



Review Article

Received: June 26, 2024

Accepted: July 10, 2024

Published: July 19, 2024

Modular construction development trends. A review

Veliky, Yaroslav Andreevich¹  
Nemova, Daria Viktorovna^{1*}  

¹Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; yaroslav0gj@gmail.com (V.Y.A.); darya0690@mail.ru (N.D.V.)

Correspondence: * email yaroslav0gj@gmail.com; contact phone [+79818053115](tel:+79818053115)

Keywords:

Modular construction; Economic housing; Block construction; Panel system; Construction

Abstract:

Modular construction technology is characterized by high speed of work and reduced project costs, which makes it attractive in a rapidly developing housing market. Modular construction is gaining popularity, and new developments in this field appear regularly. **The object of the research Method.** The review article uses a general scientific method of synthesis and analysis of information. **Results.** This review analyzes the development of modular construction, and the materials used. The development of modular construction in Russia and the world is considered. Positive and negative sides of the technology are analyzed. New developments in this field are considered. It is established that the lack of national standards for design and a large amount of initial investment in production, hinders the introduction of new technologies in construction. But at the same time the technology has a significant potential for mass construction, as the implementation of technologies such as artificial intelligence (AI) and BIM makes the technology more competitive and applicable.

1 Introduction

Согласно проведенным исследованиям и отчетам Росстата, Российская Федерация является страной с высоким уровнем урбанизации. На данный момент доля городского населения составляет 78.4%, это означает, что более 108.9 миллионов человек проживают в городах. Более того, в стране наблюдается высокая концентрация населения в крупных городах. В пятнадцати городах-миллионниках, проживает более 33 миллионов человек, что составляет 23% от общего населения страны. Это неизбежно приводит к обострению вопросов, связанных с жильем.

Для удовлетворения потребностей всех жителей необходимо большое количество доступного жилья. Однако, наибольшая экономическая эффективность таких проектов может быть обеспечена только при использовании методов строительства, основанных на стандартизации, типизации и унификации. Кроме того, внедрение передовых материалов и строительных систем является важным аспектом в этом процессе.

Модульное строительство — это инновационная технология строительства, главная идея которой, возможность создавать здания из заранее собранных на заводе модулей. Модуль или панель может включать в себя внутреннюю или внешнюю отделку, инженерные сети, что позволяет перенести часть процессов со строительной площадки на завод. После изготовления модулей они транспортируются на строительную площадку, где уже монтируются в готовое здание [1].

Вызовы, связанные с глобальными изменениями, включая рост урбанизации, меняющиеся требования к жилью, коммерческой и социальной инфраструктуре, требуют корректировки существующих подходов в строительстве. Девелоперы, подрядчики и конечные потребители становятся все более требовательны к срокам, качеству и цене [2], [3].



В работе [4] проведено исследование, в котором модульное строительство рассматривается как решение повышенного спроса на жилье в городах. Установлены потенциальные преимущества в виде повышения качества, устойчивости и безопасности рабочих в сочетании со снижением стоимости и сроков реализации проекта. Однако существуют и недостатки технологии такие как логистика и пробелы в области проектирования.

В работе [5] проведены сравнения экономических и технологических аспектов модульного и традиционного строительства и доказано, что модульное строительство не только экономит время строительства и снижает затраты, но и оказывает значительное положительное влияние на окружающую среду.

Основная цель исследования в работе [6] заключается в демонстрации значимости использования технологий, таких как BIM (Building Information Modeling), для создания децентрализованных команд и одновременной интеграции этих команд в процесс модульного строительства и разработки «умных домов». Жизненный цикл модульных умных домов разделен на три основные фазы, и исследования показывают, что использование BIM в сочетании с другими технологиями оптимизирует проектирование, сокращает время и стоимость, а также снижает потребность в человеческих ресурсах. Кроме того, интеграция BIM позволяет обнаружить коллизии на этапах проектирования, что существенно уменьшает количество брака при строительстве.

В исследовании [7] проведен анализ прогресса и возможности применения искусственного интеллекта (ИИ) для управления производством и логистикой в модульном строительстве. В результате было установлено, что интеграция ИИ в производство модулей может повысить качество элементов и эффективность самого производства, но существуют ограничения применения технологии. Исследования в области искусственного интеллекта в модульном строительстве должны сосредоточиться на анализе данных, интеграции технологий Интернета вещей с ИИ, а также разработке интеллектуальных систем принятия решений для управления производственными и логистическими процессами.

В работе [8] проведен анализ возможностей внедрения технологий модульного строительства с использованием современных цифровых технологий для достижения устойчивых строительных целей. Определены ключевые преимущества модульных технологий, такие как эффективность, качество, скорость и экологичность, а также предложена схема интеграции BIM, генеративного дизайна и современных производственных мощностей в единую цифровую производственную цепочку, что позволит оптимизировать проектирование и изготовление модульных конструкций с применением 3D-печати.

Несмотря на растущий интерес к модульному строительству и его значительные преимущества, существует недостаток систематического анализа существующих тенденций и инноваций в этой области. В литературе наблюдается фрагментация исследований, что затрудняет понимание целостной картины развития модульного строительства. Данный анализ направлен на систематизацию данных по использованию технологий в модульном строительстве, а также перспективы развития технологии. Целью исследования является исследование тенденций в развитии модульного строительства, выявление ключевых факторов, способствующие его популяризации, а также проанализировать перспективы и вызовы, с которыми сталкивается данная отрасль.

Объект исследования: Модульное строительство и его технологии, включая модульные фасадные системы и инновационные решения, применяемые в этой области.

Задачи исследования:

1. Проанализировать тенденции и новшества в модульном строительстве.
2. Оценить преимущества и недостатки модульных конструкций по сравнению с традиционными методами строительства.
3. Исследовать влияние технологий на развитие модульного строительства.
4. Выявить перспективы и возможные препятствия для дальнейшего роста этой отрасли.

2 History of modular construction

Развитие «модульной архитектуры» в России началось в 1928 году, когда архитектор К. Мельников разработал идею дома, состоящего из двух цилиндров с определенным



функциональным зонированием. Это сооружение было принципиально новым объемно-планировочным решением для жилых помещений [9].

Расцвет «модульной архитектуры» с объемными блоками во всем мире пришелся на 1950-1960-е годы XX века, когда развивалось и набирало обороты промышленное производство железобетонных конструкций.

Послевоенный период был связан с проблемой нехватки жилья в обществе. Европейские города были не только разрушены во время Второй мировой войны, но и потребовали огромных инвестиций в гражданскую инфраструктуру, в частности в жилищное строительство [10].

Переселение в города стремительно возросло в СССР после 1953 года. Помимо восстановления разрушенных зданий, возникла необходимость в масштабном строительстве доступного массового жилья.

С середины 1950-х до середины 1960-х годов в большинстве стран развивались компании, специализирующиеся на производстве железобетонных элементов зданий, таких как колонны, балки, перекрытия и полы, а также сборных внутренних и наружных стен;

Метод объемно-блочного строительства 1960-х годов был одновременно и инновационным, и экономичным, характеризуясь экономией огромного количества материалов - миллионов тонн металла и цемента - и чрезвычайно большими финансовыми ресурсами будущих жителей городов [11].

Поскольку в СССР 1960-1980-х годов скорость была важнейшим фактором при строительстве зданий, они возводились в примитивных формах с этажностью от пяти до девяти этажей, а их фасады не отличались от гигантских панельных систем.

Первым в мире примером модульного строительства стал жилой дом Habitat 67 в Монреале (Канада), который является памятником архитектуры. Идея была разработана в рамках исследования, диссертации и защиты докторской диссертации знаменитого архитектора Моше Сафди [12]. Уникальный проект будущего, представленный как пример модульного домостроения в 1967 году.

В 1974 году в Краснодарском крае (Россия) было организовано производство объемных конструкций из железобетонных блоков для жилищного строительства типа БРК-2, разработанное «Институтом комплексного проектирования жилищно-коммунальных зданий». Завод существует уже много лет и постоянно развивается. Завод выпускает более 50 блоков в сутки. Размер основных элементов составляет 3.4 м x 2.5 м x 6.0 м. Площадь стандартного блочного помещения составляет 19.6 м² [13]. В функциональных целях можно устанавливать перегородки и дополнительные системы вентиляции. С 2005 года почти все дома в 16 этажей и более строятся из блоков заводского изготовления. Строительство жилого дома из трех секций занимает один месяц.

