

На правах рукописи



Рыбакова Ангелина Олеговна

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ
МОДУЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЭТАПЕ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ
КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

**2.1.14. Управление жизненным циклом объектов строительства
(технические науки)**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Каган Павел Борисович

Официальные оппоненты: **Опарина Людмила Анатольевна,**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
политехнический университет», кафедра
организации производства и городского
хозяйства, заведующий кафедрой

Наумов Андрей Евгеньевич,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный
технологический университет им.
В.Г.Шухова», кафедра экспертизы и
управления недвижимостью, заведующий
кафедрой

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-
строительный университет»

Защита состоится «30» ноября 2023 г. в 14:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 9 студия «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на сайте www.mgsu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Коротеев Дмитрий Дмитриевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Строительство задает темп экономического развития каждой страны и является весомым сектором экономики. Строительная отрасль считается одной из стратегических отраслей экономики России. Однако, на данный момент строительство в нашей стране имеет ряд серьезных проблем, которые тормозят развитие отрасли, одна из которых: длительный жизненный цикл продукции строительного производства. Время возведения и эффективность эксплуатации во многом определяется качеством принятых на начальной стадии проектных решений. Удачные или неудачные решения могут соответственно повлиять на непосредственное строительство здания, на последующие годы эксплуатации и на весь жизненный цикл в целом.

Однако важнейшие решения часто принимаются без должной проработки и соответствующего обоснования, а также без применения новейших автоматизированных комплексов, которые могут как улучшить качество проектов, так и сократить сроки. Возникает необходимость разработки методик и инструментов, которые смогут обеспечить повышение эффективности как проектных решений, так и качества итогового строительного продукта, с обязательным соблюдением заданных сроков.

На сегодняшний день имеется ряд возможностей сокращения сроков строительства, однако эти способы реализуются не на основе проектирования элементов максимальной готовности, а также без достаточного применения средств автоматизации.

Технологии информационного моделирования зданий (BIM) и технологии модульного строительства на сегодняшний день являются важнейшими и наиболее перспективными направлениями развития строительной отрасли не только в России, но и в мире. Несмотря на фундаментальные различия данных подходов проектирования и строительства, BIM и модульные технологии достаточно взаимосвязаны и в перспективе могут интегрироваться для максимизации прибыли, сокращения сроков выполнения работ, уменьшения рисков возникновения дефектов, а также упрощения некоторых проектных процессов.

Следовательно, актуальность темы диссертационной работы определяется необходимостью исследования взаимосвязи совместного использования BIM-технологий и модульного проектирования с целью повышения эффективности архитектурно-строительного проектирования.

Степень разработанности темы исследования.

Основные принципы технологии и организации строительства быстровозводимых и блочно-модульных объектов исследовали российские ученые: Амбарцумян С.А., Афанасьев А.А., Баркалов С.А., Воробьев В.А., Грабовый П.Г., Завадская Э.К.К., Зеленцов Л.Б., Киевский Л.В., Король Е.А., Лapidус А.А., Лебедев В.М., Маилян Л.Р., Мищенко В.Я., Молодин В.В., Олейник П.П., Сычев С.А., Теличенко В.И., Ширшиков Б.Ф., Шеина С.Г.,

Шрейбер А.К. и др., а также зарубежные ученые: Chua Y.S., Fernando S., Kamali M., Mohammada M. F., Qiu Y., Ruoqiang A., Schneiderb G. F. и др.

Значительный вклад в развитие методологических основ информационного моделирования зданий внесли российские ученые: Гинзбург А.В., Евтушенко С.И., Железнов М.М., Кузина О.Н., Наумов А.Е., Опарина Л.А., Павлов А.С., Синенко С.А, Талапов В.В. и др., а также зарубежные: Koutamanis A., Issa Raja R.A., Eastman C.M., Teicholz P., Sacks R., Liston K. и другие.

Однако существующих исследований недостаточно для формирования универсальных методик, которые включают в себя теоретическую базу и инструменты для практической реализации модульных объектов различного назначения. Отсутствуют методики применения существующих инструментов информационного моделирования для модульных зданий.

Концепция блок-модульного автоматизированного проектирования успешно используется в электронике и машиностроении. В строительстве подобных инструментов информационного моделирования на сегодняшний день не существует.

Научно-техническая гипотеза заключается в предположении, что возможно повышение эффективности архитектурно-строительного проектирования за счет использования технологий информационного моделирования для строительства зданий из модульных элементов.

Целью исследования является разработка теоретических и практических основ архитектурно-строительного проектирования зданий из модульных элементов с использованием технологий информационного моделирования.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Анализ современного состояния архитектурно-строительного проектирования с использованием модульных элементов.
2. Формирование параметров ТИМ-блоков для разработки типовых моделей модульных элементов максимальной готовности (ИМЭМГ).
3. Разработка алгоритма определения рациональности применения модульного проектирования на основе значений технико-экономических показателей (ТЭП).
4. Оценка эффективности использования инструментов информационного моделирования (ТИМ) для ключевых задач проектирования на основе модульных элементов максимальной готовности.
5. Разработка алгоритма построения комплексной информационной модели на основе применения модульных элементов максимальной готовности.
6. Разработка методики проектирования на основе применения модульных элементов максимальной готовности с использованием технологий информационного моделирования.

7. Внедрение результатов исследования. Оценка эффективности проектирования на основе применения модульных элементов максимальной готовности с использованием технологий информационного моделирования.

Объектом диссертационного исследования является архитектурно-строительное проектирование на основе модульных элементов с использованием технологий информационного моделирования.

Предметом диссертационного исследования является процесс архитектурно-строительного проектирования в условиях цифровизации строительной отрасли.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

Разработаны теоретические и практические основы реализации модульных проектов на базе функциональных возможностей и средств информационного моделирования, а именно:

1. Предложена модель структуры ТИМ-блока и параметры типовых ИМЭМГ.
2. Разработан алгоритм оценки рациональности применения модульного проектирования на основе значений технико-экономических показателей (ТЭП).
3. Разработана методика проектирования на основе применения модульных элементов максимальной готовности с использованием технологий информационного моделирования.

