

Анализ особенностей проектирования на основе применения модульных элементов максимальной готовности

А.О. Рыбакова

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В середине XX в. технический прогресс позволил максимально укрупнить строительные элементы зданий, что привело к разработке новых индустриальных строительных систем и повышению темпов производства. Однако на данный момент вопрос полностью решен не был, и остается актуальным. Модульное строительство сегодня не имеет достаточного уровня распространения, но многие специалисты в области проектирования предсказывают его повсеместное внедрение в скором будущем. Останавливающим фактором развития этого направления является нехватка теоретических основ в области модульного проектирования, а также существенные различия с традиционным подходом проектирования.

Материалы и методы. Цель исследования — сформировать теоретическую основу модульного проектирования на базе изучения нормативных документов, российских и зарубежных научно-технических источников, опыта реализованных проектов. Задача — определить фундаментальные аспекты модульных элементов максимальной готовности: принципы данного модульного проектирования, параметры модульного элемента, преимущества и недостатки модульной системы, особенности проектных процессов.

Результаты. Теоретической основой модульного проектирования служат основные понятия, принципы и особенности. Продемонстрирован концептуальный процесс проектирования на примере формирования информационной модели, представлены параметры модульных элементов максимальной готовности, а также выполнен анализ влияния модульных атрибутов на жизненный цикл (ЖЦ) объекта строительства.

Выводы. Приведенная система принципов проектирования на основе модульных элементов максимальной готовности и параметры модульного элемента позволяют систематизировать существующие теоретические аспекты модульности, что дает возможность для реализации модульных зданий. Определен новый подход к проектированию, который оказывает влияние на весь ЖЦ, что дает основу для новых направлений инженерной деятельности и научных исследований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: BIM-технологии, модульные элементы максимальной готовности, комплектно-блочное проектирование, автоматизация проектирования, организация строительства, модульные конструкции, префабрикация

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках научного проекта № 20-37-90064.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рыбакова А.О. Анализ особенностей проектирования на основе применения модульных элементов максимальной готовности // Строительство: наука и образование. 2020. Т. 11. Вып. 2. Ст. 5. URL: <http://nsjournal.ru> DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.5

Analysis of design features based on the application of modular elements of maximum readiness

Angelina O. Rybakova

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In the middle of the 20th century, technological progress made it possible to enlarge the building elements of buildings as much as possible, which led to the development of new industrial construction systems and increased production rates. However, to date, the issue has not been completely resolved and remains relevant. Modular construction is not sufficiently widely spread today, but many design experts predict its widespread introduction in the near future. The factor that decelerates the development of modular construction is the lack of theoretical foundations in the field of modular design, as well as significant differences from traditional design approach.

Materials and methods. The purpose of this work is to develop the theoretical fundamentals of modular design based on the study of regulatory documents, Russian and foreign sources of research works, as well as the implemented projects. The task is to determine the fundamental features of modular elements of maximum readiness: principles of modular design, parameters of a modular element, advantages and disadvantages of a modular system, features of the design processes.

Results. The theoretical basis of modular design includes basic concepts, principles and features; the conceptual design process is described using the case of development of an information model; parameters of modular elements of maximum readiness are presented, and the influence of modular items on the life cycle of a construction facility is analyzed.

Conclusions. The presented system of principles of design based on modular elements of maximum readiness and parameters of modular elements allow us to systematize the established theoretical aspects of modularity, which make it possible to make modular buildings. The author formulates a new approach to design, which affects the entire life cycle and serves as the basis for new areas of engineering activities and scientific research.

KEYWORDS: BIM technologies, modular elements of maximum readiness, block design, design automation, organization of construction, modular structures, prefabrication

Acknowledgements. The reported study was funded by RFBR, project number 20-37-90064.

FOR CITATION: Rybakova A.O. Analysis of design features based on the application of modular elements of maximum readiness. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2021; 11(2):5. URL: <http://nso-journal.ru> DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.5 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Модульное производство технических систем — это комплектование разнообразных сложных стандартных и нестандартных комплексов с различными характеристиками и параметрами из сформированного ранее количества типов и типоразмеров модулей.

Модуль — автономное, готовое к монтажу изделие. Совокупность модулей образуют сложные системы путем соединения, разъединения, замены с целью получения новых комплексов с другими компонентами и характеристиками.

Модульный принцип обеспечивает быстрый монтаж, ремонтпригодность, удобство в обслуживании и транспортировке, возможность упрощенной замены одного узла без необходимости монтажа других узлов.

Модульное производство набирает популярность в различных технических сферах, а также в отраслях экономики. Для каждого направления деятельности модульность имеет свои характеристики, ограничения и пути развития. Каждое отраслевое инженерное направление обладает своим уровнем развития в области модульного производства: например, достаточно распространена модульность в судостроении, и одновременно незначительно она применяется в капитальном строительстве [1, 2]. Также использование модульности в промышленности различается для разных стран: на сегодняшний день лидер в этой области Китай. В Китае уже реализовано большое количество высотных зданий за счет максимального применения модульных элементов в строительстве и их эффективной разработки, строительство выполняется в короткие сроки.

Следовательно, для повышения эффективности строительства в нашей стране целесообразно использовать опыт зарубежных коллег, заниматься усовершенствованием и распространением модульности, искать новые пути развития и внедрения. Для достижения цели внедрения модулей в строительное производство важно сформировать теоретическую основу модульного проектирования: определить принципы данного направления, параметры модульного элемента, преимущества и недостатки модульной системы, особенности проектных процессов, в том числе формирования информационной модели. В результате образуется новый алгоритм проектиро-

вания, который в итоге окажет влияние на весь жизненный цикл (ЖЦ) объекта строительства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

I. Понятие модульного элемента максимальной готовности в строительстве

Модульный элемент в строительстве — это комплексная структурная единица, которая аккумулирует в себе свойства и характеристики нескольких элементов строительных конструкций. Модульный элемент имеет универсальные крепления для стыковки с другими модулями, что дает возможность взаимозаменяемости. Для наибольшей эффективности модульных элементов целесообразно создавать модули в виде, требующем минимум дополнительного вмешательства на строительной площадке [3–6].

Модульный элемент максимальной готовности в строительстве — заранее изготовленный из различных материалов полноценный элемент строительства, обладающий наивысшей степенью готовности для монтажа. Как правило, такие элементы производятся в заводских условиях, затем транспортируются на строительную площадку, где и происходит их поочередное внедрение в конструкцию объекта. Модуль включает в себя необходимые субэлементы с архитектурными и конструктивными характеристиками, инженерными решениями, оборудованием и, при необходимости, вариантами внутренней и наружной отделки. Разработанные варианты модулей можно комбинировать между собой для создания новых проектов. Один и тот же модульный элемент может использоваться по-разному в различных объектах строительства (рис. 1).

