СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ. ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ

УДК 69:004

DOI: 10.22227/2305-5502.2019.4.1

Интеграция технологии датчиков отслеживания в информационное моделирование зданий и сооружений

Т.А. Сивак, П.Ю. Кваша

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);
г. Санкт-Петербург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен вопрос связи информационной модели сооружения с реальным зданием. Эта тема включает в себя средства и методы отслеживания повреждений и различных воздействий как внутри, так и снаружи здания. С помощью внедрения технологий информационного моделирования в российское строительство, обслуживание и реконструкция сооружений выйдет на новый уровень. Для этого необходимо разобраться в технологии связи информационной модели с реальным зданием, которая осуществляется посредством нанодатчиков, установленных по всей конструкции.

Материалы и методы. Проанализированы имеющиеся научные работы об интеграции BIM в процесс реального строительства и обоснована актуальность и необходимость развития данной области в современном мире.

Результаты. Исследовано применение информационной модели в реконструкции объектов архитектурного строительства. Представлен способ сканирования реальной модели здания для создания информационной модели. Приведены примеры использования нанодатчиков для синхронизации реального объекта строительства с его информационной моделью. Установлена важность ориентирования в здании с помощью связи GIS и BIM. В этой обзорной статье хотелось бы показать важность информационного моделирования для России.

Выводы. Представлена возможность объединения таких технологий как фотограмметрия, лазерное сканирование и возможности программного обеспечения ReCap с автоматизированным мониторингом по изображениям, сделанным с различных устройств. Сделан вывод о возможности интеграции единого информационного поля в область лазерного сканирования и область сочетания технологий обнаружения и определения дальности света и построения BIM. Предложено объединение технологий обнаружения и облачного доступа к информационным моделям с радиочастотными идентификаторами. Выявлена возможность интеграции трех технологий: BLE-датчики, RFID-сканеры и автоматизированный мониторинг по изображениям в область оценки повреждений BIM после землетрясений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: модели BIM, BIM-мониторинг, связь BIM с мониторингом, обнаружение повреждений, автоматизированная система мониторинга, интеллектуальные датчики, автоматизированный мониторинг, автоматическое обнаружение повреждений

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сивак Т.А., Кваша П.Ю. Интеграция технологии датчиков отслеживания в информационное моделирование зданий и сооружений // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 4. Ст. 1. URL: <http://ns-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.4.1

Integration of tracking sensor technology into the information modeling of buildings and structures

Tatyana A. Sivak, Pauline Yu. Kvasha

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation

Introduction. The issue of communication of information model of structure with real building is under consideration. This matter includes damage and various impacts both inside and outside the building tracking tools and techniques. With the help of the adoption of information modeling technologies in the Russian construction industry, maintenance and reconstruction of structures will reach a new level. For this purpose, it is necessary to understand the technology of communication of the information model with the real building, which is carried out by means of nanosensors installed throughout the structure.

Materials and Methods. Available research papers about integration of BIM into the process of real construction are analyzed and the urgency and necessity of development of the given industry in the modern world are proved.

Results. Application of information model in reconstruction of architectural engineering sites is investigated. The technique of real model scanning of a building for the creation of information model is presented. The examples of nanosensors use for synchronization of the real construction site with its information model are given. The importance of orientation in the building using GIS and BIM communication has been established. In this review, I would like to show the importance of information modeling for Russia.

Conclusions. The opportunity to combine such technologies as photogrammetry, laser scanning and ReCap software features with automated monitoring of images taken from various devices is presented. It was concluded that it is possible to integrate a single information field into the area of laser scanning and the area of combination of technologies of detection and determination of light range and BIM construction. It is proposed to combine technologies of detection and cloud access to information models with radio-frequency identifiers. Possibility of integration of three technologies is revealed: BLE-sensors, RFID-scanners and automated image monitoring in the area of BIM damage assessment after earthquakes.

KEYWORDS: BIM models, BIM-monitoring, connection BIM with monitoring, damage detection, automated monitoring system, smart sensors, automated monitoring, automated damage detection

FOR CITATION: Sivak T.A., Kvasha P.Yu. Integration of tracking sensor technology into the information modeling of buildings and structures. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2019; 9(4):1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.4.1 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для нашей страны все актуальнее становится проблема информационного моделирования. Существует множество технологий, с помощью которых можно отслеживать различные факторы, происходящие снаружи или внутри конструкции, такие как освещенность, влажность, температурный фактор, степень нагрузки на конструкцию, степень повреждения различных частей здания. Благодаря данным технологиям мониторинга появляется возможность обеспечить наилучшее обслуживание сооружений, а также отслеживать и регулировать уровень комфорта пребывания в нем людей. Однако в России информационное моделирование не используется активно, из-за чего возникает ряд проблем: отсутствие датчиков разрушения конструкций — возникновение большого количества аварийных зданий, а также не своевременная реконструкция, что подразумевает гораздо большие затраты на это; отсутствие планов этажей коммерческих сооружений для посетителей в свободном доступе — проблемы с ориентированием посетителей внутри здания. С помощью внедрения технологий информационного моделирования в российское строительство, обслуживание и реконструкция сооружений выйдет на новый уровень. Для этого необходимо разобраться в технологии связи информационной модели с реальным зданием, которая осуществляется посредством нанодатчиков, установленных по всей конструкции.

Информационное моделирование позволяет сократить время и улучшить качество проектирования различных сооружений. А также помогает более ка-

чественно поддерживать конструкцию в хорошем состоянии на протяжении всего срока эксплуатации. С разработкой систем информационного моделирования зданий и сооружений проектирование сможет быть реализовано с наименьшими затратами времени и человеческих ресурсов.

Несмотря на то, что в России информационное моделирование считается, в первую очередь, инструментом для сокращения времени проектирования, а сокращение человеческих ресурсов, участвующих в проектировании, — это сомнительный шаг. Это далеко не так. Технологии информационного моделирования позволяют своевременно обнаруживать нарушения в эксплуатации и устранять вредные для конструкции воздействия, которые видны в режиме реального времени. Несомненно, для контроля этого процесса необходимы человеческие ресурсы. Однако их количество в совокупности с данной технологией будет в несколько раз экономически выгоднее, чем обслуживание здания без использования современных методов.

Часто упускается из вида экономическая составляющая процесса строительства и обслуживания зданий и сооружений. Так как для введения современных методов и нового оборудования необходимо будет совершить дополнительные затраты, то возникает мнение о том, что этот путь станет экономически невыгодным для сферы строительства. Однако не все задумываются о том, что в очень скором времени эти затраты окупятся и позволят поддерживать здания в наилучшем возможном состоянии.

Основной целью этого исследования является анализ уже имеющихся научных работ об ин-

теграции BIM в процесс реального строительства и обоснование актуальности и необходимости развития данной области в современном мире. Для этого были выполнены следующие задачи: изучение исследовательских статей о различных видах датчиков, применяющихся в строительстве зданий и сооружений, вопросов, которые уже были исследованы и решены в этой области; исследование научных работ о различных нестандартных способах применения BIM-моделей, как в строительстве, так и в повседневной жизни, проблем, которые уже были исследованы и решены в этой области; анализ возможных сочетаний выше упомянутой темы и использование ее связи при строительстве и дальнейшей эксплуатации зданий.

Исследования в области информационного моделирования ведутся уже несколько десятилетий. За этот немалый срок было введено достаточно новых технологий, чтобы, объединив их, можно было создать что-то совершенно новое и необходимое в области строительства. Задача состоит в том, чтобы объединить разработки в области информационного моделирования и в области программируемых систем, таких как датчики отслеживания повреждений и других различных факторов.

Быстрое развитие технологий стимулирует изменения в строительной отрасли. Происходит непрерывная оцифровка всех объектов в этой сфере, что дает возможность пересмотреть существующий дизайн конструкций для будущего развития. Несмотря на значительные достижения в области информационного моделирования, до сих пор не везде активно используются данные технологии. Этот вопрос освещается в статье «Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges» [1].

Для достижения наилучших результатов в различных сферах деятельности объединение усилий является отличным решением. Так, некоторые страны, например, США, Великобритания и Южная Корея объединились в целях разработок в сфере информационного моделирования. Эти разработки подразумевали более точную визуализацию трехмерного дизайна, координацию и планирование строительных работ, расширение обмена информацией и управления зданиями. В статье «Critical success factors for implementing building information modelling (BIM): A longitudinal review» [2] рассматриваются факторы, обеспечивающие основу для создания стандартной модели оценки, имеющей успех внедрения информационной модели. Также это служит основой для дальнейшего улучшения отрасли.

Информационное моделирование является необходимым не только для процесса проектирования и строительства сооружений, но и для обслуживания объектов строительства. В работе «Integration of BIM and GIS in sustainable built en-

vironment: A review and bibliometric analysis» [3] представлены исследования в области связи BIM и GIS технологий. Дается всеобъемлющий обзор внедрения связи информационного моделирования и географической информационной системы в устойчивые среды с целью анализа с четырех точек зрения: технологии для интеграции данных, применение в течение всего жизненного цикла, управление энергопотреблением зданий и управление городским хозяйством. Представлены три типичных режима внедрения BIM-GIS: основа BIM — поддержка GIS, основа GIS — поддержка BIM, BIM и GIS участвуют в равной степени. Эта классификация произведена на основе различных доминирующих позиций двух технологий. Кроме того, обсуждаются различные направления исследований и применения интеграции BIM-GIS в будущем. Данный обзор может служить картой для исследователей, сосредоточенных на исследованиях внедрения BIM-GIS.

Однако технологии информационного моделирования нельзя назвать самодостаточными, в этой сфере, как и в других существует ряд проблем, которые представлены в обзоре [4]. В этом документе рассматриваются проблемы и недостатки, возникающие в процессе взаимодействия информационной и инженерной модели, предлагая подробную классификацию этих проблем и их доступные решения. Кроме того, рассматриваются некоторые проблемы в применении информационной модели для проектирования схемы энергопотребления. Эта статья дает возможность исследовать применение корректирующих средств программного обеспечения, аналогичные тем, которые представлены в данной работе.

В работе «A combined scientometric and conventional literature review to grasp the entire BIM knowledge and its integration with energy simulation» [5] рассматриваются основные темы исследований и тенденций в области информационных моделей. Также предлагается подробный обзор интеграции информационного моделирования и моделирования энергоэффективности зданий.

Во-первых, выполняется наукометрический анализ, который позволяет идентифицировать образцы исследований и возникающие тенденции в конкретной области исследований, чтобы разделить большое количество статей, составляющих литературу о BIM, на несколько частей, каждый из которых представляет определенную тему.

Во-вторых, проводится анализ различных аспектов, относящихся к интеграции информационного моделирования с моделированием энергоэффективности зданий, чтобы подчеркнуть эволюцию взаимодействия между BIM и инструментами моделирования энергии. Затем осуществляется обзор различных применений такой интеграции для выявления потенциальных пробелов в знаниях. В этом

исследовании освещаются шесть основных тем исследования BIM, посвященных внедрению и преимуществам BIM: управлению с помощью BIM, мониторингу прогресса и встроенному моделированию, функциональной совместимости, анализу жизненного цикла и моделированию энергии.

Однако для темы исследования недостаточно знаний только об информационных и инженерных моделях. Так как для полноценной связи информационной и инженерной модели необходимо наличие датчиков на реальной конструкции.

Обнаружение усталостного повреждения и прогнозирование усталостного ресурса являются важными технологическими проблемами как в академической, так и в промышленной областях. Многочисленные методы были предложены и разработаны для обнаружения раннего усталостного повреждения в конструктивных элементах в работе «Early fatigue damage detecting sensors — A review and prospects» [6]. В этой статье представлен краткий обзор современного состояния датчиков усталостного повреждения. Представлены и обсуждены восемь типов существующих датчиков усталостного повреждения, основанных на различных принципах обнаружения. Кроме того, предложена новая концепция использования углеродных пленок в качестве датчика контроля усталости. Предварительные экспериментальные результаты показывают, что металлокерамические алмазоподобные углеродные пленки (Me-DLC) с оптимальным составом и микроструктурой будут хорошими материалами-кандидатами для датчиков контроля усталости.

В числе последних разработок в области отслеживающих устройств значительное внимание привлекли гибкие датчики, которые рассматриваются в исследовании «Programmable three-dimensional advanced materials based on nanostructures as building blocks for flexible sensors» [7]. В этом обзоре обсуждается методология изготовления трехмерных многоуровневых структур и объясняется, как данные программируемые материалы способны повысить производительность гибких датчиков. Поскольку электрические, оптические и механические свойства программируемых материалов зависят от их структуры, формы и размера, эти факторы имеют решающее значение в конструкции и функционировании гибких датчиков. Также приведено обсуждение не только недавно разработанных конструктивных материалов и их потенциальных применений в гибких датчиках, но также ключевых проблем будущих направлений в этой области.

Развитие методов отслеживания состояния конструкций привело к созданию различных датчиков, которые могут быть эффективным индикатором повреждений. Из-за воздействий окружающей среды или электромагнитных помех и необходимости постоянного источника энергии традиционные датчики не могут обеспечить точные и непрерывные

измерения. В свете этих событий были разработаны новые и улучшенные датчики, а также беспроводные технологии для содействия процессу мониторинга. При необходимости обнаружения более одного параметра повреждения, мультиплексные датчики были основным интересом исследователей. В статье «A review of some advanced sensors used for health diagnosis of civil engineering structures» [8] рассматриваются различные датчики, используемые для определения деформации и коррозии. Краткое сравнительное исследование было выполнено и представлено в данном обзоре. Мультиплексный волоконно-оптический датчик оказался достаточно эффективным. Метод оптимального размещения датчика, разработанный для диагностики повреждений низкого уровня, представляет собой метод повторяющейся улучшенной уменьшающей системы (IIRS).

В настоящее время изучается множество вариантов структурного мониторинга работоспособности для обеспечения надежности конкретных инфраструктур на разных этапах их срока службы. В работе «A review on five key sensors for monitoring of concrete structures» [9] представлены последние достижения в области датчиков, разработанных для мониторинга состояния конкретной инфраструктуры. Основное внимание в этом обзоре уделяется датчикам, разработанным для мониторинга параметров, включая температуру, влажность, pH, скорость коррозии и напряжение/деформацию, а также датчикам, специально изготовленным на основе волоконно-оптических, брэгговских решеток, пьезоэлектрических, электрохимических, беспроводных и самочувствительных технологий. Несколько примеров разработанных конкретных датчиков контроля (от лабораторных концепций до коммерциализированных продуктов) вместе с их различными преимуществами и недостатками, а также проблемами открытых исследований будут обсуждаться в этой статье.

