

Review Article

Received: June 07, 2022

Accepted: July 07, 2022

Published: August 09, 2022

ISSN 2658-5553

Structural and technological features of modular multi-storey buildings. A review

Kotlyarskaya, Irina Leonidovna^{1*} Sinelnikov, Alexey Sergeevich.¹ Iakovlev, Nikita Artemovich ¹ Vatin, Nikolai Ivanovich¹ Gravit, Marina Viktorovna¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; iravassilek@mail.ru (K.I.L.); alexey_sinelnikov@mail.ru (S.A.S.); nik_yakovlev@list.ru (I.N.A.); vatin@mail.ru (V.N.I.); gravit_mv@spbstu.ru (G.M.V.)

Correspondence: * email iravassilek@mail.ru; contact phone [+79095863919](tel:+79095863919)

Keywords:

Building construction; Building design; Module; Modular building; Prefabricated modular; Modular facade; Classification

Abstract:

Volumetric-block construction has many advantages compared to traditional construction. Still, its development is hampered by the lack of experience and information on the construction and design of modular buildings, and the lack of construction regulations with their clear classification. This work aimed to accumulate and systematize experience in the field of volume-block construction to create an unambiguous classification of modular buildings. The research was conducted using the general scientific method of analysis, synthesis and classification of information. The review systematized data on existing classifications and terms in the field of modular construction. The classifications by functional purpose, by materials used, by design features, as well as types of modular connections are considered. The experience of volume-block construction is also widely studied.

1 Introduction / Введение

Одним из факторов национального благосостояния в масштабе страны является степень обеспеченности ее граждан жильем, комфортной средой и инфраструктурой. Для сокращения разрыва между низким уровнем предложения и высоким уровнем спроса на недвижимость строительная отрасль постоянно находится в поиске инновационных материалов или технологий. Новые идеи прежде всего должны отвечать таким требованиям как: практическая значимость, простая реализуемость, экономическая рациональность, экологическая и социальная безопасность населения и т. д. Одной из многообещающих разработок является строительство из готовых модулей. Основной особенностью нового технологического уклада является применение готовых сборных конструкций и элементов зданий и сооружений заводского изготовления. В отечественной литературе, как правило, под это описание попадает тип *объемно-блочного домостроения* [1].

В других странах используется другая терминология: *Модульное интегрированное строительство* в Гонконге, *Сборное объемное строительство* в Сингапуре, *Модульное строительство* в США, *Промышленная строительная система* в Малайзии и *Технология строительства на месте* в Австралии и Пакистане [2], [3].

К основным преимуществам объемно-блочного строительства согласно работам [4], [5], [14]–[16], [6]–[13] можно отнести:



- высококачественное производство в оптимальных заводских условиях, минимизация неблагоприятных воздействий, возникающих на строительной площадке;
- рациональное объединение всех видов работ в одном месте, стандартизированные рабочие процессы;
- сокращение трудоемкости работ на строительной площадке за счет максимальной механизации всех работ в заводских условиях, в заводские условия переносятся до 80% трудозатрат на возведение здания;
- снижение общей трудоемкости и себестоимости работ;
- сокращение продолжительности возведения зданий, следовательно более быстрые сроки окупаемости проекта;
- снижение загрязнения окружающей среды в районе строительства;
- уменьшение потребления энергии во время строительства и эксплуатации.

В соответствии с [17]–[20] к недостаткам можно отнести:

- необходимость дополнительных решений в обеспечении пожарной безопасности;
- повышенная ответственность межмодульных соединений;
- усложнение координации строительства;
- повышенные требования к грузоподъемности используемых строительных кранов;
- специальные требования к перевозке.

Несмотря на перечисленные особенности, модульное строительство является перспективным. За 2010-2020 гг. модульные здания постепенно внедрились в государственный и частный секторы строительной отрасли, при этом обеспечивая оптимальные решения для зданий, состоящих из повторяющихся модулей, например, жилых зданий, гостиниц, студенческих общежитий, школ, больниц [21]–[30].

Поэтому сейчас в научном сообществе активно ведутся разработки в данной области. Так например, авторы статьи [31] исследовали применение материала с фазовым переходом в ограждающих конструкциях сборных зданий для улучшения внутреннего теплового режима. Также особое внимание уделяется исследованиям межмодульных соединений [20], [32]–[34].