Теоретическая значимость результатов работы:

1. Сформирована модель структуры ТИМ-блока и его параметров для разработки ИМЭМГ.
2. Предложен алгоритм оценки рациональности применения модульного проектирования на основе значений технико-экономических показателей, который позволяет на предпроектном этапе оценить целесообразность использования модульного проектирования для рассматриваемого объекта строительства.
3. Разработана методика проектирования на основе применения модульных элементов максимальной готовности с использованием технологий информационного моделирования, включающая в себя как оценку рациональности применения модульного проектирования, так и формирование итоговой модели.

Практическая значимость результатов работы:

1. Выполнена оценка эффективности использования основных инструментов информационного моделирования (ТИМ) для ключевых задач модульного проектирования.
2. Разработан алгоритм для построения комплексной информационной модели объекта на основе применения модульных элементов максимальной готовности с использованием средств автоматизации ТИМ.
3. Предложена OLAP-модель управления данными информационными моделями объектов капитального строительства, которая позволяет не только систематизировать информацию о будущем объекте и

проектные данные, но и выполнять обработку и анализ данных информационной модели и составляющих ее ИМЭМГ.

Указанные результаты исследования могут применяться проектными организациями для предварительной оценки эффективности применения МЭМГ, а также принятия рациональных проектных решений при проектировании модульных зданий.

Практический эффект от внедрения результатов работы заключается в сокращении сроков проектирования и возведения объектов строительства за счет скорейшего ввода объекта в эксплуатацию без ущерба качеству производства. Использование вышеописанных положений позволяет выполнить предварительную оценку будущих проектных решений, а также упростить процесс проектирования.

Достоверность результатов исследования подтверждена путем сравнения выполнения проектных работ аналогичных объектов строительства двумя различными способами: традиционно и на основе использования информационных моделей модульных элементов максимальной готовности согласно разработанным теоретическим и практическим положениям. Практическая апробация разработанных положений проводилась при проектировании объекта Центра обработки данных в ООО «АМДтехнологии».

Методология и методы исследования.

Методологической основой диссертации являются исследования российских и зарубежных авторов в области информационного моделирования строительных объектов, способов и подходов организации проектирования и строительства, существующих направлений повышения эффективности строительства, комплектно-блочного и блок-модульного строительства, методов оценки эффективности, а также законодательные акты в области архитектурно-строительного проектирования и информационного моделирования.

В качестве инструментов исследования использовались следующие методы научного познания: анализ, синтез, классификация, формализация, математическое моделирование, экспертная оценка и анализ.

Личный вклад автора диссертации заключается:

- в постановке цели и задач научного исследования;
- в формировании модели структуры ТИМ-блока и его параметров для разработки ИМЭМГ с определением атрибутов и учетом уровней детализации;
- в определении ключевых задач модульного проектирования и основных инструментов информационного моделирования для их решения, а также в получении в получении результатов оценки их интеграции;
- в формировании алгоритма оценки рациональности применения модульного проектирования на основе значений технико-экономических показателей;
- в формировании алгоритма для построения комплексной информационной модели объекта на основе применения ИМЭМГ, а также

разработке программной реализации ТИМ для автоматического построения модели;

- в разработке методики проектирования на основе применения модульных элементов максимальной готовности с использованием технологий информационного моделирования;

- в формировании OLAP-модели управления данными информационных моделей объектов капитального строительства.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель структуры ТИМ-блока и параметры типовых ИМЭМГ.
2. Оценка рациональности применения модульного проектирования на основе значений технико-экономических показателей (ТЭП).

3. Оценка эффективности использования инструментов информационного моделирования (ТИМ) для ключевых задач проектирования на основе модульных элементов максимальной готовности.

4. Алгоритм построения комплексной информационной модели на основе применения модульных элементов максимальной готовности.

5. Методика проектирования на основе применения модульных элементов максимальной готовности с использованием технологий информационного моделирования.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена:

- применением научных методов исследования;
- использованием трудов отечественных и зарубежных авторов в области информационного моделирования, а также положений модульного проектирования и строительства;

- использованием базовых инструментов информационного моделирования для решения ключевых задач проектирования на основе ИМЭМГ;

- успешной апробацией и внедрением основных результатов работы.

Апробация результатов исследования.

Основные положения диссертации были изложены на следующих научно-практических конференциях:

- XXII International Scientific Conference «Construction the Formation of Living Environment» (FORM-2019), April 18-21, 2019, Tashkent, TIAME;

- Первая национальная конференция «Актуальные проблемы строительной отрасли и образования», Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 30 сентября 2020 г.;

- XXIV International Scientific Conference on Advance In Civil Engineering «Construction the Formation of Living Environment» (FORM-2021), April 22-24, 2021, Moscow, MGSU;

- International Scientific Conference «Building life-cycle management. Information systems and technologies», November 26, 2021, Moscow, Moscow, MGSU;

– XXV International Scientific Conference on Advance In Civil Engineering «Construction the Formation of Living Environment» (FORM-2022), April 20-22, 2022, Moscow, MGSU;

– V Международная научно-практическая конференция «BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры» (BIMAC 2022), 20-22 апреля, 2022, Санкт-Петербург, СПбГАСУ;

Внедрение результатов исследования было выполнено в ООО «АМДтехнологии», ООО «Ивлион», ООО «ДВК-Дорстрой».

Публикации.

Основное содержание работы по теме диссертации изложено в 12 научных работах, в том числе 4 публикации в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, 4 работы в научных изданиях, индексируемых международной реферативной базой SCOPUS и 4 иные публикации.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, основной части, включающей 4 главы, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 201 страница, работа содержит 36 рисунков, 23 таблицы и 7 приложений. Список литературы насчитывает 192 наименования.

Общая методологическая схема исследования представлена на рисунке на рисунке 1.

Содержание диссертации соответствует п. 3, 5, 9 паспорта специальности 2.1.14. Управление жизненным циклом объектов строительства:

3. Исследование и формирование методов разработки, видов обеспечения, критериев, моделей описания и оценки эффективности решения задач управления жизненным циклом объектов капитального строительства с использованием технологий информационного и математического моделирования, системного анализа, автоматизации и оптимизации принятия решений.

5. Исследование и разработка методов и алгоритмов использования и управления данными информационных моделей объектов капитального строительства на всех этапах их жизненного цикла, включая: сбор, хранение, обработку, интеграцию и передачу данных, их мониторинг, актуализацию и анализ, валидацию и верификацию. Исследование и разработка моделей информационных процессов и структур, алгоритмов визуализации, трансформации и анализа информации, синтеза виртуальной и дополненной реальности.