Рекорд завода по производству 3D-блоков основан на многолетнем опыте строительства, проектирования и эксплуатации, но стоит отметить, что конечный продукт выглядит не слишком разнообразно.

Есть и другие примеры развития модульного домостроения в России: в мае 2015 года на территории индустриального парка «Масловский» в Воронежской области России был построен завод по производству 3D-блоков «ВЫБОР-ОБД». Данная технология позволила построить 17-этажное здание, при этом сборка одного этажа четырехэтажного жилого дома занимает всего четыре дня. После сборки здания необходимо произвести обшивку наружных стен.

3 Modular construction methods

Особое внимание следует уделить понятию «модульное здание». Говоря о модульных компонентах системы, можно выделить два основных направления: использование отдельных элементов каркасной системы (балки, колонны, перекрытия, стеновые панели и т.п.) и использование 3D-элементов (блоков), которые включают в себя необходимые внутренние инженерные коммуникации, внутреннюю и наружную отделку [14], [15].

Основываясь на примере четырехэтажного здания, McKinsey [16] сообщила, что использование объемной модульной системы может сэкономить до 24 % затрат по сравнению с традиционным методом строительства, в то время как соответствующая экономия гибридных и панельных систем составляет 20 % и 17% соответственно.

3.1 Panelized system

Панельные конструкции в модульном строительстве представляют собой готовые конструктивные элементы, которые состоят из панелей, соединенных в единую систему. В панельном модульном строительстве используется несколько типов панелей, таких как стены, перегородки, кровли и перекрытия. По сравнению с объемными системами, панельная требует большего объема работ на строительной площадке – монтаж и отделочные работы. Однако панельная система предлагает большую гибкость. Панельные системы широко используются в Китае и Австралии, особенно для модульных высотных зданий.

Из-за большой длины, высоты и малой толщины стеновые панели не являются самонесущими. Устойчивость обеспечивается креплением панелей друг к другу, к конструкциям перекрытий и т. д. В зависимости от типа конструктивной схемы стеновые панели классифицируются как несущие, самонесущие и навесные. Наружные стеновые панели могут быть однослойными или многослойными

Одним из главных преимуществ использования модульных панелей является простота и скорость монтажа. Панели изготавливаются на заводе со всей необходимой отделкой. Поэтому при возведении здания достаточно просто соединить панели между собой, чтобы получилась нужная конструкция. Это сокращает время строительства и повышает эффективность рабочих процессов. Электропроводка и водопроводные системы могут быть интегрированы в панели в процессе производства на заводе. Это позволяет строить здания с высокими стандартами качества и высокой энергоэффективностью [17].

Важным аспектом модульного панельного строительства является его экономическая эффективность. Массовое производство панелей снижает стоимость строительства и сводит к минимуму строительство на площадке [18]. Также снижается расход строительных материалов и воздействие на окружающую среду.

3.2 Volumetric structures

Объемные модули — это строительные элементы, используемые в модульных зданиях, которые представляют полностью готовые объемные блоки, содержащие все необходимые конструктивные элементы и инженерные сети.

Модули изготавливаются с высокой степенью точности и качества, что обеспечивает необходимые прочностные характеристики, а также соответствие качества отделки и монтажа инженерных систем. После производства модули доставляются на строительную площадку и собираются в готовое здание [19].

Этот метод строительства чаще всего используется для зданий, дизайн которых однообразен. Например: гостиницы и общежития. Кроме того, объемные элементы можно использовать вместе с другими конструктивными элементами, с панельные системами или каркасные конструкциями.

Преимущество использования объемных модулей заключается в ускорении процесса строительства и высокой доступности. Поскольку модули собираются на заводе, большая часть работ выполняется в контролируемых условиях, что сокращает время, необходимое для строительства на площадке. Кроме того, модули готовы не только к внешней облицовке, но и к установке систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, электропроводки, водопровода и других коммуникации [20].

Существует два распространенных типа модульных систем, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Первый тип (Рис. 1) — это система, в которой бетонные стены являются несущими конструкциями и передают нагрузку на фундамент.

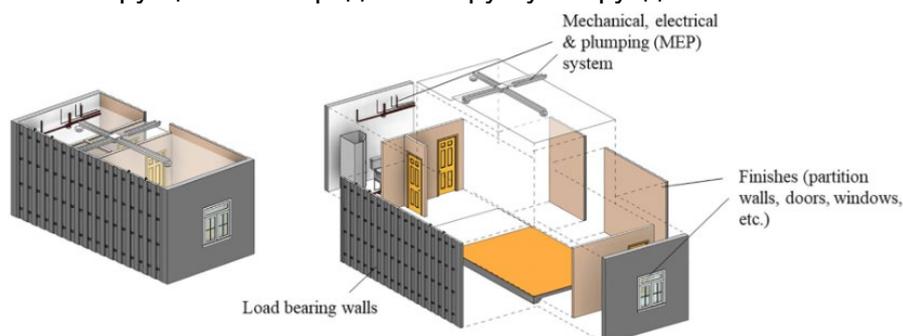


Рис. 1 – Несущая модульная система [21]

Fig. 1 - Load-bearing modular system [20]

Второй тип (Рис. 2) модульной системы основан на угловых модулях из стали. В этом случае нагрузки передаются на плиту через металлические профили.

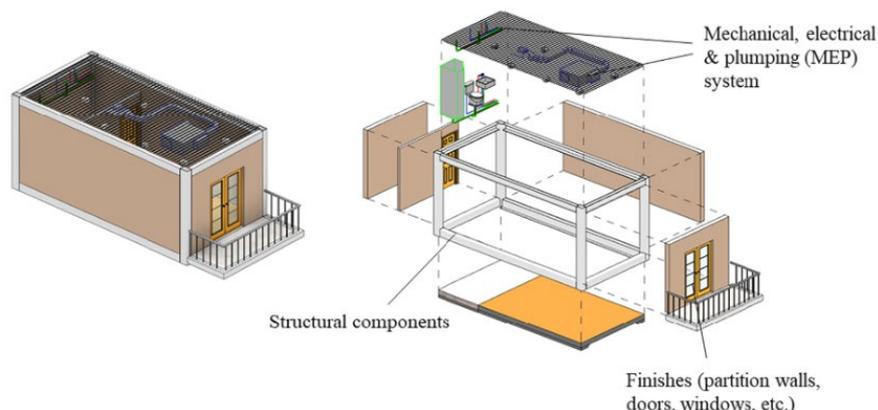


Рис. 2 – Каркасная модульная система [21]

Fig. 2 - Frame modular system [20]

Существует два типа несущих элементов для модульных объемных конструкций: бетон и сталь. Стальные модульные системы имеют ряд преимуществ перед бетонными. Они широко используются в высотных зданиях благодаря своей устойчивости, простоте соединений и гибкости конструкции [22]. Во-первых, они легче, обычно от 15 до 20 тонн, что на 20-35% меньше, чем бетонные модули, которые весят от 20 до 35 тонн [23]. Кроме того, стальная модульная система имеет более короткое время строительства, поскольку в ней используются болтовые соединения, в то время как в бетонной модульной системе соединения должны быть запрессованы. В то же время некоторые системы могут требовать периодической проверки болтовых соединений для обеспечения их целостности в течение всего срока службы здания [18].

3.3 Modular construction in Russia

По мнению экспертов, модульное строительство - одна из технологий, которая даст строительным компаниям конкурентное преимущество на рынке домостроения. Более того, ожидается, что мировой рынок модульных решений вырастет более чем в два раза. Эта тенденция наблюдается и на российском рынке [11].

На 2024 год объемно-модульная технология редко используется при строительстве жилых комплексов в Российской Федерации. Отдельные модули, производимые на заводах, представляют собой санитарно-гигиенические кабины (СГК). Для строительства квартир комфорт-класса компания ПИК использует СГК, поставляемые как сторонним поставщиком («Модульбау», Россия), так и собственной дочерней компанией.

