
ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

Известия вузов. Строительство. 2021. № 11. С. 95–109.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2021; (11): 95–109.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 639.86:004

DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-95-109

РЕАЛИЗАЦИЯ BIM ПОЛНОГО ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТА НЕДВИЖИМОСТИ

Андрей Валерьевич Мищенко^{1, 2}, Елена Петровна Горбанева^{1, 2}

¹ Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

² Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, Москва, Россия

Аннотация. Показана ключевая роль использования BIM-технологий для оптимизации взаимодействия участников проекта. Сформулированы методы оптимизации BIM, основанные на кластеризации отдельных этапов жизненного цикла, и формирование векторных представлений кластеров BIM. Получены алгоритмы оптимизации векторов свойств и минимизации наборов форматов компонент векторов, обеспечивающие полную функциональность BIM на всех этапах жизненного цикла проекта. Показано, что полное описание BIM может быть построено на основе векторов различного уровня кластеризации. Сформулированы методы векторного описания свойств нескладируемых ресурсов, независящих от конкретного проекта. Получен алгоритм построения матрицы возможных сценариев реализации проекта при различных профилях нескладируемых ресурсов. Определены методы программной реализации всех сформулированных алгоритмов в оболочке реляционных баз данных. Приведены конкретные примеры векторов свойств и реализации предложенных алгоритмов.

Ключевые слова: информационное моделирование зданий, организационные уровни, жизненный цикл, цифровизация, проект

Благодарности: работа поддержана проектом № 3.1.7.1 Плана фундаментальных исследований Российской архитектурно-строительной академии на 2021–2023 гг. и Министерства строительства и коммунального хозяйства Российской Федерации. Исследования, результат которых изложен в данной работе, проводились с использованием оборудования ЦКП имени проф. Ю.М. Борисова ВГТУ, при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 075-15-2021-662.

Для цитирования: Мищенко А.В., Горбанева Е.П. Реализация BIM полного жизненного цикла объекта недвижимости // Известия вузов. Строительство. 2021. № 11. С. 95–109. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-95-109.

Original article

REAL ESTATE FULL LIFE CYCLE BIM IMPLEMENTATION

Andrey V. Mishchenko^{1, 2}, Elena P. Gorbaneva^{1, 2}

¹ Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

² Research Institute of Building Physics RAASN, Moscow, Russia

Abstract. The key role of using BIM technologies for optimizing the interaction of project participants is shown. BIM optimization methods based on clustering of individual life cycle stages and the formation of vector representations of BIM clusters are formulated. Algorithms properties vectors optimization and the minimization of the sets of formats of the components of the vectors are obtained, which provide full BIM functionality at all stages of the project life cycle. It is shown that a complete BIM description can be built on the basis of vectors of different clustering levels. Methods for the vector description of the properties of non-stock resources, independent of a specific project, are formulated. An algorithm for constructing a matrix of possible scenarios for the implementation of a project with various profiles of non-stocked resources is obtained. Methods of software implementation of all formulated algorithms in the shell of relational databases are determined. Specific examples of vectors of properties and implementation of the proposed algorithms are given.

Keywords: building information modeling, organizational levels, life cycle, digitalization, project

Acknowledgement: this research was supported by Project No. 3.1.7.1 within the 2021–2023 Plan of Fundamental Research of the Russian Academy of Architecture and Civil Engineering and Ministry of Civil Engineering and Public Utilities of the Russian Federation. The experimental studies have been carried out using the facilities of the Collective Research Center named after Professor Yu.M. Borisov, Voronezh State Technical University, which is partly supported by the Ministry of Science and Education of the Russian Federation, Project No. 075-15-2021-662.

For citation: Mishchenko A.V., Gorbaneva E.P. Real estate full life cycle BIM implementation. *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2021; (11): 95–109. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-95-109.

Для решения основных проблем, возникающих в секторе архитектуры, инжиниринга и строительства (АЕС), таких как отсутствие возможности справиться с обширной проектной информацией, проблемы безопасности и вклад большого числа неопределенности, используется целый набор инновационных, информационных и визуализационных технологий. К ним, в первую очередь, относятся информационное моделирование зданий (BIM), виртуальная (VR), дополненная (AR) и смешанная реальность (MR). При этом именно информационное моделирование зданий выделяется как вектор инноваций, стимулирующий революцию в современном гражданском строительстве [1]. Термин BIM означает процесс создания и управления цифровой моделью, содержащей всю информацию, относящуюся к конструкции. Эта методология объединяет управленческие процессы, организацию и технологии в цифровом пространстве. Она позволяет создать единую среду, в которой можно централизованно управлять всеми данными и информацией на протяжении всего жизненного цикла проекта [2].