9. Теоретические и методологические подходы к техническому нормированию и регулированию процессов организации, управления и информационного моделирования объектов капитального строительства и строительных систем на всех этапах.



Рисунок 1. Методологическая схема исследования

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определена актуальность и перспективность исследования, определены объект и тема исследования, формализована научная гипотеза, поставлена цель и задачи исследования. В разделе представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методы исследований, личный вклад автора, а также достоверность полученных результатов.

В **главе 1** проведен обзор теории и практики основных процессов архитектурно-строительного проектирования, имеющих важную роль в системе всего жизненного цикла объекта. В результате их изучения, в том числе изучения особенностей информационного моделирования, сформулированы перспективы развития и усовершенствования проектирования и строительства.

По результатам анализа модульного проектирования сформулированы основные положения, характеризующие особенности строительства на основе модульных элементов.

Был проведен анализ применения информационного моделирования на всех стадиях архитектурно-строительного проектирования. С распространением технологий информационного моделирования расширился перечень объектов проектирования, которые могут быть реализованы данным способом.

На основании вышеописанного, выдвинута научная гипотеза, заключающаяся в возможности повышения эффективности проектирования и строительства за счет реализации модульного проектирования для различных типов объектов на основе инструментов информационного моделирования.

Во второй главе рассмотрены основы проектирования с использованием модульных элементов в условиях информационного моделирования. Сформулированы базовые теоретические основы исследования: понятия, термины, концептуальная методология. Определены основные компоненты, функционал, инструменты, примитивы и способы разработки средств информационного моделирования, которые составляют практическую базу для работы с модульными элементами. Установлены ключевые положения проектирования с использованием модульных элементов в условиях информационного моделирования.

Модульный элемент максимальной готовности в строительстве (МЭМГ) – это 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 последующий монтаж. Модуль включает в себя необходимые архитектурные и конструктивные характеристики, инженерные решения, оборудование и, при необходимости, варианты внутренней и наружной отделки.

Информационная модель модульного элемента максимальной готовности (ИМЭМГ) – цифровая копия модульного элемента, реализованная инструментами информационного моделирования (ТИМ-блок). Полноценность блока определяется наличием данных – значения параметров,

которые характеризуют блок. На основе характеристик МЭМГ сформулированы компоненты ИМЭМГ, которые реализуются посредством инструментария информационного моделирования в соответствии с уровнем детализации (рисунок 2, таблица 1).

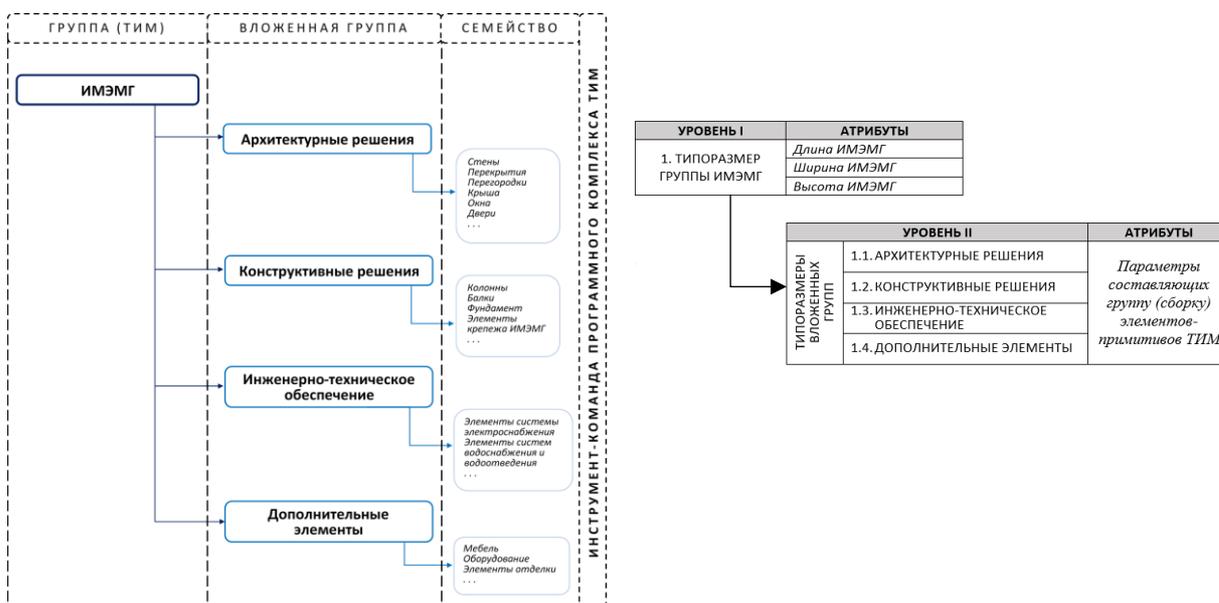


Рисунок 2. Структура и параметры типовых ТИМ-блоков (ИМЭМГ)

Таблица 1. Формирование типоразмера типовых ТИМ-блоков (ИМЭМГ)

Типоразмеры группы ИМЭМГ		Типоразмер N							
Уровни детализации		1		2		3		4	
Уровень проработки* ЦИМ		В	М	В	М	В	М	В	М
Состав ИМЭМГ	Архитектурные решения	+		+		+			+
	Конструктивные решения	-		+		+			+
	Инженерно-техническое обеспечение	-		-		+			+
	Дополнительные элементы	-		-		-			+

***В** (boundaries) - определение границ элемента;

М (material) - границы материалов в структуре элемента.

Разработка информационной модели на основе модульных элементов состоит из двух этапов: разработки моделей единичных модулей и формирование комплексной информационной модели. Каждый этап включает в себя ряд действий, принятие решений и ограничения по моделированию на основе технического задания, назначения объекта, его объема, функциональности и месторасположения. Первый этап формирует практическую базу для проектных решений на втором этапе.

Возможность проектирования на основе интеграции концепций использования модульных элементов и информационного моделирования формируется за счет базовых инструментальных средств.

Третья глава посвящена разработке методики проектирования на основе применения модульных элементов максимальной готовности с использованием технологий информационного моделирования.