Модульный принцип строительства значительно ускоряет производство, а при рациональном монтаже еще и упрощает его. Однако для максимизации преимуществ важно уменьшить время на разработку материалов, транспортировку блоков и организовать рациональное их хранение на площадке. Максимальный размер блока ограничен производственными мощностями завода, а его габариты и вес требуют особых подходов при транспортировке и монтаже.

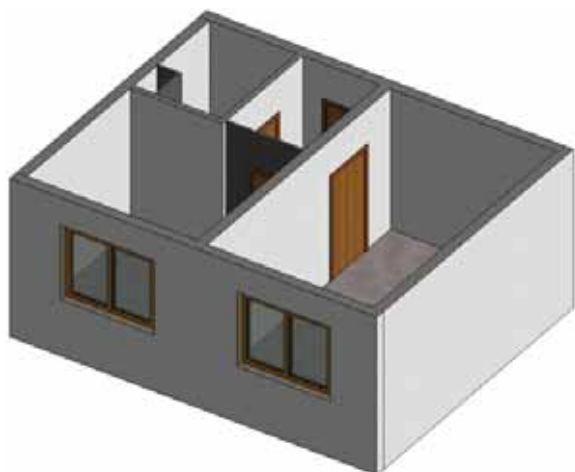


Рис. 1. Пример модульного элемента максимальной готовности

Один из главных моментов модульного принципа — качественная предварительная разработка модулей. Для эффективного использования модулей необходимо на этапе проектирования оперировать множеством существующих, ранее разработанных модулей, которые имеют подходящие характеристики, альтернативные варианты, классифицированы и систематизированы. От уровня разработки модулей и их количества зависят объем возможных вариантов планировок, инженерных решений и способы их реализации [7, 8].

Другим важным фактором является наличие инструментария как для разработки модулей, так и для полноценного проектирования. Ввиду специфики данного принципа, целесообразно применение технологий информационного моделирования [9, 10].

На сегодняшний день самый подходящий программный комплекс для данного вида работ — Autodesk Revit. Функционал программного комплекса позволяет максимально эффективно за короткий промежуток времени разработать проект, а также при необходимости экспортировать его в другое программное обеспечение. Предполагается, что для каждого модуля в Autodesk Revit будет создано Revit-семейство с необходимыми геометрическими и инженерными характеристиками — трехмерный блок. Итоговая BIM-модель проекта будет представлять собой комплекс интегрированных семейств модулей. Каждая информационная модель, разработанная по принципу модульности, будет являться одной из возможных комбинаций библиотеки модулей (рис. 2).

Максимизация количества BIM-модулей — основа большого количества потенциальных альтернативных вариантов BIM-моделей объекта. Для эффективного проектирования на базе модулей необходимо одновременное совершенствование классификации и систематизации блоков, а также расширение библиотеки. Однако один из ключевых аспектов качественного модульного проектирования — алгоритм разработки. Процесс проектирования на основе модульных элементов максимальной готовности значительно отличается от традиционного проектирования, что активизирует модернизацию общего алгоритма разработки [11].

При разработке модулей, а также проектировании на базе имеющейся системы модулей возникает проблема отсутствия соответствующей теоретической базы. Следует сформулировать принципы модульного проектирования, параметры модульности и особенности решения проектных задач на различных этапах.

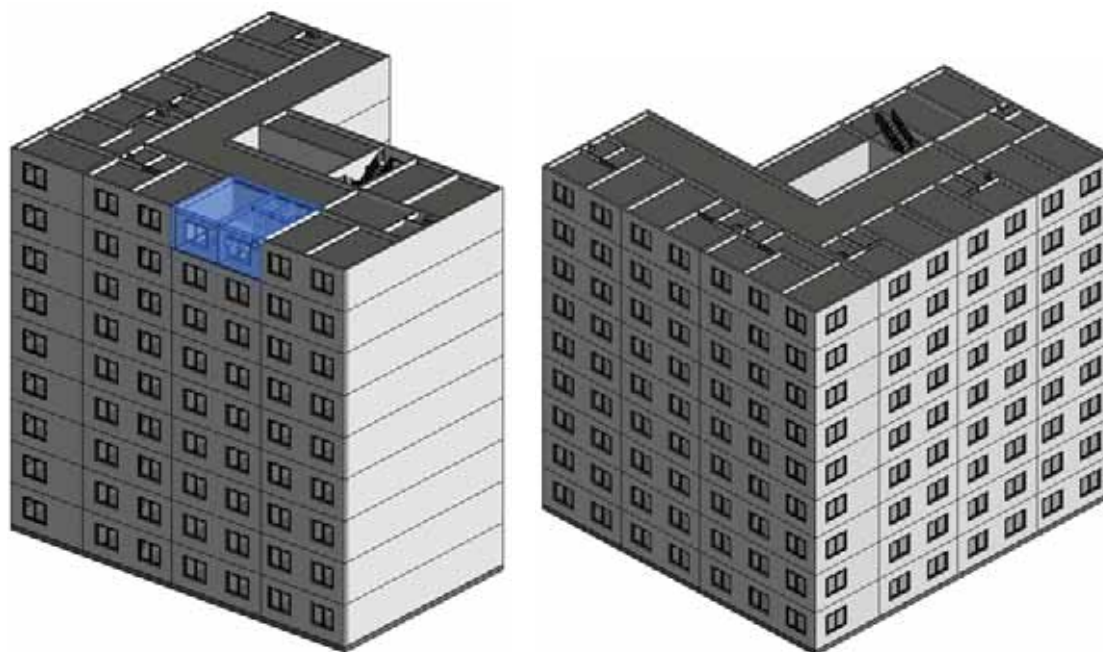


Рис. 2. Процесс формирования информационной модели в Autodesk Revit

II. Принципы модульного проектирования

Принцип модульного проектирования в глобальном смысле основывается на решении задач компоновки и предполагает условное разбиение будущего объекта капитального строительства (ОКС) на блоки, выполняющие определенные функции. Вместе с тем ввиду различного функционального назначения, уровня сложности и других исходных данных принципы невозможно сформулировать в рамках одного направления. Исходя из нормативных документов комплектно-блочного строительства, российских и зарубежных научных источников в области модульного проектирования, практического опыта современных строительных компаний различного уровня и профиля работы, а также анализа уже реализованных модульных проектов формируется теоретическая основа для данного направления проектирования¹.