Существенным фактором, сдерживающим повсеместное развитие модульного строительства на территории Российской Федерации, является недостаточность нормативной базы, а именно отсутствие определений и классификации модульных конструкций (или объемно-блочных конструкций).

Под модулем разные источники литературы подразумевают разное. В одних работах под модулем подразумевают полностью готовую объемную конструкцию, в других работах за модуль считают железобетонные объемные готовые конструкции, а в ГОСТ Р ИСО 6707-1-2020 «Здания и сооружения. Общие термины» [35] *модуль* определен, как условная размерная единица, применяемая в качестве шага для увязки габаритов. Определение «модуль» в ГОСТ 28984-2011 «Межгосударственный стандарт. Модульная координация размеров в строительстве. Основные положения» [36] — это исходная линейная условная единица измерения, применяемая для взаимосогласованности и координации размеров зданий и сооружений, их элементов, строительных конструкций, изделий и элементов оборудования.

Авторы статьи [37] подчеркивают, что в научной и нормативной литературе наблюдается некоторая неопределенность в терминологии применительно к модульным и быстровозводимым зданиям. Быстровозводимые здания, как правило, отождествляют с модульными зданиями (объемно-блочными зданиями), хотя последние являются лишь одной из разновидностей быстровозводимых зданий. Авторы также подтверждают, что не существует единой классификации строительных систем из объемных блок-модулей.

Созданием объемно-блочных конструкций и их монтажом на территории Российской Федерации занимаются общество с ограниченной ответственностью ООО «МОДУЛЬБАУ» (г. Москва, Российская Федерация), общество с ограниченной ответственностью ООО «Инжиниринговая компания Генезис» (г. Москва, Российская Федерация), дочерняя компания организации с ограниченной ответственностью ООО «КНАУФ-ГИПС» (г. Красногорск, Московская область, Российская Федерация) «Новый дом». Для изготовления своей продукции они разрабатывают Технические Условия (ТУ). Требования, устанавливаемые ТУ, должны соответствовать обязательным требованиям государственных или межгосударственных стандартов, но конкретных стандартов по модульному строительству не существует.

В 2021 году на территории страны вступил в действие СП 501.1325800.2021 «Здания из крупногабаритных модулей. Правила проектирования и строительства. Основные положения»

[38], где дается определение *крупногабаритного модуля (КГМ)*, как автономного большеразмерного компоновочного пространственного объемно-планировочного элемента здания, ограниченного максимальными размерами, формой шестигранного параллелепипеда, изготовление которого возможно в условиях роботизированного производства. Следует отметить, что конструктивно КГМ является сборной конструкцией, состоящей из отдельных сборных элементов, увязанных между собой на металлическом каркасе. Степень заводской готовности, полнота отделки и инженерное наполнение определяются техническим заданием заказчика и могут достигать 95-98%. Вид модуля представлен на Рис. 1.



Рис. 1 – Объемный крупногабаритный модуль в сборе [38]
Fig.1 – Volumetric large-sized module assembly [38]

В СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции» [39] приводится самая общая информация по модульным конструкциям, а именно, что на строительную площадку они должны поступать в соответствии с проектной документацией комплектно с соединительными элементами (самонарезающие винты, болты, заклепки) и сопровождающей документацией. В комплект сопровождающей документации должны входить:

- паспорт качества оформленный по ГОСТ 23118 «Конструкции стальные строительные. Общие технические условия» [40];
- техническая документация изготовителя в соответствии с которой изготовлены модульные конструкции (в документации должны содержаться требования к монтажу);
- монтажные схемы и спецификации.

В ГОСТ Р 58759-2019 «Здания и сооружения мобильные (инвентарные). Классификация. Термины и определения» [41] представлены определения зданий с комплектной заводской поставкой: мобильные (инвентарные) здания или сооружения, мобильные (инвентарные) здания или сооружения контейнерного и сборно-разборного типа, блок-контейнеры. Однако, данные определения также не относятся к модульным конструкциям, несмотря на полную готовность.