По данным ТАСС, группа компаний «МонАрх» планирует построить в Москве (Россия) крупный завод по производству строительных модулей. ГК «МонАрх» занимается строительством индивидуальных монолитных домов и построила ряд социально значимых объектов. Среди них здания детской неотложной хирургии, травматологии и научно-исследовательского института Министерства финансов РФ.

Эти технологии позволяют создавать изделия разной степени завершенности - от железобетонных каркасов до сборных модульных блоков, включая внутреннюю и внешнюю отделку. Готовые квартиры поставляются в строящиеся здания на заводах [12]. Например, 22-этажный дом по этой технологии можно построить за 20 рабочих дней.

Группа компаний ПИК - еще одна строительная компания, которая объявила о начале производства объемно-модульных конструкций. В качестве целевых регионов для массового жилищного строительства группа рассматривает Дальний Восток России.

В связи с этим ПИК приняла решение о строительстве своего первого завода по производству модульных домов на Сахалине (Россия). В его строительство будет инвестировано 4.5 млрд рублей. Завод будет производить около 300 000 квадратных метров в



год. Планируется производить модули для социальных объектов, таких как детские сады, поликлиники и медицинские центры.

В России модульное строительство зарекомендовало себя как один из самых распространенных и экономически эффективных методов возведения жилых комплексов и общественных зданий. Этот метод, использующий заводские железобетонные плиты, значительно сокращает сроки строительства и гарантирует высокий уровень тепло- и звукоизоляции готовых зданий. Развитие панельного строительства в России началось еще в советское время и продолжает активно развиваться, адаптируясь к строительным требованиям и стандартам качества.

Технологии позволили изготавливать панели различных форм, что позволяет реализовывать проекты различной формы и этажности. Особое внимание уделяется не только функциональности и экономичности, но и эстетичному внешнему виду панельных домов. Архитекторы и дизайнеры работают над созданием жилых комплексов, которые гармонично вписываются в городской ландшафт и отвечают требованиям комфорта и качества жизни своих жильцов.

Например, в Московской области, Россия жилые комплексы возводятся по передовой технологии панельного домостроения. Эта технология не только сокращает сроки строительства, но и повышает энергоэффективность зданий, что особенно важно в условиях российского климата. Построенные панельные дома способны поддерживать оптимальный микроклимат в помещениях и обладают отличными звуко- и теплоизоляционными свойствами.

В Санкт-Петербурге (Россия) и других российских городах также активно строятся жилые районы с панельными домами, причем не только квартиры, но и различные социальные, торговые и развлекательные объекты. Благодаря гибким строительным решениям каждый из этих проектов уникален и отражает тенденции в строительной отрасли.

Сборное строительство в России является высокотехнологичным и экономически эффективным способом комфортного проживания и продолжает активно развиваться и внедрять инновации в строительную отрасль.

3.4 Advantages and disadvantages of modular construction technology

Модульная конструкция имеет множество преимуществ: быстрый монтаж, высокий контроль качества на заводе, безопасная эксплуатация за счет сокращения времени работы на высоте, тестирование и быстрое внедрение новых технологий на заводе, снижение уровня шума.

Ниже перечислены основные преимущества технологии:

— Выполнение работ вне строительной площадки. процесс производства модулей за пределами площадки значительно быстрее по сравнению с традиционными методами строительства. Это возможно благодаря использованию закрытой и контролируемой производственной среды, автоматизации процессов и повторяющихся операций. Производство модулей может осуществляться параллельно с основными фундаментными работами, в отличие от последовательного графика традиционного строительного проекта [24].

— Сборка модулей на площадке строительства. Процессы, связанные с модульным строительством, на строительной площадке значительно упрощены по сравнению с традиционным строительством. В основном, это сводится к монтажу модулей и их подключению к инженерным системам. Исследования McKinsey Company показали, что использование технологии позволяет сократить время строительства на 50%, повысить экономическую эффективность проекта в 20% [25].

— Рациональное использование рабочей силы. При модульном строительстве до 80 % работ может быть перенесено на производственную площадку. Некоторые из наиболее трудоемких и дорогостоящих работ, например, строительные, электромонтажные и сантехнические, могут выполняться более квалифицированным штатным персоналом, что снижает затраты на рабочую силу [26]. Кроме того, более стандартизированная, автоматизированная и контролируемая производственная среда может повысить производительность и устранить большую часть простоев и брака на стройплощадке по сравнению с традиционными методами. Модульная сборка также требует меньше навыков и, следовательно, больше рабочей силы.

— Минимизация брака и устранение дефектов. Заводские условия позволяют гораздо легче и лучше контролировать качество, чем в цеху, что существенно влияет на



возникновение и предотвращение дефектов [27]. Сокращение или устранение дефектов может значительно ускорить график строительства, возможно, на несколько месяцев.

— Уменьшение строительного мусора: поскольку большая часть работы выполняется на заводе, количество строительного мусора на площадке значительно уменьшается. Это также снижает потребность в утилизации отходов и затраты на их вывоз [28] [29].

Но в то же время дома, собираемые из модулей, пока не стали массовыми, по крайней мере, в сегменте многоквартирных жилых зданий из-за наличия некоторых недостатков и ограничений:

— Визуальная составляющая. Стандартные модули существенно ограничивают выбор архитектурных решений, а сборные здания получаются если не одинаковыми, то весьма схожими.

— Существуют ограничения в нормативных документах, которые затрудняют свободное применение многоэтажного модульного строительства. Например, согласно Российскому государственному стандарту ГОСТ Р 58760–2019 "Здания мобильные (инвентарные). Общие технические условия"[30], модульные блок-контейнеры стандартизированы только для зданий высотой до трех этажей. В случае строительства зданий выше трех этажей, бизнес-компаниям необходимо демонстрировать несущую способность модульного каркаса для каждого отдельного случая, отклоняющегося от стандарта. Это создает определенные сложности и ограничения для развития рынка модульного строительства[31].

— Транспортировка и логистика. Транспортировка модулей с завода на строительную площадку может быть затруднена, особенно если здание находится в удаленном месте или требует особых условий транспортировки. Организация логистики и своевременная доставка модулей может стать сложной задачей, особенно при реализации крупных проектов. Чтобы свести к минимуму риск повреждения, модули должны быть правильно упакованы и защищены во время транспортировки. Это может включать использование специальных упаковочных материалов и защиту от ударов и вибрации, чтобы обеспечить безопасность модулей во время транспортировки. Кроме того, необходимо обеспечить надлежащую координацию и синхронизацию между различными командами, такими как команда по производству модулей, транспортная команда, команда по демонтажу и команда по сборке. Отсутствие координации может привести к задержкам и ошибкам, которые могут повредить модуль [32].

— Заводские затраты. Стоимость строительства завода должна быть сопоставлена с экономией, которую дает технология. Необходимо учитывать срок окупаемости капитальных вложений и эксплуатационные расходы установки. Типичный диапазон инвестиционных затрат определить сложно, поскольку он зависит от размера установки и уровня автоматизации. В зависимости от условий капитальные затраты могут составлять 5–15 % от общей стоимости строительного проекта[33].

4 Materials used in the construction of modular buildings and structures.

Модульные конструкции могут быть изготовлены практически из любого материала. Большинство компонентов изготавливаются из композитов одного или нескольких материалов. Базовый материал определяет свойства конструкции на протяжении всего ее жизненного цикла. Материал основы также определяет, в каких системах, компонентах и типах зданий будет использоваться конструкция. Материалы, используемые в модульном строительстве, можно разделить на дерево, сталь/алюминий и бетон[34].

4.1 Wooden structures

Деревянные строительные панели широко используются в строительстве. Деревянные строительные панели формируются путем склеивания древесно-стружечных плит между собой и прокладывания между ними полистирола или пенополиуретана. Этот процесс обеспечивает прочность, энергоэффективность и эстетичный внешний вид панелей [35].

Одним из главных преимуществ деревянных панелей является их экологичность. Процесс производства деревянных панелей требует меньше энергии, чем, например, производство бетонных или стальных панелей [36]. Это способствует снижению энергозатрат в строительной

Veliky, Y.; Nemova, D.