Разработка проекта для будущего ОКС на базе модульности предполагает соблюдение определенных принципов. Множество этих принципов можно условно разделить на три уровня. К первому уровню относятся общие принципы модульного создания технических систем; ко второму — исключительно общестроительные принципы; к третьему — принципы, сформированные на основе специфики проектирования для соответствующего типа объекта строительства.

Принципы первого уровня включают универсальные положения, образующие основу модульного проектирования различных типов объектов. Формирование этих принципов базируется на совокупности требований конструктивности и функциональности [12–14]. Обобщенно принципы первого уровня можно сформулировать следующим образом:

1. Функциональная и геометрическая совместимость элементов.
2. Взаимозаменяемость элементов.
3. Корреляция размеров и параметров.
4. Классификация и систематизация элементов.
5. Наличие алгоритма формирования комплексного объекта.
6. Возможность анализа и расчета.

Принципы второго уровня определяются на основе принципов первого уровня с учетом особенностей строительного производства. На данном уровне важно учитывать распространенность проблемных ситуаций, климатические и территориальные особенности, инструменты проектирования [15, 16]. К принципам второго уровня можно отнести следующие:

1. Совместимость конструктивных элементов и инженерных систем.
2. Максимальное использование существующих элементов комплектно-блочного строительства.

¹ РД 102-005-88. Комплектно-блочный метод строительства наземных объектов. Общие требования : утвержден и введен в действие Миннефтегазстроем 01.07.1988. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200072977>

3. Ограничение высотности при использовании модулей.

4. Максимальное использование средств автоматизации для проектирования.

5. Адаптация инструментов программного обеспечения для модульного проектирования.

6. Дифференциация элементов с учетом климата.

7. Зависимость применения геометрических и функциональных параметров от транспортной доступности объекта.

8. Рационализация хранения и производства.

9. Гибкость методик организации строительства.

10. Энергоэффективность.

11. Экологичность материалов.

12. Регулярное расширение библиотеки модульных элементов.

13. Непрерывная актуализация классификации и систематизации строительных модулей с учетом инноваций.

Третий уровень принципов устанавливается на основе технологических особенностей и назначения будущего ОКС. По сравнению с принципами первого и второго уровней, третий может включать большее количество принципов за счет функционального и геометрического разнообразия объектов [17]. Часть принципов у различных объектов может дублироваться путем технологической схожести, часть является индивидуальной. Для систематизации принципов третьего уровня логично выделить универсальные для каждой группы объектов направления, которые, как правило, указаны в каждом техническом задании. Следовательно, принципы третьего уровня можно сгруппировать так:

1. Рационализация площади застройки.
2. Рационализация строительного объема.
3. Соответствие количеству жителей/работников.
4. Соответствие производственной мощности.
5. Учет режима функционирования.
6. Соответствие технологической специализации.

В совокупности три уровня принципов образуют систему требований к совокупности процессов проектирования. При рассмотрении отдельных групп принципов второго и третьего уровней можно выделять ряд не уникальных принципов, которые могут использоваться и при традиционном варианте [18–20]. Однако с учетом ограничений первого уровня весь комплекс принципов представляет собой полноценную систему требований к проектированию в рамках модульности.

Несмотря на то, что три уровня образуют теоретический фундамент, для полноценной разработки проекта на основе модульных элементов одной только системы принципов недостаточно. Поэтому необходимо дальнейшее рассмотрение основных компонентов технологии модульного строительства.

III. Процессы модульного проектирования и традиционного

Проектирование по модульному принципу предполагает отличия по сравнению с традиционными процессами проектирования. На основе этих отличий формируется как теоретическая основа, так и преимущества модульной системы [21, 22]. Так как решение о применении модульных элементов должно приниматься на начальной стадии, следовательно, проектные процессы отличаются с начала разработки эскизного проекта до ввода объекта в эксплуатацию или демонтажа всеми участниками и специалистами. Такие значительные изменения в комплексе проектных процедур порождают ряд принципиальных отличий:

1. Заказчик, генеральный подрядчик, а также все члены проектной команды начинают тесно сотрудничать на более ранних этапах. Проработка проектных решений, анализ вариантов и принятие решений происходят в рамках ограничений модульности. Одновременно появляются новые способы и пути проектирования.

2. Для начала работы недостаточно только средств проектирования, необходимо наличие библиотеки модульных элементов. Поскольку процесс проектирования в общем смысле сводится к выбору и комбинации блоков, важно их наличие в достаточном объеме, классификация, а также возможность производства и изготовления.

3. Для предотвращения коллизий большую роль играет предварительная тщательная координация конструктива и инженерных систем. В традиционном проектировании допускается корректировка трассировки или размещения объектов, в модульном — любое принципиальное изменение порождает разработку нового блока при невозможности замены элемента. Любая коллизия имеет больше негативных последствий для работы, однако при рациональной проработке модульного элемента с учетом специфики инженерных систем коллизии могут не возникать.

4. Один из фундаментальных вопросов — крепление модульных элементов между собой в процессе монтажа. В традиционном проектировании все виды узлов имеют устоявшуюся типизацию, в модульном проектировании еще предстоит большой путь разработки эффективных способов совмещения и последующего функционирования модульных элементов между собой.

5. Ввиду большего размера, объема и массы модулей, по сравнению с существующими строительными элементами, актуальным становится вопрос безопасности на строительной площадке. С учетом новых исходных данных необходим пересмотр актуальных норм охраны труда.

6. Требуется предварительное детализированное разделение строительно-монтажных и отделочных работ, которые будут выполнены в заводских условиях и непосредственно на строительной площадке. Понятие максимальной готовности подразумевает рациональное выполнение объема работ в производ-

стве, а не 100%-ное выполнение. Степень готовности изготовления модульного элемента зависит от многих факторов, в том числе от назначения будущего объекта, климатических условий и сроков строительства.

7. Перед специалистами в области разработки проекта организации строительства и логистики стоят новые задачи по части транспортировки, размещения и хранения модульных элементов. С учетом их размеров традиционные задачи значительно усложняются. С целью наиболее эффективного решения необходимо тесное сотрудничество архитекторов и конструкторов с логистами в процессе проектирования для предотвращения конфликтных ситуаций в будущем.

8. Для минимизации коллизий всех уровней и технологической принадлежности целесообразно определить ряд дополнительных согласований.

