагается рассмотреть следующие базовые подходы к организации управления жизненным циклом сложных технических систем, производства и производственных инфраструктур в условиях глобальной цифровизации:

- внедрение BIM технологий не только на стадии проектирования или строительства, где данная технология уже хорошо себя зарекомендовала, но и в процессе эксплуатации существующих объектов, производств и производственных структур, созданных до появления BIM-технологий;
- вовлечение потенциального владельца актива (инвестора) и эксплуатирующую объект организацию в процесс создания и проектирования объекта;
- BIM-модель становится основой для формирования цифрового актива создаваемой на базе цифрового двойника объекта или сложной технической системы.

<sup>4</sup> ГОСТ Р 55.0.01-2014/ИСО 55000:2014 Управление активами. Национальная система стандартов. Общее представление, принципы и терминология.

*Существующие проблемы и постановка задачи.* В текущей парадигме (с использованием систем автоматизированного проектирования – CAD) проектируемая производственная инфраструктура, здания и сооружения, и фактически созданный объект зачастую не соответствуют друг другу [5]. То же касается производства, которое планируется разместить в рамках существующей производственной инфраструктуры. В результате возникает несоответствие между фактическим производством и инфраструктурой, поскольку происходят потери и искажения при трансформации от проектной стадии до стадии эксплуатации на стадиях жизненного цикла. Рис. 1 иллюстрирует возрастающую степень разрыва между производством и производственной инфраструктурой.



**Рис. 1.** Разрыв согласованности между производством и производственной инфраструктурой в ходе жизненного цикла объекта

**Fig. 1.** The gap in the coherence between production and production infrastructure during the life cycle of the facility

Ключевым следствием данного разрыва является стадия опытной эксплуатации, требующая времени. Чем значительнее и критичнее ошибки и несоответствия as-built производства и производственной инфраструктуры, тем больше повышаются операционные издержки. В ходе данной стадии выявляются и устраняются так называемые детские болезни объекта [6].

Другая значительная проблема управления жизненным циклом объекта связана с человеческим фактором [7]. В настоящее время в процессе проектирования материального и цифрового актива не участвует в достаточной мере будущий владелец актива или эксплуатирующая организация (понятие цифрового актива раскрывается позже в разделе «Результаты»). Тем не менее, именно эксплуатирующая организация должна играть ключевую роль в проектировании объекта, поскольку ей предстоит его обслуживать, управлять жизненным циклом и стоимостью, 80% которой приходится именно на стадию эксплуатации [8]. В случае, когда эксплуатирующей организацией приобретает сложный технический объект, содержащий ноу-хау разработчика, возможно сознательное внесение ограничений в поставляемую документацию. Производитель оборудования часто не заинтересован в раскрытии информации об особенностях его работы.

Все большее распространение получают применение цифровых двойников в проектировании и создании изделий, в производстве, а также в производственной инфраструктуре (в виде BIM-моделей зданий и сооружений, входящих в ее состав) [9]. В данном случае ключевой задачей является состыковка всех перечисленных технологий в процессе управления жизненным циклом создаваемого объекта или сложной технической системы.

Значимым барьером на пути цифровизации жизненного цикла объекта является недостаточное практическое подтверждение окупаемости внедрения информационных технологий в управление активами. В литературе редко встречаются реальные примеры внедрения с реальными показателями, что в очередной раз подтверждает актуальность данного исследования и отсутствие реального внедрения информационных технологий в процесс управления жизненным циклом объекта. Тем не менее, существуют яркие примеры экономии за счет BIM не только в период проектирования и строительства [10], но и в период эксплуатации<sup>5</sup>. Одной из потребно-

стей в дальнейших исследованиях является изучение практических примеров внедрения информационных технологий в управление активами предприятия для обобщения и формализации методов создания и управления цифровыми двойниками активов (цифровыми активами).