Алгоритм определения рациональности применения модульного проектирования заключается в определении зависимости между базовыми технико-экономическими показателями будущего объекта и

целесообразностью использования МЭМГ на основе установленных критериев. Зависимость определялась двухэтапной экспертной оценкой на основании метода априорного ранжирования.

В результате анализа и систематизации модульных объектов и их характеристик были определены пять критериев, влияющих на целесообразность применения МЭМГ в проектировании. Значение каждого критерия также рассмотрены и систематизированы для проведения анализа. Первый этап экспертной оценки заключался в ранжировании критериев относительно важности влияния (вес критерия):

- назначение объекта (GO);
- количество этажей (F);
- общая площадь (OS);
- климатический пояс (KP);
- логистика (L).

Второй этап – в ранжировании значений в рамках критерия для формирования балльного значения. Значения рассмотренных критериев варьируются от 3-х до 8-ми.

Для определения согласованности мнений экспертов используется расчет коэффициента конкордации Кэнделла:

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2 \cdot (n^3 - n)} \quad (1)$$

где: S – сумма квадратов отклонения суммы рангов от средней арифметической суммы рангов, полученные в результате балльной оценки экспертов по методу консенсуса,

n – количество исследуемых параметров,

m – количество экспертов.

$$W = \frac{12 \cdot 1114}{12^2 \cdot (5^3 - 5)} = 0,774 \quad (2)$$

Так как $W \geq 0,5$, то доказана согласованность мнений экспертов.

В рамках второго этапа экспертной оценки были получены балльные оценки в рамках возможных значений каждого критерия. Итоговая оценка формировалась как среднее арифметическое предложенных оценок экспертов.

В результате по всем экспертам и группам критериев с балльными оценками получена результирующая таблица критериев рациональности (Таблица 2).

Таблица 2. Систематизация критериев оценки рациональности

Вес критерия (CW)	Название критерия		Обозначение	Оценка	W (>0,5)	χ_p^2 (> χ_T^2)
0,18	Гражданские	Жилые	C.R	7,58	0,955	84,013 (18,48)
		Общественные	C.P	7,42		
	Промышленные	производственные	IN.P	1,42		
		подсобные	IN.A	3,50		
		складские	IN.S	5,58		
		энергетические	IN.E	1,58		
	Сельскохозяйственные	A	3,50			
Специализированные	S.x	5,42				
0,28	Количество этажей (F)	1-2 этажа	F1	4,75	0,851	46,826

Вес критерия (CW)	Название критерия	Обозначение	Оценка	W (>0,5)	χ_p^2 (> χ_r^2)
		3-5 этажей	F2	4,25	(13,28)
		6-10 этажей	F3	2,67	
		11-16 этажей	F4	2,00	
		17 и более этажей	F5	1,33	
0,20	Общая площадь (OS)	до 36 м2	OS1	1,33	0,889 (13,28)
		37-100 м2	OS2	1,83	
		100-180 м2	OS3	2,83	
		180-250 м3	OS4	4,83	
		250 м2 и более	OS5	4,17	
0,08	Климатический пояс (КР)	I	КР1	1,25	0,876 (13,28)
		II	КР2	1,92	
		III	КР3	2,83	
		IV	КР4	4,50	
		Особый	КР5	4,50	
0,25	Логистика (L)	В пределах города	L1	2,75	0,507 (9,21)
		В пределах региона	L2	1,92	
		За пределами региона	L3	1,33	

Степень возможности применения модульного проектирования для проектирования конкретного объекта определяется на основе значения Индекса рациональности (IR). Индекс рациональности формируется с учетом технико-экономических показателей будущего объекта в соответствии с данными таблицы 3 по формуле 3:

$$(IR) = CW_{GO} \times GO + CW_F \times F + CW_{OS} \times OS + CW_{KP} \times KP + CW_L \times L \quad (3)$$

С учетом максимально и минимально возможной расчетной оценки формируется ранжированная 5-ти бальная система интерпретации результатов – уровня целесообразности применения проектирования на основе МЭМГ для конкретного объекта капитального строительства с учетом его технико-экономических показателей.

Эффективность использования инструментов ТИМ для модульного строительства определяется на основе расчета индекса эффективности: экспертная оценка в рамках соответствия двух направлений: ключевых задач модульного строительства и основных функций информационного моделирования.

Задачи модульных проектов для дальнейшего анализа были сформулированы на основе их особенностей и характеристик в рамках соответствующего этапа жизненного цикла. Функции ТИМ определены с учетом особенностей модульного проектирования.

Эффективность функций ТИМ можно представить в виде индекса эффективности (EI), который вычисляется в результате опроса экспертов на основе балльной шкалы на основе следующей формулы (4):

$$\text{Индекс эффективности (EI)} = \frac{\sum_i^5 \omega_i \times \frac{f_i}{n} \times 100}{a \times 100} \quad (4)$$

i – порядковые номера оценок по задачам и функции ТИМ,
 ω_i – балл эффективности для функций ТИМ,
 f_i – количество оценок каждого балла,
 a – максимальная оценка в рамках одной задачи,
 n – количество экспертов.

Для получения балльных оценок был проведен опрос среди той же группы экспертов. Каждый эксперт выставлял оценку для каждой ТИМ-функции по соответствующей задаче модульного строительства.

Результаты опроса в виде расчёта показателя индекса эффективности выполнялись по формуле (4) и представлены в таблице 3. В итоге определены задачи модульного строительства, решение которых эффективно инструментами информационного моделирования.