Процессы модульного проектирования и традиционного имеют определенные общие аспекты, однако фундаментальные различия очевидны. Недостатки модульности на начальных этапах работы достаточно компенсируются дальнейшими преимуществами за счет сокращения сроков и минимизации объема проектных работ [23]. Одновременно все сложности модульного проектирования уменьшаются с каждым новым объектом за счет наполнения библиотеки, накопления опыта и новых знаний, учета предыдущих ошибок.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Учитывая описанную в предыдущем разделе специфику модульных элементов, особенности проектных процессов и трехуровневую систему принципов модульного проектирования, можно сформулировать универсальные параметры модульного элемента максимальной готовности, а также определить обновленные процессы на всех этапах ЖЦ под влиянием модульности.

Параметры модульного элемента максимальной готовности целесообразно представить также в трехуровневой системе, которая соответствует принципам модульного проектирования и в то же время сохраняет свойства самого модульного элемента (табл. 1).

Внедрение модульных элементов максимальной готовности отражается на всех этапах ЖЦ любого объекта строительства. Изменения возникают как за счет нового или модифицированного проектного процесса, так и путем соблюдения принципов модульности. Новые атрибуты оказывают влияние на весь ЖЦ объекта двумя способами: прямое воздействие на конкретный этап и универсальное воздействие на все этапы ЖЦ одновременно (табл. 2).

Таким образом, проектирование на основе модульных элементов максимальной готовности создает не только новый подход к проектированию, но и отражается на каждом этапе ЖЦ.

Табл. 1. Параметры модульного элемента максимальной готовности

Принципы модульного проектирования	Свойства модульного элемента
I уровень	1.1 Форма 1.2 Габариты 1.3 Конструктив 1.4 Тип крепления/совмещения
II уровень	2.1 Функциональное назначение 2.2 Расположение (внутри/снаружи) 2.3 Материалы конструкций
III уровень	3.1 Уровень наполняемости 3.2 Климатическая принадлежность 3.3 Уровень сложности транспортировки

Табл. 2. Влияние модульных атрибутов на жизненный цикл объекта строительства

Номер	Стадия	Функция	Возможность BIM-модулей
1	Концепция	Предпроектные разработки с учетом библиотеки элементов Анализ целесообразности использования модульного проектирования Использование алгоритма подбора модульного элемента	Непрерывная разработка новых модульных элементов Актуализация классификации и систематизации модульных элементов Корректировка алгоритма разработки BIM-модулей Адаптация проектных процессов и СМР согласно условиям использования модулей Поиск новых инструментов реализации
2	Проектная документация	Проектирование в рамках библиотеки элементов Анализ целесообразности использования модульного проектирования в конкретном объекте	
3	Рабочая документация	Методология проектирования с учетом модульного элемента максимальной готовности	
4	Строительно-монтажные работы (СМР)	Организация строительной площадки с учетом транспортировки и хранения модулей Разбиение СМР согласно специфике модулей Технологическая последовательность с учетом модульных элементов	
5	Эксплуатация	Мониторинг технического состояния каждого блока модуля Возможность замены модульного элемента	
6	Демонтаж	Поэтапный модульный демонтаж	

На основе модульного принципа и сложностей его реализации формируются новые правила, требования и способы решения задач. Каждая особенность модульности порождает рационализацию проектирования в той или иной степени. Исходя из комплекса преимуществ использования модульных элементов формируется суммарный положительный эффект на весь ЖЦ объекта: ускорение проектирования и строительства, непрерывное улучшение качества решений и выполненных работ, применение высоких достижений в области инженерии.

Проблемные ситуации в случае проектирования на основе модульных элементов имеют временный характер, ввиду постоянного совершенствования систематизации, структуры элементов, алгоритма проектирования. Модульный принцип формирует новые направления для научных исследований и разработки новейших технологий производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Традиционные подходы к проектированию не всегда обеспечивают высокий уровень качества проектных решений, а также имеют большую длительность выполнения работ. Существующие на сегодняшний день способы ускорения и рационализации строительства справляются со своей задачей только частично, поэтому необходим новый комплексный подход, который может значительно повысить эффективность за счет суммарного улучшения нескольких аспектов одновременно. Проектирование на основе модульных элементов максимальной готовности в наилучшей степени может стать таким подходом. Модульный принцип включает целый ряд модернизаций, которые в итоге дают положительный эффект как проектированию, так и строительству.

Проектирование на основе модульного принципа содержит как теоретические аспекты реализации, так и практические. Использование данного принципа подразумевает разработку новых инструментов и способов решения новых задач, которые в значительной мере отличаются от задач традиционного проектирования.

Таким образом, проектирование на основе модульных элементов максимальной готовности является одним из перспективных направлений не только инженерной деятельности и строительного производства, но и научных исследований. Современный подход к проектированию формирует новые методи-