Modular construction development trends. A review;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 113 Article No 11302. doi: 10.4123/CUBS.113.2



отрасли и, в свою очередь, уменьшению негативного воздействия на окружающую среду. Древесные панели также обладают отличными тепло- и звукоизоляционными свойствами, поэтому здания, построенные из них, более энергоэффективны и комфортны для проживания.

Эти панели выступают в качестве облицовки и несущих элементов. Их можно использовать в качестве напольного покрытия, облицовки или перегородок. Быстрый монтаж панелей осуществляется путем склеивания. Этот метод предотвращает разбухание и образование тепловых мостиков.

4.2 Steel structures

Легкий стальной каркас является идеальным каркасным материалом для модульного строительства благодаря эффективному использованию материалов и способности интегрироваться в сложный производственный процесс [37].

Основные преимущества металлических модульных конструкций:

— Экономическая эффективность: Использование модульных стальных конструкций позволяет значительно сократить расходы на строительство. Во-первых, производство металлических компонентов в заводских условиях оптимизирует производственный процесс и снижает расход материалов. Во-вторых, быстрая сборка и установка модулей сокращает трудозатраты и время строительства.

— Удобство транспортировки: Стальные блоки относительно легкие и компактные, что облегчает их транспортировку. Модули могут быть доставлены на стройплощадку грузовиком или железнодорожным контейнером, что упрощает логистику и снижает стоимость доставки [38].

— Высокая адаптивность к изменяющимся условиям: модульные стальные конструкции можно легко модифицировать и изменять в случае необходимости. Это особенно полезно при расширении и реконструкции сооружений. Модули могут быть добавлены или удалены и изменены в соответствии с новыми требованиями и потребностями [39].

— Более безопасная рабочая среда: производство модульных стальных конструкций в контролируемой заводской среде позволяет соблюдать строгие стандарты безопасности и качества [40]. Это снижает риск несчастных случаев на стройплощадке и обеспечивает более безопасные условия труда для сотрудников.

4.3 Concrete structures

Бетон зарекомендовал себя как преобладающий материал в модульном строительстве в Европе [41]. Бетон обладает рядом преимуществ, которые делают его идеальным материалом для модульного строительства:

— Прочность и долговечность. Бетон чрезвычайно прочен и устойчив к воздействию внешних факторов, таких как влага, ветер, огонь и перепады температур [42]. Это гарантирует долговечность бетонных зданий.

— Экономическая эффективность. Использование бетона позволяет сократить расходы на строительство благодаря его относительно низкой цене [43]. Кроме того, бетонные блоки можно производить заранее, что сокращает время строительства.

— Возможность создания сложных форм. Благодаря своей пластичности бетон может принимать различные формы и размеры, что позволяет создавать уникальные архитектурные решения [44].

В России наиболее распространены трехслойные панели. Трехслойные панели состоят из двух панелей железобетона, между которыми находится слой теплоизоляции. Трехслойные панели могут быть утеплены различными материалами. Наиболее распространенными являются полужесткие минераловатные плиты, минеральная пробка, цементно-волоконные плиты, асбестоцементные плиты, фенольные минераловатные плиты и стекловолоконные плиты.

Железобетонные слои панели соединяются сварной арматурой для обеспечения надежности и прочности конструкции. Толщина внутреннего слоя трехслойной панели обычно составляет 80 мм, а наружного - 50 мм. Толщина утеплителя определяется тепловым расчетом, в котором учитываются требования к теплоизоляции здания.

Использование трехслойных панелей позволяет достичь высокой энергоэффективности и улучшить теплоизоляционные свойства здания. Они прочны и долговечны, при этом



обеспечивают комфортный микроклимат в помещении и снижают расходы на отопление и охлаждение[45].

5 New technologies in modular construction

С развитием технологий в этой области, включая применение инновационных материалов и цифровизацию процессов, модульное строительство открывает новые горизонты для архитекторов и застройщиков. Усовершенствованные методы проектирования и строительства позволяют создавать здания практически любой сложности и назначения, делая этот подход еще более привлекательным для широкого круга задач.

5.1 Application of building information modeling technologies (BIM)

Применение технологий информационного моделирования зданий (BIM) в модульном строительстве существенно трансформирует отрасль, делая процесс проектирования, строительства и эксплуатации зданий более эффективным и синхронизированным. В основе BIM лежит использование программного обеспечения для создания детализированной 3D-модели здания, которая обеспечивает визуализацию проекта, помогает выявлять потенциальные проблемы на ранних этапах и способствует более глубокому пониманию проекта всеми участниками[46],[47].

В контексте модульного строительства использование BIM позволяет детально спланировать производство модулей и их монтаж на строительной площадке с высокой степенью точности, что значительно снижает количество ошибок и отходов материалов. Также это дает возможность для тесного взаимодействия между проектированием, производством модулей и их сборкой на объекте, поскольку все изменения в проекте мгновенно отражаются в модели, доступной всем участникам процесса[48],[49].

Одним из ключевых преимуществ применения BIM в модульном строительстве является возможность проведения виртуальных симуляций и анализов. Это включает в себя анализ энергоэффективности здания, расчет нагрузок, проверку соответствия нормам и стандартам безопасности и устойчивости. Таким образом, BIM дает возможность предугадать и оптимизировать эксплуатационные характеристики здания еще до начала его реального строительства.[50–52]

Наряду с улучшением качества и ускорением процесса строительства, применение BIM в модульном строительстве имеет положительный эффект на устойчивость и экологичность объектов. За счет точного моделирования и оптимизации использования материалов уменьшается объем отходов, а благодаря виртуальному тестированию энергоэффективности зданий и их систем, можно значительно снизить энергопотребление и выбросы углекислого газа на этапе эксплуатации[53],[54].

Таким образом, интеграция BIM в процесс модульного строительства открывает возможности для повышения его эффективности, качества, экологичности и управления проектами на всех этапах жизненного цикла здания. Это не только способствует сокращению времени и стоимости строительства, но и предоставляет большие возможности для инноваций в области строительных проектов.

5.2 Application of artificial intelligence (AI)

Искусственный интеллект (ИИ) проникает в самые разнообразные сферы нашей жизни, и модульное строительство не является исключением. Этот раздел исследования посвящен тому, как ИИ может и уже применяется в модульном строительстве, делая строительные процессы более эффективными, экономичными и устойчивыми.

На начальном этапе, ИИ может оптимизировать дизайн модулей. С помощью алгоритмов машинного обучения, системы могут анализировать огромные объемы данных о предыдущих проектах, чтобы предложить оптимальные решения по геометрии модулей, их расположению, устойчивости к нагрузкам и энергоэффективности [55]. Это позволяет значительно сократить время и затраты на проектирование, а также увеличивает вероятность того, что конечный продукт будет отвечать всем требованиям клиентов и нормативным документам[56], [7].

Следующий этап, где ИИ находит свое применение – это планирование и логистика. Искусственный интеллект может анализировать множество переменных, включая производственные мощности, доступность ресурсов, условия доставки и сборки на объекте,



чтобы разработать наиболее эффективный план работ [57–59]. Это особенно важно для модульного строительства, где точное соблюдение сроков и минимизация затрат на транспортировку играют ключевую роль.

В процессе производства модулей ИИ также играет важную роль. С системами контроля качества, эффективность и качество производства значительно повышается. Сокращение производственного цикла и уменьшение количества брака напрямую переводится в снижение стоимости конечного продукта [60–62]. Также искусственный интеллект может быть использован для оптимизации процесса производства и применения принципов бережливого строительства, например для анализа перемещения сотрудников производства [63].

На этапе сборки на месте использование ИИ помогает повысить точность выполнения работ и сократить риски для рабочих [64]. С помощью дронов и автономных роботов, оснащенных системами ИИ для анализа данных в реальном времени, можно контролировать точность установки модулей и обеспечить их максимально эффективное взаимодействие. Это позволяет сократить время на сборку и минимизировать вероятность возникновения проблем, связанных с неправильной установкой, [65].

Наконец, ИИ может играть важную роль в обслуживании здания, анализируя данные о состоянии в реальном времени. С помощью датчиков, собирающих информацию о нагрузке конструкций, температуре, влажности и других важных параметрах, системы ИИ могут предсказывать потенциальные проблемы еще до того, как они возникнут, и автоматически уведомлять обслуживающий персонал [66].