Таблица 3. Матрица использования основных задач и функций ТИМ для модульных объектов

Ключевые задачи модульного строительства		ТИМ-функции для модульных объектов									
		Моделирование ИМЭМГ	Моделирование стыков и узлов	Формирование библиотек ИМЭМГ	Моделирование СГП	Формирование комплексной информационной модели	Формирование чертежей и документации	Создание ND-модели	Формирование работ по транспортировке внутри площадки	Формирование отчетных документов	Визуализация
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Расчет количества МЭМГ	W1										0,15
Формирование требований МЭМГ	W2										
Разработка задания на моделирование МЭМГ	W3										0,20
Выбор ИМЭМГ из библиотеки	W4										0,35
Разработка или доработка ИМЭМГ	W5	0,95									0,35
Моделирование ИМЭМГ в среде информационного моделирования	W6			0,55			0,25	0,95	0,25	0,72	
Формирование комплексной информационной модели	W7	0,85	0,75	0,55			0,25	0,95	0,35	0,69	
Календарное планирование	W8	0,95	0,75	0,56			0,15	0,95	0,15	0,71	0,75
Сметная документация	W9			0,50		0,87	0,10			0,73	0,45
Проверка и верификация модели	W10				0,35			0,95	0,15	0,72	
Формирование документации	W11				0,75			0,85		0,73	
Производство МЭМГ	W12						0,25			0,71	0,75
Проверка МЭМГ	W13			0,75			0,15			0,73	0,35
Формирование требований для трансфера МЭМГ	W14	0,80	0,75	0,65		0,85	0,75			0,73	
Разработка графика транспортировки МЭМГ	W15	0,95	0,76	0,70			0,75			0,73	
Отделочные работы	W16				0,45				0,40		
Расчет количества МЭМГ	W17			0,65	0,35			0,75	0,70		
Формирование требований МЭМГ	W18						0,65			0,70	0,55
Автоматизация календарного планирования	W19				0,75		0,35	0,95		0,65	
Планирование работ по транспортировке и управление ими	W20				0,45		0,15	0,75	0,75	0,50	
Планирование подъемных работ и управление ими	W21				0,75		0,25	0,75	0,35	0,69	
Технический надзор	W22						0,15			0,69	

Следовательно, эффективность использования ТИМ-инструментов по задачам проектирования на основе МЭМГ определяется по числовому значению итоговой оценки от 0 до 1. Оценивание по шкале Харрингтона позволяет оценить и интерпретировать результат в общедоступном виде.

Для повышения эффективности работы в рамках модульного проектирования был разработан алгоритм построения комплексной информационной модели на основе применения ИМЭМГ. Укрупненно алгоритм включает в себя два этапа: подготовка ИМЭМГ для интеграции в будущую модель (разработка, изменение, корректировка, повышение детализации, интеграция библиотек) и разработка комплексной информационной модели на основе ИМЭМГ (рисунок 3).

Алгоритм предусматривает возможность корректировки, дополнительный анализ и проверку, а также возможность адаптации ИМЭМГ и итоговой модели к изменениям в техническом задании без использования дополнительных ресурсов. В итоге формируется полноценная информационная модель объекта установленного уровня детализации/ Наиболее рутинный шаг данного алгоритма – это составление комплексной модели из имеющихся ИМЭМГ. Для ускорения и упрощения этого шага был разработан инструмент автоматизации – скрипт визуального программирования Dupato, который позволяет автоматически выстраивать модель из заранее выбранных блоков.

С учетом оценки эффективности использования МЭМГ, системы классификации и алгоритма построения комплексной модели была создана методика проектирования на основе применения МЭМГ с использованием технологий информационного моделирования. Методика включает в себя 8 последовательных этапов от анализа технико-экономических показателей объекта в рамках технического задания до получения итоговой информационной модели (рисунок 4).

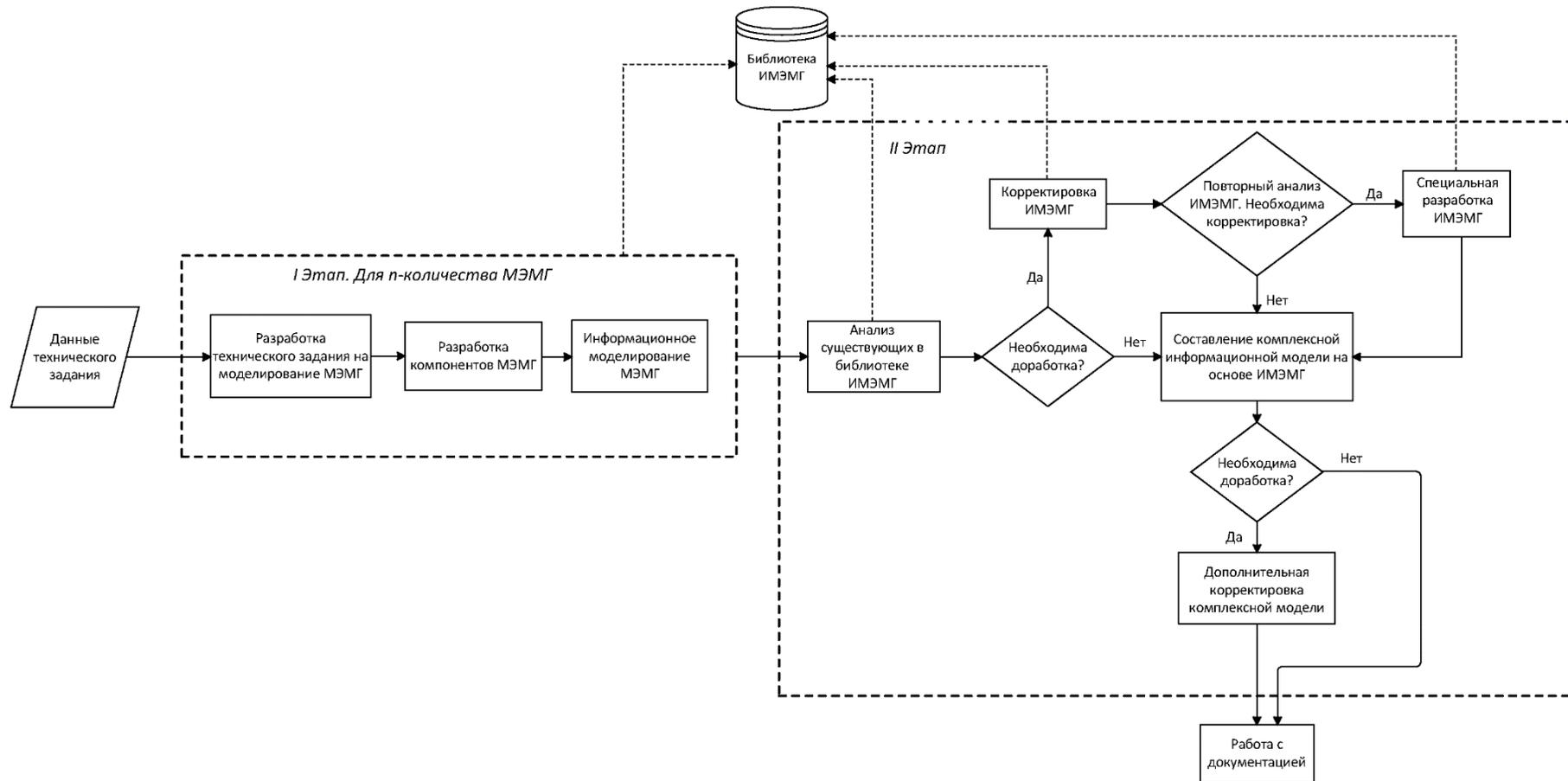


Рисунок 3. Схема алгоритма построения комплексной информационной модели на основе применения ИМЭМГ



