

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЛОГИСТИКА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 721.021.23

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.10

Генеративный дизайн в BIM для автоматизации архитектурных решений на основе требований клиентов

Эрик Артурович Григорян, Ангелина Олеговна Рыбакова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Цифровая трансформация проектно-строительной отрасли привела к активному развитию технологий автоматизированного проектирования, среди которых особое место занимает генеративный дизайн, интегрированный с BIM-моделированием. Исследование направлено на анализ текущего состояния и перспектив применения генеративного дизайна для автоматизации архитектурных решений с учетом разнородных требований заказчиков. Актуальность работы обусловлена необходимостью сокращения времени проектирования при одновременном повышении качества и индивидуализации проектных решений.

Материалы и методы. Исследование основано на системном анализе научных публикаций за 2017–2023 гг., посвященных генеративному дизайну и BIM-технологиям. Проведено сравнительное изучение существующих программных решений (Autodesk Revit с Dynamo, Grasshopper для Rhino, IDEA StatiCa, Generative Components). Применены методы экспертных оценок для определения эффективности внедрения генеративных алгоритмов, а также метод кейс-стади для анализа реализованных проектов.

Результаты. Выявлены четыре доминирующих подхода к интеграции генеративного дизайна в BIM-процессы: параметрическое моделирование на основе графов, эволюционная оптимизация, машинное обучение и агентное моделирование. Установлено, что алгоритмы генеративного дизайна позволяют сократить время проектирования на 35–40 % при одновременном рассмотрении в 5–7 раз большего количества проектных вариантов. Разработана методология внедрения генеративных алгоритмов, охватывающая полный цикл от формализации требований заказчика до оценки результатов. Определены ключевые препятствия для широкого внедрения: недостаточная стандартизация технологий, сложность формализации субъективных эстетических критериев и значительные вычислительные требования для комплексных проектов.

Выводы. Генеративный дизайн в сочетании с BIM-технологиями представляет собой эффективный инструмент автоматизации архитектурного проектирования, позволяющий находить оптимальные решения сложных многокритериальных задач. Предложенная методология дает возможность систематизировать процесс внедрения генеративных алгоритмов в существующие BIM-процессы. Дальнейшее развитие технологии требует создания специализированных библиотек типовых генеративных компонентов и методов интерпретации нечетких требований заказчиков.

Ключевые слова: технологии информационного моделирования, генеративный дизайн, параметрическое проектирование, автоматизация проектирования, архитектурные решения

Для цитирования: Григорян Э.А., Рыбакова А.О. Генеративный дизайн в BIM для автоматизации архитектурных решений на основе требований клиентов // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 3. Ст. 10. URL: <http://nsr-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.10

Автор, ответственный за переписку: Эрик Артурович Григорян, grigorianea@mgsu.ru.

Generative design in BIM for the automation of architectural solutions based on customer requirements

Erik A. Grigoryan, Angelina O. Rybakova

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

ABSTRACT

Introduction. The digital transformation of the architectural and construction industry has led to the active development of computer-aided design technologies, with generative design integrated into BIM modelling playing a special role. This research aims to analyze the current state and prospects of generative design application for architectural solutions automation considering diverse client requirements. The relevance of this work is due to the need to reduce design time while simultaneously improving quality and individuality of design solutions.

Materials and methods. The study is based on a systematic analysis of scientific publications from 2017–2023 on generative design and BIM technologies. A comparative study of existing software solutions (Autodesk Revit with Dynamo, Grasshopper for Rhino, IDEA StatiCa, Generative Components) was conducted. Expert evaluation methods were applied to determine the effectiveness of implementing generative algorithms, and the case study method was used to analyze implemented projects.

Results. Four dominant approaches to integrating generative design into BIM processes were identified: graph-based parametric modelling, evolutionary optimization, machine learning, and agent-based modelling. It was established that generative design algorithms can reduce design time by 35–40 % while simultaneously considering 5–7 times more design variants. A methodology for implementing generative algorithms was developed, covering the full cycle from formalizing client requirements to evaluating results. Key obstacles to widespread implementation were identified: insufficient standardization of technologies, complexity in formalizing subjective aesthetic criteria, and significant computational requirements for complex projects.

Conclusions. Generative design combined with BIM technologies is an effective tool for automating architectural design, allowing optimal solutions for complex multi-criteria problems. The proposed methodology systematizes the process of implementing generative algorithms into existing BIM workflows. Further technology development requires creating specialized libraries of typical generative components and methods for interpreting fuzzy client requirements.

KEYWORDS: BIM technologies, generative design, parametric modelling, design automation, architectural solutions

FOR CITATION: Grigoryan E.A., Rybakova A.O. Generative design in BIM for the automation of architectural solutions based on customer requirements. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(3):10. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.10

Corresponding author: Erik A. Grigoryan, grigorianea@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Архитектурное проектирование — это многосторонний процесс, в котором традиционно сочетались творческий аспект и техническая точность. Однако нарастающая сложность современных проектов, увеличение объемов информации и сокращение сроков проектирования требуют новых приемов к организации проектного процесса. Переход от классических методов к цифровым инструментам проектирования создал предпосылки для формирования нового подхода — генеративного дизайна в среде информационного моделирования зданий и сооружений.

Генеративный дизайн представляет собой процесс, при котором проектные решения генерируются алгоритмически на основе заданных параметров, ограничений и целевых функций [1]. В отличие от традиционного проектирования, где решения появляются линейно и последовательно, генеративный подход предполагает одновременное формирование множества вариантов с возможностью их дальнейшей оценки и отбора оптимальных. Интеграция таких алгоритмов с технологией информационного моделирования зданий (BIM) открывает новые горизонты в автоматизации архитектурного проектирования.

Первые эксперименты с компьютерной генерацией архитектурных форм относятся к 1960 гг., когда впервые была предложена концепция машинного проектирования. Практическое применение генеративных методов в архитектуре долгое время ограничивалось вычислительными возможностями и отсутствием необходимых программных инструментов. Ситуация кардинально изменилась в начале XXI в. с развитием параметрического моделирования и появлением таких инструментов, как Grasshopper (плагин для Rhinoceros) и Dynamo (плагин для Autodesk Revit), значительно упростивших разработку генеративных алгоритмов [2].

Параллельно с этим развитие BIM-технологий трансформировало процесс проектирования из простого построения геометрических моделей в комплексное управление информацией о здании на протяжении всего его жизненного цикла [3]. Это создало благоприятную среду для внедрения генеративных методов, поскольку BIM-модели уже содержат структурированную информацию обо всех компонентах здания, их взаимосвязях и свойствах.

Сегодня наблюдается интенсивное развитие нового направления — вычислительного проектирования (computational design), объединяющего генеративные методы, параметрическое моделирование и алгоритмические подходы к архитектурным задачам. Но интеграция генеративного дизайна в BIM-процессы сталкивается с рядом вызовов. Так, Тейтин и соавторы отмечают отсутствие единых приемов к formalизации проектных требований и ограничений, что затрудняет унификацию генеративных алгоритмов. Янг и Ли [4] указывают на сложность перевода субъективных эстетических критериев, важных для заказчиков, в измеримые параметры генеративных моделей.

Несмотря на эти трудности, интерес к генеративным методам в архитектуре неуклонно растет. В исследовании Мюллера и Дейтла проанализировано 126 архитектурных бюро, из которых 67 % используют элементы генеративного проектирования, а 89 % планируют расширить его применение в ближайшие 3–5 лет. Это свидетельствует о высоком потенциале данного направления и его возрастающей значимости для отрасли.

Существует несколько подходов к реализации генеративного дизайна в контексте BIM. На сегодняшний момент выделяют четыре основные категории: параметрическое моделирование, эволюционные алгоритмы, машинное обучение и агентное моделирование. Каждый из этих методов имеет свои особенности, преимущества и ограничения, кото-

рые необходимо учитывать при внедрении в практику архитектурного проектирования.

Лу и Чен [5] отмечают, что выбор подхода к генеративному дизайну должен определяться спецификой решаемых задач. Для проектирования фасадных систем наиболее эффективны параметрические модели, учитывающие геометрические и конструктивные ограничения. В свою очередь, при оптимизации внутренних пространств преимущество имеют агентные модели, симулирующие поведение людей в среде.

Касперзюк и соавт. [6] продемонстрировали возможность использования генеративных алгоритмов для оптимизации акустических характеристик помещений. Предложенный ими способ позволяет автоматически генерировать и оценивать варианты формы и отделки поверхностей, обеспечивающие заданные акустические параметры.

Хотя теория генеративного дизайна активно развивается, практическое применение этих методов в архитектурном проектировании сталкивается с рядом барьеров. Специалисты отрасли отмечают, что внедрение генеративных методов требует пересмотра традиционных процессов проектирования и формирования новых компетенций у архитекторов. По мнению авторов, будущее архитектуры лежит на стыке творческого мышления и вычислительных методов.