Датчики на цементной основе все чаще используются в интеллектуальном бетоне для определения и контроля повреждений и трещин посредством измерения удельного электрического сопротивления бетона. В статье «Piezoresistive properties of cement-based sensors: Review and perspective» [10] рассматриваются основные концепции, ключевые компоненты, производственный процесс, измерения пьезорезистивности и основные области применения датчиков на основе цемента. Рассмотрены различные материалы, механические и экологические факторы, влияющие на пьезорезистивные свойства бетона. Ожидается, что этот обзор предоставит не только ориентир для новых исследователей, чтобы исследовать и участвовать в связанных исследованиях, но также и для опытных исследователей, чтобы выполнить трансформационные исследования в пьезорезистивные датчики на основе цемента.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основным методом данной работы являлся поиск статей в электронных библиотеках по следующим ключевым словам: BIM-models, BIM-monitoring, connection BIM with monitoring, damage detection, automated monitoring system, smart sensors, automated monitoring, automated damage detection. Найденные статьи должны были включать в себя такие темы, как BIM-моделирование и отслеживающие датчики. Касательно датчиков, основной интерес представляли те виды, которые можно было бы применять в строительстве, в особенности, на датчики, которые передают информацию в облачное хранилище для ее дальнейшей обработки, так как они наиболее пригодны для интеграции в информационную модель.

Далее все виды статей были классифицированы, и составлены схемы того, как можно объединить данные темы и применить их к процессу строительства.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Датчики

В данном разделе рассматриваются уже разработанные технологии в области отслеживающих датчиков и возможность их совместного использования.

Существуют методы определения повреждений с целью обеспечения своевременной и качественной реставрации зданий, а также памятников культурного наследия [11, 12]. Для соблюдения этого метода, в первую очередь, необходимо проанализировать в каких частях здания наиболее часто появляются определенного рода повреждения. Далее необходимо в соответствующих местах установить сенсоры, помогающие выявлять эти повреждения. Таким образом удастся сделать наиболее грамотную оценку необходимости реставрации сооружения.

На данный момент разработана система расположения датчиков для отслеживания влажности, освещенности, движения и количества CO_2 [13]. Схема расположения представлена на рис. 1. Концепция данной схемы применима не только к управлению системами внутри здания, но также и для управления такой технологией, как умный город [14].

Одной из наиболее инвестируемых современных систем является беспроводной датчик влажности SmartRock2. Бетон — это материал, проявляющий различные электромагнитные свойства при различных условиях влажности [15]. Этот водонепроницаемый датчик находится на глубине 5 см в бетонной опалубке. Беспроводная технология Bluetooth позволяет контролировать данные через приложение. Устройство точно прогнозирует прочность бетона.

Этот метод полезен как в удаленном производстве, таком как технологии бетонной 3D-печати, так и в реальном времени на месте строительства.

В последние годы наблюдается непрерывный процесс снижения цен на микропроцессоры [16]. Интеллектуальные датчики становятся более популярны, благодаря мощным и недорогим усовершенствованным однокристальным микроконтроллерам. Центральный процессор — это недорогой и эффективный 32-битный микроконтроллер, имеющий следующие особенности: максимальная частота 72 МГц, память SRAM 20 КБ, флэш-память 128 КБ, аналого-цифровой 12 бит конвертер. Схема функциональных блоков измерительных приборов показана на рис. 2. Датчики подключены к процессору с помощью последовательного периферийного интерфейса (SPI). Универсальный асинхронный приемник может подключать до трех дополнительных устройств. Каждое измеряющее устройство имеет собственный настраиваемый IP-адрес.

Базовая версия измерительного прибора содержит два датчика влажности и температуры с цифровыми датчиками SHT15. В случае цифровых датчиков аналого-цифровой преобразователь встроен в одну микросхему с датчиком, поэтому с передачей аналоговых сигналов никаких дополнительных ошибок не возникает, и датчик может быть размещен в относительно отдаленном от основной платы месте. Благодаря довольно малым размерам ($7,5 \times 5 \times 2,6$ мм) сенсорной микросхемы, сенсорный зонд также может быть очень маленьким, и поэтому его легко установить почти везде. Датчик обеспечивает хорошую точность и низкое энергопотребление. Были разработаны три независимые платформы для сбора измеренных значений.

В 2014 г. разработаны и смоделированы температурные поверхностные датчики, имеющие виртуальную поверхность [17]. Показания на датчиках соответствовали показаниям на поверхности здания. Их основными плюсами является то, что они могут прогнозировать температуру на поверхности стен сооружения, производительность датчиков улучшена, а время работы с наилучшей производительностью составляет один месяц.

Разработка эффективных систем мониторинга с минимумом недостатков является достаточно актуальной задачей.

Одно из решений этой проблемы — разработка интеллектуальных материалов, способных реагировать на изменение геометрических размеров, распределение локальных напряжений, образование и развитие трещин, содержание влаги и даже наличие хлоридов [18]. Успешная реализация этого материала возможна с помощью использования углеродных наноструктур (графит, графен, нанотрубки и нановолокно) по двум схемам: однородное распределение в объеме материала конструкции или

Рис. 1. Система расположения датчиков для отслеживания влажности, освещенности, движения и количества CO_2

Рис. 2. Схема функциональных блоков измерительных приборов

в составе материала покрытия, нанесенного на поверхность диагностируемой структуры.

Несмотря на значительное количество исследований в этой области, можно с уверенностью отметить, что проблема до сих пор насущна. Доказательством этого могут быть противоречивые результаты исследований различных авторов, в которых механические и электропроводные свойства бетонов, армированных углеродными нанотрубками, могут значительно различаться. Обработку функциональной группы проводили кипячением в растворе серной и азотной кислот. Формирование на поверхности окисгенированных групп привело к повышению упрочняющих свойств бетона при сжатии и изгибе до 19 и 25 % соответственно.

Одной из недавних разработок являются датчики BLE [19]. Одним из основных преимуществ BLE является его новая топология сети. Классический Bluetooth технология была основана на специальных пикосетях, которые используют одно ведущее устройство и до семи ведомых устройств. BLE не ограничивает количество устройств для связи, также не требует сопряжения с другими устройствами BLE. По этой причине гораздо больше устройств могут одновременно быть в сопряжении с несколь-

кими главными устройствами. По результатам лабораторных испытаний, более 30 датчиков BLE (BLE версия 4.0) может одновременно обнаруживаться как iPhone, так и iPad.

Неотъемлемой частью сбора информации является информационное поле и модель сооружения по результатам приборов. Рассмотрим основные этапы процесса создания информационного поля [20].

1. На первом этапе производится трехмерное лазерное сканирование существующего объекта.

Результат сканирования — оцифрованное «облако точек» (рис. 3).

Следует особо отметить, что с помощью лазерного сканера можно получить только облако точек, т.е. массив данных, содержащий информацию о XYZ-координатах отсканированных точек объекта. Облако точек само по себе не является моделью здания — это только исходные данные о точной геометрии объекта.

2. Далее оцифрованное «облако точек» конвертируется в высокоточную геометрическую CAD-модель здания (рис. 4).

Данный этап — самый сложный и трудоемкий, поскольку к настоящему времени не разработано

Рис. 3. Оцифрованное «облако точек»

Рис. 4. Геометрическая CAD-модель здания

программного обеспечения, предназначенного для конвертации облаков точек строительных объектов в модели зданий с высокой степенью автоматизации.

3. На данном этапе из полученной модели здания можно получить обмерные чертежи объекта (рис. 5) в полностью автоматическом режиме.

4. Проведение прочностных, теплотехнических, аэродинамических и других расчетов по необходимости. Предложенная методика автоматизации оценки технического состояния позволяет минимизировать ошибки на этапе обмерных работ при создании расчетной схемы и расчете конструкций зданий и сооружений.

Другим примером использования информационного поля является применение новых технологий эксплуатации конструкций и инженерных систем. Объектом исследования является: автоматизированное управление и мониторинг инженерных систем здания. Под понятие «инженерные» попадают следующие системы: вентиляции; кондиционирования; теплоснабжения; водоснабжения; холодоснабжения; электроснабжения; электроосвещения;

пожарной сигнализации; охранной сигнализации; видеонаблюдения; видеодомофонной связи; системы оповещения и управления эвакуацией; контроля доступа, телекоммуникации.

Все перечисленные системы объединяются в единое информационное поле, в свою очередь базирующееся на устройствах четырех групп:

- управляющее устройство (контроллер – хаб), соединяющее все элементы друг с другом и связывающее систему с устройствами пользователей;
- сенсоры (датчики) — устройства, получающие информацию о внешних условиях;
- устройства для обработки и хранения данных, включая использование «облачных» сервисов;
- исполнительные устройства (актуаторы) — непосредственно исполняющие команды. Это группа, в которую входят автоматические выключатели, автоматические розетки, автоматические клапаны для труб, сирены, климат-контроллеры.

Организация мониторинга здания по описанной технологии предоставляет обслуживающей организации преимущество по отношению к тра-

Рис. 5. Обмерные чертежи объекта

Рис. 6. Организация мониторинга здания

диционному подходу к мониторингу состояния зданий и сооружений. Для собственника здания интеграция системы в перспективе позволит экономить 30 % средств на эксплуатацию, с учетом величины капитальных вложений в интеграцию автоматизированной системы, окупаемость составляет до 5 лет и в конечном итоге система автоматизированного мониторинга способна окупиться за несколько сезонов обычного наблюдения.

Для выявления повреждений зданий часто используют метод, основанный на сканировании изображений. Один из вариантов применения данного метода — использование снимков со спутника [21]. Перед началом работы со снимками их необходимо обработать, т.е. удалить следы атмосферных явлений, видимых на снимках. Спутниковые снимки, получаемые с помощью дистанционного зондирования, дают понимание ущерба для отдельных структур здания.

Смещение и деформация также могут быть измерены с помощью зрительных методов, позволяющих проводить оценку структурного состояния. Мониторинг часто осуществляется с использованием проводных или беспроводных контактных датчиков.

Однако ключевые трудности в данном методе заключаются в преобразовании сигналов и показаний. Автоматизированные структурные проверки требуют комплексного понимания контекста изображений. Это означает, что невозможно исключить из данного процесса использование человеческих ресурсов. Смещения и повреждения часто бывают небольшими и их трудно уловить только с помощью спутниковых снимков.

С момента зарождения облачных технологий и до сегодняшнего дня они меняют устоявшиеся информационные процессы за счет быстрого роста вычислительных мощностей компьютеров и развития интернет-технологий передачи обработки и хранения информации.

Применение широкополосных интернет-каналов позволяет объединять различные информационные технологии, используя так называемые облачные вычисления. Востребованность облачных вычислений обусловлена тремя причинами: масштабируемость, простота использования и доступная цена. Использование реальных возможностей облачных вычислений создает из множества автономных файлов и документов интегрированную сетевую совместную модель BIM.

Интегрированной модели требуется активный BIM-сервер, который дает возможность в режиме реального времени сотрудничать с участниками проекта, и обеспечивает доступ в реальном времени к живой модели BIM любых заинтересованных сторон с помощью программных приложений, работающих на различных, в том числе мобильных, устройствах.

Вышеупомянутый активный сервер BIM требует многопользовательского программного обеспечения, чтобы иметь возможность масштабирования и полностью использовать «облачные» возможности как хранилища данных, так и вычислительной мощности.

Система RFID (Radio Frequency Identification) — это современная технология идентификации объектов, основанная на применении радиочастотного электромагнитного излучения для автоматизированного считывания и записывания данных учета и контроля на устройство [15, 22].

Основная цель этой системы заключается в сборе информации из RFID-меток (транспондеров) в режиме реального времени, использование радиоволновой технологии позволяет обрабатывать данные, даже если транспондеры не находятся в пределах прямой видимости. Считыватели могут получать информацию и находить RFID-метки, которые расположены в диапазоне обнаружения их антенн на расстоянии от 5 м до 300 м. В предлагаемой методике синхронизации в реальном времени данных BIM-модели здания на базе RFID-технологий при реализации процесса выделено четыре этапа:

1. Первый этап — разработка проекта. На этом этапе создается трехмерная BIM-модель объекта строительства.

2. Второй этап — принятие решений о RFID-метках и считывателях. Необходимо определить для меток:

- к каким элементам будут прикреплены метки RFID (колонны, балки, дверные и оконные рамы и т.д.);
- какие неструктурные элементы здания будут помечены;
- когда будут помечаться выбранные элементы;
- для считывателей;
- расположение считывателя на въезде на строительную площадку;
- расписание и считывание RFID-меток портативными считывателями.

3. Третий этап — программное и аппаратное обеспечение процесса передачи данных. На этом этапе должна быть реализована связь RFID-считывателей с моделью BIM через интеллектуальные программные приложения с последующим экспортом в облачное хранилище, обеспечивающее многопользовательский доступ.

4. Четвертый этап — строительство. Основная цель разработки — это возможность оперативного обновления информации, позволяющей на новом уровне осуществлять контроль, управление и планирование ресурсами строительного объекта.

Таким образом, благодаря внедрению RFID-технологий появляются возможности, позволяющие не только существенно увеличить наполняемость BIM-модели реальными данными об объекте строительства в процессе его возведения, но и намно-

го упростить сбор этой информации. Это, в свою очередь, скажется на управлении планированием и управлением ресурсами на строительной площадке, что невероятно важно для повышения эффективности проекта за счет сокращения временных и финансовых затрат.

Исходя из представленных выше исследований, можно теоретически объединить несколько из них в совместное использование. Например, датчики для отслеживания влажности SMARTROCK2 [15] объединить с системой расположения датчиков для отслеживания влажности [13]. Также в эту систему можно внедрить датчики с микропроцессором [16], что позволило бы снизить цену использования всей системы в целом. Также для всех датчиков, представленных выше, была бы полезна технология, основанная на пикосетях [19]. Это позволило бы увеличить количество связей между главными и ведомыми устройствами.

Применение BIM

BIM-исследование зданий

Информационное моделирование зданий BIM приобретает все большее значение в архитектуре и строительстве. В настоящий момент исследования, которые ведутся в этой сфере, ушли в сторону от основной функции (проектирования) и сейчас направлены на мониторинг и обмен различной технической информацией, охватывающей все стадии жизненного цикла проекта. Внедрение BIM-модели в технологию оценки зданий и сооружений является бесспорно важным компонентом для качественной эксплуатации архитектурных объектов [23].