Значительные усилия во внедрении BIM-технологий в течение полного жизненного цикла проекта были предприняты во многих странах Америки [3], Европы [4, 5], Азии [6, 7] и Австралии [8]. Вместе с тем международный

Таблица 1. Ход реализации проекта международного стандарта BIM
 Table 1. Progress of the project implementation of the international BIM standard

| № | Дата реализации, г. | Сфера применения |
|---|---------------------|--|
| 1 | 2018 | Концепции и принципы |
| 2 | 2018 | Этап сдачи объектов |
| 3 | 2019 | Этап эксплуатации объектов |
| 4 | 2020 | Обмен информацией |
| 5 | 2021 | Подход к управлению информацией с учетом вопросов безопасности |

опыт свидетельствует о значительных трудностях на пути внедрения BIM-технологий и соответствующих управленческих процедур в практику [9, 10]. Как отмечено в работе [11], проблемы внедрения BIM-технологий, присущие зарубежному строительному сектору, идентичны проблемам российской строительной отрасли. В частности, на современном этапе развития BIM основное внимание уделяется проектному этапу жизненного цикла строительной продукции.

С целью преодоления имеющихся трудностей на основе обобщения национального опыта Международная организация по стандартизации (ISO) начиная с 2018 г. последовательно разрабатывает и публикует части проекта международного стандарта BIM, описывающие различные стадии полного жизненного цикла строительного проекта¹.

Данный документ определяет требования и методы управления в BIM-проектах в гибком, адаптируемом и цифровом режиме. Такой подход позволяет сформулировать общие информационные требования, применяемые к BIM-моделям инженерами, архитекторами и менеджментом. Разрабатываемый регламент применим к полному жизненному циклу строительного проекта, включая технико-экономическое обоснование, проектирование, разработку документации, строительство, текущую эксплуатацию, техническое обслуживание, реконструкцию, ремонт и окончание срока службы.

Данный международный регламент весьма гибок и универсален, вследствие чего легко адаптируется к проектам любого масштаба и сложности. Рекомендуемые концепции и принципы для бизнес-процессов и процессов получения и обработки информации в течение жизненного цикла направлены на улучшение бизнес-результатов всех участников финансирования и реализации проектов. Сотрудничество между участниками реализации строительных проектов имеет решающее значение для эффективной деятельности [12]. Вследствие этого участники проекта стремятся работать в новых условиях сотрудничества для повышения качества управления и более широкого использования существующих знаний и опыта. Именно использование BIM полного жизненного цикла проектов позволяет расширить возможности эффективного взаимодействия участников, что снижает риски и затраты. Ход реализации международного проекта представлен в табл. 1.

¹ ISO 19650–1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) – Information management using building information modeling.

| | |
|----|--|
| 1 | Формулирование задачи |
| 2 | Технико-экономическое обоснование |
| 3 | Проектирование |
| 4 | Определение векторной модели объекта |
| 5 | Расчет характеристик модели |
| 6 | Определение характеристик ресурсов, необходимых для сооружения объекта |
| 7 | Формулирование календарного плана строительства |
| 8 | Реализация календарного плана |
| 9 | Эксплуатация, текущий ремонт |
| 10 | Капитальный ремонт, реновация |
| 11 | Утилизация |

Рис. 1. Кластеризация BIM отдельных этапов полного жизненного цикла

Fig. 1. Clustering of BIM of individual stages of the full life cycle

На основе первых двух частей проекта международного стандарта BIM в РФ был разработан и в 2019 г. внедрен национальный стандарт². Значительный импульс развитию BIM-технологий в России дало поручение Президента РФ главе Правительства (Пр-1235 от 19.07.2018), в котором, в частности, сформулирована цель обеспечить переход к системе управления жизненным циклом объектов капитального строительства путем внедрения технологий информационного моделирования. Решению этой задачи и посвящена данная научная статья.

Информационная модель полного жизненного цикла строительного проекта имеет весьма высокую размерность. Так, в работе [13] предлагается использовать 9D информационную модель (пространственные координаты, время, материальные и финансовые ресурсы, технико-технологические характеристики, энергоэффективность, углеродный след). Разработка столь подробной цифровой модели потребовала привлечения значительных интеллектуальных (участвовали сотрудники шести организаций из четырех стран), материальных и временных ресурсов. Однако даже и столь сложная модель не полностью описывает жизненный цикл проекта (так, не учтены количественные и качественные характеристики трудовых ресурсов на разных этапах цикла). Вследствие высокой размерности BIM и разнообразия форматов данных значительно усложняются не только алгоритмы ее формирования, но и процедуры взаимодействия участников реализации проекта [14]. Это накладывает значительные ограничения на возможности массового внедрения BIM-технологий. Преодоление этих ограничений даже при высоких финансовых затратах потребует значительного времени [15].

Преодолеть эту трудность позволяет модель BIM отдельных этапов полного жизненного цикла и формирование векторных представлений отдельных кластеров BIM. При этом векторы свойств на всех этапах должны иметь оптимальную размерность, обеспечивающую полную функциональность BIM, а набор форматов компонент векторов должен быть минимизирован. Именно такой подход и использован в данной работе. Схема кластеризации BIM приведена на рис. 1.

² ГОСТ Р 58439.1–2019. Национальный стандарт Российской Федерации «Организация информации об объектах капитального строительства».