Применение многоэтажного модульного строительства сдерживается также существующими нормами по пожарной безопасности, так как добавляются сложности и значительные уточнения при расчете времени эвакуации, расчете индивидуального пожарного риска и степени огнестойкости и т. д.

Отсутствие норм и стандартов препятствует контролю качества модульных зданий и приводит к увеличению общего времени и стоимости модульного строительства, сводит эти преимущества к нулю, так как приходится затрачивать больше ресурсов на проведение дополнительных экспертиз и испытаний. По этой причине инвесторы неохотно увеличивают свои инвестиции в модульные здания из-за недостатка опыта и знаний в данном направлении строительства [42].

Для того, чтобы строительство из модулей шагнуло вперед необходимо доработать нормативную документацию по модульным конструкциям, важно собрать и систематизировать существующую научную информацию по данному вопросу, на которую в свою очередь будут опираться СП и ГОСТы. Таким образом, целью данной работы является получение достаточного количества аналитических данных для разработки классификации модульных (объемно-блочных) конструкций.

Основными задачами являются:

1. Анализ практического опыта организаций и торговых марок, занимающихся модульным строительством;

2. Обзор научной литературы, затрагивающей вопросы конструктивно-технологических решений для строительства модульных быстровозводимых многоэтажных зданий;
3. Подготовка систематизированных данных по существующим классификациям объемно-блочных конструкций (модулей).

2 Practical experience of companies engaged in modular construction / Практический опыт организаций, занимающихся модульным строительством

Модульное строительство имеет огромный потенциал развития и использования за счёт своих преимуществ в виде экономии времени и финансов на возведение, поэтому многие строительные компании постепенно переходят на данную технологию.

Торговая марка «MODULBAU» развивает рынок префаб-технологий в России и производит два типа модульных конструкций: санитарно-технический модуль и фасадно-стеновой модуль [43]. Сантехнический модуль представляет собой санузел с финишной отделкой и инженерными коммуникациями, изготавливаемый в заводских условиях и готовый к монтажу на строительной площадке (Рис.2). Вариативность конструктива позволяет внедрять технологию на любом этапе с сохранением технико-экономических показателей проекта [43]–[45].

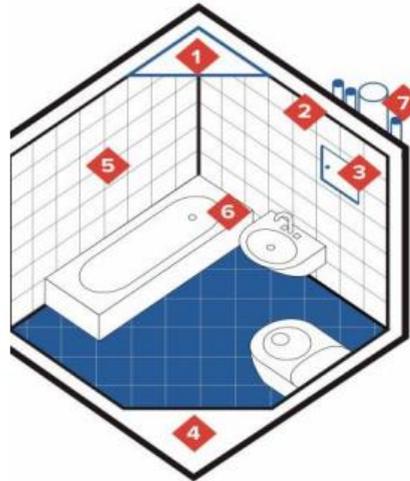


Рис. 2 – Конструкция сантехнического модуля (защитный слой и натяжной ПВХ-потолок – 1; металлический оцинкованный профиль – 2; ревизионный люк – 3; конструкция пола – 4; керамическая плитка – 5; сантехническое оборудование – 6; шахт пакет – 7) [45]

Fig. 2 – The design of the sanitary module (protective layer and stretch PVC ceiling - 1; galvanized metal profile - 2; inspection hatch - 3; floor structure - 4; ceramic tiles - 5; plumbing equipment - 6; shaft package - 7) [45]

В презентации торговой марки «MODULBAU» [46] говорится, что фасадно-стеновым модулем (TOPWALL) можно считать комплектную систему, полностью готовую к монтажу на объекте. Prefab-продукт включает в себя несущую конструкцию на основе профильной системы из легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК), внутреннюю ограждающую конструкцию из легкого бетона и внешнюю отделку с вариативными материалами и геометрией (Рис.3). Технические характеристики представлены в Таблице 1.