Первостепенную роль для безопасного строительства и эксплуатации зданий имеет структурный анализ сооружений. Структурный анализ — это процесс определения и расчета влияния нагрузок и внутренних сил на каждый элемент здания. Исходя из этого целесообразно интегрировать BIM-модель, состоящую из множества отдельных компонентов, в приложения для структурного анализа. Рассмотрим, как происходит процесс экспорта параметров строительных конструкций из Autodesk Revit в программу для структурного анализа.

1. Сначала процедура использует плагин C #, который извлекает параметры элементов конструкции из файла Revit (рис. 7) и выводит их в файл с расширением «.txt» (рис. 8). В этом файле могут находиться физические свойства материалов, размеры, координаты, форма поперечного сечения и т.д.

2. Затем специальная программа-преобразователь считывает файл, генерирует модель кадра луча и сохраняет информацию в новом формате, совместимом с программой структурного анализа.

3. Эта программа позволяет добавлять вертикальные или горизонтальные нагрузки и момент к любому из узлов каркаса балки (рис. 9). Для структурного анализа используется метод конечных элементов.

Рис. 7. Пример файла .rvt

Рис. 8. Перенос свойств элемента в файл .txt

Рис. 9. Приложение для структурного анализа

Аналогично приложения для структурного анализа могут принимать в качестве входных данных сеточные модели из облаков точек, пример такого процесса изображен на рис. 10.

Некоторые районы Земного шара подвержены высокой сейсмической активности сильнее, чем остальные. На данный момент времени, несмотря на значительные усилия сейсмологов в исследованиях, пока невозможно дать точный по времени прогноз землетрясений, поэтому большое значение имеют исследования об оценке ущерба, нанесенного землетрясениями.

В таких случаях удобно пользоваться BIM-моделью рассматриваемого здания, свойства которой экспортируются в приложения для структурного анализа, где выполняется динамический анализ нелинейной временной истории для определения дрейфа структуры и ускорения. Для моделирования условий загрузки используют исходные данные,

Рис. 10. Модель из облака точек в приложении для структурного анализа

которые относятся к какому-либо землетрясению в истории. Результаты этого анализа служат основой для определения ущерба состояния здания, при этом пользуются программным обеспечением OpenSees. Затем все состояния ущерба по отдельности оцениваются по PACT (Performance Assessment Calculation Tool).

В то же время проводится экологическая оценка жизненного цикла (LCA) для выявления экологических последствий ущерба, нанесенного зданию в результате землетрясения. Рассчитываются общие потери энергии здания на основе вероятности повреждений. BIM может использоваться как универсальный инструмент для оценки сейсмических характеристик здания [24].

Известно, что в последние годы число опасных крупных техногенных катастроф и опасных природных явлений неуклонно растет. Риски чрезвычайных ситуаций несут значительную угрозу для зданий и сооружений. Местоположение разрушений на конкретной территории может быть достаточно точно определено на основе расчетов с использованием моделей геодинамических рисков. Основная идея, положенная в основу таких моделей, связана с описанием, анализом и оценкой сейсмо-деформационных процессов в территориально-динамическом аспекте [25].

Различные исследования сейчас направлены на разработку универсальной модели управления рисками (энергетические риски, строительные риски, ценовые риски, безопасность, вопросы регулирования). Это реализовано в модели, которая включает в себя все виды информации, интегрированные в структуру риска, она охватывает четыре основных аспекта:

1. Дизайн.
2. Моделирование.
3. Принятие решений.

4. Процесс (определяет задачи, которые должны быть выполнены в проектировании зданий для выявления, моделирования и устранения риска).

Рассмотрим пример анализа энергетических рисков, для этого в качестве входных данных используются данные BIM, результатом же являются показатели энергопотребления системы. Необходимо принять показатели рисков равными стандартным отклонениям энергетической нагрузки и энергии и средней недоступности энергосистемы. Каждый риск связан с фактором неопределенности, который обуславливает его существование и с некоторыми данными BIM. Специалист составляет список всех рисков. Служба выборки, которая закодирована с помощью статистического вычислительного инструмента R , выдает N входных данных, они проходят через предварительную обработку и преобразуются в N имитационных моделей. После симуляции постобработка обеспечивает показателям риска нескольких результатов моделирования, здесь N — это значение показателей риска (например, ежегодное потребление энергии). Полученные значения показателей риска затем интерпретируются семантически с помощью онтологии, которая сравнивает их с пороговыми значениями и считает соответствующие риски.

В случае с энергией в качестве входных данных используются несколько образцов данных о погоде и занятости. Для вариационной модели была разработана схема XML. Модель состоит из пяти основных разделов: *область действия, переменные, варианты, ресурсы и метрики*. В этом примере файл здания используется в качестве входных данных вместе с данными о погоде и данными о занятости. Каждый файл данных о погоде состоит из времен-

Рис. 11. Общая оценка состояния BIM-модели

ных рядов для многих переменных, каждый файл данных о занятости содержит график занятости за один год, сохраненный в виде временного ряда. После моделирования всех образцов механизм моделирования предоставляет набор значений показателей рисков [26].

Другой подход к оценке деформаций зданий основан на сочетании технологий обнаружения и определения дальности света (LiDAR) и построении информационных моделей (BIM) [27, 28]. Для того, чтобы в цифровом виде задокументировать текущее состояние здания, применяются классические методы съемки (прохождение, нивелирование и GPS) и дополнительно наземный лазерный сканер (TLS). В результате такой комплексной съемки получаем трехмерное облако точек с высоким разрешением, на которое ссылаются в соответствии с местной геодезической системой отсчета. Это облако точек затем используется для создания трехмерной BIM-модели, которая представляет идеальное состояние здания. Выявить и оценить деформацию частей здания, которые требуют срочного вмешательства, можно с помощью сравнения между трехмерным облаком точек и BIM-моделью. Для достижения этой цели основные части здания в модели BIM (потолки и стены) сравниваются с соответствующими сегментами трехмерного облака точек по нормальным векторам каждой части, при этом составляется «карта расположения повреждений». В данном методе BIM-модель выступает эталоном

здания, а облако точек — реальным состоянием элемента здания (рис. 12).

Исходя из этого следует, что BIM-моделирование не подходит для исследований, в которых нужна высокая точность. Оно влечет за собой потерю важной морфометрической информации, это происходит из-за упрощенного представления трехмерных моделей [29]. Одним из решений этой проблемы является создание новых инструментов и методов, которые позволяют создавать эффективные трехмерные представления, основанные на правильном геометрическом анализе построенной модели.

Именно поэтому в современном мире широкое распространение получило использование технологий дистанционного зондирования для сбора пространственной информации о зданиях, в результате которых получается трехмерная система сбора данных, которая полностью автоматизирована и бесконтактна с анализируемым объектом [30].

Трехмерное лазерное сканирование позволяет досконально передать состояние объекта, вплоть до мельчайших трещин в поверхностях. Его результатом является так называемое «облако точек» с трехмерными координатами. Это наиболее полная и достоверная информация о геометрии объекта на конкретный момент времени [31].

Текущее программное обеспечение BIM недостаточно для управления большими объемами данных, полученными в результате подобных исследований. Для решения этой проблемы в среде Revit

Рис. 12. Сравнение эталонной модели и облака точек

можно использовать плагин GreenSpider, который помогает осуществлять импорт упрощенных облаков, точки которых могут обеспечить более точное моделирование в программном обеспечении BIM [32].

Наряду с лазерным сканированием сейчас динамично развивается фотограмметрия. Это процесс определения формы, размеров, положения и иных характеристик объектов по их фотографиям. Фотограмметрия позволяет получить точное трехмерное представление здания, позволяющие проводить метрические исследования и дополнительные сегментации для связывания информации различной природы, такие как повреждения, трещины, стратиграфические и временные данные на каждом элементе 3D-модели [33].

Основное отличие лазерного сканирования от фотограмметрии заключается в том, что сканеры

позволяют получать данные лишь об интенсивности отраженного сигнала, они приводят их к градациям серого, поэтому можно воспринимать «облако точек» как черно-белую трехмерную дискретную модель. Однако облако точек, представленное таким образом, дает неполное представление об объекте, поскольку информация о цвете полностью отсутствует. Это обстоятельство стало предпосылкой к разработке такой технологии, при которой результаты лазерного сканирования и цифровой фотограмметрии будут совмещены. В результате совмещения данных лазерного сканирования и цифровой съемки можно получить вполне реалистичную цветную дискретную модель [31].

Autodesk ReCap — это семейство настольных и облачных решений, предоставляемое компанией Autodesk для создания 3D-моделей из импортированных фотографий и результатов лазерных ска-

Рис. 13. Цветная трехмерная дискретная модель памятника

Рис. 14. Пример работы в ReCap PRO

нирований, в ней создается облако точек или сетка готовая для инструментов разработки CAD и BIM.

Рабочий процесс обработки результатов сканирования в ReCap — это всего лишь процесс сопоставления трех точек по осям XYZ между двумя разными сканами [30].

Autodesk ReCap позволяет создавать проект здания не с «нуля», а с учетом существующих сооружений, коммуникаций или ландшафта [31].

Ориентирование в здании с помощью BIM-моделей

Мобильные приложения, которые используют GPS сегодня широко распространены в наружной навигации, но недоступны для помещений. Однако эта проблема может быть легко решена с помощью системы определения местоположения (ILS). Внутренняя система позиционирования обычно реализуется через Bluetooth, инфракрасный порт, магнитное поле или Wi-Fi, служит для определения местоположения электронного устройства и, когда оно соединяется с ILS, система может хранить эти данные и использовать. Второй аспект этой проблемы заключается в том, что карты помещений, которые нужно интегрировать в мобильные приложения, недоступны, поэтому и возникла идея о сочетании BIM-технологий и датчиков для определения место-

положения. Существует концепт мобильного приложения «Найди меня!» [34], это соединение текущего местоположения пользователя (от ближайшего маяка) и информационной модели здания, которая содержит местоположение комнаты, маяка, лестницы и лифта, а также навигацию карты. Оно объединяет маяки Bluetooth и модели BIM, чтобы показывать пользователю его местоположение и путь к месту назначения.

Алгоритм работы приложения:

1. Маяки (с настроенными идентификационными данными) размещены на основе автоматического анализа геометрии здания.
2. Мобильное приложение вычисляет кратчайший путь между текущим местоположением и пунктом назначения, используя поиск пути.
3. Рассчитанный путь отображается на карте и обновляется шаг за шагом (при появлении нового маяка пересекается), пока не будет достигнута комната назначения.

Способы повышения эффективности процесса строительства с помощью BIM-технологий

Автоматизированная интеллектуальная наблюдательная платформа управляет специальными интеллектуальными агентами (камерами виртуальной реальности, радиочастотными идентификационны-

Рис. 15. Трехмерная модель, сделанная на основе восьми фотографий

Рис. 16. Схема работы приложения «Найди меня!»

ми RFID-сканерами, дистанционными датчиками и т.д.). Это самоорганизующаяся сеть для сбора и представления данных в режиме реального времени на строительной площадке, которая обеспечивает оптимальные автономные функции управления. Эта технология позволяет перейти от экспертизы, выполняемой людьми, к ежедневной автоматизированной проверке состояния здания.

Такая система может иметь широкий спектр возможных применений, включая:

- идентификацию, отчетность и документирование дефектов и ошибок в строительной среде;
- мониторинг хода строительства;
- создание, ведение и обновление хранилища материалов строительной площадки или оптимизация и мониторинг размещения рабочей силы [15].

Информационное моделирование здания предполагает комплексные сбор и обработку в процессе проектирования всей архитектурно-конструкторской, технологической, экономической и иной информации о здании со всеми ее взаимосвязями и зависимостями. Посредством создания точной цифровой информационной модели объекта интегрированная информационная среда общих данных дает возможность всем участникам инвестиционно-строительного процесса, согласно регламенту, получать нужную информацию об объекте в любой момент времени [25].

Практический пример того, как должна работать подобная автономная система BIM [35]:

1. Архитектор создает 3D-модель здания и извлекает чертежи раздела «Архитектурные решения», которые создаются в программе автоматически.

2. Конструктор загружает 3D-модель, созданную архитектором, в расчетную программу, которая определяет требуемые параметры для элементов здания (например, диаметр и шаг арматурных

стержней). При этом программа сразу генерирует рабочие чертежи, ведомости, спецификации, а также параллельно создает ведомость объемов работ и считает смету.

3. После этого всю эту информацию получают специалисты по инженерным сетям для разработки проекта сетей. Инженерные сети также добавляются в 3D-модель.

4. Специалисты по разработке ПОС и ППР получают точные объемы работ, при этом автоматически строится календарный график производства работ.

5. Подключается логистика — поставщикам приходит информация о том, когда и какой материал необходимо доставить на стройплощадку.

6. После завершения строительства созданная на этапе проектирования трехмерная модель здания может быть связана с самим зданием посредством специальных датчиков — это позволит качественно эксплуатировать объект, отслеживать его микроклимат, а также аварийные ситуации.

Очень важно обеспечить правильную организацию безопасной эксплуатации, за счет эффективного технического мониторинга состояния здания, а также оптимизацию объема и качества строительства, значительную экономию ресурсов времени и средств на всех этапах жизненного цикла здания и сооружения [36].

На данный момент инженерам и конструкторам недоступно использование полного потенциала BIM, они тратят больше времени, чем могли бы на проектирование больших объектов. Однако потенциальное повышение эффективности может быть достигнуто, если в процессе разработки данные будут доступны в облаке. Большие инженерные компании и поставщики программного обеспечения смогут разработать дизайн для конкретной задачи, причем все операции, которые будут происходить

с моделью, будут храниться в связанной структуре данных. Примеры такой технологии представлены в исследованиях [25, 37, 38], они служат доказательствами того, что эта концепция осуществима. Авторам этих научных работ удалось разработать рабочий прототип инструмента для выполнения запросов в браузере с визуальным трехмерным представлением результатов.