Таким образом, использование искусственного интеллекта в модульном строительстве открывает возможности для оптимизации всех этапов строительного процесса, от дизайна до эксплуатации. Это приводит не только к снижению себестоимости проектов, но и к улучшению их качества и устойчивости, что делает модульное строительство еще более привлекательным вариантом для реализации будущих строительных проектов.

5.3 Innovative material use

В сфере модульного строительства, благодаря своей гибкости и экономической эффективности, особое внимание уделяется разработке и внедрению передовых материалов. Эти материалы не только должны обеспечивать прочность и долговечность конструкции, но и быть легкими, экологичными и эффективными с точки зрения тепло- и звукоизоляции.

Одним из материалов, который находит все большее применение в модульном строительстве, является кросс-ламинированная древесина (КЛД) или CLT (Cross Laminated Timber). Этот материал состоит из нескольких слоев деревянных плит, склеенных и сложенных перекрестно. Такая техника придает CLT высокую прочность, делая его отличным выбором для создания стен, полов и крыш в модульных зданиях. Благодаря своим теплоизоляционным свойствам и низкому весу, CLT упрощает транспортировку и сокращает энергетические затраты на отопление и охлаждение модульных сооружений [67], [68].

Также важным направлением является применение аэрогелей — суперлегких материалов, обладающих выдающимися теплоизоляционными свойствами. Аэрогели могут служить высокоэффективным слоем изоляции в модульных конструкциях, значительно сокращая потери тепла без значительного увеличения толщины стен [69]. В сочетании с теплоизоляционными материалами на основе наноматериалов, такие как аэрогели, модульные ограждающие конструкции могут способствовать снижению энергетических затрат зданий и сооружений, что, в свою очередь, поможет уменьшить выбросы углекислого газа [70–73].

При проектировании модульных сооружений все чаще используются композитные материалы, объединяющие в себе лучшие качества металла, пластика и дерева. Они не только легкие и прочные, но также стойки к коррозии, гниению, влаге и воздействию различных вредных факторов окружающей среды. Использование композитных материалов позволяет создавать долговечные и надежные модульные элементы, которые при этом могут быть весьма привлекательными визуально [74–76].

Технология позволяет применять строительные материалы основываясь на принципах экологической совместимости и устойчивости. Разработка материалов на основе вторичного сырья, таких как переработанный пластик и резина, не только способствует снижению отходов, но и повышает экологическую ценность модульного строительства. Эти материалы могут применяться в качестве изоляционных плит, напольных покрытий и других элементов здания [77],[78].



Инновационные материалы, находящие применение в модульном строительстве, не только повышают качество и долговечность объектов, но и вносят значительный вклад в экологическую безопасность и устойчивость сооружений.

6 Results and discussion

Модульное строительство – технология строительства, предполагающая изготовление стандартных модулей или компонентов за пределами строительной площадки перед их сборкой на строительной площадке. На протяжении всего своего существования модульное строительство постоянно адаптировалось к меняющимся требованиям различных эпох, набирая обороты во время таких значимых исторических событий как Вторая мировая война, когда быстрое и эффективное строительство имело первостепенное значение [79].

Модульное строительство славится своей эффективностью, рентабельностью и устойчивостью [80]. Благодаря сборке модулей в контролируемых заводских условиях этот метод значительно сокращает сроки реализации проекта, затраты и отходы материалов по сравнению с традиционным строительством. Преимущества модульного строительства включают в себя на улучшенный контроль качества и индивидуальный подход, а заводская сборка обеспечивает большую последовательность и точность, тем самым снижая вероятность ошибки. Кроме того, технология способствует более быстрой сборке, что полезно в таких срочных ситуациях, как строительство аварийного жилья и крупномасштабных коммерческих объектов [81], [82].

Несмотря на многочисленные преимущества, модульное строительство сталкивается с рядом проблем, которые могут препятствовать его широкому распространению. К числу таких препятствий можно отнести нормативно-правовое регулирование, отсутствие большого количества квалифицированных специалистов, транспортную и монтажную логистику, а также первоначальные затраты на создание производственных мощностей [83]. Кроме того, дополнительные препятствия создают укоренившаяся традиционная практика строительной отрасли и ограничения гибкости проектирования.

Решение этих проблем с помощью технологических решений, нормативных реформ и повышения квалификации специалистов отрасли будет иметь решающее значение для будущего роста модульного строительства.

Можно сказать, что перспективы модульного строительства представляются многообещающим благодаря технологическим инновациям, усилиям по обеспечению устойчивости и развивающейся динамике рынка. Появляющиеся технологии, такие как информационное моделирование зданий (BIM) и искусственный интеллект, должны произвести революцию в модульном строительстве, повысив точность, эффективность и устойчивость [84–86].

По прогнозам, рынок будет переживать значительный рост благодаря значительным инвестициям в передовые технологии модульного строительства и растущему вниманию к экологичным материалам и возобновляемым источникам энергии. Эта тенденция подчеркивает потенциал модульного строительства, предлагающего более быстрые, безопасные и устойчивые строительные решения, что делает его ключевым игроком в будущем мировой строительной отрасли [87].

7 Conclusions

Модульное строительство имеет большой потенциал для применения в различных сферах, включая жилую, коммерческую и промышленную. Технология обладает значительными преимуществами, такими как сокращение времени и затрат на строительство, а также возможность повысить качество, безопасность и устойчивость объекта [88], [89].

Ниже приводятся результаты обзора и анализа:

1. Анализ тенденций: Модульное строительство активно развивается и совершенствуется вследствие множества факторов, таких как: рост популярности модульного строительства, внедрение инновационных технологий (BIM, AI), повышения внимания к вопросам экологии.



2. Преимущества модульных конструкций, такие как сокращение сроков строительства, снижение затрат и меньшее влияние на окружающую среду, делают технологию привлекательнее по сравнению с традиционными методами строительства.
3. Технология модульного строительства наиболее применима и эффективна для зданий с большой повторяемостью элементов [90]. Иначе изготовление модулей и строительство может занять больше ресурсов чем традиционное строительство. Также на данный момент сдерживающим фактором в России является отсутствие базы нормативной документации на строительство высотных модульных зданий.
4. Развитие и распространение технологии модульного строительства связано с способностью адаптации технологии к появляющимся разработкам. Использование технологии BIM для управления рисками, контроля средств и точного проектирования. Использование технологии ИИ для контроля качества на производстве, применения принципов бережливого производства и обработки больших объем информации. Влияние появляющихся технологий значительно повышает эффективность модульного строительства, делая его более быстрым, экономичным и экологически чистым. Эти аспекты способствуют росту популярности модульных конструкций и их внедрению в различные сектора строительства.
5. Перспективы роста: Значительный потенциал для внедрения в строительную практику и устойчивое развитие городской инфраструктуры. Одним из решений вопроса доступного жилья – удешевления стройматериалов и строительных работ, при этом без потери качества [91]. Это значит, что будет возрастать спрос на модульную технологию, которая к тому же продолжает совершенствоваться в сторону сокращения издержек и влияния на окружающую среду, а также сроков реализации проектов.