Сформулируем алгоритмы выполнения п. 4–6 получения информации из предшествующего кластера и передачи информации в последующий кластер. Векторное представление ВМ любого проекта может быть построено на основе динамически обновляющейся библиотеки типов (базовая структура) и типоразмеров (производная структура) элементов, используемых в строительстве.

Далее на основе результатов схемы кластеризации ВМ (рис. 1) с учетом динамической библиотеки типов/типоразмеров строится вектор X_1 характеристик структуры первого уровня. Так, для описания характеристик структуры «стена», необходимых для реализации схемы, должны быть заданы характеристики, набор которых представлен в табл. 2.

Обозначения для окон и дверей, имеющих радиусные элементы, отражены на рис. 2.

Таблица 2. Набор характеристик структуры «стена»

Table 2. A set of characteristics of the «wall» structure

| № | Показатель | Обозначение | Источник | Формат | |
|----|--|---------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| 1 | Длина | L | Проект | Число действительное | |
| 2 | Высота полная | H | | | |
| 3 | Высота нижней части | h | | | |
| 4 | Тип покрытия нижней части | Td | | Текст | |
| 5 | Тип покрытия верхней части | Tu | | | |
| 6 | Тип черновой отделки | Td | | | |
| 7 | Число типов окон | Kw | | Библиотека типоразмеров | Число целое |
| 8 | Количество окон i -го типа | nw_i | | | Число действительное |
| 9 | Наименование окна i -го типа | Nw_i | | | |
| 10 | Высота окна i -го типа | Hw_i | Проект | Число действительное | |
| 11 | Ширина окна i -го типа | Lw_i | | | |
| 12 | Радиус окна i -го типа | rw_i | | | |
| 13 | Центральный угол окна i -го типа | φw_i | | | |
| 14 | Расстояние от пола до нижней грани окна i -го типа | hw_i | Проект | Число целое | |
| 15 | Число типов дверей | Kd | | | |
| 16 | Количество дверей i -го типа | nd_i | | | Текст |
| 17 | Наименование двери i -го типа | Nd_i | | | |
| 18 | Высота двери i -го типа | Hd_i | Библиотека типоразмеров | Число действительное | |
| 19 | Ширина двери i -го типа | Ld_i | | | |
| 20 | Радиус двери i -го типа | rw_i | | | |
| 21 | Центральный угол двери i -го типа | φw_i | | | |

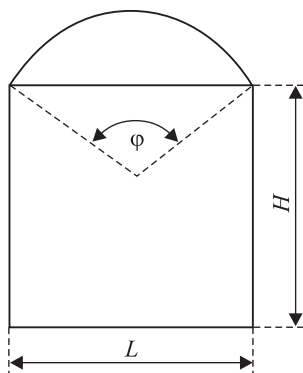


Рис. 2. Обозначения для радиусных элементов

Fig. 2. Designations for radius elements

Далее по формулам (1)–(3) вычисляется полная площадь остекления, дверей и черновой отделки стены соответственно. В отсутствие радиусных элементов вторые слагаемые в формулах (1) и (2) равны нулю.

$$S_w = \sum_{i=1}^{K_w} n w_i \left[H w_i L w_i + \frac{r w_i^2}{2} (\varphi w_i - \sin(\varphi w_i)) \right], \quad (1)$$

$$S_d = \sum_{i=1}^{K_d} n d_i \left[H d_i L d_i + \frac{r d_i^2}{2} (\varphi d_i - \sin(\varphi d_i)) \right], \quad (2)$$

$$S = HL. \quad (3)$$

На следующем этапе по формулам (4) и (5) вычисляем площади покрытия нижней и верхней части стены соответственно:

$$S_d = \left(L - \sum_{i=1}^{K_d} n d_i L d_i \right) h - \sum_{i=1}^{K_w} n w_i \max(0; h - h w_i) L w_i, \quad (4)$$

$$S_u = L(H - h) - \sum_{i=1}^{K_w} n w_i \left[\max(0; h w_i - h) L w_i + \frac{r w_i^2}{2} (\varphi w_i - \sin(\varphi w_i)) \right] - \sum_{i=1}^{K_d} n d_i \left[\max(0; h d_i - h) L d_i + \frac{r d_i^2}{2} (\varphi d_i - \sin(\varphi d_i)) \right]. \quad (5)$$

Аналогичным образом строятся векторы других структур первого уровня (пол, потолок, лестничный марш, крыша и др.). Источники информации, наборы форматов данных для всех таких структур совпадают с аналогичными характеристиками разобранного примера. Совпадают также и методы расчета объемов выполняемых работ. Далее из векторов **X1** строятся векторы характеристик структур второго уровня **X2** (комната, коридор и др.). Компонентами вектора **X2** являются векторы **X1** (текстовый формат) и их количество (в формате целого числа). Для проектов малоэтажного строительства набор векторов **X2** полностью описывает проект. При реализации проектов индустриального строительства эффективное описание ВММ может строиться на основе итерационной кластеризации векторов более низкого ранга. Возможная структура ВММ приведена на рис. 3.