*Методика исследования.* Для объектов недвижимости, в частности, промышленных объектов, благодаря развитию цифровых технологий сегодня можно создать информационную модель объекта. Под информационной моделью объекта мы понимаем цифровую 3D-модель объекта, представленную в виде совмещенной информации о геометрических параметрах объекта и его качественных характеристик, характеристик материалов и других постоянных и переменных параметрах, их взаимосвязи. Информационная модель объекта позволяет прогнозировать изменение состояния объекта в зависимости от внешних факторов и принимаемых решений. Эта модель не является цифровым двойником объекта, скорее она его «цифровая тень». Если по части внедрения информационных технологий в управление недвижимыми активами ключевым понятием сегодня является BIM [11], то в области цифровых систем автоматического управления (CAU) применяется понятие SIM (system information modelling). Оба этих понятия тесно связаны с управлением информацией об объекте, и особенный интерес представляет то, как два данных подхода могут быть интегрированы в процесс управления сложными техническими объектами с технологической точки зрения и с точки зрения экономики, управления операционными издержками.

Текущая парадигма создания объекта или сложной технической системы предполагает две первоначальные стадии: проектирование и опытная эксплуатация. Согласованная цифровизация производства и производственной инфраструктуры делает возможным переход к новой парадигме: проектирование и опытная цифровая эксплуатация совместно на первой стадии. В данном случае предполагается проведение виртуальных экспериментов, корректировка проектной документации исходя из потребностей стадий строительства

<sup>5</sup> UNITEC's integrated information system. Building performance. URL: <https://www.building.govt.nz/assets/Uploads/projects-and-consents/building-information-modelling/nz-bim-case-study-5-unitec.pdf> (дата обращения: 25.10.2019).

и эксплуатации при непосредственном участии строительной и эксплуатирующей организаций в процессе проектирования.

В разработанной под руководством А.И. Боровкова [12] новой парадигме цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения (рис. 2) приведены сравнения традиционного и передового подхода к производству, представленные в кратком докладе Центра компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии» на тему цифровых двойников в высокотехнологичной промышленности [13]. Смещение центра тяжести затрат в сторону проектирования может быть применено не только к созданию новых образцов продукции, но и к созданию и модернизации объектов и сложных технических систем.

*Результаты и их обсуждение.* Если рассматривать управление активом в контексте жизненного цикла [14], то внедрение информационных технологий позволит в значительной степени снизить затраты собственника на протяжении всего жизненного цикла объекта, сконцентрировать рассмотрение всех возможных рисков и издержек на стадии проектирования, свести к минимуму возможные дополнительные затраты на стадиях производства (строительства) и эксплуатации [15]. Иными словами, владелец актива при помощи информационных технологий получает инструментарий для управления стоимостью своего актива еще на стадии проектирования объекта [16], при этом, в случае достаточной проработки цифровой модели, появляется возможность с высокой точностью прогнозировать последствия любого принимаемого решения. Цифровая информационная модель объекта фактически становится цифровой моделью актива, так как позволяет моделировать и прогнозировать последствия принимаемых решений. В связи с этим информационная модель актива может быть рассмотрена как ресурс, контролируемый компанией и способный принести экономическую выгоду в будущем, а значит, цифровая модель объекта сама по себе выступает в качестве цифрового актива.

Цифровизация экономики приводит к возрастающему распространению контракта жизненного цикла как в управлении недвижимостью [17], так и в управлении активами в целом. При этом существует конфликт между стремлением компании проектировщика и застройщика объекта сократить сроки проектирования и изготовления и соответственно себестоимости, с одной стороны, и эксплуатационными расходами на содержание и эксплуатацию объекта, с другой стороны [18]. Цифровые технологии, внедряемые на всех стадиях жизненного цикла, повышают прозрачность стадий проектирования, производства и эксплуатации, стимулируя участников процесса взаимодействовать в открытой системе (open-book).

Как уже описывалось выше, цифровизация – инструмент уменьшения времени реальной опытной эксплуатации (стремится к нулю с совершенствованием степени проработки стадии проектирования и моделирования процессов эксплуатации).

Компоненты сложной технической системы должны быть проработаны на стадии проектирования так, чтобы в дальнейшем использовались только упрощенные модели с необходимыми входными/выходными данными. Соответственно, предполагается ресурсоемкое проектирование компонентов, а в дальнейшем – создание smart-системы.