References

- 1 Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H. and Bi, K. (2018) Structural Response of Modular Buildings – An Overview. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **16**, 45–56. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2017.12.008>.
- 2 Polyakova A.O. (2015) Modul'noe Stroitel'stvo Kak Odin Iz Putej Resheniya Problemy "Dostupnogo Zhil'ya." Izbrannye Doklady II Mezhdunarodnoj Nauchnoj Konferencii Studentov i Molodyh Uchenyh "Molodezh", Nauka, Tekhnologii: Novye Idei i Perspektivy (MNT-2015)," Tomsk: Tomskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet, Tomsk, 481–484. <https://elibrary.ru/item.asp?id=26123919>.
- 3 EdialeYoung, B., Dimeji Seidu, R., Thayaparan, M. and Appiah-Kubi Site Supervisor, J. (2020) Modular Construction Innovation in the UK: The Case of Residential Buildings. *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Dubai, 806–816. https://www.researchgate.net/publication/348658485_Modular_Construction_Innovation_in_the_UK_The_Case_of_Residential_Buildings.
- 4 Coskun, C., Lee, J., Xiao, J., Graff, G., Kang, K. and Besiktepe, D. (2024) Opportunities and Challenges in the Implementation of Modular Construction Methods for Urban Revitalization. *Sustainability*, **16**, 7242. <https://doi.org/10.3390/SU16167242>.
- 5 Patel, J. and Kaushal, V. (2024) Comparative Review Study of Modular Construction with Traditional On-Site Construction. Preprints. <https://doi.org/10.20944/PREPRINTS202406.0301.V1>.
- 6 Foad Zahedi, Saeid Kazemi and Javad Majrouhi Sardroud. (2023) ADVANCES IN ENGINEERING RESEARCH. VOLUME 53. NOVA SCIENCE. https://www.researchgate.net/publication/374873105_New-emerging_Technologies_in_Modular_Construction.
- 7 Liu, Q., Ma, Y., Chen, L., Pedrycz, W., Skibniewski, M.J. and Chen, Z.S. (2024) Artificial Intelligence for Production, Operations and Logistics Management in Modular Construction Industry: A Systematic Literature Review. *Information Fusion*, Elsevier B.V., **109**. <https://doi.org/10.1016/J.INFFUS.2024.102423>.



- 8 Smorzhenkov, N. and Ignatova, E. (2023) Sustainability of Construction Based on Digital and Modular Technologies. *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, **410**. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202341004006>.
- 9 Issabayev, G., Slyambayeva, A., Kelemeshev, A. and Amandykova, D. (2022) DEVELOPMENT OF THE PROJECT OF MODULAR PREFABRICATED BUILDINGS. *EUREKA, Physics and Engineering*, Scientific Route, **2022**, 36–45. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002499>.
- 10 Shirokov, V. (2022) Design Features of Modular Buildings. *The Eurasian Scientific Journal*, Publishing Company World of Science LLC, **14**. <https://doi.org/10.15862/03SAVN322>.
- 11 Sdobnova, L.D. (2018) PREIMUSHchESTVA MODUL'NOGO STROITEL'STVA. *NOVAYA NAUKA: STRATEGII I VEKTORY RAZVITIYA*, **58**, 107–109. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25304253>.
- 12 Saukov, D.A. and Ginzberg L. A. (2018) Sovremennoe Modul'noe Stroitel'stvo. Bezopasnost' Kritichnyh Infrastruktur i Territorij. Problemy Bezopasnosti Stroitel'nyh Kritichnyh Infrastruktur Safety2018, Ekaterinburg, NIC «NiR BSM» UrO RAN; Ural'skij federal'nyj universitet im. pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'cina, 69–82. <https://elibrary.ru/item.asp?id=37095973>.
- 13 Thompson, J. (2019) Modular Construction: A Solution to Affordable Housing Challenges. Cornell University. https://core.ac.uk/outputs/217137645/?utm_source=pdf&utm_medium=banner&utm_campaign=pdf-decoration-v1.
- 14 Innella, F., Arashpour, M. and Bai, Y. (2019) Lean Methodologies and Techniques for Modular Construction: Chronological and Critical Review. *Journal of Construction Engineering and Management*, American Society of Civil Engineers (ASCE), **145**. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001712](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001712).
- 15 Boafu, F.E., Kim, J.H. and Kim, J.T. (2016) Performance of Modular Prefabricated Architecture: Case Study-Based Review and Future Pathways. *Sustainability (Switzerland)*, MDPI, **8**. <https://doi.org/10.3390/SU8060558>.
- 16 Bertram, N., Fuchs, S., Mischke, J., Palter, R., Strube, G. and Woetzel, J. (2019) Modular Construction: From Projects to Products. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/modular-construction-from-projects-to-products>.
- 17 Kamali, M. and Hewage, K. (2016) Life Cycle Performance of Modular Buildings: A Critical Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, **62**, 1171–1183. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.05.031>.
- 18 Almashaqbeh, M. and El-Rayes, K. (2022) Minimizing Transportation Cost of Prefabricated Modules in Modular Construction Projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*, Emerald Publishing, **29**, 3847–3867. <https://doi.org/10.1108/ECAM-11-2020-0969>.
- 19 Gunawardena, T., Ngo, T., Mendis, P., Aye, L. and Crawford, R. (2014) Time-Efficient Post-Disaster Housing Reconstruction with Prefabricated Modular Structures. *Open House International*, Open House International Association, **39**, 59–69. <https://doi.org/10.1108/OHI-03-2014-B0007>.
- 20 Ferdous, W., Bai, Y., Ngo, T.D., Manalo, A. and Mendis, P. (2019) New Advancements, Challenges and Opportunities of Multi-Storey Modular Buildings – A State-of-the-Art Review. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **183**, 883–893. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.01.061>.
- 21 Liew, J.Y.R., Chua, Y.S. and Dai, Z. (2019) Steel Concrete Composite Systems for Modular Construction of High-Rise Buildings. *Structures*, Elsevier Ltd, **21**, 135–149. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2019.02.010>.
- 22 Jiang, Y., Zhao, D., Wang, D. and Xing, Y. (2019) Sustainable Performance of Buildings through Modular Prefabrication in the Construction Phase: A Comparative Study. *Sustainability (Switzerland)*, MDPI, **11**. <https://doi.org/10.3390/SU11205658>.
- 23 Boafu, F.E., Kim, J.H. and Kim, J.T. (2016) Performance of Modular Prefabricated Architecture: Case Study-Based Review and Future Pathways. *Sustainability (Switzerland)*, MDPI, **8**. <https://doi.org/10.3390/SU8060558>.
- 24 Chen, Z., Liu, J. and Yu, Y. (2017) Experimental Study on Interior Connections in Modular Steel Buildings. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **147**, 625–638. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2017.06.002>.
- 25 Li, J., Andersen, L.V. and Hudert, M.M. (2023) The Potential Contribution of Modular Volumetric Timber Buildings to Circular Construction: A State-of-the-Art Review Based on Literature and 60