Для повышения производительности рабочего процесса большое значение имеют не только технологии, но и оборудование. Обычная экипировка, предназначенная для строительных работ, зачастую недостаточно эффективна, не полностью охватывает потребности людей, работающих на объектах строительства. Для решения этой проблемы был разработан умный шлем DAQRI (Smart Helmet), в дополнение к предотвращению травм от падающих предметов, он предоставляет работникам дополнительную информацию, которая накладывается на то, что они уже видят в своей физической среде, иными словами, погружает их в дополненную реальность. Шлем оснащен четырьмя камерами — две установлены спереди и две сзади, чтобы создать 360-градусный обзор. Камеры могут снимать как изображения, так и видео, что также позволяет распознавать цели в 2D и отслеживание объектов. Записи, сделанные пользователем, могут быть переданы в режиме реального времени, таким образом передавая обычный рабочий процесс в прямом эфире со строительной площадки. Программное обеспечение, которое собирает и отображает данные о настройках пользователя и управляет камерой называется IntelliTrack. Кроме того, шлем предоставляет информацию о местонахождении пользователя (без GPS, Bluetooth и Wi-Fi). Встроенные устройства слежения создают карту окружающей среды, которая может служить основой для трехмерной реконструкции объекта. DAQRI шлем позволяет пользователю проводить мониторинг прямо на строительной площадке: он может смотреть на панели управления в стене и определять, есть ли неровности, также через возможности тепловизионной камеры, шлем позволяет пользователю видеть показания температуры и определять, является ли объект перегретым. Шлем оснащен дополнительной лазерной 3D-камерой для измерения глубины и для съемки фотографий в плохих условиях.

Совместимость шлема с технологией BIM позволяет обеспечивать рабочих прямыми инструкциями и визуальным моделированием, позволяющим им лучше и быстрее понять задачи, которые они должны выполнить. Благодаря этой дополненной реальности взаимодействие со строительной площадкой становится более интерактивным, доступным и легким для интерпретации, что повышает эффективность и улучшает коммуникации.

Такое же значение имеют приспособления, которые позволяют управлять программным обе-

спечением жестами рук и пальцев пользователя (Контроллер прыжкового движения (Leap Motion Controller), Mio, Nimble VR, PrioVR). Ниже рассмотрим применение этих устройств.

Контроллер Leap Motion Controller — это устройство для измерения движения рук и пальцев, которое используется в виртуальной реальности, датчик преобразует движения в 3D-входные данные, сохраняя при этом точность до миллиметра. Он работает без необходимости каких-либо аксессуаров, позволяет пользователю управлять всеми видами жестов — от перемещения объектов, панорамирования и масштабирования до создания фигур. Устройства работают с разными программными обеспечениями компании Autodesk. Технология основана на двух камерах и трех инфракрасных светодиодах, которые способны отслеживать 200 кадров в секунду, обеспечивая поле зрения 150°. Наибольшим недостатком является то, что Leap Motion Controller способен отслеживать относительно небольшой объем интерактивного трехмерного пространства — около восьми кубических футов, что позволяет делать небольшие жесты рукой, такие как смахивание, захват, защемление и штамповка.

Муо

Вторая технология, связанная с виртуальной реальностью — это Муо. Муо также отслеживает жесты пальцев и рук, но на основе мышечной активности. Устройство носит как повязка и работает на основе комбинации датчиков ЭМГ медицинского уровня, трехосного гироскопа, трехосного акселерометра, трехосного магнитометра. Электрическая активность в мышцах предплечья пользователя соотносится с его мышечными движениями, которые, в свою очередь, позволяют управлять программным обеспечением жестами рук пользователя. Применение этого датчика распространяется не только на строительных площадках, но и в лабораториях, контролирующей робототехнику, оборудование, а также при работе с цифровыми презентациями. Светодиодные индикаторы на 93-граммовом устройстве информируют пользователя о его текущем состоянии и возможных ошибках.

Nimble VR

Еще одной технологией отслеживания движений рук является Nimble VR, он состоит из камеры, которая встроена в гарнитуру Oculus, что позволяет работать без дополнительных ручных устройств, таким образом обеспечивая более естественное взаимодействие рук и пальцев пользователя. Устройство отличается от Leap Motion Controller тем, что он использует технологию измерения глубины во время полета. Устройство работает на основе инфракрасного лазера, генерирующего импульс невидимого света, который освещает поле зрения в 110°. Датчик обнаруживает отражение инфракрасного излучения от окружающей среды и рассчитывает расстояние до определенных точек. Устройство обнаруживает

жесты, такие как захват объекта и его перемещение, открытие меню, нажимные кнопки и общие движения, лучшего всего с расстояния в 10–70 см.

PrioVR

Последние разработки в этой области присутствуют в PrioVR, это технология, которая включает в себя костюм для измерения движений всего тела, который беспроводным способом импортирует данные движения в PrioVR, которая в свою очередь отправляет ее в программное обеспечение VR в режиме реального времени. Устройство состоит из инфракрасного датчика и инфракрасной камеры, помогает совершать следующие действия: строительство, снос конструкций, движение кранов, а также простые операции, например, открытие дверей в виртуальной реальности. Допускается одновременное использование нескольких костюмов, благодаря расширенному спектру действия [15].

BIM-модель значительно упрощает работу с объектом, поскольку позволяет в виртуальном режиме согласовать все компоненты здания и проверить их взаимодействие и работоспособность. Технология BIM дает нам возможность виртуального прогнозирования всех стадий жизненного цикла здания, с помощью множества различных способов. Значение этого мониторинга неопределимо, так как помогает свести к минимуму различные человеческие ошибки в процессе определения технического состояния зданий.

Интеграция технологии датчиков отслеживания в информационное моделирование зданий и сооружений

Подводя итог всему вышесказанному, важно сказать о значимости развития технологий, которые будут сочетать в себе BIM-моделирование и автоматизированные системы сбора данных с помощью

датчиков. Актуальность этой проблемы следует из необходимости безопасного строительства и эксплуатации зданий, наличия удобной автоматизированной системы мониторинга повреждений и сбора информации о состоянии зданий в целом.

На нижепредставленных схемах продемонстрировано, какие технологии, описанные в разделах выше, можно объединить в отрасли информационного моделирования и отслеживающих датчиков, чтобы добиться максимальной эффективности от их использования.

Данная схема показывает возможность применения автоматизированного мониторинга по изображениям в области фотограмметрии, лазерного сканирования и облака точек, а также для загрузки в программу ReCap. Этот ход значительно упростит работу в каждой из трех областей.

На схеме выше представлен принцип «взаимопомощи» одной технологии другой. С помощью лазерного сканирования облака точек и сочетания технологий обнаружения определения дальности света и построения BIM, гарантировано улучшится работа по составлению единого информационного поля.

Стоит отметить, что радиочастотные идентификаторы очень многофункциональны. Они могут не только собирать данные сооружения для создания информационной модели, но и имеют возможность предоставлять облачный доступ к этим данным в реальном времени. Поэтому на данной схеме представлена взаимосвязь этих трех составляющих, способных взаимосвязано работать.

Для оценки повреждений BIM после землетрясений лучше всего подойдут три технологии, представленные справа. BLE датчики предоставят необходимую информацию с достаточно высокой скоростью на неограниченное количество серверов.

Рис. 17. Возможности совмещения автоматизированного мониторинга по изображениям

Рис. 18. Возможности сочетания теории единого информационного поля

Рис. 19. Возможности использования RFID-сканеров

Рис. 20. Возможные способы оценки повреждений BIM-модели после землетрясений

Радиочастотные сканеры смогут создать информационную модель и облачный доступ к ней в режиме реального времени. А автоматизированный мониторинг по изображениям поможет составить наиболее полную картину повреждений сооружения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данная статья написана с целью рассмотрения и попытки теоретического совмещения принципа информационного моделирования и технологий в области отслеживающих датчиков.

В первой части обзора рассматривались датчики, измеряющие различные параметры окружающей и внутренней обстановки здания, а также датчики повреждений. Во второй части представлены существующие способы применения технологий информационного моделирования в целях улучшения строительного процесса и эксплуатации зданий.

По итогам этих двух частей были сделаны следующие выводы. Представлена возможность объединения таких технологий как фотограмметрия, лазерное сканирование и возможности программного обеспечения ReCap с автоматизированным мониторингом по изображениям, сделанным с различных устройств. Далее был сделан вывод о возможности интеграции единого информационного поля в область лазерного сканирования и область сочетания технологий обнаружения и определения дальности света и построения BIM. Следующим предложением является объединение технологий обнаружения и облачного доступа к информационным моделям с радиочастотными идентификаторами. И, наконец, завершающим выводом стала возможность интеграции трех технологий: BLE датчики, RFID-сканеры и автоматизированного мониторинга по изображениям в область оценки повреждений BIM после землетрясений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ghaffarianhoseini A., Tookey J., Ghaffarianhoseini A., Naismith N., Azhar S., Efimova O. et al. Building Information Modelling (BIM) uptake: clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 75. Pp. 1046–1053. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.083
2. Antwi-Afari M.F., Li H., Pärn E.A., Edwards D.J. Critical success factors for implementing building information modelling (BIM): a longitudinal review // *Automation in Construction*. 2018. Vol. 91. Pp. 100–110. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.03.010
3. Wang H., Pan Yi., Luo X. Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: a review and bibliometric analysis // *Automation in Construction*. 2019. Vol. 103. Pp. 41–52. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.03.005
4. Kamel E., Memari A.M. Review of BIM's application in energy simulation: tools, issues, and solutions // *Automation in Construction*. 2019. Vol. 97. Pp. 164–180. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.11.008
5. Andriamamonjy A., Saelens D., Klein R. A combined scientometric and conventional literature review to grasp the entire BIM knowledge and its integration with energy simulation // *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 22. Pp. 513–527. DOI: 10.1016/j.jobbe.2018.12.021
6. Wang P., Takagi T., Takeno T., Miki H. Early fatigue damage detecting sensors — a review and prospects // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2013. Vol. 198. Pp. 46–60. DOI: 10.1016/j.sna.2013.03.025
7. Lou Z., Wang L., Jiang K., Shen G. Programmable three-dimensional advanced materials based on nanostructures as building blocks for flexible sensors // *Nano Today*. 2019. Vol. 26. Pp. 176–198. DOI: 10.1016/j.nantod.2019.03.002
8. Das S., Saha P. A review of some advanced sensors used for health diagnosis of civil engineering structures // *Measurement*. 2018. Vol. 129. Pp. 68–90. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.07.008
9. Taheri S. A review on five key sensors for monitoring of concrete structures // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 204. Pp. 492–509. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.172
10. Dong W., Li W., Tao Z., Wang K. Piezoresistive properties of cement-based sensors: review and perspective // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 203. Pp. 146–163. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.081
11. Braila N., Vakhrusheva S., Martynenko E., Kisel T. Development of a cultural heritage object BIM model // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012030
12. Мохирева А.О., Глебова Е.А., Логинова П.В., Назинян Л.Г., Тихонович Н.А. Качественная оценка стоимости ремонта исторических зданий при использовании систем автоматизированного мониторинга // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2019. № 2 (77). С. 7–22. DOI: 10.18720/CUBS.77.1
13. Kima J.W., Jeonga Y.K., Lee I.W. Automatic sensor arrangement system for building energy and environmental management // *Energy Procedia*. 2012. Vol. 14. Pp. 265–270. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.12.887
14. Kuzina O. Conception of the operational information model of smart city control system //

E3S Web of Conferences. 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012030

15. *Asgari Z., Rahimian F.P.* Advanced virtual reality applications and intelligent agents for construction process optimisation and defect prevention // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 196. Pp. 1130–1137. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.08.070

16. *Walaszczyk J., Batog P.* Distributed Ethernet based system of measurement and visualization for buildings monitoring // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 57. Pp. 1242–1250. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.157

17. *Yu Yu., Woradechjumroen D., Yu D.* Virtual surface temperature sensor for multi-zone commercial buildings // *Energy Procedia*. 2014. Vol. 61. Pp. 21–24. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.11.896

18. *Bolshakov V.I., Vaganov V.E., Bier Th.A., Bausk Ie.A., Matiushenko I.M., Ozhyshchenko O.A. et al.* The usage of smart materials for skin-diagnostics of building structures while their monitoring // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 172. Pp. 119–126. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.033

19. *Park J., Chen J., Cho Y.K.* Self-corrective knowledge-based hybrid tracking system using BIM and multimodal sensors // *Advanced Engineering Informatics*. 2017. Vol. 32. Pp. 126–138. DOI: 10.1016/j.aei.2017.02.001

20. *Оленьков В.Д., Попов Д.С.* Автоматизация диагностики технического состояния зданий и сооружений в процессе их эксплуатации // *Вестник ЮУрГУ*. 2012. № 17. С. 82–85.

21. *Spencer B.F.Jr., Hoskere V., Narazaki Y.* Advances in computer vision-based civil infrastructure inspection and monitoring // *Engineering*. 2019. Vol. 5. Pp. 199–222. DOI: 10.1016/j.eng.2018.11.030

22. *Гаряева В.В.* Автоматизация синхронизации в реальном времени данных BIM-модели здания на базе RFID технологии // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2018. № 5. С. 186–188. DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-5-186-188

23. *Ekba S.* BIM technologies in the inspection of buildings and structures // *E3S Web Conf*. 2019. Vol. 110. P. 6. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001081

24. *Alirezaei M., Noori M., Tatari O., Mackied K.R., Elgamal A.* BIM-based damage estimation of buildings under earthquake loading condition // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 145. Pp. 1051–1058. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.136

25. *Минаев В.А., Мохов А.И., Фаддеев А.О., Кузьменко Н.А.* Интеграция BIM-технологий и моделей геодинамических рисков на территории застройки // *Технологии техносферной безопасности*. 2016. № 1. С. 267–273.

26. *Pruvost H., Scherer R.J.* Analysis of risk in building life cycle coupling BIM-based energy simulation and semantic modeling // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 196. Pp. 1106–1113. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.08.068

27. *Yaagoubi R., Miky Ye.* Developing a combined Light Detecting and Ranging (LiDAR) and Building Information Modeling (BIM) approach for documentation and deformation assessment of Historical Buildings // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 149. Pp. 1–6. DOI: 10.1051/matecconf/201814902011

28. *Warcho A.* The concept of LIDAR data quality assessment in the context of BIM modeling // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019. Vol. XLII-1/W2. Pp. 61–66. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-1-W2-61-2019

29. *Sun Z., Cao Y.K.* Data processing workflows from low-cost digital survey to various applications: three case studies of chinese historic architecture // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015. Vol. XL-5/W7. Pp. 409–416. DOI: 10.5194/isprs-archives-XL-5-W7-409-2015

30. *Dezen-Kempler E., Soibelman L., Chen M., Müller Filho A.V.* An integrated laser and image surveying approach in support of model-based information technology for inventory of campus historic buildings // *Proc. of the 32nd CIB W78 Conference*. 2015. Pp. 128–138. DOI: 10.13140/RG.2.1.3468.7441

31. *Мельникова О.Г., Олейников П.П.* Информационное моделирование зданий: опыт реконструкции памятников культурного наследия // *Социология города*. 2013. № 4. С. 72–80.