На пути внедрения информационных технологий в процесс управления активами организации возникает ряд барьеров. Один из них – определение и формализация информации, необходимой для создания, обновления и использования модели по управлению активом [19]. Как и в случае с цифровым двойником промышленного объекта, цифровой актив зачастую может наполняться в значительной степени излишними данными, не представляющими практической значимости в процессе управления [12]. Цифровизация управления активами должна быть направлена на создание высокоинтеллектуальных систем управления, использующих только необходимую информацию об активе и его компонентах.

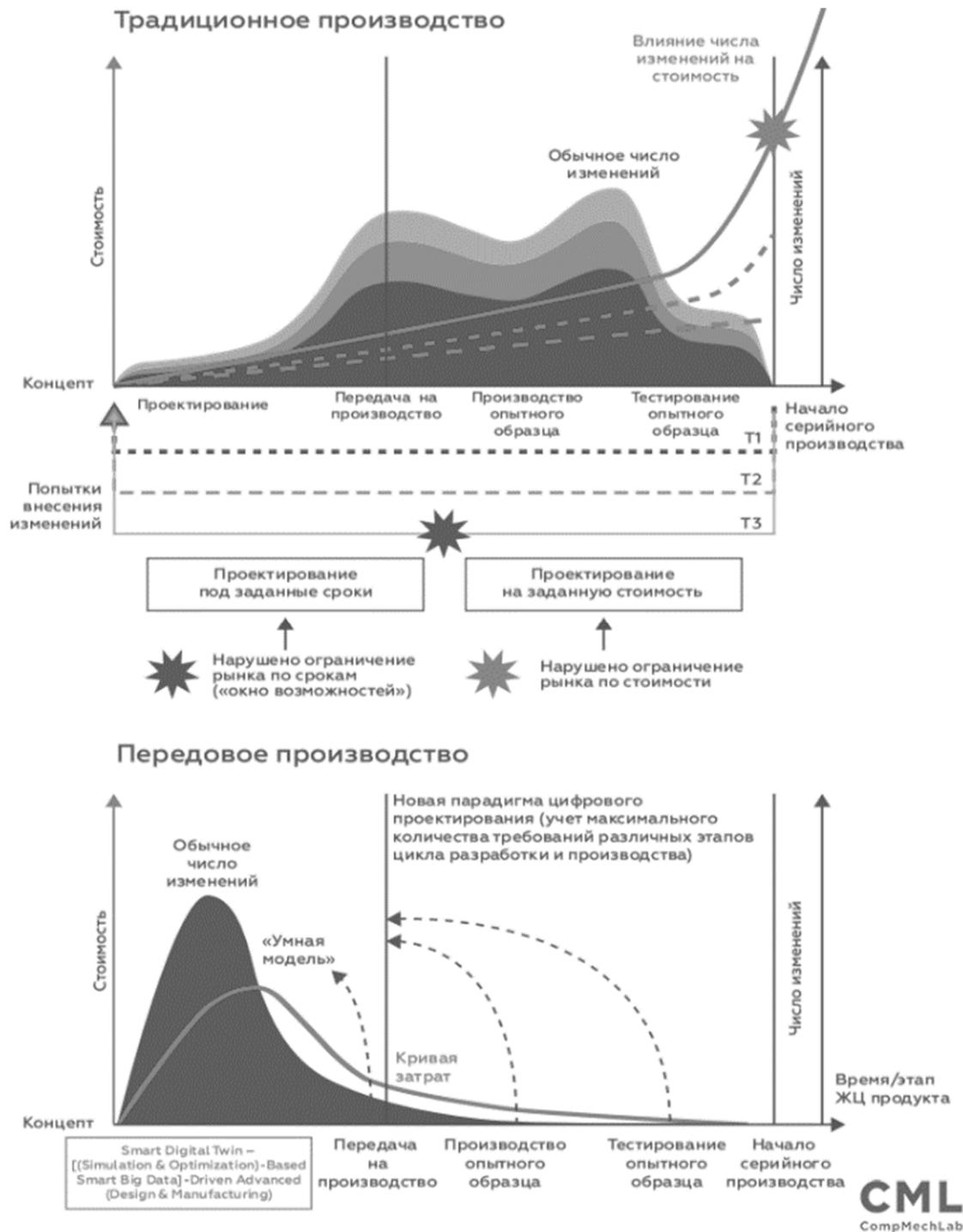


Рис. 2. Традиционный и передовой подходы к производству [13]