ки выполнения всех видов работ, открывает пути развития для специалистов всех уровней, участвующих в строительстве. Существующие программные комплексы обладают соответствующим функционалом для максимально эффективной разработки информационные модели. На основании анализа традиционного и модульного проектирования можно выделить неоспоримые преимущества применения принципа модульности. Данный способ проектирования является основой для дальнейшего эффективного функционирования объекта строительства, а также для успешной реализации новых проектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брагинцев С.В., Бахчевников О.Н., Бенова Е.В. Преимущества модульного проектирования малых комбикормовых заводов // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 6. С. 141–145. DOI: 10.24412/FeYK7B0nROQ
2. Дубовицкая М.М. Внутренние организационно-технологические процессы в сфере строительства: построение моделей с использованием современных инновационных технологий // Сметно-договорная работа в строительстве. 2020. № 7. С. 56–62.
3. Николайчук С.Е. Обзор самых эффективных инновационных инструментов в строительстве // Сметно-договорная работа в строительстве. 2019. № 9. С. 48–51.
4. Naranje V., Swarnalatha R. Design of Tracking System for Prefabricated Building Components using RFID Technology and CAD Model // Procedia Manufacturing. 2019. Vol. 32. Pp. 928–935. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.305
5. Бородулин К.В. Внедрение технологий информационного моделирования в процесс эксплуатации зданий и сооружений // Молодой ученый. 2019. № 2 (240). С. 200–202.
6. Pittau F., Malighetti L.E., Iannaccone G., Masera G. Prefabrication as large-scale efficient strategy for the energy retrofit of the housing stock: An Italian case study // Procedia Engineering. 2017. Vol. 180. Pp. 1160–1169. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.276
7. Gao Y., Tian X.-L. Prefabrication policies and the performance of construction industry in China // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 253. P. 120042. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120042
8. Андреева А.Б. Актуальность использования технологий информационного моделирования на всех этапах «жизненного цикла» объекта капитального строительства // Уральский научный вестник. 2019. Т. 3. № 2. С. 63–66.
9. Третьякова З.О., Воронина М.В. Использование новых информационных технологий в строительном моделировании // Современное образование: содержание, технологии, качество. 2019. Т. 1. С. 363–365.
10. Jang S., Lee G. Process, productivity, and economic analyses of BIM-based multi-trade prefabrication — a case study // Automation in Construction. 2018. Vol. 89. Pp. 86–98. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.035
11. Hwang B.-G., Ngo J., Wan Yi Her P. Integrated Digital Delivery: Implementation status and project performance in the Singapore construction industry // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 262. P. 121396. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121396
12. Arashpour M., Kamat V., Bai Yu., Wakefield R., Abbasi B. Optimization modeling of multi-skilled resources in prefabrication: Theorizing cost analysis of process integration in off-site construction // Automation in Construction. 2018. Vol. 95. Pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.07.027
13. Goh M., Goh Ya.M. Lean production theory-based simulation of modular construction processes // Automation in Construction. 2019. Vol. 101. Pp. 227–244. DOI: 10.1016/s0926-5805(02)00086-9
14. Чибурикова Д.А., Атаев Б.С., Мельникова О.Г. Модульное проектирование и конструирование многоквартирных домов с использованием готовых компонентов // Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса: сб. тр. Междунар. научно-практ. конф: в 2-х ч. Волгоград, 2020. С. 82–86.
15. Kasperzyk C., Kim M.-C., Brilakis I. Automated re-prefabrication system for buildings using robotics // Automation in Construction. 2017. Vol. 83. Pp. 184–195. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.002
16. Мануковский А.Ю., Курдюков Д.П., Коротков В.А. Опыт применения элементов технологии информационного моделирования // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2020. Т. 8. № 1 (48). С. 100–105. DOI: 10.34220/2308-8877-2020-8-1-100-105

17. Lu W., Chen K., Xue F., Pan W. Searching for an optimal level of prefabrication in construction: an analytical framework // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 201. Pp. 236–245. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.319
18. Ракова А.В., Иливанова Е.В. Новшества в строительстве // *Образование: профессиональный дебют: сб. мат. V Междунар. студ. научно-практ. конф. Мелеуз, 2019. С. 261–264.*
19. Anton A., Reiter L., Wangler T., Frangez V., Flatt R.J., Dillenburger B. A 3D concrete printing prefabrication platform for bespoke columns // *Automation in Construction*. 2021. Vol. 122. P. 103467. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103467
20. Lee J., Kim J. BIM-Based 4D Simulation to Improve Module Manufacturing Productivity for Sustainable Building Projects // *Sustainability*. 2017. Vol. 9 (3). P. 426. DOI: 10.3390/su9030426
21. Lyu Z., Lin P., Guo D., Huang G.Q. Towards zero-warehousing smart manufacturing from zero-inventory just-in-time production // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020. Vol. 64. P. 101932. DOI: 10.1016/j.rcim.2020.101932
22. Рашев В.С., Астафьева Н.С., Рогожкин Л.С., Григорьев В.Ю. Анализ внедрения технологии информационного моделирования в российских строительных компаниях по проектированию и строительству инженерных систем // *Вестник евразийской науки*. 2020. Т. 12. № 3. С. 11.
23. Плешивцев А.А. Применение технологий информационного моделирования для формирования функционального качества архитектурных (строительных) объектов // *Инновации и инвестиции*. 2020. № 10. С. 189–192.

Поступила в редакцию 8 июня 2021 г.

Принята в доработанном виде 28 июня 2021 г.

Одобрена для публикации 28 июня 2021 г.

ОБ АВТОРЕ: **Ангелина Олеговна Рыбакова** — преподаватель, аспирант кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 865289; angelinaribakova@yandex.ru.

INTRODUCTION

Modular production of technical systems represents the kitting of various complex standard and non-standard systems having different characteristics and parameters from the previously generated number of types and standard sizes of modules.

The module is a stand-alone, ready-to-install product. A set of modules is used to make complex systems by connecting, disconnecting, replacing different elements in order to obtain new complexes featuring different components and characteristics.

The modular principle provides for the quick installation, maintainability, serviceability and transportation, easy replacement of one unit without the need to install other units.

Modular manufacturing is gaining popularity in various technical fields and industries. For each area of activity, modularity has its own characteristics, limitations and development paths. Each branch of engineering has its own level of development of modular production: for example, modularity is quite common in shipbuilding, and at the same time it is barely used in the construction industry [1, 2]. Also, the use of modularity in industrial production varies from country to country: today, China is the leader in this area. A large number of high-rise buildings have already been constructed in China due to

the maximum use of modular elements in construction and their efficient development; construction takes very little time.

Consequently, in order to increase the efficiency of construction in our country, it is advisable to use the experience of foreign colleagues, to improve and disseminate modularity, to look for new ways of development and implementation. To achieve the goal of introducing modules into the construction process, it is important to form a theoretical basis for modular design: to determine the principles of this design area, parameters of a modular element, advantages and disadvantages of a modular system, features of design processes, including the formation of an information model. As a result, a new design algorithm is formed, which ultimately will have an impact on the entire life cycle of a construction facility.

MATERIALS AND METHODS

I. The concept of a modular element of maximum readiness in construction

A modular element in construction is a complex structural unit that accumulates the properties and characteristics of several elements of building structures. A modular element has universal fasteners that ensure its connectivity to other modules, which allows for in-

terchangeability. To ensure the highest efficiency of modular elements, it is advisable to create modules in a form that requires minimal additional intervention on the construction site [3–6].

A modular element of maximum readiness in construction is a full-fledged pre-fab building element made of various materials, which has the highest degree of readiness for installation. As a rule, such elements are manufactured at the factory, transported to the construction site, where they are consequently added to the structure of a facility. The module includes necessary sub-elements with architectural and structural characteristics, engineering solutions, equipment and, if necessary, options for interior and exterior decoration. The developed versions of modules can be combined with each other to create new projects. The same modular element can be used in different ways for different construction projects (Fig. 1).