- Case Studies. *Sustainability (Switzerland)*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), **15**. <https://doi.org/10.3390/SU152316203>.
- 26 Pang, S.D., Liew, J.Y.R.L., Dai, Z. and Wang, Y. (2016) Prefabricated Prefinished Volumetric Construction Joining Tech-Niques Review. *Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings*, University of Alberta Libraries. <https://doi.org/10.29173/MOCS31>.
- 27 Jin, R., Hong, J. and Zuo, J. (2020) Environmental Performance of Off-Site Constructed Facilities: A Critical Review. *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, **207**. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.109567>.
- 28 Zhang, Y. and Pan, W. (2022) Reducing Construction Waste Through Modular Construction. 339–347. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5256-2_27.
- 29 Waste Reduction Potential of Offsite Volumetric Construction. www.wrap.org.uk.
- 30 GOST R 58760-2019 “Mobile (Inventory) Buildings. General Technical Conditions.” <https://docs.cntd.ru/document/1200170185>.
- 31 Mills S, Grove D and Egan M. (2015) Breaking the Pre-Fabricated Ceiling: Challenging the Limits for Modular High-Rise. CTBUH International Conference, New York, 416–425. <https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2488-breaking-the-pre-fabricated-ceiling-challenging-the-limits-for-modular-high-rise.pdf>.
- 32 Tharaka Gunawardena, Priyan Mendis, Tuan Duc Ngo, Lu Aye and Jose Alfano. (2014) Sustainable Prefabricated Modular Buildings. 5th International Conference on Sustainable Built Environment, Kandy, Sri Lanka. <https://doi.org/10.13140/2.1.4847.3920>.
- 33 Kotlyarskaya (Vasileva), I.L., Sinelnikov, A.S., Iakovlev, N.A., Vatin, N.I. and Gravit, M.V. (2022) Structural and Technological Features of Modular Multi-Storey Buildings. A Review. *AlfaBuild*, **23**. <https://doi.org/10.57728/ALF.23.4>.
- 34 Taş, E. and Can, G. (2023) Material Waste Management in the Construction Industry: The Case Studies of Prefabricated and Modular Buildings. **5**, 10650–10664. https://www.researchgate.net/publication/377204570_Material_Waste_Management_in_the_Construction_Industry_The_Case_Studies_of_Prefabricated_and_Modular_Buildings.
- 35 Al-Najjar, A. and Dodoo, A. (2023) Modular Multi-Storey Construction with Cross-Laminated Timber: Life Cycle Environmental Implications. *Wood Material Science and Engineering*, Taylor and Francis Ltd., **18**, 525–539. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2053204>.
- 36 Orellana, P., Santa María, H., Almazán, J.L. and Estrella, X. (2021) Cyclic Behavior of Wood-Frame Shear Walls with Vertical Load and Bending Moment for Mid-Rise Timber Buildings. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **240**. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.112298>.
- 37 Liew, J.Y.R., Chua, Y.S. and Dai, Z. (2019) Steel Concrete Composite Systems for Modular Construction of High-Rise Buildings. *Structures*, Elsevier Ltd, **21**, 135–149. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2019.02.010>.
- 38 Farajian, M., Sharafi, P. and Kildashti, K. (2021) The Influence of Inter-Module Connections on the Effective Length of Columns in Multi-Story Modular Steel Frames. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier Ltd, **177**. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2020.106450>.
- 39 Chen, Z., Li, H., Chen, A., Yu, Y. and Wang, H. (2017) Research on Pretensioned Modular Frame Test and Simulations. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **151**, 774–787. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2017.08.019>.
- 40 Dhanapal, J., Ghaednia, H., Das, S. and Velocci, J. (2019) Structural Performance of State-of-the-Art VectorBloc Modular Connector under Axial Loads. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **183**, 496–509. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.01.023>.
- 41 Jeyanthi, J. and Revathi, S. (2022) Study of Light Weight Composite Concrete Incorporated with Polypropylene Fiber and Cenosphere. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, **62**, 4303–4309. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.04.804>.
- 42 Pan, W. and Wang, Z. (2023) Precast Concrete Coupled Shear Wall System of Modular High-Rises Without In Situ Cores. *Structural Engineering International*, Taylor and Francis Ltd., **33**, 128–140. <https://doi.org/10.1080/10168664.2021.2004974>.
- 43 Cai, G., Xiong, F., Xu, Y., Larbi, A.S., Lu, Y. and Yoshizawa, M. (2019) A Demountable Connection for Low-Rise Precast Concrete Structures with DfD for Construction Sustainability-A Preliminary Test under Cyclic Loads. *Sustainability (Switzerland)*, MDPI, **11**. <https://doi.org/10.3390/SU11133696>.
- 44 Hogan L, Henry R and Ingham J. (2018) Performance Ofpanel-to-Foundation Connections in Low-Rise Precastconcrete Buildings. *SESOC Journal*, **31**, 26–36.



- https://www.researchgate.net/publication/325379644_Performance_of_panel-to-foundation_connections_in_low-rise_precast_concrete_buildings.
- 45 Belyaev V.S. (2011) E'nergoeffektivnost' Naruzhny'x Sten Krupnopanel'nogo Domostroeniya. *Zhilishhnoe stroitel'stvo*, ООО Рекламно-издательская фирма «Стройматериалы», 23–26. <https://cyberleninka.ru/article/n/energoeffektivnost-naruzhnyh-sten-krupnopanelnogo-domostroeniya>.
- 46 Zhou, J.X., Shen, G.Q., Yoon, S.H. and Jin, X. (2021) Customization of On-Site Assembly Services by Integrating the Internet of Things and BIM Technologies in Modular Integrated Construction. *Automation in Construction*, Elsevier, **126**, 103663. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2021.103663>.
- 47 Abbasi, S. and Noorzai, E. (2021) The BIM-Based Multi-Optimization Approach in Order to Determine the Trade-off between Embodied and Operation Energy Focused on Renewable Energy Use. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, **281**, 125359. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.125359>.
- 48 Omurtay, İ., Soyluk, A. and Ünay, A. (2024) Use of BIM with Modular Construction in Future Construction Techniques. *MANAS Journal of Engineering*, Kyrgyz-Turkish Manas University, **12**, 29–33. <https://doi.org/10.51354/MJEN.1220152>.
- 49 Moghadam, M., Alwisy, A. and Al-Hussein, M. (2012) Integrated BIM/Lean Base Production Line Schedule Model for Modular Construction Manufacturing. *Construction Research Congress 2012: Construction Challenges in a Flat World, Proceedings of the 2012 Construction Research Congress*, 1271–1280. <https://doi.org/10.1061/9780784412329.128>.
- 50 Chen, L. and Luo, H. (2014) A BIM-Based Construction Quality Management Model and Its Applications. *Automation in Construction*, Elsevier, **46**, 64–73. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2014.05.009>.
- 51 Alwisy, A., Al-Hussein, M. and Al-Jibouri, S.H. (2012) BIM Approach for Automated Drafting and Design for Modular Construction Manufacturing. *Congress on Computing in Civil Engineering, Proceedings*, 221–228. <https://doi.org/10.1061/9780784412343.0028>.
- 52 Lu, N. and Korman, T. (2010) Implementation of Building Information Modeling (BIM) in Modular Construction: Benefits and Challenges. *Construction Research Congress 2010: Innovation for Reshaping Construction Practice - Proceedings of the 2010 Construction Research Congress*, 1136–1145. [https://doi.org/10.1061/41109\(373\)114](https://doi.org/10.1061/41109(373)114).
- 53 Smorzhenkov, N. and Ignatova, E. (2023) Sustainability of Construction Based on Digital and Modular Technologies. *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, **410**. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202341004006>.
- 54 Zhang, X., Azhar, S., Nadeem, A. and Khalfan, M. (2018) Using Building Information Modelling to Achieve Lean Principles by Improving Efficiency of Work Teams. *International Journal of Construction Management*, Taylor and Francis Ltd., **18**, 293–300. <https://doi.org/10.1080/15623599.2017.1382083>.
- 55 Han, S.H., Al-Hussein, M., Al-Jibouri, S. and Yu, H. (2012) Automated Post-Simulation Visualization of Modular Building Production Assembly Line. *Automation in Construction*, Elsevier, **21**, 229–236. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2011.06.007>.
- 56 Golabchi, A., Han, S., Seo, J., Han, S., Lee, S. and Al-Hussein, M. (2015) An Automated Biomechanical Simulation Approach to Ergonomic Job Analysis for Workplace Design. *Journal of Construction Engineering and Management*, American Society of Civil Engineers (ASCE), **141**. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000998](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000998).
- 57 Bortolini, R., Formoso, C.T. and Viana, D.D. (2019) Site Logistics Planning and Control for Engineer-to-Order Prefabricated Building Systems Using BIM 4D Modeling. *Automation in Construction*, Elsevier, **98**, 248–264. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2018.11.031>.
- 58 Xu, G., Li, M., Chen, C.H. and Wei, Y. (2018) Cloud Asset-Enabled Integrated IoT Platform for Lean Prefabricated Construction. *Automation in Construction*, Elsevier, **93**, 123–134. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2018.05.012>.
- 59 Ko, C.H. and Wang, S.F. (2011) Precast Production Scheduling Using Multi-Objective Genetic Algorithms. *Expert Systems with Applications*, Pergamon, **38**, 8293–8302. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2011.01.013>.
- 60 Panahi, R., Louis, J., Podder, A., Swanson, C. and Pless, S. (2023) Bottleneck Detection in Modular Construction Factories Using Computer Vision. *Sensors*, MDPI, **23**. <https://doi.org/10.3390/S23083982>.