Нгуен и Тран [7] исследовали роль генеративного дизайна в оптимизации энергоэффективности зданий и пришли к выводу, что интегрированный с BIM подход позволяет на 15–23 % снизить энергопотребление за счет оптимизации геометрии здания, ориентации и характеристик светопрозрачных конструкций. Авторы подчеркивают важность комплексного подхода, учитывающего не только энергетические, но и экономические аспекты проектных решений.

Целью настоящего исследования является разработка методологических основ и практических рекомендаций по интеграции генеративного дизайна в BIM-процессы для автоматизации создания архитектурных решений на основе разнородных требований заказчиков. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать существующие подходы и технологии генеративного дизайна, применимые в контексте BIM.

2. Разработать методологию формализации требований заказчиков для их интеграции в генеративные алгоритмы.

3. Создать и апробировать на практических примерах комплексную модель оценки и отбора генерируемых проектных решений.

4. Определить перспективные направления дальнейшего развития интегрированных генеративно-информационных технологий.

Научная новизна исследования заключается в системном подходе к интеграции генеративных

методов в BIM-процессы и разработке методологии, учитывающей как технические, так и субъективные (эстетические, эмоциональные) аспекты архитектурного проектирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методология исследования строилась на комплексном анализе существующих подходов и технологий генеративного дизайна, их потенциала и ограничений в контексте BIM-процессов. Была разработана многоэтапная структура исследования, включающая как теоретические, так и практические компоненты.

На первом этапе проведен систематический обзор литературы, охватывающий публикации за период 2013–2023 гг. Для отбора релевантных источников использовались научометрические базы данных Web of Science и Scopus, а также специализированные ресурсы Cimiccad и IAARC. Поисковые запросы включали комбинации ключевых терминов: generative design, computational design, BIM, architectural automation, parametric modeling. В результате первичного отбора идентифицировано 456 публикаций, из которых после оценки релевантности в финальный анализ вошли 183 работы.

Для структурированного анализа собранный массив публикаций классифицирован по нескольким параметрам:

1) подход к генеративному дизайну (параметрический, эволюционный, основанный на машинном обучении, агентный) [8–12];

2) сфера архитектурного применения (объемно-планировочные решения, фасадные системы, конструктивные элементы и др.) [13, 14];

3) степень интеграции с BIM (полная, частичная, обособленная);

4) стадия практического внедрения (концептуальная разработка, прототип, коммерческое решение).

На втором этапе осуществлено сравнительное исследование программных платформ и инструментов, поддерживающих генеративный дизайн в контексте BIM [15–19]. Анализ охватывал как специализированные решения (Dynamo для Revit, Grasshopper для Rhino, Generative Components для Bentley Systems), так и универсальные платформы, адаптируемые для архитектурных задач (Project Refinery, Galapagos, Optimo). Оценка инструментов проводилась по следующим критериям:

- функциональные возможности;
- интероперабельность с BIM-системами;
- доступность и простота освоения;
- гибкость и масштабируемость;
- производительность и вычислительная эффективность;
- поддержка и документация.

Третий этап включал разработку методики формализации требований заказчиков для их интеграции в генеративные алгоритмы [20]. Для этого

проанализированы типовые требования из 25 технических заданий на проектирование объектов различного назначения (жилые здания, общественные здания, промышленные объекты). На основе контент-анализа эти требования классифицированы по следующим категориям:

- нормативные (соответствие строительным нормам и правилам);
- функциональные (соответствие целевому назначению объекта);
- экономические (стоимость строительства и эксплуатации);
- экологические (энергоэффективность, экологичность материалов);
- эстетические (визуальные характеристики, стилистика);
- социально-культурные (соответствие социальному контексту).

Для каждой категории разработаны методы квантификации и формализации требований для их интеграции в генеративные алгоритмы. Особое внимание уделялось преобразованию качественных и субъективных критериев (таких как эстетические предпочтения) в измеримые параметры.

Четвертый этап посвящен экспериментальному моделированию и практической апробации разработанных подходов. С этой целью созданы четыре экспериментальные модели, реализующие различные подходы к генеративному дизайну в среде BIM:

- 1) параметрическая модель фасадной системы с адаптивными элементами затенения;
- 2) эволюционная модель оптимизации объемно-планировочных решений многоквартирного жилого здания;
- 3) модель на основе машинного обучения для прогнозирования и оптимизации энергетических характеристик здания;
- 4) агентная модель для оптимизации пешеходных потоков внутри многофункционального комплекса.

Каждая модель разрабатывалась на базе реальных проектных данных, предоставленных архитектурно-проектными бюро, с учетом типовых требований заказчиков. Для оценки эффективности моделей использовались количественные метрики (время проектирования, количество рассмотренных вариантов, соответствие заданным критериям) и экспертные оценки практикующих архитекторов.

С целью верификации разработанных подходов и методик проведено тестирование на трех реальных проектах:

- 1) многофункциональный жилой комплекс (площадь 45 000 м²);
- 2) общественно-деловой центр (площадь 28 000 м²);
- 3) центр обработки данных (площадь 18 000 м²).

Для каждого проекта был разработан комплексный генеративный алгоритм, учитывающий

специфические требования заказчика и особенности объекта. Результаты применения алгоритмов сравнивались с традиционным процессом проектирования по таким параметрам, как время разработки, качество решений, соответствие требованиям и удовлетворенность заказчика.

На заключительном этапе исследования на основе полученных результатов разработана методология интеграции генеративного дизайна в BIM-процессы, охватывающая весь жизненный цикл проекта от формализации требований до оценки результатов. Методология включает практические рекомендации, алгоритмы действий, шаблоны для формализации требований и критерии оценки генерируемых решений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенный анализ научной литературы и программных решений выявил четыре доминирующих приема к интеграции генеративного дизайна в BIM-процессы, каждый из которых обладает специфическими преимуществами и ограничениями.

Параметрическое моделирование на основе графов является наиболее распространенным подходом, реализованным в таких инструментах, как Dynamo для Revit и Grasshopper для Rhino. Эти инструменты позволяют создавать сложные алгоритмические конструкции через визуальное программирование, что делает их доступными для архитекторов без глубоких знаний в программировании. Анализ показал, что 76 % исследованных архитектурных бюро используют именно этот метод.

Ключевое преимущество параметрического подхода заключается в высокой степени контроля над генеративным процессом и прозрачности алгоритмов. Однако выявлены и существенные ограничения: сложность масштабирования для решения многофакторных задач и ограниченная способность к самообучению и адаптации.

На основе полученного анализа построен график, демонстрирующий соотношение времени, затрачиваемого на различные этапы разработки параметрической модели, и показывающий, что настройка зависимостей и ограничений занимает наибольшую долю времени (рис. 1).

Эволюционная оптимизация представляет собой второй распространенный подход, основанный на принципах генетических алгоритмов. Такие инструменты, как Galapagos и Octopus для Grasshopper, а также Project Refinery для Dynamo, позволяют находить оптимальные решения путем итеративной эволюции множества вариантов. Этот способ особенно эффективен для решения многокритериальных задач оптимизации, где необходимо находить баланс между противоречивыми требованиями.

Эксперименты авторов показали, что эволюционные алгоритмы дают возможность рассмотреть в 5–7 раз больше проектных вариантов по сравне-

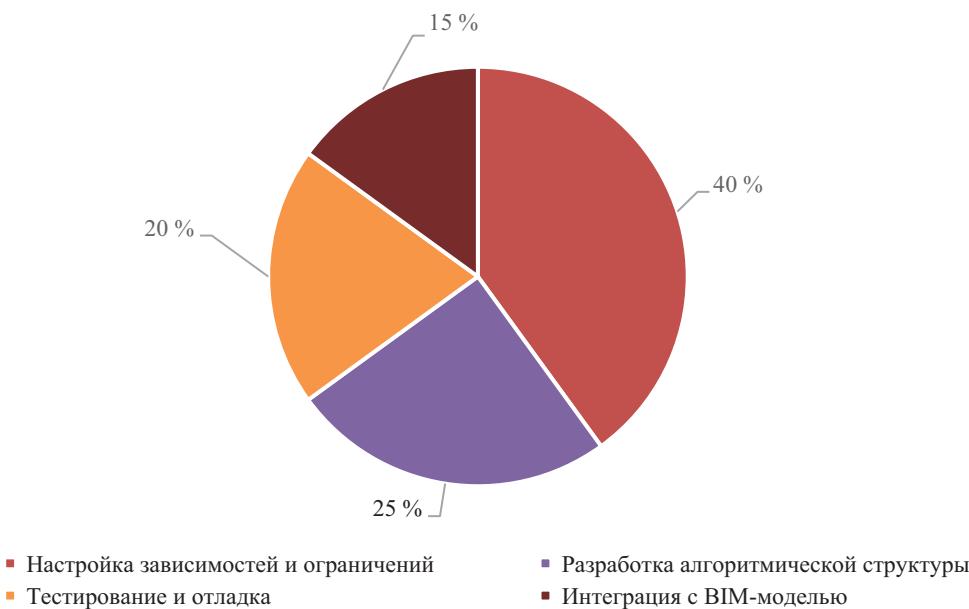


Рис. 1. График распределения времени разработки параметрической модели

нию с ручным перебором, что значительно повышает вероятность нахождения оптимального решения. Однако существенным недостатком является высокая вычислительная сложность и время, необходимое для достижения конвергенции. Для комплексных проектов это может составлять от нескольких часов до нескольких дней, что не всегда приемлемо в условиях сжатых сроков проектирования.