Рис. 3 – Конструкция фасадно-стенового модуля (легкий бетон 100 мм – 1; пароизоляция – 2; каркас из ЛСТК с утеплением – 3; гидро-ветрозащита диффузионная – 4; Аквапанель 12.5 мм – 5; двойная обрешетка из Омега-профилей 44 мм – 6; фиброцементные плиты 10 мм – 7) [46]
 Fig. 3 – The design of the facade-wall module (lightweight concrete 100 mm - 1; vapor barrier - 2; LSTK frame with insulation - 3; diffusion hydro-wind protection - 4; Aquapanel 12.5 mm - 5; double crate of Omega-profiles 44 mm - 6; fiber cement slabs 10 mm - 7) [46]

Таблица 1. Технические характеристики фасадно-стеновой панели TOPWALL
 Table 1. Technical characteristics of the facade wall panel TOPWALL

Характеристика	Значение
Размер модуля	3x3 м
Вес модуля	830 кг
Толщина	От 300 мм
Максимальная высотность	75 м
Скорость монтажа	30 мин/модуль
Сфера применения	Монолитное домостроение
Тип конструкции	Ограждающая конструкция + вентилируемый фасад
Класс пожарной опасности	КМ0

В 2016 году общество с ограниченной ответственностью ООО «Инжиниринговая компания Генезис» (г. Москва, Российская Федерация) создала модульную систему ограждающей конструкции G-tech, в основу которой были положены технические решения стеновых панелей и фасадов с вентилируемым зазором. Каркас модуля является несущим элементом фасадной конструкции и воспринимает: собственный вес модуля с фасадной облицовкой, эксплуатационные, ветровые и динамические нагрузки [47]. Согласно отчету [48] модульный навесной вентилируемый фасад успешно применен на объектах:

- Жилой дом по адресу: Москва, ул. Широкая, дом 30;
- Жилой комплекс ЖК ПРАЙМ ПАРК R4 и т.д.

Основные показатели монтажного процесса представлены в Таблице 2.



Таблица 2. Применение модульного навесного вентилируемого фасада
Table 2. Application of the Modular Hinged Ventilated Facade

Объект	Жилой дом по адресу: Москва, ул. Широкая, дом 30	ЖК ПРАЙМ ПАРК R4 по адресу: Москва, ул. Ленинградский проспект, владение 37
Время монтажа фасада	45 рабочих дней	180 рабочих дней
Средняя производительность монтажа	27 модулей в смену	32 модуля в смену
Средняя площадь одного модуля	4,25 м ²	4 м ²
Установленный объем за смену	115 м ²	130 м ²
Количество бригад	1 бригада	5 бригад
Количество работников в бригаде	5 человек	4 человека

Также модульным строительством занимается дочернее предприятие группы Кнауф «НОВЫЙ ДОМ», работающее под торговой маркой Knauf prefab construction (КРС). Завод представляет собой конвейер, на котором поэтапно изготавливается до 80% готового будущего здания. Завод изготавливает prefab модули, фасадные панели, а также сантехнические модули для интеграции в строящееся здание. Для создания модульных зданий используются два подхода:

1. Строительство блочно-модульных зданий (БМЗ). Объемные модули заводского изготовления могут быть выполнены с любым видом внутренней отделки и интегрированными инженерными сетями [49].
2. Строительство сборно-комплектных зданий (СКЗ). Изготовление базируется на возведении здания на основе металлического каркаса (легкие металлические конструкции ЛМК, легкие стальные тонкостенные конструкции ЛСТК и др.) [49].

Реализованные проекты КРС на начало 2022-го года – это малоэтажные здания (гостиница в г. Ступино «Квадрат», детские сады, общежития, таунхаусы и т.д.).

Производственные базы объемно-блочного домостроения существуют в ряде городов России. Показатели заводов представлены в Таблице 3 [50].

Таблица 3. Заводы объемно-блочного домостроения
Table 3. Factories of volume-block housing construction

Завод	Краснодарский завод «ОБД» (г. Краснодар, Российская Федерация)	ОАО АПСКГ «Гулькевичский» (г. Гулькевичи, Краснодарский край, Российская Федерация)	Завод «Выбор-ОБД» (г. Воронеж, Российская Федерация)
Конструктивный тип здания	Блочный	Блочно-панельный	Блочный
Этажность домов	9-12, с 2005 г. - 16	9-12, с 2005 г. - 16	До 17
Технология производства блоков	«Лежащий стакан»	«Лежащий стакан»	«Колпак»
Конструкция наружной стены	Трехслойная (присоединяется на посту комплектации)	Трехслойная (присоединяется на посту комплектации)	Утепление минеральной ватой и вентилируемые фасады
Крепление пола к стенам	Монолитное	Монолитное	