Объемы работ на любом этапе усложнения структуры суммируются. Поэтому для любого вектора **Xi** ($i = 1, 2, 3, \dots, I$) могут быть рассчитаны векторы набора работ – **Wi** ($i = 1, 2, 3, \dots, I$) и их объемов – **Vi** соответственно. Размерность компонент вектора **Vi** определяется нормативными и техническими документами, используемыми при реализации проекта и, как правило, совпадает с основными единицами системы СИ (м, м², м³, кг и др.), их дробными или кратными частями (см, т и др.). Применение единиц других систем (дюйм, фут, фунт и др.) или внесистемных единиц (кгс, атм и др.) нежелательно и должно быть обосновано специально. Примеры векторов

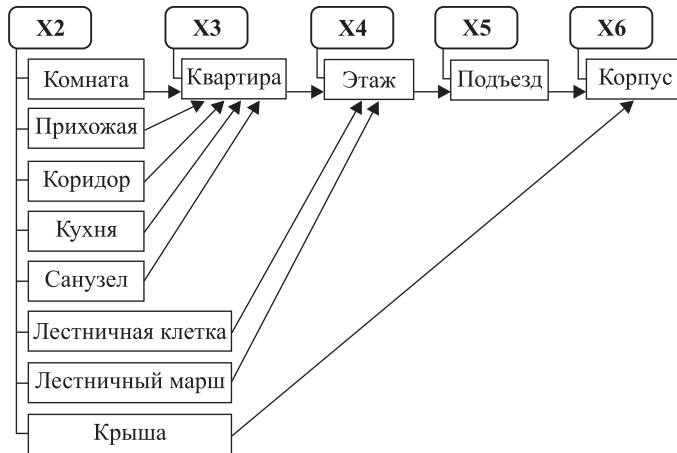


Рис. 3. Структура BIM на основе итерационной кластеризации векторов более низкого ранга

Fig. 3. BIM structure based on iterative clustering of lower-rank vectors

свойств, работ и объемов для проекта строительства детского сада приведены в табл. 3.

Поскольку вектор X_i ($i = 2, 3, \dots, I$) полностью определяется набором предшествующих векторов X_j ($j = 1, 2, 3, \dots, i$), предложенный итерационный алгоритм построения BIM полностью решает задачу оптимизации взаимодействия участников реализации проекта. Это открывает возможность широкого практического применения BIM-технологий в строительстве.

Таблица 3. Набор характеристик структуры «стена» на примере помещения пищеблока детского сада

Table 3. A set of characteristics of the «wall» structure on the example of a kindergarten food hall

| № | Показатель | Обозначение | Стена 1 | Стена 2 | Стена 3 | Стена 4 |
|---|------------------------------|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | | Размеры | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | Длина | L | 9 | 4,5 | 9 | 4,5 |
| 2 | Высота полная | H | 3600 | 3600 | 3600 | 3600 |
| 3 | Высота нижней части | h | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 |
| 4 | Тип покрытия нижней части | Td | Керамогранит | Керамогранит | Керамогранит | Керамогранит |
| 5 | Тип покрытия верхней части | Tu | Окраска | Окраска | Окраска | Окраска |
| 6 | Тип черновой отделки | Td | Цементная штукатурка | Цементная штукатурка | Цементная штукатурка | Цементная штукатурка |
| 7 | Число типов окон | Kw | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | Количество окон i -го типа | nw_i | 3 | 0 | 0 | 0 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|--|---------------|------------------------|-----|----------------------------------|---|
| 9 | Наименование окна i -го типа | Nw_i | Большое двухстворчатое | Нет | Нет | Нет |
| 10 | Высота окна i -го типа | Hw_i | 1,5 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | Ширина окна i -го типа | Lw_i | 1,5 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | Радиус окна i -го типа | rw_i | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | Центральный угол окна i -го типа | φw_i | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | Расстояние от пола до нижней грани окна i -го типа | hw_i | 1,2 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | Число типов дверей | Kd | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 16 | Количество дверей i -го типа | nd_i | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 17 | Наименование двери i -го типа | Nd_i | Нет | Нет | Межкомнатная, деревянная широкая | Межкомнатная, деревянная двухстворчатая |
| 18 | Высота двери i -го типа | Hd_i | 0 | 0 | 2 | 2 |
| 19 | Ширина двери i -го типа | Ld_i | 0 | 0 | 0,8 | 1,2 |
| 20 | Радиус двери i -го типа | rw_i | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 21 | Центральный угол двери i -го типа | φw_i | 0 | 0 | 0 | 0 |

Независимо от конкретного проекта зададим \mathbf{R} – вектор свойств нескладируемых ресурсов (персонала, оборудования и др.), состав и формат компонентов которого отражен в табл. 4. Размерность компонентов вектора \mathbf{R} определяется размерностью компонент векторов \mathbf{Vi} и промежутками планирования (час, смена, сутки, неделя и др.), используемыми при реализации проекта. Источником информации в этом случае являются результаты динамического мониторинга текущей деятельности организаций строительного комплекса региона.