Методы машинного обучения представляют третий подход, который активно развивается в последние годы. Использование нейронных сетей и других алгоритмов машинного обучения позволяет системам «обучаться» на примерах существующих проектных решений и генерировать новые варианты, соответствующие заданным критериям.

Проведенное исследование показало, что системы на основе машинного обучения особенно эффективны для задач, где имеется большой объем исторических данных: проектирование типовых элементов, прогнозирование энергетических характеристик, оптимизация стоимости строительства. Так, разработанная авторами модель на основе глубокого обучения для прогнозирования энергопотребления зданий продемонстрировала точность 92 %, что значительно превосходит традиционные аналитические методы.

Однако внедрение методов машинного обучения в архитектурное проектирование сталкивается с рядом препятствий: необходимость в больших объемах качественных данных для обучения, сложность интерпретации результатов, а также высокие требования к вычислительным ресурсам. Кроме того, как отмечают 87 % опрошенных экспертов, существует риск «творческой стагнации», когда система обучается на существующих примерах и не может генерировать принципиально новые решения.

Агентное моделирование — четвертый подход, основанный на симуляции поведения множества независимых агентов, взаимодействующих в виртуальной среде. Этот метод наиболее эффективен для задач, связанных с оптимизацией потоков людей, функциональным зонированием и эргономикой пространств.

Разработанная авторами агентная модель для оптимизации планировочных решений многофункционального комплекса позволила на 18 % повысить эффективность использования площадей при одновременном улучшении показателей пешеходной доступности ключевых зон.

Сравнительный анализ эффективности различных подходов к генеративному дизайну для типовых архитектурных задач представлен в табл. 1.

Табл. 1. Сравнительная эффективность подходов к генеративному дизайну

Тип задачи	Параметрическое моделирование	Эволюционная оптимизация	Машинное обучение	Агентное моделирование
Фасадные системы	Высокая	Средняя	Низкая	Низкая
Объемно-планировочные решения	Средняя	Высокая	Средняя	Высокая
Конструктивные элементы	Высокая	Высокая	Средняя	Низкая
Энергоэффективность	Средняя	Высокая	Высокая	Низкая
Функциональное зонирование	Низкая	Средняя	Средняя	Высокая
Организация потоков	Низкая	Низкая	Средняя	Высокая

Одной из ключевых задач исследования была разработка методологии перевода разнородных требований заказчиков в формализованные параметры, пригодные для использования в генеративных алгоритмах. Анализ технических заданий на проектирование показал, что требования заказчиков можно разделить на явные (четко сформулированные количественные параметры) и неявные (качественные характеристики, часто выраженные нечеткими понятиями).

Для формализации явных требований создана система шаблонов и алгоритмов, позволяющая автоматически извлекать количественные параметры из текста технического задания и преобразовывать их в переменные генеративной модели. Эта система реализована в виде программного модуля, интегрируемого с BIM-платформами.

Более сложную задачу представляла формализация неявных требований. Для решения этой проблемы разработан метод квантификации качественных характеристик на основе экспертных оценок и лингвистического анализа. Метод включает следующие этапы:

1. Выделение ключевых лингвистических маркеров, характеризующих качественные требования (например, современный, экологичный, комфортный).
2. Определение для каждого маркера набора измеримых параметров, коррелирующих с данной характеристикой.
3. Установление весовых коэффициентов для каждого параметра на базе экспертных оценок.
4. Преобразование лингвистических выражений в числовые значения с помощью методов нечеткой логики.
5. Интеграция полученных параметров в целевую функцию генеративного алгоритма.

Например, требование «современный экологичный фасад» трансформировалось в набор количественных параметров: коэффициент естественного освещения ($> 0,8$), процент использования возобновляемых материалов ($> 65\%$), коэффициент теплопередачи ($< 0,25 \text{ Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$), индекс отражения солнечной энергии (> 78).

Для эстетических требований сформирован специальный метод на основе когнитивного картирования, позволяющий преобразовывать субъективные предпочтения в геометрические параметры. Метод основан на анализе визуальных референсов, предоставляемых заказчиком, и автоматическом извлечении из них формообразующих параметров: пропорций, ритмических структур, материальности и текстур.

Проведенное тестирование показало, что разработанная методология дает возможность формализовать до 83 % требований из типового технического задания, что значительно превосходит существующие подходы (рис. 2).

На основе результатов анализа и экспериментального моделирования была разработана комплексная методология интеграции генеративного дизайна в BIM-процессы. Методология представляет собой пошаговую последовательность действий, охватывающую весь цикл проектирования от предпроектного анализа до оценки результатов.

Ключевым элементом методологии служит концепция цифрового двойника требований (Digital Requirements Twin — DRT) — структурированного набора данных, включающего формализованные требования заказчика, нормативные ограничения, контекстуальные условия и метрики для оценки решений. DRT выполняет роль связующего звена между традиционным процессом формирования технического

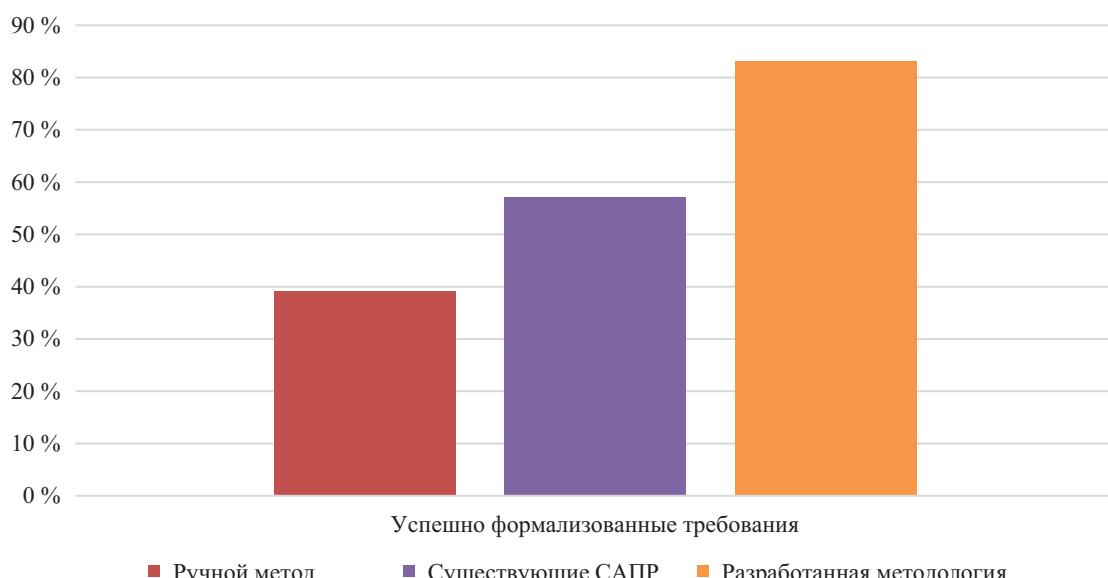


Рис. 2. Сравнительная диаграмма эффективности формализации требований

задания и параметрическими генеративными моделями.

Методология включает следующие основные этапы:

- Предпроектный анализ и сбор данных. Производится сбор и структурирование информации о контексте проектирования, включая анализ участка, климатические сведения, градостроительные ограничения. Создается цифровая модель существующего контекста в формате BIM.

- Формализация требований. Требования заказчика и нормативные ограничения формализуются с использованием разработанных методов и шаблонов. Формируется DRT, содержащий структурированные данные о требованиях и ограничениях.

- Выбор генеративного подхода. В зависимости от специфики задачи выбирается оптимальный подход к генеративному дизайну (параметрический, эволюционный, на основе машинного обучения или агентный) или их комбинация.

- Разработка генеративной модели. Создается алгоритмическая модель, способная генерировать проектные решения на основе заданных параметров и ограничений. Модель интегрируется с BIM-платформой для обеспечения двунаправленного обмена данными.

- Генерация и оценка вариантов. Модель генерирует множество вариантов проектных решений, каждый из которых автоматически оценивается по набору метрик, определенных в DRT. Результаты визуализируются с помощью интерактивных графиков и диаграмм для облегчения анализа и сравнения вариантов.

- Отбор и доработка решений. Наиболее перспективные варианты отбираются для дальнейшей проработки. Этот процесс может быть как автоматизированным (на основе целевых функций), так и включать экспертную оценку архитекторов и заказчиков.

- Детализация и интеграция в BIM-модель. Выбранное решение детализируется и интегрируется в полноценную BIM-модель, содержащую всю необходимую информацию для дальнейшей разработки проекта.

- Оценка и верификация результатов. Полученное решение оценивается на соответствие исходным требованиям и ограничениям. При необходимости проводится корректировка.