Fig. 2. Traditional and advanced manufacturing approaches [13]

Исходя из вышесказанного, предполагается переход от моделирования к использованию оптимизированной базы данных результатов моделирования. Т. е. упрощенная модель в составе

цифрового актива должна иметь возможность взаимодействовать с ERP-системой (системой управления ресурсами предприятия), передавая в нее информацию, необходимую для принятия

решений на уровнях операционного и стратегического менеджмента [20, 21].

Описываемая методика реально применяется на практике. Положительный опыт проиллюстрирован авторами в публикациях, в том числе описаны алгоритмы лазерного сканирования [22], формирования информационных моделей на основе данных лазерного сканирования [23], мониторинга деформаций [24] в существующих объектах, гибридной обработки данных лазерного сканирования [25] и прочее. Глобально все разработанные технологии могут быть применены для создания цифровых as-built активов, соответствующих реальному состоянию объекта и изменяющихся во времени.

*Заключение.* Таким образом, предложены следующие базовые подходы к организации управления жизненным циклом сложных технических систем, производства и производственных инфраструктур в условиях глобальной цифровизации:

- BIM-технологии не только на стадии проектирования или строительства, где данная технология уже себя зарекомендовала, а в процессе эксплуатации существующих объектов, производств и производственных структур, созданных до появления BI- технологий;
- вовлечение потенциального владельца актива (инвестора) и эксплуатирующую объект организацию в процесс проектирования;
- BIM-модель становится основой для формирования цифрового актива создаваемой на базе цифрового двойника объекта или сложной технической системы.

Технологический прорыв будет возможен тогда, когда станет естественным формирование и обновление цифрового актива по мере проектирования, строительства и эксплуатации самого актива. На данный момент существуют требова-

ния к эксплуатационной модели отражены в ГОСТ, но фактически они не соблюдаются. Информационная модель, выдаваемая проектировщиком, мало того, что не доходит до процесса эксплуатации, но и становится неактуальной в ходе строительства, поскольку фактические ППР (проекты производства работ) подстраиваются под подрядчиков, корректируют исходные данные и отходят от изначальной информационной модели. Промежуточным этапом на пути к технологическому прорыву может стать повсеместное внедрение следующего правила: строительные и эксплуатирующие организации обязаны обновлять информационную модель, фактически являющуюся цифровым активом, в соответствии с корректировками и изменениями, происходящими в периоды строительства и эксплуатации.

*Направления дальнейших исследований.* На основе данного исследования особенную актуальность в дальнейших направлениях приобретают разработки методов управления активами за счет совмещения экономических подходов и информационных технологий в области BIM и SIM, внедрения цифрового актива во все стадии жизненного цикла объекта, включая проектирование, строительство и эксплуатацию.

Существует мало примеров практического применения цифровизации активов и вычисления экономии, в связи с чем существует потребность в реализации реальных проектов создания промышленных и гражданских объектов на базе цифровых технологий и формулирования методов оценки экономической эффективности внедрения цифровых технологий в управление активами. Также практический интерес представляет анализ изменения времени опытной эксплуатации в зависимости от степени внедрения и проработки цифрового актива на всех стадиях жизненного цикла.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Matarneh S.T., Danso-Amoako M., Al-Bizri S., Gaterell M., Matarneh R.** Building information modeling for facilities management: A literature review and future research directions // *Journal of Building Engineering*. 2019. No. 24. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.100755.