Рисунок 4. Основные этапы методики проектирования на основе применения МЭМГ с использованием технологий информационного моделирования

В результате модель данных комплексной информационной модели представляется в виде OLAP-куба: трехмерной матрицы по двум измерениям для плана этажа и одному вертикальному измерению для этажей. Модель OLAP позволяет организовать не только структурированное хранение данных информационной модели, но и выполнять аналитические операции по анализу и обработке данных в рамках инструментов OLAP (рисунок 5).

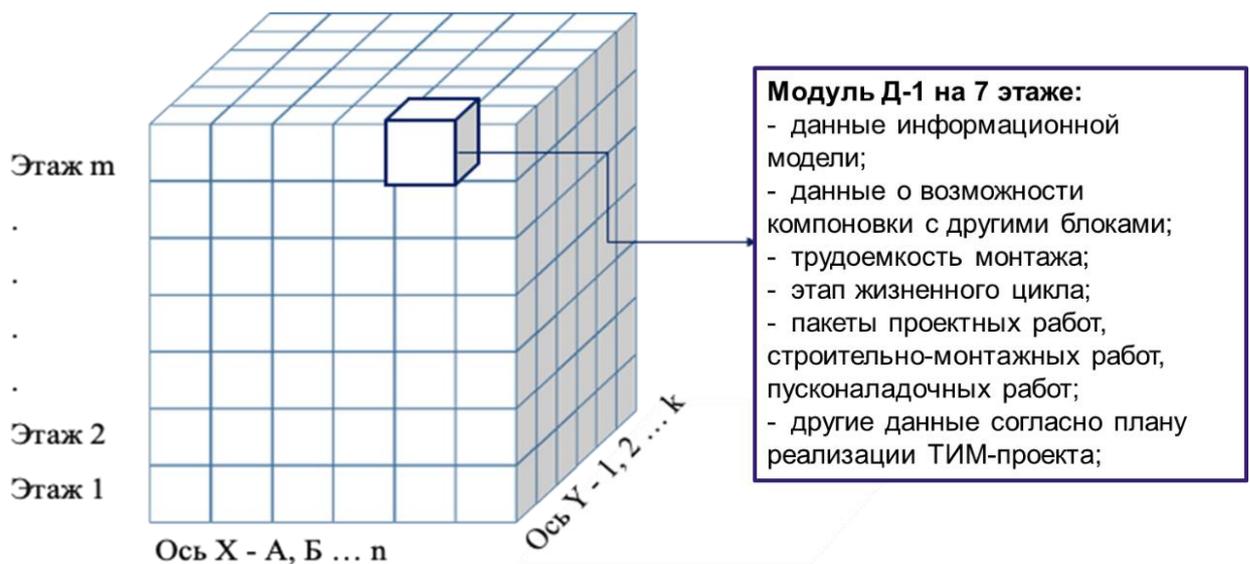


Рисунок 5. Представление информационной модели модульного здания в виде OLAP-куба

Внедрение модульных элементов максимальной готовности отражается на всех этапах жизненного цикла любого объекта строительства. Изменения возникают как за счёт нового или модифицированного проектного процесса, так и за счёт соблюдения основных положений модульного проектирования, которые оказывают влияние на весь жизненный цикл объекта двумя способами: прямое воздействие на конкретный этап и универсальное воздействие на все этапы жизненного цикла одновременно (Таблица 4). В результате проектирование на основе модульных элементов максимальной готовности создаёт не только новый подход к проектированию, но и отражается на каждом этапе жизненного цикла.

Таблица 4. Влияние модульного проектирования на жизненный цикл объекта

№	Стадия	Функция ИМЭМГ	Преимущества использования ИМЭМГ
1	Инженерные изыскания	1.Предпроектные разработки с учетом библиотеки элементов 2.Анализ рациональности использования модульного проектирования 3.Использование алгоритма автоматизированного формирования модели для эскиза и вариативного проектирования	1.Непрерывная разработка новых модульных элементов. 2.Актуализация классификации и систематизации модульных элементов. 3.Корректировка алгоритма разработки ИМЭМГ. 4.Адаптация проектных процессов и СМР согласно условиям использования модулей. 5.Поиск новых инструментов реализации.
2	Архитектурно-строительное проектирование (проектирование)	1.Проектирование в рамках библиотеки элементов 2.Анализ целесообразности использования модульного проектирования в конкретном объекте 3.Методика проектирования с учетом модульного элемента максимальной готовности	
3	Строительство, реконструкция, капитальный ремонт	1.Организация строительной площадки с учетом транспортировки и хранения модулей 2.Формирование работ согласно специфики модулей 3.Технологическая последовательность с учетом модульных элементов	
5	Эксплуатация	1.Мониторинг технического состояния каждого модуля 2.Возможность замены модульного элемента	
6	Снос и утилизация (ликвидация)	1.Поэтапный модульный демонтаж	

Таким образом, в результате работы формируется следующая взаимосвязь разработанных положений (рисунок б).