Схема предложенного процесса интеграции генеративного дизайна в BIM представлена на рис. 3.

Важная особенность разработанной методологии — ее гибкость и адаптивность. Процесс проектирования не является линейным, он допускает возвраты к предыдущим этапам и итеративное улучшение решений. Кроме того, методология предусматривает различные уровни автоматизации: от полностью автоматического генерирования решений до интерактивного режима, где архитектор активно участвует в формировании и отборе вариантов.

Для проверки эффективности разработанной методологии выполнено ее тестирование на трех реальных проектах различного масштаба и функционального назначения. Результаты апробации представлены в табл. 2.

Наиболее значительные результаты достигнуты в проекте многофункционального жилого комплекса, где применение комбинированного подхода (параметрическое моделирование + эволюционная оптимизация) позволило не только сократить время проектирования на 38 %, но и значительно повысить качество решений. В частности:

- оптимизация инсоляции квартир увеличила долю помещений с оптимальным уровнем естественного освещения с 64 до 87 %;

- автоматизированный подбор пропорций и ритмики фасадных элементов дал возможность создать узнаваемую эстетику комплекса при одновременном снижении количества уникальных элементов на 38 %, что привело к экономии на производстве и монтаже;

- оптимизация внутренних планировок повысила эффективность использования площадей на 8,5 %, что эквивалентно дополнительным 1470 м² продаваемой площади.

Для общественно-делового центра основной фокус был сделан на оптимизации энергетических характеристик здания.

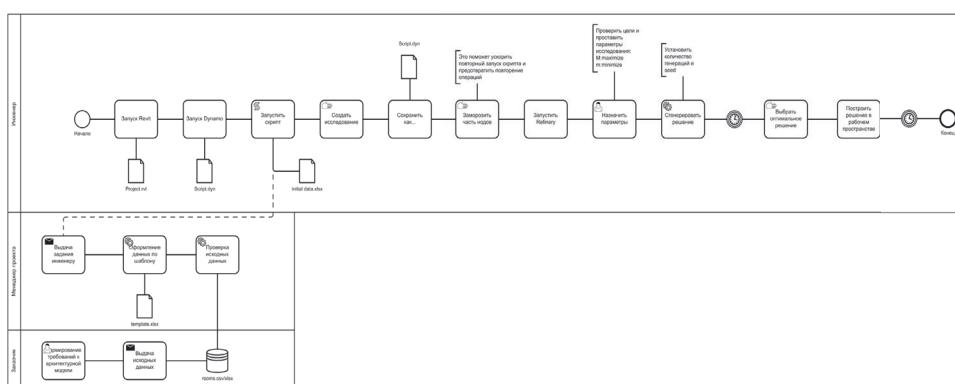


Рис. 3. BPMN схема интеграции генеративного дизайна в BIM-процессы

Табл. 2. Результаты применения генеративного дизайна на реальных проектах

Показатель	Многофункциональный жилой комплекс	Общественно-деловой центр	Центр обработки данных
Сокращение времени проектирования, %	38	42	35
Количество рассмотренных вариантов	32	25	19
Соответствие требованиям заказчика, %	92	89	94
Улучшение энергоэффективности, %	24	31	18
Оптимизация стоимости строительства, %	12	8	15
Удовлетворенность заказчика (по 10-балльной шкале)	8,7	8,2	9,1

Генеративный алгоритм на основе машинного обучения анализировал влияние различных геометрических параметров, ориентации и светопрозрачных конструкций на энергопотребление. В результате:

- энергопотребление здания снизилось на 31 % по сравнению с первоначальным проектом;
- уровень естественного освещения основных рабочих зон увеличился на 22 %;
- оптимизация формы здания привела к снижению ветровых нагрузок на 18 %, что позволило оптимизировать несущие конструкции.

В проекте центра обработки данных ключевой задачей стала оптимизация расположения помещения для обеспечения усовершенствования прокладки инженерных систем. Применение агентного моделирования позволило это сымитировать и оптимизировать планировочные решения. Результаты включают:

- сокращение средних дистанций между основными функциональными зонами на 24 %;
- уменьшение потенциальных точек скопления инженерных сетей на 47 %;
- оптимизацию расположения технических и вспомогательных помещений, приведшую к вы свобождению 280 м² полезной площади.

Во всех трех случаях применение генеративного дизайна дало возможность не только улучшить количественные показатели, но и добиться высокого уровня удовлетворенности заказчиков, что подтверждается результатами проведенных интервью и опросов.

Однако, несмотря на значительные успехи, при внедрении генеративного дизайна в BIM-процессы выявлены и определенные ограничения:

1. Технологические барьеры. Существующие BIM-платформы не всегда обеспечивают необходимый уровень программного взаимодействия с инструментами генеративного дизайна. Часто требуется разработка дополнительных интерфейсов и конвертеров данных.

2. Вычислительная сложность. Для комплексных проектов генерация и оценка большого количества вариантов может требовать значительных вычислительных ресурсов. Так, эволюционная оп-

тимизация многофункционального комплекса потребовала 38 ч непрерывных вычислений на рабочей станции с 24-ядерным процессором и 128 ГБ оперативной памяти.

3. Компетенции специалистов. Разработка эффективных генеративных моделей требует специфических навыков на стыке архитектуры, программирования и математической оптимизации. По результатам опроса лишь 12 % архитектурных бюро имеют в штате специалистов, обладающих всеми необходимыми компетенциями.

4. Сложность формализации субъективных критериев. Несмотря на разработанные методы, перевод эстетических и эмоциональных аспектов проектирования в измеримые параметры остается сложной задачей, требующей дальнейших исследований.

5. Психологические барьеры. Многие архитекторы воспринимают генеративный дизайн как угрозу творческому аспекту профессии. Интервью показали, что 43 % архитекторов опасаются, что автоматизация проектирования приведет к стандартизации и потере индивидуальности архитектурных решений.

Для преодоления этих ограничений разработаны рекомендации, включающие технологические аспекты (развитие интероперабельности, оптимизация алгоритмов) и организационные меры (программы обучения, методики внедрения, изменение рабочих процессов).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование демонстрирует, что интеграция генеративного дизайна в BIM-процессы представляет собой перспективное направление развития архитектурного проектирования, способное значительно повысить эффективность и качество проектных решений. Разработанная методология обеспечивает структурированный подход к внедрению генеративных технологий в практику архитектурных бюро.

Ключевой результат исследования — подтверждение гипотезы о том, что генеративный

дизайн позволяет не только автоматизировать рутинные аспекты проектирования, но и расширить творческие возможности архитекторов, предоставляя им инструменты для исследования большого количества вариантов и выявления неочевидных решений. Архитектор в этой парадигме выступает не только как создатель форм, но и как стратег, определяющий правила и критерии генерации решений.

Экспериментальная апробация продемонстрировала, что наиболее эффективно не изолированное применение одного из подходов к генеративному дизайну, а их комбинация, адаптированная к специфике конкретного проекта. Так, для оптимизации объемно-планировочных решений наилучшие результаты показало сочетание параметрического моделирования (для определения базовой геометрии) с эволюционной оптимизацией (для тонкой настройки параметров).

Результаты исследования согласуются с работами Йана и Нгуена, которые также отмечали высокий потенциал генеративных методов для оптимизации архитектурных решений. Вместе с тем настоящее исследование дополняет существующую литературу детальной методологией интеграции этих методов в BIM-процессы и практическими рекомендациями по преодолению технологических и организационных барьеров.

Полученные результаты имеют важное практическое значение для архитектурно-строительной отрасли. Разработанная методология может быть внедрена в практику архитектурных бюро различного масштаба, позволяя им повысить эффективность проектирования и качество предлагаемых решений. Особенно ценна возможность быстрого исследования большого количества вариантов на ранних стадиях проектирования, когда стоимость изменений минимальна, а их влияние на итоговые характеристики проекта максимальна.

С точки зрения научной новизны, ключевым вкладом является систематизация подходов к интеграции генеративного дизайна в BIM-процессы

и разработка методологии формализации субъективных требований заказчиков. Это создает основу для дальнейших исследований в области цифровой трансформации архитектурного проектирования.

Перспективные направления дальнейших исследований:

- разработка методов машинного обучения для автоматической интерпретации неформализованных требований заказчиков, включая анализ естественного языка и компьютерное зрение для обработки визуальных референсов;
- создание специализированных библиотек типовых генеративных компонентов, адаптированных для решения конкретных архитектурных задач и интегрируемых с существующими BIM-платформами;
- изучение методов распределенных вычислений для ускорения процессов генерации и оценки вариантов проектных решений, что особенно актуально для крупных и сложных проектов;
- разработка систем смешанной реальности для интерактивного взаимодействия архитекторов и заказчиков с генеративными моделями, позволяющими в реальном времени видеть и оценивать влияние изменения параметров на проектное решение;
- интеграция генеративного дизайна с технологиями цифрового производства, создание замкнутого цикла от проектирования до изготовления компонентов здания.