32. *Brusaporci S., Maiezza P.* Re-loading BIM: between spatial and database information modeling for architectural heritage documentation // *Conference: XIII Congreso Internacional de Expresión Gráfica aplicada a la Edificación*. 2016. Pp. 835–847.

33. *Canevese E.P., De Gottardo T.* Beyond point clouds and virtual reality innovative methods and technologies for the protection and promotion of cultural heritage // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017. Vol. XLII-5/W1. Pp. 685–691. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-685-2017

34. *Ferreira J.C., Resende R., Martinho S.* Beacons and BIM models for indoor guidance and location // *Sensors*. 2018. Vol. 18. Pp. 1–20. DOI: 10.3390/s18124374

35. *Хахук Б.А., Кушу А.А., Ахметов М.-А., Мелитонян А.А.* Методология создания BIM моделей // *Научные труды КубГТУ*. 2018. № 2. С. 356–366.

36. *Демениев А.В., Артамонов А.С.* Информационное моделирование при эксплуатации зданий и сооружений // *Науковедение*. 2015. № 7. С. 1–9. DOI: 10.15862/29TVN315

37. *Rasmussen M.H., Hviid C.A., Karlshø J.* Web-based topology queries on a BIM model // *5th Linked Data in Architecture and Construction Workshop*. 2017. DOI: 10.13140/RG.2.2.22298.95685

38. *Chien S., Chuang T., Yu H., Han Y., Soong B.H., Tseng K.J.* Implementation of cloud BIM-

based platform towards high-performance building services // *Procedia Environmental Sciences*. 2017. Vol. 38. Pp. 436–444. DOI: 10.1016/j.proenv.2017.03.129

39. Kima S., Zadeh P.A., Staub-French S., Froese T., Cavkae B.T. Assessment of the impact of window size, position and orientation on building energy load using BIM // *Procedia Engineering* 2016. Vol. 145. Pp. 1424–1431. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.179

40. Zotkina S.P., Ignatova E.V., Zotkina I.A. The organization of Autodesk Revit software interaction with applications for structural analysis // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 153. Pp. 915–919. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.225

41. Li W., Koob C., Chaa S.H., Laia J.H.K., Jinsoo Leec. A conceptual framework for the real-time monitoring and diagnostic system for the optimal operation of smart building : A case study in Hotel ICON of Hong Kong // *Energy Procedia*. 2019. Vol. 158. Pp. 3107–3112. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.1005

42. Bai Q., Deng S., Li C., Qie Z. Application of BIM in the creation of prefabricated structures local parameterized component database // *Architecture and Engineering*. 2019. Vol. 4. Pp. 13–21. DOI: 10.23968/2500-0055-2019-4-2-13-21

43. Bortoluzzi B., Sobieraj D., McArthur J.J. Automating the creation of facility and energy management BIM models // *Proceedings of the Joint Conference on Computing in Construction*. 2017. Pp. 153–160. DOI: 10.24928/JC3-2017/0144

44. Pruvost H., Scherer R.J. Analysis of risk in building life cycle coupling BIM-based energy simulation and semantic modeling // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 196. Pp. 1106–1113. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.08.068

45. Lim J., Janssen P., Stoufs R. Automated generation of BIM models from 2D CAD drawings // *Learning, Adapting and Prototyping, Proceedings of the 23rd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, (CAADRIA)*. 2018. Vol. 2. Pp. 61–70.

46. Janssen P., Chen K.W., Mohanty A. Automated generation of BIM models // *BIM Concepts*. 2016. Vol. 2. Pp. 583–590.

47. Alirezaei M., Noori M., Tatari O., Mackied K.R., Elgamal A. BIM-based damage estimation of buildings under earthquake loading condition // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 145. Pp. 1051–1058. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.136

48. Chihib M., Salmerón-Manzano E., Novas N., Manzano-Agugliaro F. Bibliometric maps of BIM and BIM in universities: a comparative analysis // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. Pp. 1–22. DOI: 10.3390/su11164398

49. Lina J.R., Zhou Y.C., Zhang J.P., Hu Z.Z. Classification and exemplary BIM models development of design changes // *36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2019)*. 2019. Pp. 122–127. DOI: 10.22260/ISARC2019/0017

50. Kalyan T.S., Zadeh P.A., Staub-French S., Froese T.M. Construction quality assessment using 3D as-built models generated with project tango // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 145. Pp. 1416–1423. DOI: 10.1016/j.compind.2019.08.001

51. Olugboyega O. Developing framework for managing Building Information Modelling processes // *PM World Journal*. 2017. Vol. VI. Pp. 1–7.

52. Volkov A., Chelyshkov P., Brazhnikov P. Features of BIM-modeling of engineering systems of the construction object // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. Pp. 1–7. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701010

53. Wu W., Li W., Law D., Na W. Improving data center energy efficiency using a cyber-physical systems approach: integration of building information modeling and wireless sensor networks // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 118. Pp. 1266–1273. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.481

54. Yang X., Koehl M., Grussenmeyer P. Mesh-to-BIM: from segmented mesh elements to BIM model with limited parameters // *ISPRS TC II Mid-term Symposium “Towards Photogrammetry 2020”*. 2018. Vol. XLII-2. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-1213-2018

55. Atazadeh B., Rajabifard A., Zhang Y., Barzegar M. Querying 3D cadastral information from BIM models // *International Journal Geo-Information*. 2019. Vol. 8. Pp. 1–17. DOI: 10.3390/ijgi8080329

56. Provan G., Buaudachain S.O. Sensor calibration and diagnostics under parameter uncertainty: a smart building application // *8th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS)*. 2012. Pp. 409–416. DOI: 10.3182/20120829-3-MX-2028.00267

57. Borodin S., Lyapina A. State examination of BIM-model on the basis of object technological dependencies model // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 451. Pp. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/451/1/012082

58. Motawa I., Carter K. Sustainable BIM-based evaluation of buildings // *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. 2013. Vol. 74. Pp. 419–428. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.03.015

59. Lyapina A.R., Borodin S.I. Use of Building Information Modelling (BIM) in construction: the state expert inspection of construction projects in Russia // *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2018. Vol. 8. Issue 2. Pp. 11–17. DOI: 10.21285/2227-2917-2018-2-11-17

60. Stančík A., Macháček R., Horák J. Using BIM model for fire emergency evacuation plan // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 146. Pp. 1–6. DOI: 10.1051/mateconf/201814601012

61. Лебедева В.И. Взаимоувязка информационной модели (BIM) и модели объектных технологических зависимостей при строительстве объектов // *Современные междисциплинарные исследования: история, настоящее, будущее*. 2017. С. 30–37.

62. Деменев А.В., Павлов Н.Л. Интеграция системы мониторинга и управления инженерными системами зданий с массовым пребыванием людей // Sciences of Europe. 2016. № 6. С. 23–27.

63. Богданов А.Н., Алешиутин И.А. Наземное лазерное сканирование в строительстве и BIM-технологиях // Известия КГАСУ. 2018. № 4. С. 326–332.

64. Грибкова И.С., Горенко Д.А. Обзор программного обеспечения для использования BIM моделей // Научные труды КубГТУ. 2018. № 2. С. 211–220.

65. Шеина С.Г., Упенников Д.К. Современные технологии, приборы и оборудования для трехмерного моделирования памятников архитектурного наследия // Науковедение. 2015. Т. 7. № 3. С. 1–9. DOI: 10.15862/103TVN315

66. Козлова Т.И., Куликова С.О., Талапов В.В., Чжан Гуаньин. BIM и памятники деревянной архитектуры // Геоинформационные системы и 3D-реконструкции. 2015. С. 50–73.

Поступила в редакцию 1 августа 2019 г.

Принята в доработанном виде 15 ноября 2019 г.

Одобрена для публикации 26 ноября 2019 г.

ОБ АВТОРАХ: Татьяна Анатольевна Сивак — студентка; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; sivak.ta@edu.spbstu.ru;

Полина Юрьевна Кваша — студентка; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; yes_pol99@mail.ru.

INTRODUCTION

At present, the problem of information modeling is becoming increasingly important for Russia. There is a number of technologies that can be used to track various factors outside or inside the structure, such as illumination, humidity, temperature, load on the structure, degree of damage to different parts of the building. Thanks to these monitoring technologies, it is possible to ensure the best maintenance of buildings, as well as to monitor and regulate the level of comfort of people staying there. However, in Russia information modeling is not used actively which causes a number of problems: absence of structure failure sensors — a considerable quantity of dilapidated buildings, and late reconstruction that means much more expenses for it; absence of floor plans of commercial buildings for visitors in free access — visitors orientation problems inside the building. With the help of the adoption of information modeling technologies in the Russian construction industry, maintenance and reconstruction of structures will reach a new level. For this purpose, it is necessary to understand the technology of communication of the information model with the real building, which is carried out by means of nanosensors installed throughout the structure.

Information modeling allows to reduce time and improve the quality of design of various structures. It also helps to keep the structure in good condition throughout its entire life cycle. With development of building and structures information modeling systems, design can be realized with the least time spent and human resources used.

Information modeling technologies allow timely detection of violations in operation and elimination of harmful effects on the structure, which are visible in real time. Human resources are needed to control this process. But their number in combination with this technology will be several times more cost effective than the maintenance of the building without using modern methods.

The economic components of the construction and maintenance of buildings and structures are often neglected. For introduction of modern methods and new equipment it will be necessary to spend extra money, and probably this way becomes economically unprofitable for construction industry. But very soon, these costs will pay off and let keep buildings in the best possible condition.

The main purpose of this study is to analyze the existing research papers on the integration of BIM in the process of real construction and the substantiation of the relevance and necessity of development of this area in the modern world. The authors solved the following problems: study of research articles on various types of sensors used in the construction of buildings and structures, issues that have already been investigated and solved in this area; study of research papers on various non-standard ways of using BIM models, both in construction and everyday life, problems that have already been investigated and solved in this area; analysis of possible combinations of the above mentioned topic and the use of its connection in the construction and further operation of buildings.

Research in the field of information modeling has been going on for several decades. Many new technolo-

gies have been introduced so that by combining them, it would be possible to create something completely new and necessary in the field of construction. The objective is to combine developments in information modeling with programmable systems, such as damage sensors and other various factors.

Rapid development of technologies stimulates changes in the construction industry. All sites in this field are being continuously digitalized, which makes it possible to revise the existing design of structures for future development. Despite significant progress in information modeling, these technologies are still not in active use. This issue is covered in the article “Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges” [1].

Joining efforts is an excellent solution to achieve the best results in various areas. Thus, some countries, such as the United States, the United Kingdom and South Korea, have teamed up to develop information modelling. This included more accurate visualization of three-dimensional design, coordination and planning of construction work, enhanced information sharing and building management. The article “Critical success factors for implementing building information modelling (BIM): A longitudinal review” [2] considers the factors that provide the basis for the creation of a standard evaluation model that is successful in implementing the information model. It also serves as a basis for further improvement of the industry.

Information modeling is necessary for the process of designing and construction of structures, and for maintenance of construction sites. The paper “Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: A review and bibliometric analysis” [3] describes the research in the field of BIM and GIS technologies communication. An overview of the implementation of the information modeling and geographic information system communication in sustainable environments is given for analysis from four perspectives: technologies for data integration, life-cycle application, building energy management and urban management. There are three typical BIM-GIS implementation modes: BIM base GIS support, GIS base BIM support, equal BIM and GIS. This classification is made on the basis of different dominating positions of the two technologies. Various areas of research and future applications of BIM-GIS integration are discussed. This overview can serve as a map for researchers focused on BIM-GIS implementation studies.

However, information modeling technologies cannot be called self-sufficient — there is a number of problems, which are presented in the review “Review of BIM’s application in energy simulation: Tools, issues, and solutions” [4]. It considers problems and problems arising in the course of interaction of information and engineering model, the detailed classification of these problems and their possible solutions are offered. Some

problems in application of information model for designing of the power consumption diagram are considered. This article provides an opportunity to study the use of software correction tools similar to those presented in this paper.

The paper “A combined scientometric and conventional literature review to grasp the entire BIM knowledge and its integration with energy simulation” [5] examines the main research topics and trends in information models. A detailed review of integration of information modelling and modelling of energy efficiency of buildings.

Firstly, a scientometric analysis is performed, which allows the identification of research samples and emerging trends in a particular area of research, in order to divide the large number of articles that make up the BIM literature into several parts, each of which presents a specific topic.

Secondly, various aspects related to the integration of information modelling with building energy efficiency modelling are analyzed to highlight the evolution of the interaction between BIM and energy modelling tools. A review of the various applications of such integration has been carried out to identify potential knowledge gaps. This study highlights six major topics of the BIM research, focusing on the implementation and benefits of BIM: BIM control, progress monitoring and integrated modelling, functional compatibility, life cycle analysis and energy modelling.

However, there is not enough knowledge only about information and engineering models for the research topic, because for full communication of information and engineering models it is necessary to have sensors on the real structure.

Fatigue damage detection and fatigue forecasting are important technological issues in both academic and industrial fields. Numerous methods have been proposed and developed to detect early fatigue damage in structural elements in the paper. Early fatigue damage detecting sensors — A review and prospect [6]. Here is a brief overview of the current status of the fatigue damage sensors. Eight types of existing fatigue sensors based on different detection principles are presented and discussed. A new concept has been proposed for the use of carbon films as a fatigue sensor. Preliminary experimental results show that metal-containing diamond-like carbon films (Me-DLC) with optimal composition and microstructure will be good candidate materials for fatigue sensors.

Among the latest developments in the field of tracking devices, considerable attention was drawn to flexible sensors, which are considered in the study “Programmable three-dimensional advanced materials based on nanostructures as building blocks for flexible sensors” [7]. It discusses the methodology of manufacturing three-dimensional multi-level structures and explains how these programmable materials can improve the performance of flexible sensors. Since the electrical,

optical and mechanical properties of programmable materials depend on their structure, shape and size, these factors are crucial in the design and operation of flexible sensors. It also discusses not only the newly developed construction materials and their potential applications in flexible sensors, but also the key challenges for future directions in this area.