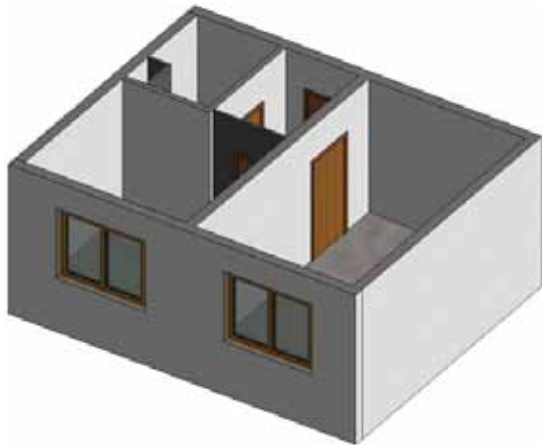


Fig. 1. An example of a modular element of maximum readiness

The principle of modular construction significantly speeds up the production process, and it also simplifies it if installation is rational. However, to maximize the benefits, it is important to reduce the time needed to develop materials, transport blocks and organize their efficient storage on site. The maximum block size is limited by the plant's production capacity, and its dimensions and weight require special approaches during transportation and installation.

One of the most important aspects of the modular principle is the quality pre-design of modules. For the effective use of modules, At the design stage it is necessary use a variety of existing, previously developed modules that have suitable characteristics; alternative options need to be classified and systematized. Potential layouts, engineering solutions and methods of their implementation depends on the extent of development of modules and their number [7–8].

Another important point is the availability of tools for both the development of modules and their full-fledged design. Given the specific features of this principle, it is advisable to use information modeling technologies [9–10]. Today the most suitable software package for this type of work is Autodesk Revit. The functionality of the software package allows to develop a project as efficiently as possible in a short period of time, and export it into a different software package, if necessary. It is assumed that for each module in Autodesk Revit, a Revit family with the necessary geometric and engineering characteristics will be created, that represents a 3D block. The final BIM model of the project will be a set of integrated module families. Each information model, designed according to the modularity principle, will be one of possible combinations of a module library (Fig. 2).

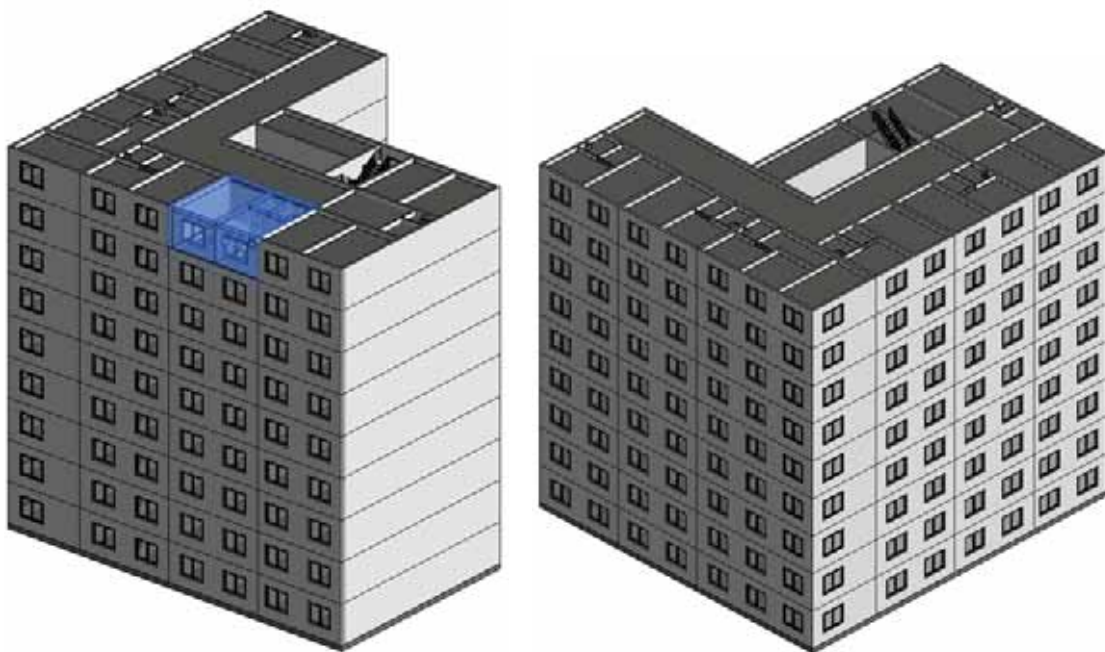


Fig. 2. The process of making an information model in Autodesk Revit

Maximization of the number of BIM modules is the basis for a large number of potential BIM alternatives for a construction facility. For effective module-based design, it is necessary to simultaneously improve the classification and systematization of blocks, as well as expand the library. However, one of the most important aspects of good modular design is the design algorithm. The design process based on modular elements of maximum availability differs significantly from traditional design, which activates the modernization of the overall development algorithm [11].

The problem of lack of an appropriate theoretical base arises when modules are developed and a project is designed on the basis of the existing system of modules. It is necessary to formulate the principles of modular design, modularity parameters and features of solving design problems at various stages.

II. Principles of modular design

The principle of modular design in a global sense is based on solving layout problems, and it contemplates the conventional division of the future construction facility into blocks that perform certain functions. However, due to different functional purposes, varying levels of complexity and other initial data, the principles cannot be formulated within one area of knowledge. Based on the regulatory documents of pre-fab construction, Russian and foreign researches in the field of modular design, the practical experience of modern construction companies of various levels and work profiles, as well as the analysis of implemented modular projects, a theoretical basis for this design school is formed¹.

The design development for a future construction facility based on modularity presupposes compliance with certain principles. Many of these principles can be roughly divided into three levels. The first level includes the general principles of modular formation of technical systems, the second one contemplates general construction principles, the third one encompasses the principles formed on the basis of design features of a particular type of construction facilities.

First-level principles include universal provisions that form the basis for modular design of various types of facilities. The formation of these principles is based on a set of requirements for designability and functionality [12–14]. In general, the principles of the first level can be formulated as follows:

1. Functional and geometric compatibility of elements.
2. Interchangeability of elements.
3. Correlation of sizes and parameters.
4. Classification and systematization of elements.