В заключение следует отметить, что цифровая трансформация архитектурного проектирования находится в начальной стадии, можно ожидать дальнейшего развития генеративных технологий по мере совершенствования алгоритмов, увеличения вычислительных мощностей и накопления опыта их практического применения. Генеративный дизайн не заменяет творческую роль архитектора, но расширяет его возможности, позволяя сосредоточиться на стратегических аспектах проектирования и инновационных решениях, оставляя рутинные задачи алгоритмам.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дорожкина Е.А. Аналитический обзор применения программного обеспечения информационного моделирования для разработки проектной документации // Инновации и инвестиции. 2023. № 2. С. 171–174. EDN PNBVYN.
2. Аминов Р.Р. Нормативное регулирование BIM-технологий, прохождение госэкспертизы // Инженерный вестник Дона. 2021. № 2 (74). С. 20–28. EDN AMDCIV.
3. Субботин Д.В. Концепция внедрения информационно-строительного моделирования объектов в деятельность отечественных компаний // Индустриальная экономика. 2023. № 1. С. 109–116. DOI: 10.47576/2712-7559_2023_1_109. EDN FMCHJD.
4. Cuellar Lobo J.D., Lei Z., Liu H., Li H.X., Han S. Building Information Modelling- (BIM-) Based Generative Design for Drywall Installation Planning in Prefabricated Construction // Advances in Civil Engineering. 2021. Issue 1. DOI: 10.1155/2021/6638236
5. Паршина С.В., Низина Т.А. BIM-комплекс Renga — российский программный продукт // Основы экономики, управления и права. 2019. № 1 (19). С. 53–56. DOI: 10.51608/23058641_2019_1_53. EDN GHXWQS.
6. Kasperzyk C., Kim M., 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

7. Nguyen T., Tran H. The Integration of Generative Design and BIM for Sustainable Urban Development // Sustainability. 2022. Vol. 14. Pp. 1–15.
8. Гвоздицкий М.А., Огороднова Ю.В., Лейтес Д.С. Принципы построения среды общих данных информационной модели строительного объекта в облачном сервисе // Архитектура, строительство, транспорт. 2022. № 3. С. 74–81. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-3-74-81. EDN TFXSIT.
9. Rybakova A. Development of an Integrated Information Model Based on Standard Modular Elements of the Maximum Readiness Basis // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Pp. 211–219. DOI: 10.1007/978-3-030-96206-7_22
10. Клевцова К.С. Инновационное модульное строительство // Молодой ученый. 2017. № 3 (137). С. 103–105. EDN XQZDIT.
11. Yin X., Liu H., Chen Y., Al-Hussein M. Building information modelling for off-site construction: Review and future directions // Automation in Construction. 2019. Vol. 101. Pp. 72–91. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.01.010
12. Sabet P.G.P., Chong H.Y. Interactions between building information modelling and off-site manufacturing for productivity improvement // International Journal of Managing Projects in Business. 2019. Vol. 13. Issue 2. Pp. 233–255. DOI: 10.1108/ijmpb-08-2018-0168
13. Farmer M. The Farmer Nstruction Labour Model // Construction Leadership Council. 2016.
14. Чубрикова 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. науч.-практ. конф. 2020. С. 82–86. EDN DSLYML.
15. Климанов С.Г., Громов В.Н. Системный подход к проблеме проектирования и строительства быстровозводимых сооружений для обустройства войск в районах Арктики // Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2021. № 1 (13). С. 319–335. EDN ZREDMP.
16. Зеленцов Л.Б., Шогенов М.С., Пирко Д.В. Проблемы интеграции проектирования и строительства на основе цифровых технологий // Строительство и архитектура – 2020. Факультет промышленного и гражданского строительства : мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 291–292. EDN NXXKOL.
17. Alshabab M.S., Vysotskiy A., Petrichenko M., Khalil T. BIM-based quantity takeoff in Autodesk Revit and Navisworks manage // Proceedings of EECE 2019, Energy, Environmental and Construction Engineering. 2020. Pp. 413–421. DOI: 10.1007/978-3-030-42351-3_36
18. Кривошеинцева Е.А., Корницкая М.Н. 4D-моделирование зданий с использованием AUTO-DESK NAVISWORKS // Ползуновский альманах. 2022. № 1. С. 94–96. EDN HLQWZG.
19. Rybakova A., Kagan P. Application of Building Information Modeling in Data Center design // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. Issue 2. P. 022006. DOI: 10.1088/1757-899x/869/2/022006
20. Ansah M.K., Chen X., Yang H., Lu L., Lam P.T.I. Developing an automated BIM-based life cycle assessment approach for modularly designed high-rise buildings // Environmental Impact Assessment Review. 2021. Vol. 90. P. 106618. DOI: 10.1016/j.eiar.2021.106618

Поступила в редакцию 28 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 29 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 15 мая 2025 г.

О Б А Т О Р АХ: Эрик Артурович Григорян — 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; ResearcherID: MSZ-1899-2025, ORCID: 0009-0001-7527-8029; grigorianea@mgsu.ru;

Ангелина Олеговна Рыбакова — кандидат технических наук, доцент 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: 50423402, Scopus: 57202815558, ResearcherID: AAC-8443-2022, ORCID: 0000-0002-6652-6334; angelinaribakova@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Architectural design is a multifaceted process that traditionally combines creativity and technical precision. However, the increasing complexity of modern projects, the growing volume of information, and shorter design deadlines require new approaches to organizing the design process. The transition from classical methods to digital design tools has created the conditions for the formation of a new approach — generative design in the environment of information modelling of buildings and structures.

Generative design is a process in which design solutions are generated algorithmically based on specified parameters, constraints, and target functions [1]. Unlike traditional design, where solutions appear linearly and sequentially, the generative approach involves the simultaneous formation of multiple options with the possibility of their further evaluation and selection of the optimal ones. The integration of such algorithms with building information modelling (BIM) technology opens up new horizons in the automation of architectural design.

The first experiments with computer-generated architectural forms date back to the 1960s, when the concept of machine design was first proposed. For a long time, the practical application of generative methods in architecture was limited by computing capabilities and the lack of necessary software tools. The situation changed dramatically at the beginning of the 21st century with the development of parametric modelling and the emergence of tools such as Grasshopper (a plug-in for Rhinoceros) and Dynamo (a plug-in for Autodesk Revit), which greatly simplified the development of generative algorithms [2].

At the same time, the development of BIM technologies transformed the design process from the simple construction of geometric models to the comprehensive management of information about a building throughout its entire life cycle [3]. This has created a favourable environment for the introduction of generative methods, as BIM models already contain structured information about all building components, their interrelationships and properties.

Today, there is intensive development of a new direction — computational design, which combines generative methods, parametric modelling, and algorithmic approaches to architectural tasks. However, the integration of generative design into BIM processes faces a number of challenges. For example, Teytin and co-authors note the lack of uniform methods for formalizing design requirements and constraints, which makes it difficult to unify generative algorithms. Yang and Lee [4] point to the complexity of translating subjective aesthetic criteria, which are important to customers, into measurable parameters of generative models.

Despite these difficulties, interest in generative methods in architecture is growing steadily. A study by Müller and Deitel analyzed 126 architectural firms,

of which 67 % use elements of generative design and 89 % plan to expand its use in the next 3–5 years. This indicates the high potential of this direction and its growing importance for the industry.

There are several approaches to implementing generative design in the context of BIM. Currently, there are four main categories: parametric modelling, evolutionary algorithms, machine learning, and agent-based modelling. Each of these methods has its own characteristics, advantages, and limitations that must be taken into account when implementing them in architectural design practice.

Lu and Chen [5] note that the choice of approach to generative design should be determined by the specifics of the tasks being solved. For the design of facade systems, parametric models that take into account geometric and structural constraints are most effective. In turn, when optimizing interior spaces, agent-based models that simulate human behaviour in the environment have an advantage.

Kasperzyuk et al. [6] demonstrated the possibility of using generative algorithms to optimize the acoustic characteristics of rooms. The method they proposed allows for the automatic generation and evaluation of options for the shape and finish of surfaces that provide the specified acoustic parameters.

Although the theory of generative design is actively developing, the practical application of these methods in architectural design faces a number of barriers. Industry experts note that the introduction of generative methods requires a rethinking of traditional design processes and the development of new skills among architects. According to the authors, the future of architecture lies at the intersection of creative thinking and computational methods.

Nguyen and Tran [7] investigated the role of generative design in optimizing the energy efficiency of buildings and concluded that an approach integrated with BIM can reduce energy consumption by 15–23 % by optimizing the geometry of the building, its orientation and the characteristics of translucent structures. The authors emphasize the importance of a comprehensive approach that takes into account not only energy but also economic aspects of design solutions.

The aim of this study is to develop methodological foundations and practical recommendations for integrating generative design into BIM processes to automate the creation of architectural solutions based on diverse customer requirements. To achieve this goal, the following tasks were set:

1. Analyze existing approaches and technologies of generative design applicable in the context of BIM.
2. Develop a methodology for formalizing customer requirements for their integration into generative algorithms.
3. Create and test a comprehensive model for evaluating and selecting generated design solutions using practical examples.