The development of structural monitoring methods has led to the creation of various sensors that can be an effective damage indicator. Due to environmental impact or electromagnetic interference and the need for a permanent energy source, conventional sensors cannot provide accurate and continuous measurements. In light of this, new and improved sensors and wireless technologies have been developed to facilitate the monitoring process. When it is necessary to detect more than one damage parameter, multiplex sensors were the main interest of researchers. The article “A review of some advanced sensors used for health diagnosis of civil engineering structures” [8] considers various sensors used to detect deformation and corrosion. A brief comparative study was performed and presented in this review. The multiplex fiber optic sensor proved to be quite effective. The Sensor Optimal Positioning Method, designed to diagnose low level damages, is a Iterated Improved Reduced System (IIRS) technique.

Many structural operational integrity monitoring options are currently being explored to ensure the reliability of specific infrastructures at different stages of their life cycle. The paper “A review on five key sensors for monitoring of concrete structures” [9] presents the latest developments in sensors designed to monitor the status of a specific infrastructure. The focus is on sensors designed to monitor parameters, including temperature, humidity, pH, corrosion rate and stress/deformation, as well as specially manufactured on the basis of optical fiber, bragg gratings, piezoelectric, electrochemical, wireless and self-sensing technologies. A few examples of specific control sensors developed (from laboratory concepts to commercialized products), together with their various advantages and disadvantages, as well as problems of open research, will be discussed in this article.

Cement-based sensors are increasingly used in intelligent concrete to detect and control damage and cracks by measuring the electrical resistivity of concrete. The article “Piezoresistive properties of cement-based sensors: Review and perspective” [10] considers basic concepts, key components, production process, piezoresistivity measurements and key applications of cement-based sensors. Various materials, mechanical and environmental factors influencing the piezoresistive properties of concrete are considered. It is expected that this review will provide not only a benchmark for new researchers to study and participate in related research, but also for experienced researchers to perform transformational studies into cement-based piezoresistive sensors.

MATERIALS AND METHODS

The main method of this work was to search for articles in digital libraries on the following keywords: BIM models, BIM-monitoring, connection BIM with monitoring, damage detection, automated monitoring system, smart sensors, automated monitoring, automated damage detection. The articles found should have included topics such as BIM modelling and tracking sensors. With regard to sensors, the main interest was the types of sensors that could be used in the construction industry, in particular sensors that transmit information to cloud storage for further processing, as they are most suitable for integration into the information model.

Further, all types of articles have been classified and diagrams have been made on how to combine these topics and apply them to the construction process.

RESEARCH RESULTS

Sensors

This section discusses the technologies already developed in the field of tracking sensors and the possibility of sharing them.

There are methods for determining damages in order to ensure timely and quality restoration of buildings and cultural heritage sites [11, 12]. In order to comply with this method, it is first necessary to analyze which parts of the building are most frequently affected by certain types of damage. Sensors should then be installed at appropriate locations to help identify these damages. Thus, it will be possible to make the most competent assessment of the need for restoration of the structure.

At the moment, the system of location of sensors has been developed to track humidity, illumination, movement and CO₂ content [13]. The layout is shown in Fig. 1. The concept of this diagram is applicable not only to the management of systems inside the building, but also to the management of technology such as smart city [14].

One of the most invested modern systems is the SMARTROCK2 wireless humidity sensor. Concrete is a material that exhibits different electromagnetic properties under different humidity conditions [15]. This waterproof sensor is located at a depth of 5 cm in concrete framework. Bluetooth wireless technology allows you to control data through an application. The device accurately predicts the strength of the concrete.

This method is useful both in the remote production of such as the technology of concrete 3D-printing, and in real time on the construction site.

In recent years, there has been a continuous process of decreasing prices for microprocessors [16]. Smart sensors are becoming more popular thanks to powerful and inexpensive advanced single-chip microcontrollers. The CPU is an inexpensive and efficient 32-bit microcontroller with the following features: 72 MHz maximum frequency, 20 KB SRAM memory, 128

Fig. 1. A sensor arrangement system for tracking moisture, light, movement and the amount of CO₂

Fig. 2. Diagram of the functional blocks of measuring instruments

KB flash memory, 12-bit analog-to-digital converter. The diagram of functions blocks of measuring devices is shown in Fig. 2. Sensors are connected to the processor via a serial peripheral interface (SPI). The universal asynchronous receiver can connect up to three additional devices. Each measuring device has its own customizable IP address.

The basic version of the measuring instrument contains two humidity and temperature sensors with digital sensors SHT15. In the case of digital sensors, the analog-to-digital converter is built into the same chip with the sensor, so no additional errors occur during the transmission of analog signals, and the sensor can be placed in a relatively remote location from the main board. Due to the rather small size ($7.5 \times 5 \times 2.6$ mm) of the sensor chip, the sensor probe can also be very small and therefore easy to install almost anywhere. The sensor provides good accuracy and low power consumption. Three independent platforms for the collection of measured values have been developed.

In 2014, temperature surface sensors with a virtual surface were developed and simulated [17]. The readings on the sensors corresponded to those on the surface of the building. Their main advantages are that they can predict the temperature on the surface of the walls of the building, the performance of the sensors is

improved, and the operating time with the best performance is one month.

The development of effective monitoring systems with minimum defects is a relevant task.

One of the solutions to this problem is the development of smart materials capable of reacting to changes in geometric dimensions, distribution of local stresses, formation and development of cracks, moisture content and even the presence of chlorides [18]. The successful implementation of this material is possible through the use of carbon nanostructures (graphite, graphene, nanotubes and nanofibers) in two ways: uniform distribution in the volume of the structure material or in the composition of the coating material applied to the surface of the structure under investigation.

Despite a significant number of studies in this area, it is safe to say that the problem is still pressing. It can be proved by contradictory results of research by various authors, in which the mechanical and electrical properties of carbon nanotube reinforced concrete may differ significantly. The functional group was treated by boiling in a solution of sulfuric and nitric acids. The formation of oxygenated groups on the surface has led to an increase in the hardening properties of concrete at compression and bending up to 19 and 25 %, respectively.

One of the recent developments is the BLE sensor [19]. One of the main advantages of BLE is its new network topology. Classic Bluetooth technology was based on special piconets that use one master device and up to seven slaves. BLE does not limit the number of communication devices, nor does it require coupling with other BLE devices. For this reason, there are many more devices that can be paired with more than one main device at a time. According to the results of laboratory tests, more than 30 BLE sensors (BLE version 4.0) can be detected simultaneously by both iPhone and iPad.

An integral part of the information collection is the information field and the structure model based on the results of the instruments. Let us consider the main stages of the process of creating an information field [20].

1. The first stage is the 3D laser scanning of an existing site.

The result of scanning is a digitized “point cloud” (Fig. 3).

It should be noted that with the help of a laser scanner it is possible to get only a point cloud, i.e. a data array containing information about XYZ-coordinates of the scanned points of the site. The point cloud itself is not a building model — it’s just the initial data about the exact geometry of the site.

2. The digitized “point cloud” is then converted to a high-precision CAD geometry model of the building (Fig. 4).

This stage is the most complicated and time-consuming, because by now there is no developed software designed to convert point clouds of construction sites into models of buildings with a high degree of automation.

3. At this stage, it is possible to receive from the obtained model of a building measurement drawings of site (Fig. 5) in a fully automatic mode.

4. Conducting strength, thermal, aerodynamic and other calculations as needed. The offered technique of automation of technical condition estimation allows to minimize errors at the stage of measurement works at

Fig. 3. Digitized “point cloud”

Fig. 4. Geometric CAD model of the building

Fig. 5. Dimensional drawings of the object

creation of the design diagram and calculation of constructions of buildings and structures.

Another example of the use of the information field is the application of new technologies for the operation of structures and engineering systems. The object of research is automated control and monitoring of engineering systems of the building. The following systems fall under the concept of “engineering”: ventilation; air-conditioning; heating; water supply; refrigeration; electricity; electric lighting; fire alarm; security alarm; video surveillance; video door communication; alarm and evacuation control systems; access control; telecommunications.

All these systems are combined into a single information field, which in turn is based on four groups of devices:

- control device (controller — hub), which connects all the elements to each other and connects the system to the user devices;
- sensors (transmitters) are devices that receive information about external conditions;
- data processing and storage devices, including cloud services;
- executive devices (actuators) directly execute commands. It is a group that includes circuit breakers,

sockets, automatic valves for pipes, sirens, climate controllers.

Building monitoring organization according to the described technology gives the service provider an advantage over the traditional approach to monitoring the condition of buildings and structures. For the owner of the building, the system integration will allow saving 30 % of the funds for operation in the future, taking into account the amount of capital investment in the integration of an automated system, the payback period is up to 5 years, and eventually the system of automated monitoring can be recouped in several seasons of conventional monitoring.

An image scanning method is often used to detect damage to buildings. One of the applications of this method is the use of satellite images [21]. Before starting to work with images, they should be processed, i.e. the traces of atmospheric phenomena visible in the images should be removed. Remotely sensing satellite images help to understand the damage to individual building structures.

Displacement and deformation can also be measured using visual methods to assess structural condition. Monitoring is often performed using wired or wireless contact sensors.

Fig. 6. Organization of building monitoring

However, the key difficulties in this method are the conversion of signals and indications. Automated structural checks require a comprehensive understanding of the image context. This means that the use of human resources cannot be excluded from this process. Displacements and damage are often small and difficult to detect with satellite images alone.

From the beginning of cloud technologies to the present day, it is changing the established information processes through rapid growth in computing power of computers and the development of Internet technologies for data processing and storage.

The use of broadband Internet channels allows to combine various information technologies using so-called cloud computing. There are three reasons why cloud computing is so popular: scalability, ease of use and affordable price. Using the real capabilities of cloud computing creates an integrated network-based collaborative BIM model from a variety of offline files and documents.

The integrated model requires an active BIM server that enables real-time collaboration with project participants and provides real-time access to the live BIM model for any interested parties using software applications running on various devices, including mobile devices.

The aforementioned, active BIM server requires multiuser software to be able to scale and fully use the cloud capabilities of both data storage and computing power.

RFID (Radio Frequency Identification) system is a modern technology of identification of sites based on the use of radio-frequency electromagnetic radiation for automated reading and recording of accounting data and control on the device [15, 22].

The main purpose of this system is to collect information from RFID tags (transponders) in real time; the use of radio wave technology allows you to process data even if the transponders are not within line of sight. Readers can receive information and find RFID tags that are located within the detection range of their antennas at a distance of 5 m to 300 m. The proposed method of real-time synchronization of the data of the BIM model of the building based on RFID-technology in the implementation of the process is divided into four stages:

1. The first stage is project development. At this stage, a three-dimensional BIM model of the construction site is created.

2. The second stage is to make decisions about RFID tags and readers. Need to be determined for the tags:

- which elements RFID tags (columns, beams, door and window frames, etc.) will be attached to;
- which non-structural elements of the building will be marked;
- when the selected elements are marked;
- for readers;
- the reader must be placed at the entrance to the construction site;

- schedule and reading of RFID tags with portable readers.

3. The third stage is the software and hardware of the data transmission process. At this stage, RFID readers should be connected to the BIM model via smart software applications and then exported to cloud storage for multiuser access.

4. Stage four is construction. The main purpose of the development is a possibility of operative updating of the information allowing to carry out the control, management and planning of resources of a construction site at a new level.

Thus, thanks to the introduction of RFID-technologies, there are opportunities that allow not only to significantly increase the filling rate of the BIM model with real data about the construction site in the process of its construction, but also to simplify the collection of this information. This, in turn, will have an impact on construction site planning and resource management, which is incredibly important to improve project efficiency by reducing time and cost.

Based on the studies presented above, it is possible to theoretically combine several of them into a shared use. For example, SMARTROCK2 humidity sensors [15] are combined with the humidity tracking system [13]. Also it is possible to introduce in this system sensors with a microprocessor [16], which would reduce the cost of using the system as a whole. Also, for all the sensors presented above, piconet-based technology would be useful [19]. This would increase the number of connections between the master and slave devices.

BIM Application

BIM Building Inspection

Information modeling of BIM buildings is becoming increasingly important in architecture and construction. At present, research in this area has moved away from the main function (design) and now focuses on monitoring and sharing various technical information covering all stages of the project life cycle. Introduction of the BIM model into the technology of buildings and structures assessment is undoubtedly an important component for the qualitative operation of architectural sites [23].

Structural analysis of buildings is of primary importance for safe construction and operation of buildings. Structural analysis is a process of determining and calculating the impact of loads and internal forces on each element of the building. On this basis, it is advisable to integrate a BIM model consisting of many individual components into structural analysis applications. Let's consider the process of export of parameters of building constructions from Autodesk Revit in the structural analysis program.

First, the procedure uses C # plugin, which extracts the parameters of construction elements from the Revit file (Fig. 7) and displays them in the file with the

“.txt” extension (Fig. 8). This file may contain physical properties of materials, dimensions, coordinates, cross-section shape, etc.

Then a special converter program reads the file, generates a model of the beam frame and saves the information in a new format compatible with the structural analysis program.

This program allows you to add vertical or horizontal loads and torque to any of the beam frame units (Fig. 9). The finite element method is used for structural analysis.

Fig. 7. Sample of rvt file

Fig. 8. Transferring the properties of an element to a.txt file

Fig. 9. Structural Analysis Application

Similarly, Structural Analysis Applications can receive gridded models from point clouds as input data, an example of such a process is shown in Fig. 10.

Some areas of the globe are more exposed to high seismic activity than others. Currently, despite the considerable efforts of seismologists in research, it is not yet possible to give an accurate prediction of

Fig. 10. A model from a point cloud in a Structural Analysis Application

earthquakes, so research on the assessment of damage caused by earthquakes is of great importance.

In such cases, it is convenient to use the BIM model of the building in question, the properties of which are exported to the structural analysis applications, where the dynamic analysis of nonlinear time history to determine the structure drift and acceleration. To simulate the loading conditions, the initial data, which refer to any earthquake in the history, are used. The results of this analysis serve as the basis for determining the damage to the building, while using the OpenSees software. All damage states are then evaluated separately by the PACT (Performance Assessment Calculation Tool).

At the same time, an Environmental Life Cycle Assessment (LCA) is being conducted to identify

the environmental impacts of damage to the building caused by the earthquake. The total energy loss of the building is calculated based on the probability of damage. BIM can be used as a universal tool to assess the seismic characteristics of a building [24].