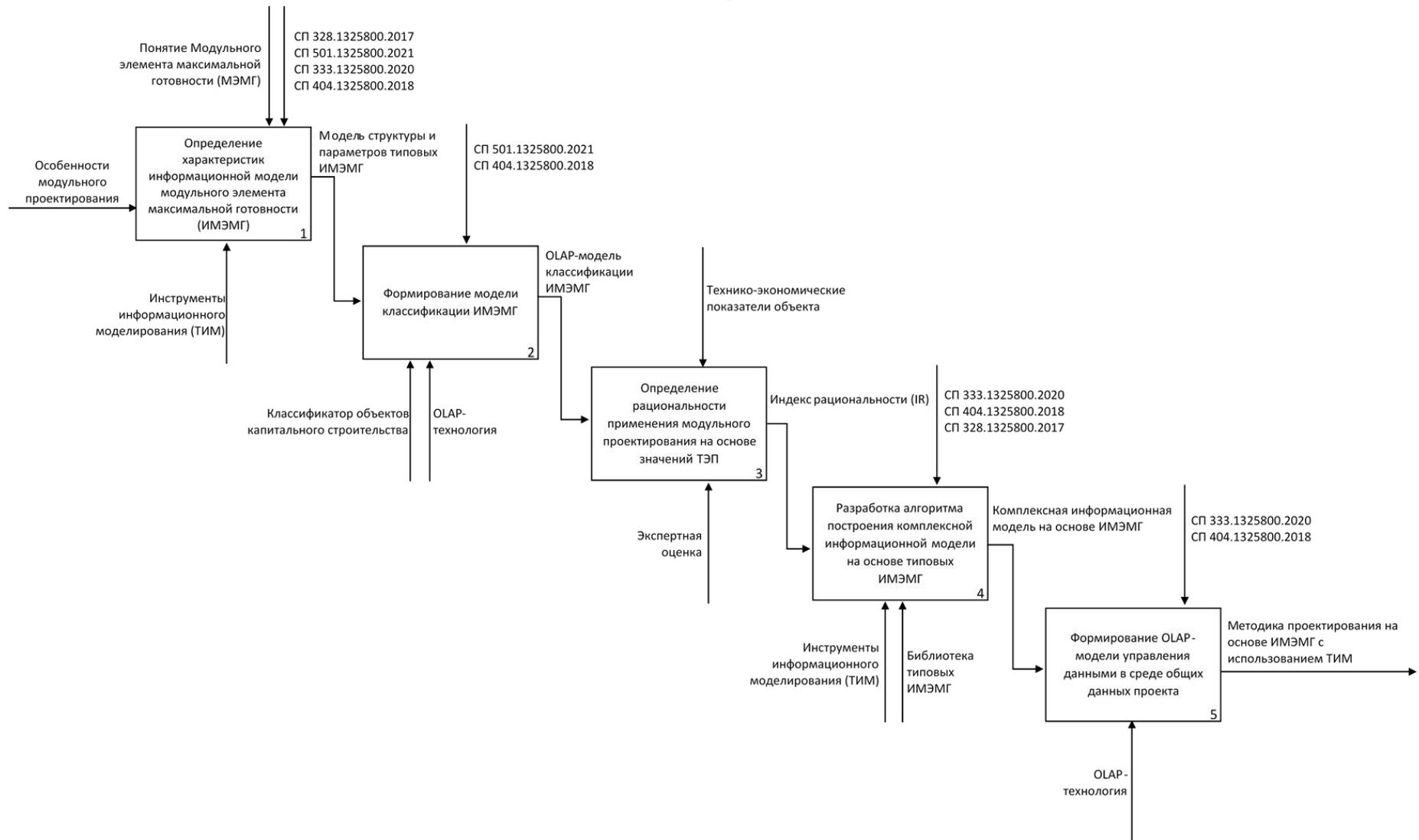


Рисунок 6. Этапы исследования

В четвертой главе описывается внедрение методики проектирования на основе применения МЭМГ с использованием технологий информационного моделирования в процессе разработки проектной документации объекта «Центр обработки данных (ЦОД) центра опережающей профессиональной подготовки (ЦОПП) Московской области», расположенного по адресу: Московская область, г. Реутов, Юбилейный проспект, д.58, в рамках работы компании ООО «АМДтехнологии» (рисунок 7).

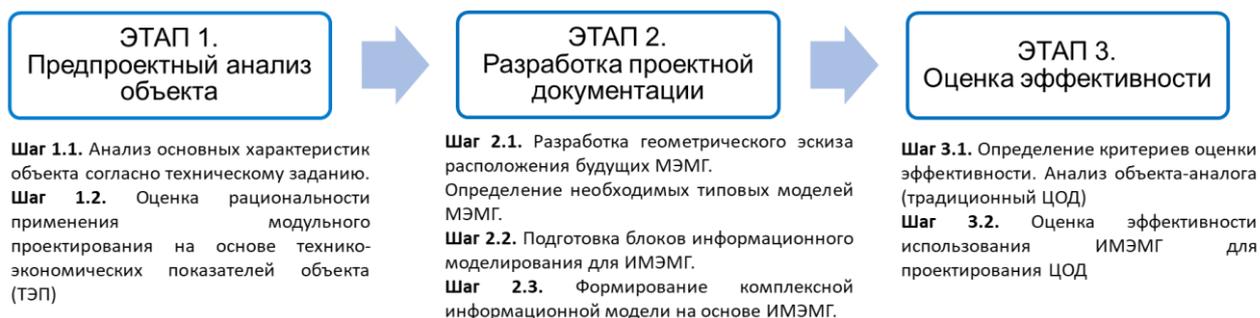


Рисунок 7. Этапы внедрения результатов исследования

Для оценки эффективности использования ИМЭМГ были рассмотрены два аналогичных объекта – центров обработки данных: трехэтажные здания площадью 480 м² и 510 м², с общим количеством серверных элементов – 250 шт. По результатам оценки было установлено повышение эффективности работы по всем предложенным критериям эффективности относительно аналогичного объекта, проектирование которого выполнялось традиционным способом (Таблица 5).

Таблица 5. Характеристики сравниваемых объектов

№	Критерий	Модульный ЦОД	Традиционный ЦОД	%
1	Продолжительность проектирования (дн)	82	99	17%
2	Количество задействованных специалистов	16	20	20%
3	Количество обнаруженных коллизий	51	158	67%
4	Количество замечаний Заказчика/Эксперта	30	57	47%
5	Общепроектные вопросы/проблемные ситуации	4	6	33%
6	Продолжительность исправления замечаний (дн)	3	8	62%
7	Фонд заработной платы	9 020 454,55 Р	11 430 000,00 Р	21%

Проектирование, выполненное на основе представленных в исследовании положений, позволило повысить качество и снизить трудоемкость создаваемой проектной документации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автором диссертации в ходе исследования, в соответствии с целями и задачами, получены следующие результаты:

1. Выполнен анализ современного состояния архитектурно-строительного проектирования, научных и практических работ в области проектирования и строительства модульных зданий, который показал необходимость поиска новых способов решения задач возведения модульных зданий на всех этапах жизненного цикла объектов. Доказана перспективность применения информационного моделирования в архитектурно-строительном проектировании модульных объектов. Проведен анализ отечественного и международного опыта использования модульного проектирования и модульного строительства, а также изучены функциональные возможности технологий информационного моделирования.