Схема опирания блока на блок	По контуру	По контуру	По четырем углам
Наибольшие размеры блока, мм	6000x3600, 7200 – с балконом	6000x3300, 7200 – с балконом	6000x3600, 7200 – с балконом

Также модульным строительством занимается крупная китайская организация *Broad Sustainable Building* (г. Чанша) [8], специализирующаяся на модульных высотных зданиях. Одним из ее проектов является 57-этажное жилое здание J57 Mini Sky City, возведенное за 19 дней со скоростью 3 этажа в день [51], [52]. В работе применяется панельная система, которая включает в себя стальные кассеты перекрытий и стальных колонн, скрепляющиеся болтовыми соединениями.

В Китае модульным строительством занимаются также такие организации, как *Keda Light Steel Housing Systems* (г. Фушань), *Changshu Yahgee Modular Building* (г. Чаншу) и *Shanghai LYLUX Business Limited* (г. Шанхай). Перечисленные организации специализируются преимущественно на малоэтажных модульных зданиях из легких стальных тонкостенных конструкций.

В статьях [37], [53] отмечается, что к числу лидирующих компаний, выпускающих плоскостные сборные модульные конструкции, относятся такие широко известные производители как американская организация *Clark Pacific* (штат Калифорния), ряд предприятий из Великобритании — *Arupand Partners* (г. Лондон), *Britspace* (Западный Йоркшир), *Yorkon* (г. Йорк) и Японии — *Sekisui Chemicals* (г. Осака, г. Токио), *Daiwa* (г. Осака), *Misawa* (г. Мисава), *Toyota Homes* (г. Касугаи). Следует отметить, что каждая из перечисленных организаций специализируется на изготовлении тех или иных модулей в рамках конкретного ассортимента.

Daiwa специализируется на строительстве сборно-модульного малоэтажного жилья. В качестве перекрытий используются легкие панели, укладываемые вплотную друг к другу. Также организацией проводилось исследование по увеличению виброустойчивости данных перекрытий при землетрясениях [54].

Toyota Homes использует в строительстве жилых модульных зданий систему «скелет и наполнение», которая на сочетании 10-15 стальных каркасных блоков в соответствии с формой плана дома. Данный каркас заполняется подкомпонентами. А *Sekisui Heim* «собирает» модульные дома из уникальных стальных блоков, которые разрабатываются при помощи автоматизированной системы подбора деталей (HAPPS) 22, обеспечивающей бесперебойный рабочий процесс от получения заказа до доставки на место [55].

В Европе стало бурно развиваться объемно-модульное домостроение в секторе бюджетных блок-хаусов шведской компании «Skanska» (г. Сольна, Швеция) и корпорации «ИКЕА» (г. Лейден, Нидерланды) – «ВоKлок». Проекты зданий представляют собой одно- и двухэтажные деревянные модульные быстровозводимые дома, отвечающие экологическим нормам. В настоящее время в Швеции, Великобритании, Финляндии, Германии постоянно ведется строительство новых жилых кварталов по данной технологии, при этом площади, планировка, оснащение таких квартир варьируется в зависимости от региональных и национальных особенностей [56].

3 Systematized data on existing classifications of volume-block structures (modules) / Систематизированные данные по существующим классификациям объемно-блочных конструкций (модулей)

Модульное строительство или строительство из объемно-блочных конструкций – это одна из форм внеплощадочного строительства (ВПС). Lawson M., Ogden R., Goodier C. [57] и A.G.F. Gibb [58] разработали классификацию форм строительного производства вне строительной площадки (внеплощадочное строительство ВПС), которая активно используется исследователями в научной литературе. Она подразумевает деление на уровни строительства: от низшего Уровня 0 до самого продвинутого Уровня 4. Подробная классификация представлена в Таблице 4.