[2] **Azhar S.** Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry // *Leadership and management in engineering*. 2011. No. 11–3. P. 241–252. DOI: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127

- [3] **Abatecola G. [et al.]**. Real estate management: past, present, and future research directions // *International Journal of Globalization and Small Business*. 2012. No. 5–1–2. P. 98–113. DOI: 10.1504/IJGSB.2013.050485
- [4] **Lu Q., Xie X., Heaton J., Parlikad A.K., Schooling J.** From BIM towards digital twin: Strategy and future development for smart asset management // *Studies in Computational Intelligence*. 2020. No. 853. P. 392–404. DOI: 10.1007/978-3-030-27477-1\_30
- [5] **Lin Y.C., Lin C.P., Hu H.T., Su Y.C.** Developing final as-built BIM model management system for owners during project closeout: A case study // *Advanced Engineering Informatics*. 2018. No. 36. P. 178–193. DOI: 10.1016/j.aei.2018.04.001.
- [6] **Ольховский Г.Г. [и др.]**. Результаты тепловых испытаний и опыт наладки головной газотурбинной установки ГТЭ-150 на ГРЭС-3 «Мосэнерго» // *Теплоэнергетика*. 1996. № 4. С. 15–22.
- [7] **Hsu H.C., Chang S., Chen C.C., Wu I.C.** Knowledge-based system for resolving design clashes in building information models // *Automation in Construction*. 2020. No. 110. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.103001.
- [8] **Devetakovic M., Radojevic M.** Facility management: a paradigm for expanding the scope of architectural practice // *International Journal of Architectural Research: ArchNet-IJAR*. 2007. No. 1–3. P. 127–139.
- [9] **Love P.E.D., Matthews J.** The ‘how’ of benefits management for digital technology: From engineering to asset management // *Automation in Construction*. 2019. No. 107. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102930.
- [10] **Barlish K., Sullivan K.** How to measure the benefits of BIM – A case study approach // *Automation in Construction*. 2012. No. 24. P. 149–159. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.02.008
- [11] **Volk R., Stengel J., Schultmann F.** Building Information Modeling (BIM) for existing buildings – Literature review and future needs // *Automation in Construction*. 2014. No. 38. P. 109–127. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.023
- [12] **Боровков А.И., Рябов Ю.А.** Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки // *Цифровая трансформация экономики и промышленности: сб. тр. конф. ИНПРОМ-2019 / под. ред. А.В. Бабкина*. СПб.: СПбПУ, 2019. С. 234–245.
- [13] **Боровков А.И. [и др.]**. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. Краткий доклад. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. 62 с.
- [14] **Kovacic I., Zoller V.** Building life cycle optimization tools for early design phases // *Energy*. 2015. No. 92. P. 409–419. DOI: 10.1016/j.energy.2015.03.027
- [15] **Wang Y. [et al.]**. Engagement of facilities management in design stage through BIM: framework and a case study // *Advances in Civil Engineering*. 2013. No. 2013. DOI: 10.1155/2013/189105.
- [16] **Pärn E.A., Edwards D.J., Sing M.C.P.** The building information modelling trajectory in facilities management // *Automation in Construction*. 2017. No. 75. P. 45–55.
- [17] **Baronin S.A., Yankov A.G., Bizhanov S.A.** Assessing the cost of real estate lifecycle contracts in Russias present-day economy and the characteristics of the European experience // *Life science journal*. 2014. No. 11–8s. P. 249–253.
- [18] **Баденко В.Л., Ядыкин В.К.** Цифровая трансформация промышленности и предприятий: роль и место ВІМ технологий // *Цифровая трансформация экономики и промышленности: сб. тр. Конф. ИНПРОМ-2019 / под. ред. А.В. Бабкина*. СПб.: СПбПУ, 2019. С. 506–516.
- [19] **Cavka H.B., Staub-French S., Poirier E.A.** Developing owner information requirements for BIM-enabled project delivery and asset management // *Automation in Construction*. 2017. No. 83. P. 169–183. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.006
- [20] **Manavalan E., Jayakrishna K.** A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements // *Computers & Industrial Engineering*. 2019. No. 127. P. 925–953. DOI: 10.1016/j.cie.2018.11.030.
- [21] **Olawumi T.O., Chan D.W.M.** Critical success factors for implementing building information modeling and sustainability practices in construction projects: A Delphi survey // *Sustainable Development*. 2019. No. 27–4. P. 587–602. DOI: 10.1002/sd.1925.
- [22] **Badenko V. [et al.]**. Comparison of software for airborne laser scanning data processing in smart city applications // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019. No. 42–5/W2. P. 9–13. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-5-W2-9-2019
- [23] **Badenko V. [et al.]**. Scan-to-BIM methodology adapted for different application // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019. No. 42–5/W2. P. 1–7. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-5-W2-1-2019.
- [24] **Badenko V., Volgin D., Lytkin S.** Deformation monitoring using laser scanned point clouds and BIM // *MATEC Web of Conferences*. 2018. No. 245. DOI: 10.1051/mateconf/201824501002.
- [25] **Badenko V., Zotov D., Fedotov A.** Hybrid processing of laser scanning data // *E3S Web of Conferences*. 2018. No. 33. DOI: 0.1051/e3sconf/20183301047.