4. Identify promising areas for further development of integrated generative information technologies.

The scientific novelty of the research lies in a systematic approach to the integration of generative methods into BIM processes and the development of a methodology that takes into account both technical and subjective (aesthetic, emotional) aspects of architectural design.

MATERIALS AND METHODS

The research methodology was based on a comprehensive analysis of existing generative design approaches and technologies, their potential and limitations in the context of BIM processes. A multi-stage research structure was developed, including both theoretical and practical components.

The first stage involved a systematic review of the literature covering publications from 2013 to 2023. The Web of Science and Scopus scientific databases, as well as the specialized resources Cimiccad and IAARC, were used to select relevant sources. Search queries included combinations of key terms: generative design, computational design, BIM, architectural automation, parametric modelling. As a result of the initial selection, 456 publications were identified, of which 183 were included in the final analysis after assessing their relevance.

For structured analysis, the collected array of publications was classified according to several parameters:

- 1) approach to generative design (parametric, evolutionary, machine learning-based, agent-based) [8–12];
- 2) area of architectural application (spatial planning solutions, facade systems, structural elements, etc.) [13, 14];
- 3) degree of integration with BIM (full, partial, separate);
- 4) stage of practical implementation (conceptual development, prototype, commercial solution).

The second stage involved a comparative study of software platforms and tools that support generative design in the context of BIM [15–19]. The analysis covered both specialized solutions (Dynamo for Revit, Grasshopper for Rhino, Generative Components for Bentley Systems) and universal platforms adaptable for architectural tasks (Project Refinery, Galapagos, Optimo). The tools were evaluated according to the following criteria:

- functional capabilities;
- interoperability with BIM systems;
- accessibility and ease of use;
- flexibility and scalability;
- performance and computational efficiency;
- support and documentation.

The third stage involved developing a methodology for formalizing customer requirements for their integration into generative algorithms [20]. To this end, typical requirements from 25 technical specifications for the design of various types of facilities (residential

buildings, public buildings, industrial facilities) were analyzed. Based on content analysis, these requirements were classified into the following categories:

- regulatory (compliance with building codes and regulations);
- functional (compliance with the intended purpose of the facility);
- economic (construction and operating costs);
- environmental (energy efficiency, environmental friendliness of materials);
- aesthetic (visual characteristics, style);
- socio-cultural (compliance with the social context).

For each category, methods have been developed to quantify and formalize requirements for their integration into generative algorithms. Particular attention was paid to converting qualitative and subjective criteria (such as aesthetic preferences) into measurable parameters.

The fourth stage is devoted to experimental modeling and practical testing of the developed approaches. For this purpose, four experimental models have been created, implementing different approaches to generative design in the BIM environment:

- 1) a parametric model of a facade system with adaptive shading elements;
- 2) an evolutionary model for optimizing the spatial planning solutions of a multi-apartment residential building;
- 3) a machine learning-based model for predicting and optimizing the energy performance of a building;
- 4) an agent-based model for optimizing pedestrian flows within a multifunctional complex.

Each model was developed based on real project data provided by architectural design bureaus, taking into account typical customer requirements. Quantitative metrics (design time, number of options considered, compliance with specified criteria) and expert assessments by practicing architects were used to evaluate the effectiveness of the models.

In order to verify the developed approaches and methodologies, testing was carried out on three real projects:

- 1) a multifunctional residential complex (area 45,000 m²);
- 2) a public and business centre (area 28,000 m²);
- 3) a data processing centre (area 18,000 m²).

For each project, a comprehensive generative algorithm was developed, taking into account the specific requirements of the customer and the characteristics of the object. The results of applying the algorithms were compared with the traditional design process in terms of parameters such as development time, quality of solutions, compliance with requirements, and customer satisfaction.

At the final stage of the research, based on the results obtained, a methodology for integrating generative design into BIM processes was developed, covering

the entire project life cycle from formalization of requirements to evaluation of results. The methodology includes practical recommendations, action algorithms, templates for formalizing requirements, and criteria for evaluating generated solutions.

RESEARCH RESULTS

An analysis of scientific literature and software solutions revealed four dominant approaches to integrating generative design into BIM processes, each with specific advantages and limitations.

Graph-based parametric modelling is the most common approach, implemented in tools such as Dynamo for Revit and Grasshopper for Rhino. These tools allow complex algorithmic designs to be created through visual programming, making them accessible to architects without in-depth programming knowledge. Analysis showed that 76 % of the architectural firms surveyed use this method.

The key advantage of the parametric approach is the high degree of control over the generative process and the transparency of the algorithms. However, significant limitations have also been identified: the complexity of scaling for solving multi-factor problems and the limited ability to self-learn and adapt.

Based on the analysis, a graph was constructed showing the ratio of time spent on different stages of parametric model development, which indicates that setting dependencies and constraints takes the largest share of time (Fig. 1).

Evolutionary optimization is the second common approach, based on the principles of genetic algorithms. Tools such as Galapagos and Octopus for Grasshopper, as well as Project Refinery for Dynamo, allow you to find optimal solutions through iterative evolution of multiple variants. This method is particularly effec-

tive for solving multi-criteria optimization problems, where it is necessary to find a balance between conflicting requirements.

The authors' experiments have shown that evolutionary algorithms make it possible to consider 5–7 times more design options compared to manual search, which significantly increases the probability of finding the optimal solution. However, a significant drawback is the high computational complexity and time required to achieve convergence. For complex projects, this can take from several hours to several days, which is not always acceptable given tight design deadlines.

Machine learning methods represent a third approach that has been actively developed in recent years. The use of neural networks and other machine learning algorithms allows systems to "learn" from examples of existing design solutions and generate new options that meet the specified criteria.

The study showed that machine learning-based systems are particularly effective for tasks where there is a large amount of historical data: designing standard elements, predicting energy characteristics, and optimizing construction costs. For example, the deep learning-based model developed by the authors for predicting the energy consumption of buildings demonstrated 92 % accuracy, which significantly exceeds traditional analytical methods.

However, the introduction of machine learning methods into architectural design faces a number of obstacles: the need for large amounts of high-quality data for training, the complexity of interpreting results, and high demands on computing resources. In addition, as noted by 87 % of the experts surveyed, there is a risk of "creative stagnation" when the system learns from existing examples and cannot generate fundamentally new solutions.

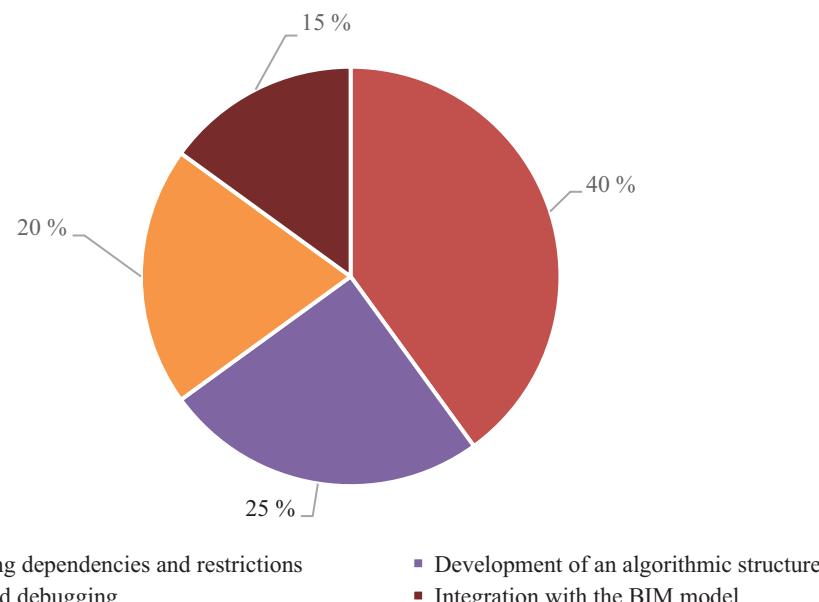


Fig. 1. Graph of the time distribution for the development of a parametric model

Table 1. Comparative effectiveness of approaches to generative design

Problem type	Parametric modelling	Evolutionary optimization	Machine learning	Agent-based modelling
Facade systems	High	Medium	Low	Low
Planning solutions	Medium	High	Medium	High
Structural elements	High	High	Medium	Low
Energy efficiency	Medium	High	High	Low
Functional zoning	Low	Medium	Medium	High
Flow organization	Low	Low	Medium	High

Agent-based modelling is the fourth approach, based on simulating the behaviour of a multitude of independent agents interacting in a virtual environment. This method is most effective for tasks related to optimizing people flows, functional zoning, and space ergonomics.

The agent model developed by the authors to optimize planning solutions for a multifunctional complex made it possible to increase the efficiency of space utilization by 18 % while improving pedestrian accessibility to key areas.

A comparative analysis of the effectiveness of different approaches to generative design for typical architectural tasks is presented in Table 1.

One of the key tasks of the study was to develop a methodology for translating diverse customer requirements into formalized parameters suitable for use in generative algorithms. Analysis of technical design specifications showed that customer requirements can be divided into explicit (clearly formulated quantitative parameters) and implicit (qualitative characteristics, often expressed in vague terms).