- 61 Panahi, R., Louis, J., Podder, A. and Swanson, C. (2022) Tracking Volumetric Units in Modular Factories for Automated Progress Monitoring Using Computer Vision. *Construction Research Congress 2022: Computer Applications, Automation, and Data Analytics - Selected Papers from Construction Research Congress 2022*, American Society of Civil Engineers (ASCE), **2-B**, 822–829. <https://doi.org/10.1061/9780784483961.086>.
- 62 Panahi, R., Louis, J., Podder, A., Pless, S., Swanson, C. and Jafari, M. (2023) Automated Progress Monitoring in Modular Construction Factories Using Computer Vision and Building Information Modeling. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 1–8. <https://doi.org/10.22260/ISARC2023/0003>.
- 63 Panahi, R., Louis, J., Aziere, N., Podder, A. and Swanson, C. (2021) Identifying Modular Construction Worker Tasks Using Computer Vision. *Computing in Civil Engineering 2021 - Selected Papers from the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering 2021*, American Society of Civil Engineers (ASCE), 959–966. <https://doi.org/10.1061/9780784483893.118>.
- 64 Hussein, M., Eltoukhy, A.E.E., Karam, A., Shaban, I.A. and Zayed, T. (2021) Modelling in Off-Site Construction Supply Chain Management: A Review and Future Directions for Sustainable Modular Integrated Construction. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, **310**, 127503. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127503>.
- 65 Kijewski-Correa, T., Kwon, D.K., Kareem, A., Bentz, A., Guo, Y., Bobby, S. and Abdelrazaq, A. (2013) SmartSync: An Integrated Real-Time Structural Health Monitoring and Structural Identification System for Tall Buildings. *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), **139**, 1675–1687. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000560](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000560).
- 66 Abbasi, S. and Noorzai, E. (2021) The BIM-Based Multi-Optimization Approach in Order to Determine the Trade-off between Embodied and Operation Energy Focused on Renewable Energy Use. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, **281**, 125359. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.125359>.
- 67 Navaratnam, S., Widdowfield Small, D., Gatheeshgar, P., Poologanathan, K., Thamboo, J., Higgins, C. and Mendis, P. (2021) Development of Cross Laminated Timber-Cold-Formed Steel Composite Beam for Floor System to Sustainable Modular Building Construction. *Structures*, Elsevier Ltd, **32**, 681–690. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2021.03.051>.
- 68 Loss, C. and Tannert, T. (2018) Hybrid CLT-Based Modular Construction Systems for Prefabricated Buildings. *IABSE Symposium, Nantes 2018: Tomorrow's Megastructures*, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), S32-1-S32-8. <https://doi.org/10.2749/NANTES.2018.S32-1>.
- 69 Berardi, U. and Nosrati, R.H. (2018) Long-Term Thermal Conductivity of Aerogel-Enhanced Insulating Materials under Different Laboratory Aging Conditions. *Energy*, Pergamon, **147**, 1188–1202. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.01.053>.
- 70 Leonidovna, I., Artemovich, N., Ivanovich, N. and Viktorovna, D. (2022) Modular Energy-Efficient Enclosing Structures with the Aerogel Thermal Insulation . A Review. *AlfaBuild*, **24**, 60. <https://doi.org/10.57728/ALF.24.2>.
- 71 Na, S., Kim, S. and Moon, S. (2022) Additive Manufacturing (3D Printing)-Applied Construction: Smart Node System for an Irregular Building Façade. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **56**. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104743>.
- 72 Ahmad, H., Anguilano, L. and Fan, M. (2022) Microstructural Architecture and Mechanical Properties of Empowered Cellulose-Based Aerogel Composites via TEMPO-Free Oxidation. *Carbohydrate Polymers*, Elsevier Ltd, **298**. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2022.120117>.
- 73 Jiang, T., Wang, Y., Shi, S., Yuan, N., Ma, R., Wu, X., Shi, D., Sun, K., Zhao, Y., Li, W. and Yu, J. (2022) Compressive Behavior of Lightweight Concrete Using Aerogel-Reinforced Expanded Polystyrene Foams. *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier Ltd, **17**. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01557>.
- 74 Chen, S., Zhang, Y., Teng, Y., Poon, C.S. and Pan, W. (2023) Estimating Embodied Carbon Reduction in Modular High-Rise Residential Buildings Through Low Carbon Concrete. 1357–1369. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3626-7_105.
- 75 Munmulla, T., Navaratnam, S., Hidallana-Gamage, H.D., Tushar, Q., Ponnampalam, T., Zhang, G. and Jayasinghe, M.T.R. (2023) Sustainable Approaches to Improve the Resilience of Modular



- Buildings under Wind Loads. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier Ltd, **211**. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2023.108124>.
- 76 Łaskawiec, K., Gębarowski, P., Zajac, P. and Stankiewicz, J. (2023) AAC Building Components for Modular Construction Using Recycled Materials. *ce/papers*, Wiley, **6**, 223–229. <https://doi.org/10.1002/CEPA.1961>.
- 77 Vitomir, J. and Nastić, V. (2024) Modular Structures: Sustainable Ecological Structures Made of Recycled Aluminium. Centre for Evaluation in Education and Science (CEON/CEES), 163–168. <https://doi.org/10.5937/GREENB24021V>.
- 78 Jiang, X. and Bai, X. (2024) Carbon Emissions of Cast-in-Place and Prefabricated Buildings: A Comparative Analysis and Carbon Reduction Strategy. *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, **546**. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202454601009>.
- 79 Sharafi, P., Rashidi, M., Samali, B., Ronagh, H. and Mortazavi, M. (2018) Identification of Factors and Decision Analysis of the Level of Modularization in Building Construction. *Journal of Architectural Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), **24**. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000313](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000313).
- 80 Li, J., Lu, S., Wang, W., Huang, J., Chen, X. and Wang, J. (2018) Design and Climate-Responsiveness Performance Evaluation of an Integrated Envelope for Modular Prefabricated Buildings. *Advances in Materials Science and Engineering*, Hindawi Limited, **2018**. <https://doi.org/10.1155/2018/8082368>.
- 81 Hyun, H., Kim, H., Lee, H.S., Park, M. and Lee, J. (2020) Integrated Design Process for Modular Construction Projects to Reduce Rework. *Sustainability (Switzerland)*, MDPI, **12**. <https://doi.org/10.3390/SU12020530>.
- 82 Zukowski, M. (2022) A Small Modular House as a Response to the Energy Crisis. *Energies*, MDPI, **15**. <https://doi.org/10.3390/EN15218058>.
- 83 Ma, R., Xia, J., Chang, H., Xu, B. and Zhang, L. (2021) Experimental and Numerical Investigation of Mechanical Properties on Novel Modular Connections with Superimposed Beams. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **232**. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.111858>.
- 84 Ansah, M.K., Chen, X., Yang, H., Lu, L. and Lam, P.T.I. (2021) Developing an Automated BIM-Based Life Cycle Assessment Approach for Modularly Designed High-Rise Buildings. *Environmental Impact Assessment Review*, Elsevier Inc., **90**. <https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2021.106618>.
- 85 Omurtay, İ., Soyluk, A. and Ünay, A. (2024) Use of BIM with Modular Construction in Future Construction Techniques. *MANAS Journal of Engineering*, Kyrgyz-Turkish Manas University, **12**, 29–33. <https://doi.org/10.51354/MJEN.1220152>.
- 86 Najjar, M.K., Franco de Carvalho Willcox, L., Khalas, M., Da Costa, B., Haddad, A. and Boer, D. (2024) BIM and Experimental Design Analysis Toward Sustainable Energy Efficiency in Buildings: A Modular Construction Case Study. *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, **444**, 483–495. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48461-2_42.
- 87 Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H. and Bi, K. (2018) Structural Response of Modular Buildings – An Overview. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **16**, 45–56. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2017.12.008>.
- 88 Zav`yalov I.V. (2022) Preimushhestva i Perspektivy` Modul`nogo Stroitel`stva. *Korrekcionno-pedagogicheskoe obrazovanie: e`lektronny`j zhurnal*, 65–68. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48198152>.
- 89 Bida, S.M., Aziz, F.N.A.A., Jaafar, M.S., Hejazi, F. and Nabilah, A.B. (2018) Thermal Performance of Super-Insulated Precast Concrete Structural Sandwich Panels. *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, **176**, 418–430. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.08.004>.
- 90 Gunawardena, T., Mendis, P., Ngo, T., Aye, L. and Alfano, J. (2014) Sustainable Prefabricated Modular Buildings. <https://doi.org/10.13140/2.1.4847.3920>.
- 91 Alekseeva A.S. and Irmanova E.V. (2019) Innovacionny`e Teknologii v Proektirovanii i Stroitel`stve Modul`ny`x Zhily`x Zdani. Aktual`ny`e Problemy` Nauki i Tekniki, Донской государственный технический университет , г. Ростов-на-Дону, 147–148. <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=yqespr>.