**БАДЕНКО Владимир Львович.** E-mail: vbadenko@gmail.com

**БОЛЬШАКОВ Николай Сергеевич.** E-mail: nikolaybolshakov7@gmail.com

**ФЕДОТОВ Александр Александрович.** E-mail: alexandrefedotov@gmail.com

**ЯДЫКИН Владимир Константинович.** E-mail: v.yadikin@gmail.com

*Статья поступила в редакцию: 17.01.2020*

## REFERENCES

- [1] **S.T. Matarneh, M. Danso-Amoako, S. Al-Bizri, M. Gaterell, R. Matarneh** Building information modeling for facilities management: A literature review and future research directions, *Journal of Building Engineering*, 24 (2019). DOI: 10.1016/j.jobe.2019.100755.
- [2] **S. Azhar**, Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry, *Leadership and management in engineering*, 11–3 (2011) 241–252. DOI: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127
- [3] **G. Abatecola [et al.]**, Real estate management: past, present, and future research directions, *International Journal of Globalization and Small Business*, 5–1–2 (2012) 98–113. DOI: 10.1504/IJGSB.2013.050485
- [4] **Q. Lu, X. Xie, J. Heaton, A.K. Parlikad, J. Schooling**, From BIM towards digital twin: Strategy and future development for smart asset management, *Studies in Computational Intelligence*, 853 (2020) 392–404. DOI: 10.1007/978-3-030-27477-1\_30
- [5] **Y.C. Lin, C.P. Lin, H.T. Hu, Y.C. Su**, Developing final as-built BIM model management system for owners during project closeout: A case study, *Advanced Engineering Informatics*, 36 (2018) 178–193. DOI: 10.1016/j.aei.2018.04.001.
- [6] **G.G. Olkhovskiy [et al.]**, Rezultaty teplovykh ispytaniy i opyt naladki golovnoy gazoturbinnoy ustanovki GTE-150 na GRES-3 «Mosenergo» [The results of thermal tests and the commissioning experience of the GTE-150 head gas turbine unit at Mosenergo GRES-3], *Teploenergetika*, 4 (1996) 15–22.
- [7] **H.C. Hsu, S. Chang, C.C. Chen, I.C. Wu**, Knowledge-based system for resolving design clashes in building information models, *Automation in Construction*, 110 (2020). DOI: 10.1016/j.autcon.2019.103001.
- [8] **M. Devetakovic, M. Radojevic**, Facility management: a paradigm for expanding the scope of architectural practice, *International Journal of Architectural Research: ArchNet-IJAR*, 1–3 (2007) 127–139.
- [9] **P.E.D. Love, J. Matthews**, The ‘how’ of benefits management for digital technology: From engineering to asset management, *Automation in Construction*, 107 (2019). DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102930.
- [10] **K. Barlish, K. Sullivan**, How to measure the benefits of BIM – A case study approach, *Automation in construction*, 24 (2012) 149–159. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.02.008
- [11] **R. Volk, J. Stengel, F. Schultmann**, Building Information Modeling (BIM) for existing buildings – Literature review and future needs, *Automation in construction*, 38 (2014) 109–127. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.023
- [12] **A.I. Borovkov, Yu.A. Ryabov**, Tsifrovyye dvoyniki: opredeleniye, podkhody i metody razrabotki [Digital twins: definition, approaches and development methods]. Babkin A.V. (Ed.). *Tsifrovaya transformatsiya ekonomiki i promyshlennosti* [Digital transformation of economics and industry], Proceedings of the conference INPROM-2019. St. Petersburg, SPbPU, (2019) 234–245.