При формировании вектора \mathbf{R} учитываются возможности как выполнения работ за счет различных ресурсов, так и использования ресурса при выполнении разных работ. Пример заполнения данных вектора свойств нескладируемых ресурсов приведен в табл. 5.

Для дальнейшей работы необходимо транспонировать вектор \mathbf{R} и привести его к виду $\tilde{\mathbf{R}}$. Конкретный пример транспонированного вектора свойств нескладируемых ресурсов для проекта строительства детского сада (помещение пищеблока) приведен в табл. 6.

Таблица 4. Состав компонентов вектора свойств нескладируемых материалов R

Table 4. Composition of the components of the vector of properties of non-stackable materials R

| Ресурс | Выполняемые работы | Производительность | Удельные затраты |
|--------|--------------------|--------------------|------------------|
| 1 | Работа 1.1 | P1.1 | C1.1 |
| | Работа 1.2 | P1.2 | C1.2 |
| | ... | ... | ... |
| | Работа 1.k1 | P1.k1 | C1.k1 |
| 2 | Работа 2.1 | P2.1 | C2.1 |
| | Работа 2.2 | P2.2 | C2.2 |
| | ... | ... | ... |
| | Работа 2.k2 | P2.k2 | C2.k2 |
| ... | | | |
| m | Работа m.1 | Pm.1 | Cm.1 |
| | Работа m.2 | Pm.2 | Cm.2 |
| | ... | ... | ... |
| | Работа m.k2 | Pm.km | Cm.km |

Далее на основании векторов V_i и \tilde{R} строится матрица M возможных сценариев реализации проекта (табл. 7), содержащая информацию о полном времени и затратах использования ресурсов при выполнении всего объема работ, необходимых для реализации описываемой части проекта (в зависимо-

Таблица 5. Пример заполнения данных вектора свойств нескладируемых ресурсов при выполнении различных работ
Table 5. Example of filling in the data of the vector of properties of non-stackable resources when performing various works

| Работа | Используемый ресурс | Производительность | Удельные затраты |
|--------|---------------------|--------------------|------------------|
| 1 | Ресурс 1.1 | P1.1 | C1.1 |
| | Ресурс 1.2 | P1.2 | C1.2 |
| | ... | ... | ... |
| | Ресурс 1.m1 | P1.k1 | C1.k1 |
| 2 | Ресурс 2.1 | P2.1 | C2.1 |
| | Ресурс 2.2 | P2.2 | C2.2 |
| | ... | ... | ... |
| | Ресурс 2.m2 | P2.k2 | C2.k2 |
| ... | | | |
| k | Ресурс k.1 | Pk.1 | Ck.1 |
| | Ресурс k.2 | Pk.2 | Ck.2 |
| | ... | ... | ... |
| | Ресурс k.mk | Pk.mk | Ck.mk |

Таблица 6. Формирование данных вектора свойств нескладируемых ресурсов при выполнении различных работ для проекта строительства детского сада (помещение пищеблока)

Table 6. Formation of data of the vector of properties of non-stackable resources when performing various works for the kindergarten construction project (food supply room)

| Вид работ | Выполняемые работы | Производительность | Удельные затраты, руб./м ² |
|-----------------------------------|---|---|---------------------------------------|
| Потолочные (штукатурка, покраска) | Штукатурка 40 м ² (2 человека) | 20 м ² /чел. | 500 |
| | Покраска 40 м ² (2 маляра) | 20 м ² /чел. | 210 |
| Штукатурка и облицовка стен | Штукатурка 64 м ² | 32 м ² /ч | 450 |
| | Облицовка плиткой 32,4 м ² | 32,4 м ² /чел. | 600 |
| Стяжка пола и укладка плитки | Цементная стяжка (толщина 15 см) 6 м ³ смеси – 40 м ² | 2 м ³ /чел. 13,3 м ² /чел. | 300 |
| | Укладка керамогранита 40 м ² | 40 м ² /чел. | 480 |
| Монтаж окон | Монтаж окон 1,5×1,5 – 3 шт. | 1,5 окно/человек | 650 |
| Монтаж дверей | Монтаж двери 2×0,8 и 2×1,2 | 1 дверь/человек | 2000 руб./ед.* |

* Оплата за единицу.

сти от степени кластеризации – стена, комната, квартира, этаж, подъезд, ..., проект). В матрице **M** в отличие от вектора **R** индекс *kpr* (число элементов перечня работ) определяется не полным числом элементов библиотеки свойств нескладируемых ресурсов, а лишь набором работ, необходимых для реализации описываемой части проекта.