It is known that in recent years the number of dangerous large man-made disasters and dangerous natural phenomena has been steadily increasing. Emergency risks pose a significant threat to buildings and structures. The location of the failure in a particular area can be determined quite accurately based on calculations using geodynamic risk models. The main idea behind such models is related to the description, analysis and evaluation of seismic and deformation processes in the territorial and dynamic aspect [25].

Various studies are now aimed at developing a universal model of risk management (energy risks, construction risks, price risks, safety, regulatory issues). This is implemented in the model, which includes all types of information integrated into the risk structure, and covers four main aspects:

- design;
- modelling;
- decision making;
- process (defines the tasks to be performed in building design to identify, model and eliminate risk).

Let's consider an example of energy risk analysis, for this purpose BIM data are used as input data, and the result is system energy consumption indicators. Risk indicators equal to the standard deviation of the energy load and energy and the average inaccessibility of the grid should be adopted. Each risk is associated with an uncertainty factor that makes it exist and with some BIM data. A specialist makes a list of all risks. Sampling service, which is encoded with the help of statistical computing tool *R*, gives out *N* input data, they are preprocessed and converted to *N* simulation models. After simulation, post-processing provides risk indicators for several simulation results, here *N* is the value of risk indicators (e.g. annual energy consumption). The resulting risk values are then interpreted semantically using ontology, which compares them to thresholds and considers the risks involved.

In the case of energy, several weather and employment data samples are used as input data. An XML diagram has been developed for the variational model. The model consists of five main sections: *scope*, *variables*, *options*, *resources* and *metrics*. In this example, the building file is used as the input data along with the weather and occupancy data. Each weather data file consists of time series for many variables, each occupancy data file contains a graph of occupancy for one year, saved as a time series. After modeling all samples, the modeling mechanism provides a set of values for risk indicators [26].

Another approach to the assessment of deformations of buildings is based on a combination of light range detecting and ranging (LiDAR) and information

Fig. 11. General assessment of the state of the BIM model

modeling (BIM) technologies [27, 28]. In order to digitally document the current state of the building, classical methods of surveying (passing, levelling and GPS) and additionally ground-based laser scanner (TLS) are used. As a result of such a complex survey we get a three-dimensional cloud of points with high resolution, which is referred to in accordance with the local geodetic reference frame. This point cloud is then used to create a three-dimensional BIM model that represents the ideal building condition. Identify and assess deformations of parts of a building that require urgent intervention by comparing a three-dimensional point

cloud to a BIM model. In order to achieve this goal, the main parts of the building in the BIM model (ceilings and walls) are compared with the corresponding segments of the three-dimensional point cloud according to the normal vectors of each part, and a “damage location map” is produced. In this method, the BIM model acts as a standard of the building, and the point cloud is the real state of the building element (Fig. 12).

It follows from this that BIM modelling is not suitable for research where high accuracy is required. It entails the loss of important morphometric information, this is due to the simplified representation of three-

Fig. 12. Comparison of the reference model and point cloud

dimensional models [29]. One of the solutions to this problem is the creation of new tools and methods that allow you to create effective three-dimensional representations based on the correct geometric analysis of the built model.

That is why in the modern world the use of remote sensing technologies has become widespread to collect spatial information about buildings, resulting in a three-dimensional system of data collection, which is fully automated and contactless with the analyzed site [30].

Three-dimensional laser scanning allows you to thoroughly convey the state of the site, down to the smallest cracks in the surfaces. Its result is the so-called “point cloud” with three-dimensional coordinates. This is the most complete and reliable information about the geometry of the site at a given time [31].

Current BIM software is not sufficient to manage the large amounts of data generated by such research. To solve this problem, you can use the GreenSpider plug-in in Revit environment, which helps to import simplified clouds, the points of which can provide more accurate modeling in BIM software [32].

Along with laser scanning, photogrammetry is progressing now. This is the process of determining the shape, size, position and other characteristics of sites from their photographs. Photogrammetry allows to obtain an accurate three-dimensional representation of the building, allowing to carry out metric studies and additional segmentation for linking information of different nature, such as damage, cracks, stratigraphic and temporal data on each element of the 3D model [33].

The main difference between laser scanning and photogrammetry is that the scanners allow to receive data only on the intensity of the reflected signal, they lead to gradations of gray, so you can perceive the “point cloud” as a black-and-white three-dimensional

discrete model. However, the point cloud presented in this way provides an incomplete view of the site, as the color information is completely missing. This fact became a prerequisite for the development of such a technology, in which the results of laser scanning and digital photogrammetry will be combined. As a result of the combination of laser scanning data and digital imaging it is possible to obtain a quite realistic color discrete model [31].

Autodesk ReCap is a family of desktop and cloud solutions provided by Autodesk for creating 3D models from imported photos and laser scans. It creates a point cloud or grid ready for CAD and BIM development tools.

The ReCap scanning results processing is just a process of comparing 3 points in the XYZ axis between two different scans [30].

Autodesk ReCap allows to create the project of a building not from “zero”, and taking into account existing constructions, communications or a landscape [31].

Building orientation with BIM models

Mobile applications that use GPS are now widely used in outdoor navigation, but are not available indoors. However, this problem can be easily solved with the help of the location system (ILS). The internal positioning system is usually implemented via Bluetooth, infrared, magnetic field or WI-FI, and is used to locate the electronic device and when it connects to ILS, the system can store and use this data. The second aspect of the problem is that room maps that need to be integrated into mobile applications are not available, so the idea of combining BIM technology and location sensors was born. There is a concept of the “Find me!” mobile application [34] is a connection between the user’s current location (from the nearest beacon) and the building’s information model, which contains the

Fig. 13. Color three-dimensional discrete model of the monument

Fig. 14. An example of work in ReCap PRO

Fig. 15. Three-dimensional model based on 8 photos

location of the room, beacon, staircase, and elevator, as well as map navigation. It combines Bluetooth beacons and BIM models to show the user its location and path to the destination.

Algorithm of the application:

Beacons (with configured identification data) are placed on the basis of automatic analysis of building geometry.

The mobile application calculates the shortest path between your current location and destination using a pathfinder.

The calculated path is displayed on the map and is updated step by step (when a new beacon appears, it overlaps) until the destination room is reached.

Ways to improve the efficiency of the construction process with the help of BIM-technologies

Automated intelligent observation platform manages special intelligent agents (virtual reality cameras, RFID-scanners radio frequency identification, remote sensors, etc.). It is a self-organizing network for real-time data collection and presentation on the construction site, which provides optimal stand-alone control functions. This technology makes it possible to move from human expertise to a daily automated inspection of the building's condition.

Such a system can have a wide range of possible applications, including

- identification, reporting and documentation of defects and errors in the building environment;
- monitoring of construction progress;
- creation, maintenance and updating of a storage facility for construction site materials or optimisation and monitoring of workforce deployment [15].

Information modelling of a building assumes complex collection and processing in the course of designing of all architectural and design, process, economic and other information on a building with all its interrelations and dependences. By creating an accurate digital information model of the site, the integrated information environment of general data enables all participants of the investment and construction process, according to the regulations, to get the necessary information about the site at any time [25].

An application example of how such a stand-alone BIM system should work [35]:

1. The architect creates a 3D model of the building and extracts drawings of the “Architectural Solutions” section, which are automatically created in the program.
2. The designer loads the 3D model created by the architect into the calculation program, which defines

Fig. 16. The scheme of the application “Find me!”

the required parameters for the building elements (for example, diameter and pitch of reinforcement bars). Thus the program at once generates working drawings, sheets, specifications, and also creates the bill of quantities and calculates the estimate at the same time.

3. All this information is then shared with network engineers to design the networks. Utility networks are also added to the 3D model.

4. Construction Method Statement and Working Plan developers receive exact scope of works, thus the work time schedule of is made automatically.

5. Logistically starts working, the suppliers receive information about when and what materials need to be delivered to the construction site.

6. After the completion of construction, the three-dimensional model of the building created at the stage of design can be connected with the building itself by means of special sensors. It will allow to properly operate the site, to trace its microclimate, as well as emergency situations.

It is very important to ensure proper organization of safe operation through effective technical monitoring of the building condition, as well as optimization of the volume and quality of construction, significant saving of time and money resources at all stages of the life cycle of the building and structure [36].

At the moment, engineers and designers do not have access to the full potential of BIM, they spend more time than they could have for the design of large sites. However, potential efficiency gains can be achieved if data are available in the cloud during development. Large engineering companies and software suppliers will be able to develop a design for a specific task, and all operations that will take place with the model will be stored in a linked data structure. Examples of such a technology are presented in studies [37, 38, 25], and they provide evidence that this concept is feasible. The authors of these research papers managed to develop a working prototype of the tool to fulfill re-

quests in a browser with a visual three-dimensional representation of the results.

Not only the technology but also the equipment are important for increasing the productivity of the workflow. Conventional construction equipment is often not effective enough to fully cover the needs of people working on construction sites. To solve this problem, a DAQRI helmet (Smart Helmet) has been developed, in addition to preventing injuries from falling objects, it provides workers with additional information that is superimposed on what they already see in their physical environment, in other words, immersing them in an augmented reality. The helmet is equipped with four cameras: two at the front and two at the back to create a 360-degree view. Cameras can capture both images and videos, which also allows you to recognize targets in 2D and track sites. User records can be transmitted in real time, thus transmitting normal live workflows from the construction site. Software that collects and displays user configuration data and controls the camera is called Intellitack. In addition, the helmet provides information about the user's location (without GPS, Bluetooth and Wi-Fi). Built-in tracking devices create an environmental map that can serve as a basis for three-dimensional reconstruction of a site. DAQRI helmet allows the user to monitor directly the construction site: it can look at the control panel in the wall and determine if there is roughness, also through the thermal imaging camera, the helmet allows the user to see the temperature readings and determine whether the site is overheated. The helmet is equipped with an optional 3D laser camera for depth measurement and photographing in bad conditions.

The compatibility of the helmet with BIM technology allows for direct instructions and visual simulation for workers, allowing them to better and faster understand the tasks they need to perform. Thanks to this augmented reality, the interaction with the construction site becomes more interactive, accessible and easy to

interpret, which increases efficiency and improves communication.

Devices that allow you to control the software by hand and finger gestures of the user (Leap Motion Controller, Mio, Nimble VR, PrioVR) have the same importance. Below we will consider the application of these devices.

The Leap Motion Controller is a hand and finger measurement device used in virtual reality that converts movements into 3D input data while maintaining accuracy to the millimeter. It works without the need for any accessories and allows the user to manage all types of gestures — from moving objects, panning and zooming to creating shapes. The devices work with a variety of Autodesk software. The technology is based on two cameras and three infrared LEDs, which are capable of tracking 200 frames per second, providing a field of view of 150°. The biggest defect is that Leap Motion Controller is able to track a relatively small amount of interactive three-dimensional space — about 8 cubic feet, allowing you to make small hand gestures such as swiping, gripping, pinching and punching.

Myo

The second technology related to virtual reality is Myo. Myo also tracks finger and hand gestures, but based on muscle activity. The device is worn as a bandage and works on the basis of a combination of medical level EMG sensors, triaxial gyroscope, triaxial accelerometer, triaxial magnetometer. Electrical activity in the muscles of the user's forearm is related to its muscular movements, which, in turn, allow to control the software with the user's hand gestures. This sensor is used not only on construction sites, but also in laboratories monitoring robotics and equipment, as well as for digital presentations. The LEDs on the 93-gram unit inform the user of the current status and possible errors.

Nimble VR

Another hand movement tracking technology is the Nimble VR, which consists of a camera that is built into the Oculus headset, allowing you to work without additional handheld devices, thus providing a more natural interaction between the user's hands and fingers. The device differs from the Leap Motion Controller in that it uses depth measurement technology during flight. The device operates on the basis of an infrared laser that generates an invisible light pulse that illuminates the field of view of 110°. The sensor detects the reflection of infrared radiation from the environment and calculates the distance to specific points. The device detects gestures such as grabbing an object and moving it, opening menus, push buttons and general movements, best from a distance of 10–70 cm.

PrioVR

The latest developments in this area are present in PrioVR, a technology that includes a full body suit that wirelessly imports motion data into PrioVR, which in turn sends it to VR software in real time. The device

consists of an infrared sensor and an infrared camera and helps to perform the following actions: construction, demolition of structures, movement of cranes, as well as simple operations, such as opening doors in virtual reality. Multiple suits can be used simultaneously thanks to the extended action spectrum [15].

The BIM model considerably simplifies work with site as it allows to co-ordinate in a virtual mode all components of a building and to check up their interaction and working capacity. BIM technology gives us the ability to virtually predict all stages of the building's life cycle in many different ways. The importance of this monitoring is invaluable, as it helps to minimize various human errors in the process of determining the technical condition of buildings.

Integration of Tracking Sensor Technology onto the Information Modeling of Buildings and Structures

Summing up all of the above, it is important to say about the importance of the development of technologies that will combine BIM modeling and automated data collection systems using sensors. The urgency of this problem follows from the need for safe construction and operation of buildings, the availability of a convenient automated system of damage monitoring and collection of information on the state of buildings as a whole.

The following diagrams demonstrate which of the technologies described in the sections above can be combined in the information modelling and tracking sensor industry to maximize their effectiveness.

This diagram shows the possibility of using automated image monitoring in the field of photogrammetry, laser scanning and point cloud, as well as for uploading to ReCap. It will greatly simplify the work in each of the three areas.

The diagram above shows the principle of “mutual assistance” of one technology to another. With the help of point cloud laser scanning and the combination of light range detection and BIM technology, it is guaranteed to improve the work on the compilation of a unified information field.

It is worth noting that radio-frequency identifiers are multifunctional. They can not only collect data from a facility to create an information model, but can also provide real-time cloud access to this data. Therefore, this diagram illustrates the interrelation of these three components, which can work together.

The three technologies on the right are best to assess BIM damage after earthquakes. BLE sensors will provide the necessary information at a sufficiently high speed on an unlimited number of servers. Radio Frequency Scanners will be able to create an information model and real-time cloud access to it. And the automated image monitoring will help to build the most complete picture of damage to the building.

Fig. 17. Capabilities of combining automated monitoring by images

Fig. 18. The possibilities of combining the theory of a single information field

Fig. 19. Possibilities of using RFID scanners

Fig. 20. Possible methods for assessing the BIM model damage after earthquakes

CONCLUSION AND DISCUSSION

This article is aimed at considering and attempting to theoretically combine the principle of information modeling and technologies in the field of tracking sensors.