- [13] **A.I. Borovkov [et al.]**, Tsifrovyye dvoyniki v vysokotekhnologichnoy promyshlennosti [Digital twins in the high-tech industry], Report. St. Petersburg, POLITEKKh-PRESS, 2019.
- [14] **I. Kovacic, V. Zoller**, Building life cycle optimization tools for early design phases, *Energy*, 92 (2015) 409–419. DOI: 10.1016/j.energy.2015.03.027
- [15] **Y. Wang [et al.]**, Engagement of facilities management in design stage through BIM: framework and a case study, *Advances in Civil Engineering*, 2013 (2013). DOI: 10.1155/2013/189105.
- [16] **E.A. Pärn, D.J. Edwards, M.C.P. Sing**, The building information modelling trajectory in facilities management, *Automation in construction*, 75 (2017) 45–55.
- [17] **S.A. Baronin, A.G. Yankov, S.A. Bizhanov**, Assessing the cost of real estate lifecycle contracts in Russias present-day economy and the characteristics of the European experience, *Life science journal*, 11–8s (2014) 249–253.
- [18] **V.L. Badenko, V.K. Yadykin**, Tsifrovaya transformatsiya promyshlennosti i predpriyatiy: rol i mesto BIM tekhnologiy [Digital transformation of industry and enterprises: the role and place of BIM technologies]. Babkin A.V. (Ed.), *Tsifrovaya transformatsiya ekonomiki i promyshlennosti* [Digital transformation of economics and industry]. Proceedings of the conference INPROM-2019. St. Petersburg, SPbPU, (2019) 506–516.
- [19] **H.B. Cavka, S. Staub-French, E.A. Poirier**, Developing owner information requirements for BIM-enabled project delivery and asset management, *Automation in construction*, 83 (2017) 169–183. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.006
- [20] **E. Manavalan, K. Jayakrishna**, A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements, *Computers & Industrial Engineering*, 127 (2019) 925–953. DOI: 10.1016/j.cie.2018.11.030.
- [21] **T.O. Olawumi, D.W.M. Chan**, Critical success factors for implementing building information modeling and sustainability practices in construction projects: A Delphi survey, *Sustainable Development*, 27–4 (2019) 587–602. DOI: 10.1002/sd.1925.

[22] **V. Badenko [et al.]**, Comparison of software for airborne laser scanning data processing in smart city applications. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42–5/W2 (2019) 9–13. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-5-W2-9-2019

[23] **V. Badenko [et al.]**, Scan-to-BIM methodology adapted for different application. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial

Information Sciences, 42–5/W2 (2019) 1–7. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-5-W2-1-2019.

[24] **V. Badenko, D. Volgin, S. Lytkin**, Deformation monitoring using laser scanned point clouds and BIM, MATEC Web of Conferences, 245 (2018). DOI: 10.1051/mateconf/201824501002.

[25] **V. Badenko, D. Zotov, A. Fedotov**, Hybrid processing of laser scanning data, E3S Web of Conferences, 33 (2018). DOI: 0.1051/e3sconf/20183301047.

**BADENKO Vladimir L.** E-mail: vbadenko@gmail.com

**BOLSHAKOV Nikolai S.** E-mail: nikolaybolshakov7@gmail.com

**FEDOTOV Alexander A.** E-mail: alexandrefedotov@gmail.com

**YADYKIN Vladimir K.** E-mail: v.yadikin@gmail.com