Таблица 7. Матрица **M** возможных сценариев реализации проектаTable 7. Matrix **M** of possible project implementation scenarios

| Работа | Используемый ресурс | Время использования ресурса | Затраты использования ресурса |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 | Ресурс 1.1 | <i>t</i> 1.1 | <i>C</i> 1.1 |
| | Ресурс 1.2 | <i>t</i> 1.2 | <i>C</i> 1.2 |
| | ... | ... | ... |
| | Ресурс 1. <i>m</i> 1 | <i>t</i> 1. <i>k</i> 1 | <i>C</i> 1. <i>k</i> 1 |
| 2 | Ресурс 2.1 | <i>t</i> 2.1 | <i>C</i> 2.1 |
| | Ресурс 2.2 | <i>t</i> 2.2 | <i>C</i> 2.2 |
| | ... | ... | ... |
| | Ресурс 2. <i>m</i> 2 | <i>t</i> 2. <i>k</i> 2 | <i>C</i> 2. <i>k</i> 2 |
| ... | | | |
| <i>kpr</i> | Ресурс <i>kpr</i> .1 | <i>t</i> <i>k</i> .1 | <i>C</i> <i>k</i> .1 |
| | Ресурс <i>kpr</i> .2 | <i>t</i> <i>k</i> .2 | <i>C</i> <i>k</i> .2 |
| | ... | ... | ... |
| | Ресурс <i>kpr</i> . <i>mk</i> | <i>t</i> <i>k</i> . <i>mk</i> | <i>C</i> <i>k</i> . <i>mk</i> |

Если профиль ресурсов, используемых для выполнения работы, неизменен по времени (например, в комплексной бригаде), алгоритм построения матрицы \mathbf{M} значительно упрощается. В этом случае неизменными являются и полная производительность, и затраты бригады, соответственно определяемые формулами:

$$\tilde{P}_i = \sum_{j=1}^{m_i} n_{ij} P_{ij}, \quad (6)$$

$$\tilde{C}_i = \sum_{j=1}^{m_i} n_{ij} C_{ij}. \quad (7)$$

Здесь векторы $\mathbf{n}_i = \{n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{im_i}\}$ определяют профиль используемых ресурсов, т.е. число специалистов и единиц оборудования, применяемых бригадой для выполнения рассматриваемой работы на всем протяжении реализации проекта. Естественно, приближение постоянного профиля $\mathbf{n}_i = \text{const}$ может использоваться только на этапе планирования работ. При реализации календарного плана стохастические воздействия, связанные с временной нетрудоспособностью персонала или техническим состоянием оборудования, изменяют динамический профиль используемых ресурсов. На этом этапе следует использовать исходное описание свойств нескладированных ресурсов.

Информация, содержащаяся в матрице \mathbf{M} , позволяет решить несколько классов задач календарного планирования. Она дает возможность оценить длительность реализации проекта при фиксированном наборе нескладированных ресурсов. Возможна и постановка обратной задачи – определение профиля ресурсов при фиксированных сроках выполнения работ. Также возможна оптимизация затрат при изменении профиля ресурсов и сроков реализации проекта. При этом основным методом использования матрицы \mathbf{M} является формирование набора единиц планирования [16], составление на этой основе оптимального календарного плана и динамическая корректировка хода его реализации [15].

Оптимизация взаимодействия участников реализации проекта на базе технологии ВМ возможна только на основе унификации методов программной реализации используемых алгоритмов и форматов передаваемых данных. Выбор оболочки программной реализации определяется рядом требований [17]. Во-первых, ее функциональность должна быть достаточной для решения как текущих, так и перспективных задач [18]. Во-вторых, технические ресурсы и уровень квалификации персонала, необходимые для ее функционирования, должны быть доступны всем участникам реализации проекта. Кроме того, используемая оболочка должна учитывать динамический характер сектора архитектуры, инжиниринга и строительства и значительную длительность WLC .

Всем этим требованиям удовлетворяют реляционные базы данных (*RDBMS – Relational Database Management System*). Самые популярные среди них, на август 2021 г. занимавших более 90 % рынка, являются *MySQL* (разработанная шведской компанией *MySQL AB*), *MS SQL Server* и *MS ACCESS* (разработанные *Microsoft Corporation*), *ORACLE (Oracle Corporation)*. Из всех *RDBMS* наиболее демократичной является оболочка *MS ACCESS*. Ее

интерфейс знаком большинству пользователей, поскольку совпадает с интерфейсом приложений *MS OFFICE*, в составе которого распространяется *MS ACCESS*.

Многие разработчики (в частности, университеты) имеют бесплатную полнофункциональную лицензию продукта. Кроме того, корпорация Майкрософт предлагает бесплатные версии *Microsoft Access* ограниченной, но достаточной для многих приложений по функциональности. Это позволяет разработчикам СУБД в оболочке *MS ACCESS* создавать программные продукты, которые могут свободно распространяться неограниченному числу конечных пользователей, что значительно уменьшает препятствия на пути внедрения технологии ВІМ в практику АЕС.

Использование *MS ACCESS* позволяет унифицировать форматы передаваемых данных и обеспечить связность и непротиворечивость полного массива информации ВІМ. Только на этапе формирования библиотеки типов необходима как текстовая, так и числовая информация. На остальных этапах при построении векторов X_i ($i = 1, 2, 3, \dots, I$) необходимо указать номер вектора более низкого ранга без его наименования. В таком подходе изменение компонент векторов X_i (например, при модификации проекта или технологии изготовления отдельных элементов) автоматически каскадно обновляет и компоненты всех связанных векторов более высокого ранга. Такой подход позволяет избежать большинства ошибок ВІМ, возникающих при трансферте информации между участниками проекта. Кроме того, возникает возможность интеграции новых участников на протяжении всего жизненного цикла проекта. Вследствие этого область практического применения ВІМ значительно расширяется.