¹ RD 102-005-88. Complete-block method of construction of ground objects. General requirements. Approved and put into effect by the Ministry of Oil and Gas Construction on 01.07.1988: date of introduction 01.08.1988. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200072977>

5. The presence of an algorithm for the formation of an integrated facility.

6. Possibility of analysis and calculation.

Second-level principles are formed on the basis of the first-level principles, taking into account the peculiarities of the construction industry. At this level, it is important to take into account the abundance of problem situations, climatic and territorial features, design tools [15, 16]. The principles of the second level include the following:

1. Compatibility of structural elements and engineering systems.

2. Maximum use of existing elements of prefabricated construction.

3. Building height limitation in the case of module-based construction.

4. Maximum use of automated design tools.

5. Adaptation of software tools for modular design.

6. Differentiation of elements with regard for the climate.

7. The dependence of the use of geometric and functional parameters on the transport accessibility of a facility.

8. Streamlining storage and production.

9. Flexibility of construction organization methods.

10. Energy efficiency.

11. Environmental friendliness of materials.

12. Regular expansion of the library of modular elements.

13. Continuously updated classification and systematization of building modules with regard for innovations.

The third level of principles is formed on the basis of technological features and the purpose of the future construction facility. If compared to the principles of the first and second levels, the third level of principles can include a larger number of principles due to the functional and geometric diversity of facilities [17]. Some of the principles can be duplicated due to technological similarity, while others are individual. To systematize the principles of the third level, it is logical to single out the features that are universal for each group of facilities, which, as a rule, are indicated in each technical assignment. Therefore, the principles of the third level can be grouped as follows:

1. Rationalization of the construction area.

2. Rationalization of the amount of construction work.

3. Compliance with the number of residents/employees.

4. Compliance with production capacity.

5. Regard for the mode of operation.

6. Compliance with technological specialization.

Taken together, the three levels of principles form a system of requirements for a set of design processes. When considering individual groups of principles of the second and third levels, it is possible to single out a number of non-unique principles that can be used in traditional construction [18–20]. However, given the con-

straints of the first level, the whole set of principles is a complete system of requirements for design within the framework of modularity.

Despite the fact that the three levels form a theoretical foundation, a system of principles alone cannot fully develop a project based on modular elements. Therefore, further consideration of the main components of modular construction technology is necessary.

III. Modular design and traditional design processes

Modular design is fundamentally different from traditional design processes. The theoretical basis and advantages of the modular system originate from these differences [21, 22]. Since the decision on the use of modular elements should be made at the initial stage, design processes differ from the preliminary design stage to the commissioning of a facility or its dismantling by all participants and specialists. These major changes in the set of design procedures give rise to a number of fundamental differences:

1. The customer, the general contractor, and all members of the project team begin to work closely together at an earlier stage. Development of design solutions, analysis of options and decision making occurs within the limits of modularity. At the same time, new methods and ways of designing emerge.

2. Design tools are not enough to get started; one needs a library of modular elements. Since the design process is reduced to selection and combination of blocks, a sufficient number of elements, their classification, producibility and manufacturability are important.

3. Careful preliminary coordination of structural and engineering systems plays an important role in preventing conflict situations. Traditional design allows to correct the routing or location of facilities, while in modular design, any fundamental change causes the development of a new block accompanied by the impossibility of element replacement. Any conflict has more negative consequences for work; however, a rational study of a modular element with regard for the features of engineering systems can prevent conflicts.

4. One of the fundamental issues is the fastening of modular elements to each other during installation. In traditional design, all nodes are standard; in modular design, there is still a long way to go to develop effective ways of combining and subsequent functioning of modular elements.

5. Given the larger size, volume and mass of modules, in comparison with existing building elements, the issue of on-site safety becomes relevant. It is necessary to revise current occupational safety standards with regard for the new input data.

6. It is necessary to have a preliminary detailed division of construction, installation and finishing works, to find out the work to be performed at the factory and on the construction site. The concept of maximum readiness implies the rational execution of work, rather than its 100 % completion. The extent of readiness of a modular element depends on many factors, including the pur-

pose of the future facility, climatic conditions and construction time.

7. Specialists in the field of the organization of construction and logistics are facing new challenges in terms of transportation, arrangement, and storage of modular elements. Given their size, traditional tasks become much more complex. Most effective solutions need close cooperation between architects, designers, and logistics experts at the stage of design to prevent conflict situations in the future.

8. It is advisable to introduce a number of additional approvals to minimize conflicts of all levels.

Modular and traditional design have certain common aspects, although their fundamental differences are clear. The disadvantages of modularity at the initial stages of work are sufficiently compensated by further advantages, including smaller time frames and minimal design efforts [23]. At the same time, the number of complexities of modular design goes down with each new object that fills the library, generates new experience and knowledge that take account of the previous mistakes.

RESULTS OF THE STUDY

Given the specificity of modular elements described in the previous section, features of design processes and a three-level system of principles of modular design, it is possible to formulate universal parameters of a modular element of maximum readiness, as well as to determine updated processes at all stages of the life cycle under the influence of modularity.

It is advisable to present the parameters of a modular element of maximum readiness as a three-tier system, which corresponds to the principles of modular design and at the same time preserves the properties of a modular element itself (Table 1).

Table 1. Parameters of a modular unit of maximum readiness

Modular design principles	Modular unit properties
I Level	1.1 Shape 1.2 Sizes 1.3 Design 1.4 Type of fastening /line-up
II Level	2.1 Functional profile 2.2 Placement (interior/exterior) 2.3 Construction material
III Level	3.1 Occupancy rate 3.2 Climatic conditions 3.3 Transportation complexity

The introduction of modular elements of maximum readiness makes impact at all stages of the life cycle of any construction facility. Changes are triggered both by new or modified design processes and adherence to principles of modularity. New attributes affect the entire life cycle of a facility in two ways: they make a direct impact at a specific stage and a universal impact at all stages of the life cycle (Table 2).

Table 2. Effect of modular attributes on the life cycle of a project

No.	Stage	Function	Proficiency of BIM modular units
1	Concept	Pre-design based on library of modular units Modular design feasibility assessment Use of modular unit selection algorithm	Continuous development of new modular units Correction of classification and systematization of modular units Correction of BIM module development algorithm Adaptation of design processes and construction works as per module operation conditions Search for new implementation tools
2	Design documentation	Unit Library Design	
3	Working documentation	Project-specific modular design feasibility analysis Prefabricated design methodology use of BIM technologies to develop modular units	
4	Construction and installation	Site organization with regard to transportation and storage of modular units Classification of construction and installation works according to modular unit characteristics Process sequence taking into account modular units	
5	Operation	Monitoring of technical condition of each modular unit Possibility of unit replacement	
6	Dismantling	Phased modular dismantling	

Thus, the design based on modular elements of maximum readiness not only creates a new approach to design, but it also affects every stage of the life cycle of a construction facility.