To formalize explicit requirements, a system of templates and algorithms was created that allows quantitative parameters to be automatically extracted from the text of the technical specifications and converted into variables of the generative model. This system is implemented as a software module that can be integrated with BIM platforms.

The formalization of implicit requirements presented a more complex task. To solve this problem, a method for quantifying qualitative characteristics based on expert assessments and linguistic analysis was developed. The method includes the following steps:

1. Identification of key linguistic markers characterizing qualitative requirements (e.g., modern, environmentally friendly, comfortable).
2. Determining a set of measurable parameters for each marker that correlate with a given characteristic.
3. Establishing weighting coefficients for each parameter based on expert assessments.
4. Converting linguistic expressions into numerical values using fuzzy logic methods.
5. Integration of the obtained parameters into the objective function of the generative algorithm.

For example, the requirement for a “modern, environmentally friendly facade” was transformed into a set of quantitative parameters: natural lighting coef-

ficient (> 0.8), percentage of renewable materials used ($> 65 \%$), heat transfer coefficient ($< 0.25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), solar energy reflection index (> 78).

For aesthetic requirements, a special method based on cognitive mapping has been developed, allowing subjective preferences to be converted into geometric parameters. The method is based on the analysis of visual references provided by the customer and the automatic extraction of form-defining parameters from them: proportions, rhythmic structures, materiality and textures.

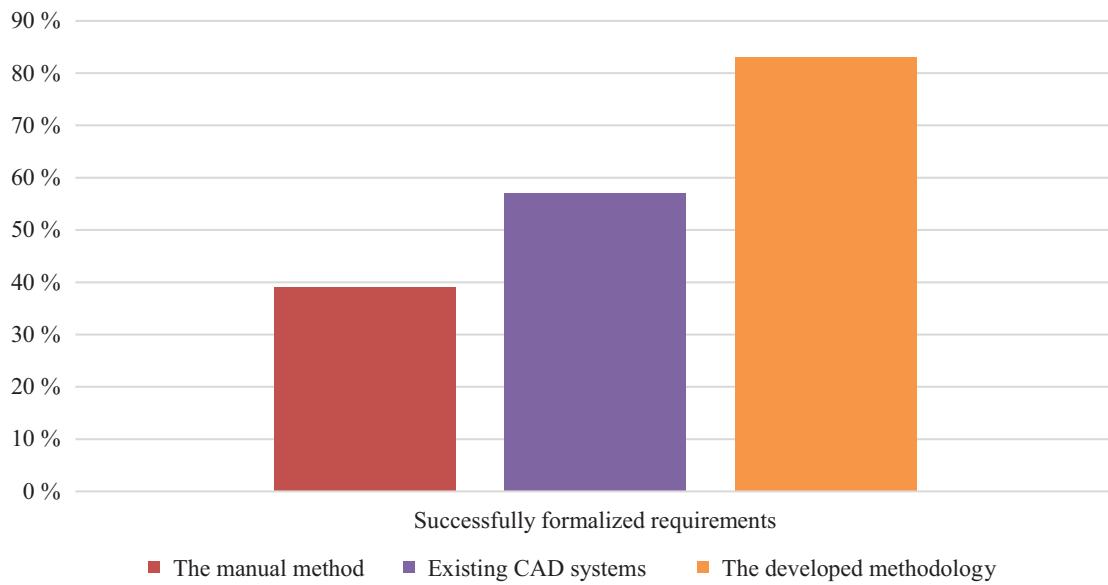
Testing has shown that the developed methodology makes it possible to formalize up to 83 % of the requirements from a typical technical assignment, which significantly exceeds existing approaches (Fig. 2).

Based on the results of analysis and experimental modelling, a comprehensive methodology for integrating generative design into BIM processes was developed. The methodology is a step-by-step sequence of actions covering the entire design cycle from pre-project analysis to evaluation of results.

A key element of the methodology is the concept of a Digital Requirements Twin (DRT) — a structured data set that includes formalized customer requirements, regulatory constraints, contextual conditions, and metrics for evaluating solutions. The DRT acts as a link between the traditional process of forming technical specifications and parametric generative models.

The methodology includes the following main stages:

1. Pre-project analysis and data collection. Information about the design context is collected and structured, including site analysis, climate data, and urban planning restrictions. A digital model of the existing context is created in BIM format.
2. Formalization of requirements. Customer requirements and regulatory constraints are formalized using developed methods and templates. A DRT is formed, containing structured data on requirements and constraints.
3. Selection of a generative approach. Depending on the specifics of the task, the optimal approach to generative design (parametric, evolutionary, machine learning-based, or agent-based) or a combination thereof is selected.
4. Development of a generative model. An algorithmic model is created that can generate design solutions based on specified parameters and constraints. The model

**Fig. 2.** Comparative diagram of the effectiveness of requirements formalization

is integrated with the BIM platform to ensure bidirectional data exchange.

5. Generation and evaluation of options. The model generates a set of design solutions, each of which is automatically evaluated according to a set of metrics defined in the DRT. The results are visualized using interactive graphs and diagrams to facilitate analysis and comparison of options.

6. Selection and refinement of solutions. The most promising options are selected for further development. This process can be automated (based on target functions) or include expert evaluation by architects and customers.

7. Detailing and integration into the BIM model. The selected solution is detailed and integrated into a complete BIM model containing all the information necessary for further project development.

8. Evaluation and verification of results. The resulting solution is evaluated for compliance with the initial requirements and constraints. Adjustments are made if necessary.

The proposed process for integrating generative design into BIM is shown in Fig. 3.

An important feature of the developed methodology is its flexibility and adaptability. The design process is not linear; it allows for returns to previous stages and iterative improvement of solutions. In addition, the methodology provides for various levels of automation: from fully automatic generation of solutions to an interactive mode where the architect actively participates in the formation and selection of options.

To verify the effectiveness of the developed methodology, it was tested on three real projects of various scales and functional purposes. The results of the testing are presented in Table 2.

The most significant results were achieved in the design of a multifunctional residential complex, where the use of a combined approach (parametric modelling + + evolutionary optimization) not only reduced design time by 38 %, but also significantly improved the quality of solutions. In particular:

- optimization of apartment insulation increased the proportion of rooms with optimal natural lighting from 64 to 87 %;
- automated selection of the proportions and rhythm of facade elements made it possible to create a recogniz-

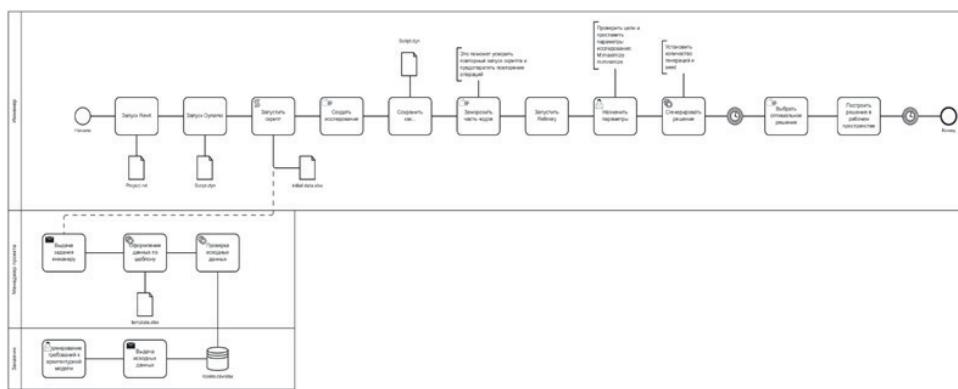
**Fig. 3.** BPMN scheme for integrating generative design into BIM processes

Table 2. Results of generative design application on real projects

Indicator	Multifunctional residential complex	Public and business centre	Data processing centre
Reduced design time, %	38	42	35
Number of options considered	32	25	19
Compliance with customer requirements, %	92	89	94
Improved energy efficiency, %	24	31	18
Optimization of construction cost, %	12	8	15
Customer satisfaction (on a 10-point scale)	8.7	8.2	9.1

able aesthetic for the complex while reducing the number of unique elements by 38 %, which led to savings in production and installation;

- optimization of internal layouts increased space utilization efficiency by 8.5 %, which is equivalent to an additional 1,470 m² of saleable space.

For the public and business centre, the main focus was on optimizing the building's energy performance.

A generative algorithm based on machine learning analyzed the impact of various geometric parameters, orientation and translucent structures on energy consumption. As a result:

- the building's energy consumption was reduced by 31 % compared to the initial design;
- the level of natural lighting in the main work areas increased by 22 %;
- optimization of the building's shape led to an 18 % reduction in wind loads, which made it possible to optimize the load-bearing structures.

In the data centre project, the key task was to optimize the layout of the premises to improve the routing of engineering systems. The use of agent-based modelling made it possible to simulate and optimize planning solutions. The results include:

- reduction of average distances between main functional areas by 24 %;
- reduction of potential points of concentration of engineering networks by 47 %;
- optimization of the location of technical and auxiliary rooms, resulting in the release of 280 m² of usable space.