In the first part of the review, sensors measuring various parameters of the building's exterior and interior as well as damage sensors were considered. In the second part, existing ways of application of technologies of information modeling with a view of improvement of construction procedure and operation of buildings are presented.

The following conclusions were drawn from these two parts. The opportunity to combine such technolo-

gies as photogrammetry, laser scanning and ReCap software features with automated monitoring of images taken from various devices is presented. Further, it was concluded that it is possible to integrate a single information field into the area of laser scanning and the area of combination of technologies of detection and determination of light range and BIM construction. The next proposal is to combine detection technologies and cloud access to information models with radio-frequency identifiers. Finally, the final conclusion was the possibility of integrating the three technologies: BLE-sensors, RFID-scanners and automated image monitoring in the area of BIM damage assessment after earthquakes.

REFERENCES

1. Ghaffarianhoseini A., Tookey J., Ghaffarianhoseini A., Naismith N., Azhar S., Efimova O. et al. Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 75:1046-1053. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.083
2. Antwi-Afari M.F., Li H., Pärn E.A., Edwards D.J. Critical success factors for implementing building information modelling (BIM): A longitudinal review. *Automation in Construction*. 2018; 91:100-110. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.03.010
3. Wang H., Pan Yi., Luo X. Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: A review and bibliometric analysis. *Automation in Construction*. 2019; 103:41-52. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.03.005
4. Kamel E., Memari A.M. Review of BIM's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions. *Automation in Construction*. 2019; 97:164-180. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.11.008
5. Andriamamonjy A., Saelens D., Klein R. A combined scientometric and conventional literature review to grasp the entire BIM knowledge and its integration with energy simulation. *Journal of Building Engineering*. 2019; 22:513-527. DOI: 10.1016/j.jobbe.2018.12.021
6. Wang P., Takagi T., Takeno T., Miki H. Early fatigue damage detecting sensors — A review and prospects. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2013; 198:46-60. DOI: 10.1016/j.sna.2013.03.025
7. Lou Z., Wang L., Jiang K., Shen G. Programmable three-dimensional advanced materials based on nanostructures as building blocks for flexible sensors. *Nano Today*. 2019; 26:176-198. DOI: 10.1016/j.nantod.2019.03.002
8. Das S., Saha P. A review of some advanced sensors used for health diagnosis of civil engineering structures. *Measurement*. 2018; 129:68-90. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.07.008

9. Taheri S. A review on five key sensors for monitoring of concrete structures. *Construction and Building Materials*. 2019; 204:492-509. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.172
10. Dong W., Li W., Tao Z., Wang K. Piezoresistive properties of cement-based sensors: Review and perspective. *Construction and Building Materials*. 2019; 203:146-163. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.081
11. Braila N., Vakhrusheva S., Martynenko E., Kisel T. Development of a cultural heritage object BIM model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012030
12. Mohireva S.A., Glebova E.A., Loginova P.V., Nazinyan L.G. Qualitative assessment of the cost of the repair of historic buildings using automated monitoring systems. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2019; 2:7-22. DOI: 10.18720/CUBS.77.1 (rus.).
13. Kima J.W., Jeonga Y.K., Leea I.W. Automatic sensor arrangement system for building energy and environmental management. *Energy Procedia*. 2012; 14:265-270. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.12.887
14. Kuzina O. Conception of the operational information model of smart city control system. *E3S Web of Conferences*. 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012030
15. Asgari Z., Rahimian F.P. Advanced virtual reality applications and intelligent agents for construction process optimisation and defect prevention. *Procedia Engineering*. 2017; 196:1130-1137. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.08.070
16. Walaszczyk J., Batog P. Distributed Ethernet based system of measurement and visualization for buildings monitoring. *Procedia Engineering*. 2016; 57:1242-1250. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.157
17. Yu Yu., Woradechjumroen D., Yu D. Virtual surface temperature sensor for multi-zone commercial buildings. *Energy Procedia*. 2014; 61:21-24. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.11.896
18. Bolshakov V.I., Vaganov V.E., Bier Th.A., Bausk Ie.A., Matiushenko I.M., Ozhyschenko O.A. et al. The usage of smart materials for skin-diagnostics of building structures while their monitoring. *Procedia Engineering*. 2017; 172:119-126. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.033
19. Park J., Chen J., Cho Y.K. Self-corrective knowledge-based hybrid tracking system using BIM and multimodal sensors. *Advanced Engineering Informatics*. 2017; 32:126-138. DOI: 10.1016/j.aei.2017.02.001
20. Olenkov V.D., Popov D.S. Automation of diagnostics of the technical condition of buildings and structures during their operation. *Bulletin of SUSU*. 2012; 17:82-85. (rus.)
21. Spencer Jr.B.F., Hoskere V., Narazaki Y. Advances in computer vision-based civil infrastructure inspection and monitoring. *Engineering*. 2019; 5:199-222. DOI: 10.1016/j.eng.2018.11.030
22. Garyaeva V.V. Automation of real-time synchronization of data from BIM building models based on RFID technologies. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*. 2018; 5:186-188. DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-5-186-188 (rus.).
23. Ekba S. BIM technologies in the inspection of buildings and structures. *E3S Web of Conferences*. 2019; 110:1-6. DOI:10.1051/e3sconf/2019
24. Alirezai M., Noori M., Tatari O., Mackied K.R., Elgamal A. BIM-based damage estimation of buildings under earthquake loading condition. *Procedia Engineering*. 2016; 145:1051-1058. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.136
25. Minaev V.A., Mokhov A.I., Faddeev A.O., Kuzmenko N.A. Integration of BIM-technologies and models of geodynamic risks in the construction area. *Technology of Technosphere Security*. 2016; 1:267-273. (rus.).
26. Pruvost H., Scherer R.J. Analysis of risk in building life cycle coupling BIM-based energy simulation and semantic modeling. *Procedia Engineering*. 2017; 196:1106-1113. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.08.068
27. Yaagoubi R., Miky Ye. Developing a combined light detecting and ranging (LiDAR) and building information modeling (BIM) approach for documentation and deformation assessment of historical buildings. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 149:1-6. DOI: 10.1051/mateconf/201814902011
28. Warcho A. The concept of LIDAR data quality assessment in the context of BIM modeling. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019; XLII-1/W2:61-66. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-1-W2-61-2019
29. Sun Z., Cao Y.K. Data processing workflows from low-cost digital survey to various applications: three case studies of chinese historic architecture. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015; XL-5/W7:409-416. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-409-2015
30. Dezen-Kempter E., Soibelman L., Chen M., Müller Filho A.V. An integrated laser and image surveying approach in support of model-based information technology for inventory of campus historic buildings. *Proc. of the 32nd CIB W78 Conference*. 2015; 128-138. DOI: 10.13140/RG.2.1.3468.7441
31. Melnikova O.G., Oleinikov P.P. Information modeling of buildings: experience in the reconstruction of cultural heritage monuments. *Sociology of the City*. 2013; 4:72-80. (rus.).
32. Brusaporci S., Maiezza P. Re-loading BIM: between spatial and database information modeling for architectural heritage documentation. *Conference: XIII Congreso Internacional de Expresión Gráfica aplicada a la Edificación*. 2016; 835-847.

33. Canevese E.P., De Gottardo T. Beyond point clouds and virtual reality innovative methods and technologies for the protection and promotion of cultural heritage. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017; XLII-5/W1:685-691. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-685-2017
34. Ferreira J.C., Resende R., Martinho S. Beacons and BIM models for indoor guidance and location. *Sensors*. 2018; 18:1-20. DOI: 10.3390/s18124374
35. Khakhuk B.A., Kushu A.A., Akhmetov A.M., Melitonyan A.A. Methodology for creating BIM models. *Scientific Works of KubSTU*. 2018; 2:356-366. (rus.).
36. Demenev A.V., Artamonov A.S. Information modeling in the operation of buildings and structures. *Science*. 2015; 7:1-9. DOI: 10.15862/29TVN315 (rus.).
37. Rasmussen M.H., Hviid C.A., Karlshøj J. Web-based topology queries on a BIM model. *5th Linked Data in Architecture and Construction Workshop*. 2017. DOI: 10.13140/RG.2.2.22298.95685
38. Chien S., Chuang T., Yu H., Han Y., Soong B.H., Tseng K.J. Implementation of cloud BIM-based platform towards high-performance building services. *Procedia Environmental Sciences*. 2017; 38:436-444. DOI: 10.1016/j.proenv.2017.03.129
39. Kima S., Zadeh P.A., Staub-French S., Froesed T., Cavkae B.T. Assessment of the Impact of window size, position and orientation on building energy load using BIM. *Procedia Engineering*. 2016; 145:1424-1431. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.179
40. Zotkina S.P., Ignatova E.V., Zotkina I.A. The organization of autodesk revit software interaction with applications for structural analysis. *Procedia Engineering*. 2016; 153:915-919. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.225
41. Li W., Koob C., Chaa S.H., Laia J.H.K., Jinsoo Leec. A conceptual framework for the real-time monitoring and diagnostic system for the optimal operation of smart building : A case study in Hotel ICON of Hong Kong. *Energy Procedia*. 2019; 158:3107-3112. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.1005
42. Bai Q., Deng S., Li C., Qie Z. Application of BIM in the creation of prefabricated structures local parameterized component database. *Architecture and Engineering*. 2019; 4:13-21. DOI: 10.23968/2500-0055-2019-4-2-13-21
43. Bortoluzzi B., Sobieraj D., McArthur J.J. Automating the creation of facility and energy management BIM models. *Proceedings of the Joint Conference on Computing in Construction*. 2017; 153-160. DOI: 10.24928/JC3-2017/0144
44. Pruvost H., Scherer R.J. Analysis of risk in building life cycle coupling BIM-based energy simulation and semantic modeling. *Procedia Engineering*. 2017; 196:1106-1113. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.08.068
45. Lim J., Janssen P., Stoufs R. Automated generation of BIM models from 2D CAD drawings. *Learning, Adapting and Prototyping, Proceedings of the 23rd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, (CAADRIA)*. 2018; 2:61-70.
46. Janssen P., Chen K.W., Mohanty A. Automated generation of BIM models. *BIM Concepts*. 2016; 2:583-590.
47. Alirezai M., Noori M., Tatari O., Mackied K.R., Elgamal A. BIM-based damage estimation of buildings under earthquake loading condition. *Procedia Engineering*. 2016; 145:1051-1058. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.136
48. Chihib M., Salmerón-Manzano E., Novas N., Manzano-Agugliaro F. Bibliometric maps of BIM and BIM in universities: a comparative analysis. *Sustainability*. 2019; 11:1-22. DOI: 10.3390/su11164398
49. Lina J.R., Zhou Y.C., Zhang J.P., Hu Z.Z. Classification and exemplary BIM models development of design changes. *36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2019)*. 2019; 122-127. DOI: 10.22260/ISARC2019/0017
50. Kalyan T.S., Zadeh P.A., Staub-French S., Froesed T.M. Construction quality assessment using 3D as-built models generated with project tango. *Procedia Engineering*. 2016; 145:1416-1423. DOI: 10.1016/j.compind.2019.08.001
51. Olugboyega O. Developing Framework for managing Building Information Modelling processes. *PM World Journal*. 2017; VI:1-7.
52. Volkov A., Chelyshkov P., Brazhnikov P. Features of BIM-modeling of engineering systems of the construction object. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:1-7. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701010
53. Wu W., Li W., Law D., Na W. Improving data center energy efficiency using a cyber-physical systems approach: integration of building information modeling and wireless sensor networks. *Procedia Engineering*. 2015; 118:1266-1273. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.481
54. Yang X., Koehl M., Grussenmeyer P. Mesh-to-BIM: from segmented mesh elements to BIM model with limited parameters. *ISPRS TC II Mid-term Symposium "Towards Photogrammetry 2020"*. 2018; XLII-2. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-1213-2018
55. Atazadeh B., Rajabifard A., Zhang Y., Barzegar M. Querying 3D Cadastral Information from BIM Models. *International Journal Geo-Information*. 2019; 8:1-17. DOI: 10.3390/ijgi8080329
56. Provan G., Buadachain S.O. Sensor calibration and diagnostics under parameter uncertainty: a smart building application. *8th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS)*. 2012; 409-416. DOI: 10.3182/20120829-3-MX-2028.00267
57. Borodin S., Lyapina A. State examination of BIM-model on the basis of object technological depen-

dencies model. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 451:15. DOI: 10.1088/1757-899X/451/1/012082

58. Motawa I., Carter K. Sustainable BIM-based evaluation of buildings. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. 2013; 74:419-428. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.03.015

59. Lyapina A.R., Borodin S.I. Use of Building Information Modelling (BIM) in construction: the state expert inspection of construction projects in Russia. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real Estate*. 2018; 8(2):11-17. DOI: 10.21285/2227-2917-2018-2-11-17

60. Stančík A., Macháček R., Horák J. Using BIM model for fire emergency evacuation plan. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 146:1-6. DOI: 10.1051/mateconf/201814601012

61. Lebedeva V.I. Interconnection of the information model (BIM) and the model of technological object dependencies in the construction of facilities. *Modern*

Interdisciplinary Research: History, Present, Future. 2017; 30-37. (rus.).

62. Demenev A.V., Pavlov N.L. Integration of a monitoring and management system for engineering systems of buildings with a large stay of people. *Sciences of Europe*. 2016; 6:23-27. (rus.).

63. Bogdanov A.N., Aleshutin I.A. Ground-based laser scanning in construction and BIM-technologies. *News of KGASU*. 2018; 4:326-332. (rus.).

64. Gribkova I.S., Gorenko D.A. Overview of software for using BIM models. *Scientific Works of KubSTU*. 2018; 2:211-220. (rus.).

65. Sheina S.G., Upennikov D.K., Modern technologies, instruments and equipment for three-dimensional modeling of monuments of architectural heritage. *Science of Science*. 2015; 7(3):1-9. DOI: 10.15862/103TVN315 (rus.).

66. Kozlova T.I., Kulikova S.O., Talapov V.V., Guanyin Zhang. BIM and monuments of wooden architecture. *Geoinformation Systems and 3D Reconstruction*. 2015; 50-73. (rus.).

Received August 1, 2019.

Adopted in a revised form on November 15, 2019.

Approved for publication November 26, 2019.

BIONOTES: **Tatyana A. Sivak** — student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnic st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; sivak.ta@edu.spbstu.ru;

Pauline Yu. Kvasha — student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnic st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; yes_pol99@mail.ru.