2. Установлено понятие модульного элемента максимальной готовности (МЭМГ) как фундаментальной единицы проектирования и строительства модульных зданий. С учетом особенностей реализации МЭМГ определено понятие информационной модели МЭМГ (ИМЭМГ) как полноценного элемента единицы информационного моделирования. Определены основные характеристики МЭМГ и ИМЭМГ, их свойства, особенности функционирования и взаимодействия.

Определены параметры ТИМ-блоков типовых модульных элементов максимальной готовности (МЭМГ), которые составляют практическую основу для разработки МЭМГ. Сформулированы необходимые компоненты ИМЭМГ согласно установленным уровням детализации, а также определены соответствующие инструменты реализации в рамках программного комплекса информационного моделирования.

3. Установлена зависимость рациональности использования модульного проектирования от его технико-экономических показателей. В результате представлен алгоритм определения рациональности применения модульного проектирования объекта на начальных этапах работы над проектом.

Предложена модель классификации модульных ТИМ-блоков – ИМЭМГ, которая включает в себя объемно-планировочные характеристики, а также атрибуты функциональности МЭМГ в рамках технологических особенностей и назначения итогового объекта. Представленная классификация обеспечивает систематизацию хранения ИМЭМГ.

4. Определена эффективность реализации ключевых задач модульного строительства на основе инструментов ТИМ. Разработан алгоритм оценки эффективности использования МЭМГ, который включает в себя определение индекса эффективности применения информационного моделирования для ключевых задач модульного строительства. В результате определены задачи модульного проектирования для реализации в среде информационного моделирования.

5. Разработан алгоритм автоматизированного построения комплексной информационной модели на основе применения ИМЭМГ,

который состоит из двух этапов: подготовка ИМЭМГ для интеграции в будущую модель, и разработка комплексной информационной модели на основе ИМЭМГ. Алгоритм предусматривает дополнительный анализ и проверку модели, а также возможность адаптации ИМЭМГ и итоговой модели к изменениям в техническом задании без дополнительных ресурсов. В результате реализации алгоритма в рамках требований к будущему объекту формируется полноценная информационная модель. Разработана программная реализация ТИМ для автоматического построения модели на основе ранее разработанных ИМЭМГ.

6. Разработана методика проектирования на основе применения МЭМГ с использованием технологий информационного моделирования, включающая в себя этапы принятия проектных решений и этапы разработки информационной модели.

7. Выполнено внедрение результатов исследования в деятельность ООО «АМДтехнологии». По результатам было установлено повышение эффективности работы относительно аналогичного объекта, проектирование которого выполнялось традиционным способом.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

- разработка предложений по совершенствованию нормативных документов и стандартов, применение которых позволит эффективно использовать ИМЭМГ;

- разработка расширенной системы классификации, которая позволит учитывать подробные объемно-планировочные, инженерно-технологические и детализированные характеристики ИМЭМГ и разработку базы данных для систематизации и хранения информационных моделей МЭМГ (ИМЭМГ);

- автоматизация построения схемы пространственного расположения ИМЭМГ с формированием технического задания на разработку информационных моделей МЭМГ.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:

1. Рыбакова А.О., Каган П.Б. Повышение эффективности проектирования и строительства // Научно-технический журнал «Наука и бизнес: пути развития». – 2019. – № 3(93). – С. 46–48.

2. Каган П.Б., Рыбакова А.О., Титенко В.И. Работа службы технического заказчика при использовании модульных элементов на протяжении жизненного цикла объектов капитального строительства // Научно-технический журнал «Строительное производство» – 2022. – №. 3(43). – С. 34–40. DOI: 10.54950/26585340_2022_3_34

3. Рыбакова А. О. Формирование данных информационной модели модульного здания в формате OLAP // Строительство и архитектура. 2023. №. 1. С. 21-21. DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2022-11-1-21-21>

4. Рыбакова А.О. Методика разработки информационной модели на основе модульных элементов максимальной готовности // Научно-

технический журнал «Строительное производство» – 2023. – №. 2(46). – С. 99–102. DOI: 10.54950/26585340_2023_2_99

Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus:

1. Angelina Rybakova and Pavel Kagan Opportunities to improve the efficiency of design and construction // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. № 01008. DOI: 10.1051/e3sconf /20199701008

2. Angelina Rybakova and Pavel Kagan Application of Building Information Modeling in Data Center design // FORM-2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. № 022006. DOI:10.1088/1757-899X/869/2/022006

3. Angelina Rybakova A study of aspects of structural design based on application of complete modular units // E3S Web of Conferences 263(3):04038 DOI: 10.1051/e3sconf/202126304038

4. Angelina Rybakova Development of an Integrated Information Model Based on Standard Modular Elements of the Maximum Readiness Basis // Building Life-cycle Management. Information Systems and Technologies. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 231. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96206-7_22

Иные публикации:

1. Рыбакова А.О. Перспективы развития автоматизированного проектирования центров обработки данных на основе применения технологий информационного моделирования зданий // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы». – 2020. - №1. - 8 с. <https://resources.today/PDF/08INOR120.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус.,англ. DOI: 10.15862/08INOR120/

2. Рыбакова А.О. Анализ особенностей проектирования на основе применения модульных элементов максимальной готовности // Строительство: наука и образование. 2021 Т. 11. Вып. 2. Ст. 5. URL: <http://nsojournal.ru> DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.5

3. Рыбакова А.О. Оценка эффективности проектирования на основе модульных элементов максимальной готовности // Строительство: наука и образование. 2022 Т. 12 Вып. 3 Ст. . URL: <http://nsojournal.ru> DOI: 10.22227/2305-5502.2022.3.9

4. Рыбакова А.О., Алешин А.А. Особенности обучения и внедрения технологий информационного моделирования в высшем образовании // Материалы V Международной научно-практической конференции "ВИМ-МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ" (20–22 апреля 2022 года). Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2022. С.205-210