The modular principle and difficulties of its implementation, new rules, requirements and ways of solving problems are generated. Each modularity feature streamlines the design process. Based on a set of advantages of modular elements, the total positive effect is produced on the entire life cycle of a facility: accelerated design and construction, continuous improvement of the quality of solutions and work performed, implementation of engineering advancements.

Problematic situations in the case of design based on modular elements are of a temporary nature, due to the ongoing improvement of the systematization process, the structure of elements, and the design algorithm. The modular principle forms new areas of research and furthers the development of new production technologies.

CONCLUSION AND DISCUSSION

Traditional approaches to design do not always ensure a high level of quality of design solutions, and work performance takes a long time. The existing methods of accelerating and rationalizing construction can only

partially cope with their task; therefore, a new integrated approach is needed, which can significantly increase the efficiency due to the total improvement of several aspects at the same time. The use of modular elements of maximum readiness is the best approach. The modular principle entails a number of upgrades, which have a positive effect on design and construction.

Modular design encompasses theoretical and practical aspects of implementation. The use of this principle implies the development of new tools and methods for solving new problems, which are significantly different from the problems of traditional design.

Hence, design based on the use of modular elements of maximum readiness is one of promising areas of engineering and construction activities, as well as the focus of scientific research. The newest approach to design forms new methods of performing all types of work, opens up development paths for specialists of all levels involved in construction. Existing software systems have the appropriate functionality for the most efficient development of information models. Based on the analysis of traditional and modular design, it is possible to highlight the undeniable advantages of the modularity principle. This design method is the basis for the further effective operation of a construction facility, as well as the successful implementation of new projects.

REFERENCES

1. Braginets S.V., Bakhchevnikov O.N., Benova E.V. Advantages of modular design the small-scale formula-feed plants. *Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*. 2018; 6:141-145. DOI: 10.24412/FeYK-7B0nROQ (rus.).
2. Dubovitskaya M.M. Internal organizational and technological processes in the field of construction: building models using modern innovative technologies. *Estimate and contract work in construction*. 2020; 7:56-62. (rus.).

3. Nikolaichuk S.E. Review of the most effective innovative tools in construction. *Estimate and contract work in construction*. 2019; 9:48-51. (rus.).
4. Naranje V., Swarnalatha R. Design of tracking system for prefabricated building components using RFID technology and CAD model. *Procedia Manufacturing*. 2019; 32:928-935. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.305
5. Borodulin K.V. Introduction of information modeling technologies in the process of operation of buildings and structures. *Young Scientist*. 2019; 2(240):200-202. (rus.).
6. Pittau F., Malighetti L.E., Iannaccone G., Masera G. Prefabrication as large-scale efficient strategy for the energy retrofit of the housing stock: An Italian case study. *Procedia Engineering*. 2017; 180:1160-1169. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.276
7. Gao Y., Tian X.-L. Prefabrication policies and the performance of construction industry in China. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 253:120042. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120042
8. Andreeva A.B. The relevance of the use of information modeling technologies at all stages of the “life cycle” of the capital construction object. *Ural Scientific Bulletin*. 2019; 3(2):63-66. (rus.).
9. Tretyakova Z.O., Voronina M.V. The use of new information technologies in construction modeling. *Modern education: content, technologies, quality*. 2019; 1:363-365. (rus.).
10. Jang S., Lee G. Process, productivity, and economic analyses of BIM-based multi-trade prefabrication — a case study. *Automation in Construction*. 2018; 89:86-98. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.035
11. Hwang B.-G., Ngo J., Wan Yi Her P. Integrated digital delivery: Implementation status and project performance in the Singapore construction industry. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 262:121396. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121396
12. Arashpour M., Kamat V., Bai Yu., Wakefield R., Abbasi B. Optimization modeling of multi-skilled resources in prefabrication: Theorizing cost analysis of process integration in off-site construction. *Automation in Construction*. 2018; 95:1-9. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.07.027
13. Goh M., Goh Ya.M. Lean production theory-based simulation of modular construction processes. *Automation in Construction*. 2019; 101:227-244. DOI: 10.1016/s0926-5805(02)00086-9
14. Chibirikova D.A., Ataev B.S., Melnikova O.G. Modular design and construction of apartment buildings using ready-made components. *Actual problems and prospects of the construction complex development: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference: in 2 hours*. Volgograd, 2020; 82-86. (rus.).
15. Kasperzyk C., Kim M.-C., Brilakis I. Automated re-prefabrication system for buildings using robotics. *Automation in Construction*. 2017; 83:184-195. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.002
16. Manukovsky A.Yu., Kurdyukov D.P., Korotkov V.A. Experience of application of elements of information modeling technology. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. 2020; 8:1(48):100-105. DOI: 10.34220/2308-8877-2020-8-1-100-105 (rus.).
17. Lu W., Chen K., Xue F., Pan W. Searching for an optimal level of prefabrication in construction: an analytical framework. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 201:236-245. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.319
18. Rakova A.V., Ilivanova E.V. Innovations in construction. *Education: professional debut: Collection of materials of the V International Student Scientific and Practical Conference*. Meleuz, 2019; 261-264
19. Anton A., Reiter L., Wangler T., Frangez V., Flatt R.J., Dillenburger B. A 3D concrete printing prefabrication platform for bespoke columns. *Automation in Construction*. 2021; 122:103467. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103467
20. Lee J., Kim J. BIM-Based 4D Simulation to Improve Module Manufacturing Productivity for Sustainable Building Projects. *Sustainability*. 2017; 9(3):426.
21. Lyu Z., Lin P., Guo D., Huang G. Q. Towards Zero-Warehousing Smart Manufacturing from Zero-Inventory Just-In-Time production. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020; 64:101932. DOI: 10.1016/j.rcim.2020.101932
22. Rashev V.S., Astafeva N.S., Rogozhkin L.S., Grigorev V.Iu. Analysis of the implementation of information modeling technology in russian construction companies for the design and construction of engineering systems. *Bulletin of Eurasian Science*. 2020; 12(3):11. (rus.).
23. Pleshivtsev A.A. Application of information modeling technologies for the formation of the functional quality of architectural (construction) objects. *Innovations and Investments*. 2020; 10:189-192. (rus.).

Received Juny 8, 2021.

Adopted in revised form on Juny 28, 2021.

Approved for publication on Juny 28, 2021.

BIONOTES: Angelina O. Rybakova — teacher, postgraduate student of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 865289; angelinaribakova@yandex.ru.