Таким образом, формирование и оптимизация векторных представлений отдельных кластеров ВІМ с учетом только части информации, достаточной на этапах полного жизненного цикла проекта, позволяют преодолеть отставание сектора архитектуры, инжиниринга и строительства в темпах цифровизации от лидеров этого процесса. Эффективное описание ВІМ должно базироваться на основе векторов характеристик структур различного уровня кластеризации. Число уровней кластеризации растет с увеличением масштаба проекта и не зависит от этапа его жизненного цикла. Алгоритм построения векторов характеристик должен базироваться на итерационной кластеризации векторов более низких уровней. Такой подход позволяет оптимизировать взаимодействие участников реализации проекта и облегчает широкое практическое применение ВІМ-технологий в секторе архитектуры, инжиниринга и строительства.

Дополнительные возможности интеграции новых участников на протяжении всего жизненного цикла проекта открывает унификация методов программной реализации алгоритмов и форматов передаваемой информации на основе реляционной базы данных. Возможность разделения структуры и содержания ВІМ в реляционных базах данных позволяет значительно расширить область практического применения полученных моделей. Связано это с двумя обстоятельствами. Высококвалифицированные кадры необходимы только на стадии формирования структуры, и на этой стадии необходима полнофункциональная лицензионная версия *RDBMS*. Наполнение и актуализация базы могут выполняться техническими работниками в режиме ограни-

ченной функциональности. Технология *RDBMS* позволяет в автоматическом режиме поддерживать связность и непротиворечивость информации при динамическом обновлении BIM. Это дает возможность избегать ошибок, возникающих при взаимодействии большого числа участников разной квалификации.

Заключение. Дальнейшее развитие предложенной модели предполагает формирование динамической BIM, что позволит распространить область ее применения на этапе реализации календарного плана строительства. Функционал динамической модели должен не только осуществлять текущий мониторинг, но и прогнозировать дальний ход реализации проекта в условиях внешних стохастических и динамических воздействий. Такой прогноз должен стать основой выработки управленческих и технических решений, направленных на достижение целей проекта.

Список источников

1. *Cheng J.C., Chen W., Chen K., Wang Q.* Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms // *Autom. Constr.* 2020. Vol. 112. P. 103087.
2. *Pan Y., Zhang L.* A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management // *Autom. Constr.* 2021. Vol. 124. P. 103564.
3. *Boton C., Forgues D., Halin G.* A framework for building information modeling implementation in engineering education // *Can. J. Civ. Eng.* 2018. Vol. 45, no. 10. P. 866.
4. *Mirarchi C., Pavan A.* Building information models are dirty // *European conference on computing in construction*. Chania, Greece, 2019. P. 1107–1115.
5. *Boton C.* Conception de vues métiers dans les collecticiels orientés service: Vers des multi-vues adaptées pour la simulation collaborative 4D/nD de la construction. Université de Lorraine, Nancy, 2019.
6. *Liu Z., Zhao M., Xu R.* BIM technology in China's Research and Development and engineering applications // *Constr. Technol.* 2017. Vol. 44, no. 10. P. 893–897.
7. *Chan I.Y.S., Liu A.M.M., Chen B.* Management strategies for the adoption of 5D-BIM in Hong Kong // *Proceedings of the 21st International Symposium on the Development of Construction and Real Estate Management (209889)*. 2018. P. 1023–1039.
8. *Aibinu A., Venkatesh S.* The status of BIM implementation and the experience of BIM cost consultants in Australia // *J. Prof. Issues Eng. Educ. Pract.* 2019. Vol. 140, no. 3. P. 04013021.
9. *Mirarchi C., Pavan A.* Building information models are dirty // *European conference on computing in construction*. Chania, Greece, 2019.
10. *Santos R., Costa A.A., Silvestre J.D., Pyl L.* Informetric analysis and review of literature on the role of BIM in sustainable construction // *Mechanics of Materials and Constructions*. 2019. Vol. 103, no. 14. P. 221–234.
11. *Абрамян С.Г., Котляревская А.О., Оганесян О.В., Бурлаченко А.О., Дикмеджян А.А.* Проблемы внедрения BIM-технологий в строительном секторе: обзор научных публикаций // *Инж. вестн. Дона*. 2019. № 9.
12. *Daniotti B., Pavan A., Spagnolo S.L., Caffi V., Pasini D., Mirarchi C.* BIM-Based Collaborative Building Process Management. Springer International Publishing, 2020. P. 181. DOI: 10.1007/978-3-030-32889-4
13. *Daniotti B., Bolognesi C.M., Spagnolo S.L., Pavan A., Signorini M., Ciuffreda S., Mirarchi C. et al.* An Interoperable BIM-Based Toolkit for Efficient Renovation in Buildings // *Buildings*. 2021. No. 11. P. 271.