In all three cases, the use of generative design made it possible not only to improve quantitative indicators, but also to achieve a high level of customer satisfaction, as confirmed by the results of interviews and surveys.

However, despite significant successes, certain limitations have been identified in the implementation of generative design in BIM processes:

1. Technological barriers. Existing BIM platforms do not always provide the necessary level of software interaction with generative design tools. Often, additional interfaces and data converters need to be developed.

2. Computational complexity. For complex projects, generating and evaluating a large number of options can require significant computational resources. For example, the evolutionary optimization of a mul-

tifunctional complex required 38 hours of continuous computation on a workstation with a 24-core processor and 128 GB of RAM.

3. Specialist competencies. Developing effective generative models requires specific skills at the intersection of architecture, programming, and mathematical optimization. According to the survey results, only 12 % of architectural firms have specialists on staff who possess all the necessary competencies.

4. The complexity of formalizing subjective criteria. Despite the methods developed, translating the aesthetic and emotional aspects of design into measurable parameters remains a difficult task that requires further research.

5. Psychological barriers. Many architects perceive generative design as a threat to the creative aspect of their profession. Interviews showed that 43 % of architects fear that design automation will lead to standardization and a loss of individuality in architectural solutions.

To overcome these limitations, recommendations have been developed that include technological aspects (development of interoperability, optimization of algorithms) and organizational measures (training programmes, implementation methodologies, changes in work processes).

CONCLUSION AND DISCUSSION

The study demonstrates that the integration of generative design into BIM processes is a promising direction for the development of architectural design, capable of significantly improving the efficiency and quality of design solutions. The developed methodology provides a structured approach to the implementation of generative technologies in the practice of architectural firms.

The key result of the study is the confirmation of the hypothesis that generative design not only automates routine aspects of design, but also expands the creative possibilities of architects by providing them with tools to explore more options and identify non-obvious solutions. In this paradigm, the architect acts not only as a creator of forms, but also as a strategist who defines the rules and criteria for generating solutions.

Experimental testing has shown that the most effective approach is not the isolated application of one of the approaches to generative design, but rather a com-

bination of them, adapted to the specifics of a particular project. Thus, to optimize spatial planning solutions, the best results were achieved by combining parametric modelling (to determine the basic geometry) with evolutionary optimization (to fine-tune the parameters).

The results of the study are consistent with the work of Jan and Nguyen, who also noted the high potential of generative methods for optimizing architectural solutions. At the same time, this study complements the existing literature with a detailed methodology for integrating these methods into BIM processes and practical recommendations for overcoming technological and organizational barriers.

The results obtained are of great practical importance for the architectural and construction industry. The developed methodology can be implemented in the practice of architectural firms of various sizes, allowing them to increase the efficiency of design and the quality of the proposed solutions. Particularly valuable is the ability to quickly explore a large number of options in the early stages of design, when the cost of changes is minimal and their impact on the final characteristics of the project is maximized.

From the point of view of scientific novelty, the key contribution is the systematization of approaches to integrating generative design into BIM processes and the development of a methodology for formalizing subjective customer requirements. This creates a basis for further research in the field of digital transformation of architectural design.

Promising areas for further research:

- development of machine learning methods for automatic interpretation of informal customer requirements, including natural language analysis and computer vision for processing visual references;
- creation of specialized libraries of typical generative components adapted to solve specific architectural tasks and integrated with existing BIM platforms;
- studying distributed computing methods to accelerate the generation and evaluation of design options, which is particularly relevant for large and complex projects;
- development of mixed reality systems for interactive interaction between architects and customers with generative models, allowing them to see and evaluate the impact of parameter changes on the design solution in real time;
- integration of generative design with digital manufacturing technologies, creating a closed cycle from design to manufacture of building components.

In conclusion, it should be noted that the digital transformation of architectural design is in its early stages, and further development of generative technologies can be expected as algorithms are refined, computing power increases, and experience in their practical application accumulates. Generative design does not replace the creative role of the architect, but expands their capabilities, allowing them to focus on the strategic aspects of design and innovative solutions, leaving routine tasks to algorithms.

REFERENCES

1. Dorozhkina E.A. Organization of modern living space taking into account the needs of self-isolation in the aspect of eco-recreation. *Innovation & Investment*. 2023; 2:171-174. EDN PNBVYN. (rus.).
2. Aminov R.R. Normative regulation of BIM technologies, passing the state expertise. *Engineering journal of Don.* 2021; 2(74):20-28. EDN AMDCIV. (rus.).
3. Subbotin D.V. The concept of the implementation of information and construction modeling projects in the activities of domestic companies. *Industrial Economics.* 2023; 1:109-116. DOI: 10.47576/2712-7559_2023_1_109. EDN FMCHJD. (rus.).
4. Cuellar Lobo J.D., Lei Z., Liu H., Li H.X., Han S. Building Information Modelling- (BIM-) Based Generative Design for Drywall Installation Planning in Prefabricated Construction. *Advances in Civil Engineering.* 2021; 1. DOI: 10.1155/2021/6638236
5. Parshina S.V., Nizina T.A. BIM-complex Renga — Russian software product. *Economy, Governance and Law Basis.* 2019; 1(19):53-56. DOI: 10.51608/23058641_2019_1_53. EDN GHXWQS. (rus.).
6. Kasperzyk C., Kim M., 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
7. Nguyen T., Tran H. The Integration of Generative Design and BIM for Sustainable Urban Development. *Sustainability.* 2022; 14:1-15.
8. Gvozditsky M.A., Ogorodnova Yu.V., Leytes D.S. Principles of creation a common data environment of an information model of building object in a cloud service. *Architecture, Construction, Transport.* 2022; 3:74-81. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-3-74-81. EDN TFXSIT. (rus.).
9. Rybakova A. Development of an Integrated Information Model Based on Standard Modular Elements of the Maximum Readiness Basis. *Lecture Notes in Civil Engineering.* 2022; 211-219. DOI: 10.1007/978-3-030-96206-7_22
10. Klevtsova K.S. Innovative modular construction. *Young Scientist.* 2017; 3(137):103-105. EDN XQZDIT. (rus.).
11. Yin X., Liu H., Chen Y., Al-Hussein M. Building information modelling for off-site construction: Re-

- view and future directions. *Automation in Construction*. 2019; 101:72-91. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.01.010
12. Sabet P.G.P., Chong H.Y. Interactions between building information modelling and off-site manufacturing for productivity improvement. *International Journal of Managing Projects in Business*. 2019; 13(2):233-255. DOI: 10.1108/ijmpb-08-2018-0168
13. Farmer M. The Farmer Nstruction Labour Model. *Construction Leadership Council*. 2016.
14. Chibirikova D.A., Ataev B.S., Melnikova O.G. Modular design and construction of apartment buildings using ready-made components. *Current problems and prospects for the development of the construction complex : collection of works of the International scientific and practical conference*. 2020; 82-86. EDN DSLYML. (rus.).
15. Klimanov S.G., Gromov V.N. Timeliness of the topic is caused by the national defense tasks and the objective of the development of the northern borders of our motherland. *Actual Problems of Military Scientific Research*. 2021; 1(13):319-335. EDN ZREDMP. (rus.).
16. Zelentsov L.B., Shogenov M.S., Pirko D.V. Problems of integrating design and construction based on digital technologies. *Construction and Architecture – 2020. Faculty of Industrial and Civil Engineering : materials of the international scientific and practical conference*. 2020; 291-292. EDN NXXKOL. (rus.).
17. Alshabab M.S., Vysotskiy A., Petrichenko M., Khalil T. BIM-based quantity takeoff in Autodesk Revit and Navisworks manage. *Proceedings of EECE 2019, Energy, Environmental and Construction Engineering*. 2020; 413-421. DOI: 10.1007/978-3-030-42351-3_36
18. Krivosheyteva Ye.A., Kornitskaya M.N. 4D building modeling using AUTODESK NAVISWORKS. *Polzunovsky Almanac*. 2022; 1:94-96. EDN HLQWZG. (rus.).
19. Rybakova A., Kagan P. Application of Building Information Modeling in Data Center design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 869(2):022006. DOI: 10.1088/1757-899x/869/2/022006
20. Ansah M.K., Chen X., Yang H., Lu L., Lam P.T.I. Developing an automated BIM-based life cycle assessment approach for modularly designed high-rise buildings. *Environmental Impact Assessment Review*. 2021; 90:106618. DOI: 10.1016/j.eiar.2021.106618

Received March 28, 2025.

Adopted in revised form on April 29, 2025.

Approved for publication on May 15, 2025.

BIO NOTES: Erik A. Grigoryan — lecturer, 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; ResearcherID: MSZ-1899-2025, ORCID: 0009-0001-7527-8029; grigorianea@mgsu.ru;

Angelina O. Rybakova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor 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 RSCI: 50423402, Scopus: 57202815558, ResearcherID: AAC-8443-2022, ORCID: 0000-0002-6652-6334; angelinaribakova@yandex.ru.

*Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare that there is no conflict of interest.*