14. D'Oca S., Ferrante A., Ferrer C., Perneti R., Gralka A., Sebastian R., Op't Veld P. Technical, financial, and social barriers and challenges in deep building renovation: Integration of lessons learned from the H2020 cluster projects // *Buildings*. 2018. No. 8. P. 174.
15. Mishchenko A.V., Gorbaneva E.P., Preobrazhensky M.A. Reduction of the BIM dimension of the full life cycle of building and facilities // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2021. No. 4. P. 95–105.
16. Gorbaneva E.P., Mishchenko A.V. Information Modeling of Real Estate at the Stage of Survey Works // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020. No. 2. P. 18–35.
17. Alekseev K. Relational database problems // *Cybernetics and programming*. 2020. No. 2. P. 7–18. DOI: 10.25136/2644-5522.2020.2.34076
18. Connolly T.M., Beg C.E. Database systems: a practical approach to design, implementation and management. 7th ed., Pearson, 2019. P. 1281.

References

1. Cheng J.C., Chen W., Chen K., Wang Q. Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms. *Autom. Constr.* 2020; (112): 103087.
2. Pan Y., Zhang L. A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management. *Autom. Constr.* 2021; (124): 103564.
3. Boton C., Forgues D., Halin G. A framework for building information modeling implementation in engineering education. *Can. J. Civ. Eng.* 2018; 45 (10): 866.
4. Mirarchi C., Pavan A. Building information models are dirty. European conference on computing in construction. Chania, Greece, 2019. P. 1107–1115.
5. Boton C. Conception de vues métiers dans les collecticiels orientés service: Vers des multi-vues adaptées pour la simulation collaborative 4D/nD de la construction. Université de Lorraine, Nancy, 2019.
6. Liu Z., Zhao M., Xu R. BIM technology in China's Research and Development and engineering applications. *Constr. Technol.* 2017; 44 (10): 893–897.
7. Chan I.Y.S., Liu A.M.M., Chen B. Management strategies for the adoption of 5D-BIM in Hong Kong. Proceedings of the 21st International Symposium on the Development of Construction and Real Estate Management (209889). 2018. P. 1023–1039.
8. Aibinu A., Venkatesh S. The status of BIM implementation and the experience of BIM cost consultants in Australia. *J. Prof. Issues Eng. Educ. Pract.* 2019; 140 (3): 04013021.
9. Mirarchi C., Pavan A. Building information models are dirty. European conference on computing in construction. Chania, Greece, 2019.
10. Santos R., Costa A.A., Silvestre J.D., Pyl L. Informetric analysis and review of literature on the role of BIM in sustainable construction. *Mechanics of Materials and Constructions*. 2019; 103 (14): 221–234.
11. Abramyan S.G., Kotlyarevskaya A.O., Oganessian O.V., Burlachenko A.O., Dikmedzhyan A.A. Problems of BIM Technologies Implementation in the Construction Sector: Review of Scientific Publications. *Inzhenernyy vestnik Dona = Engineering bulletin of the Don*. 2019; (9). (In Russ.).
12. Daniotti B., Pavan A., Spagnolo S.L., Caffi V., Pasini D., Mirarchi C. BIM-Based Collaborative Building Process Management. Springer International Publishing, 2020. P. 181. DOI: 10.1007/978-3-030-32889-4
13. Daniotti B., Bolognesi C.M., Spagnolo S.L., Pavan A., Signorini M., Ciuffreda S., Mirarchi C. et al. An Interoperable BIM-Based Toolkit for Efficient Renovation in Buildings. *Buildings*. 2021; (11): 271.
14. D'Oca S., Ferrante A., Ferrer C., Perneti R., Gralka A., Sebastian R., Op't Veld P. Technical, financial, and social barriers and challenges in deep building renovation:

- Integration of lessons learned from the H2020 cluster projects. *Buildings*. 2018; (8): 174.
15. *Mishchenko A.V., Gorbaneva E.P., Preobrazhensky M.A.* Reduction of the BIM dimension of the full life cycle of building and facilities. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2021; (4): 95–105.
16. *Gorbaneva E.P., Mishchenko A.V.* Information Modeling of Real Estate at the Stage of Survey Works. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020; (2): 18–35.
17. *Alekseev K.* Relational database problems. *Cybernetics and programming*. 2020; (2): 7–18. DOI: 10.25136/2644-5522.2020.2.34076
18. *Connolly T.M., Beg C.E.* Database systems: a practical approach to design, implementation, and management. 7th ed., Pearson, 2019. P. 1281.

Информация об авторах

А.В. Мищенко – аспирант, инженер

Е.П. Горбанева – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник

Information about the authors

A.V. Mishchenko – Post-graduate Student, Engineer

E.P. Gorbaneva – PhD, Ass. Professor, Senior Researcher

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.09.2021

Одобрена после рецензирования 15.10.2021

Принята к публикации 22.10.2021

The article was submitted 15.09.2021

Approved after reviewing 15.10.2021

Accepted for publication 22.10.2021