Таблица 4. Уровни строительного производства вне строительной площадки
Table 4. Levels of construction production outside the construction site

Уровень	Комплекующие	Описание технологии	Доля удаленного производства
0	Материалы	Используются обычные материалы, например, кирпич, бетон и т.д.	0%
1	Компоненты	Составляющие, которые используются как часть строительных конструкций с интенсивным применением на строительной площадке.	10-15%
2	Элементы или плоские конструкции	Линейные или 2D-компоненты в виде собранных несущих каркасов и стеновых панелей	15-25%
3	Объемные системы	3D-компоненты в виде модулей, используемые для создания основных частей зданий, которые можно комбинировать с элементными системами	30-50%
4	Комплексные строительные системы	Комплексные строительные системы, состоящие из модульных компонентов и практически полностью готовые перед доставкой на стройплощадку	60-70%

Уровень 0 представляет строительство, полностью привязанное к строительной площадке, например, проведение бетонных, арматурных работ, изготовление кирпичной кладки и т. д. Уровень 1 подразумевает вид строительства, в котором используются некоторые сборные элементы, такие как фермы или сборные железобетонные плиты перекрытия. Большинство текущих строительных процессов представляют собой комбинацию компонентов Уровня 0 и 1. Уровень 2 состоит из предварительно изготовленных линейных или плоских структурных систем, таких как деревянные и легкие стальные каркасные системы. Каркасы из конструкционной стали обеспечивают структурный каркас, к которому прикрепляются другие элементы. Уровень 3 предполагает использование высокой доли сборных элементов, таких как модульные блоки, их можно комбинировать с плоскими элементами. Уровень 4 применяется к комплексным строительным системам, которые закупаются полностью из одних рук.

Похожая классификация приводится в работе [59].

В статье [8] рассматривается аналогичная классификация с дополнительным уровнем 5. Данный уровень представляет собой унифицированное цельное здание, состоящее из одного строительного блока с максимальным уровнем отделки.

Авторы статьи [60] предлагают модульные конструкции разделять на следующие категории:

1. Каркасно-панельные конструкции. Такие конструкции состоят из общего каркаса с применением стандартизированных элементов. С помощью этого способа можно возводить здания из легкой стали, а также из сборного железобетона. Модульные элементы предварительно изготавливаются в заводских условиях, упаковываются, а собираются уже на месте строительства. Модульными элементами являются готовые несущие стеновые ограждения, плиты покрытия, перекрытия, модули санитарных узлов с встроенными инженерными коммуникациями.

2. Блочные конструкции. Основой блочных модульных зданий выступают блоки стандартных заводских размеров. Они включают в себя все элементы, присущие первому виду модульных конструкций. Блок может являться отдельной комнатой, а при объединении нескольких таких блок-модулей становятся непосредственно частью помещения. Такие модули на место построения доставляются специальным транспортом. Автокран выступает главным техническим оборудованием для сборки конструкции.

2.1. Каркасно-модульные конструкции. Конструкции изготавливаются по индивидуальным техническим возможностям завода, но не превышают габаритов транспортных перевозных средств на основании стандартных грузовых контейнеров, в различной степени модернизированных.

2.2. Контейнерные конструкции. Они изготавливаются на основании стандартных размеров грузовых контейнеров. Основные требования к таким конструкциям представлены в

ГОСТ Р 58759-2019 «Здания и сооружения мобильные (инвентарные). Классификация. Термины и определения» [61].

Общая классификация строительных систем из объемных блоков-модулей по функциональному назначению выглядит следующим образом [37]:

1. Гражданские строительные системы:

1.1 Жилые (Квартирные дома для постоянного проживания людей, гостиницы, общежития для проживания в течение срока учеба или работы, дома интернаты);

1.2 Общественные (Образовательные учреждения, здания для научно-исследовательских и проектных организаций, для здравоохранения, туризма и отдыха, культурно-просветительские и зрелищные учреждения).

2. Промышленные строительные системы:

2.1 Производственные (Здания для размещения промышленных и сельскохозяйственных производств и обеспечения необходимых условий для труда и эксплуатации технологического оборудования);

2.2 Сельскохозяйственные (Здания для содержания скота, птицы, овощей, зернохранилища и другие);

2.3 Складские здания (Помещения и резервуары для хранения изделий, деталей и материалов различного назначения).

В статье [62] приводится классификация модульного строительства в зависимости от вида элементов, которая представлена на Рис. 3.

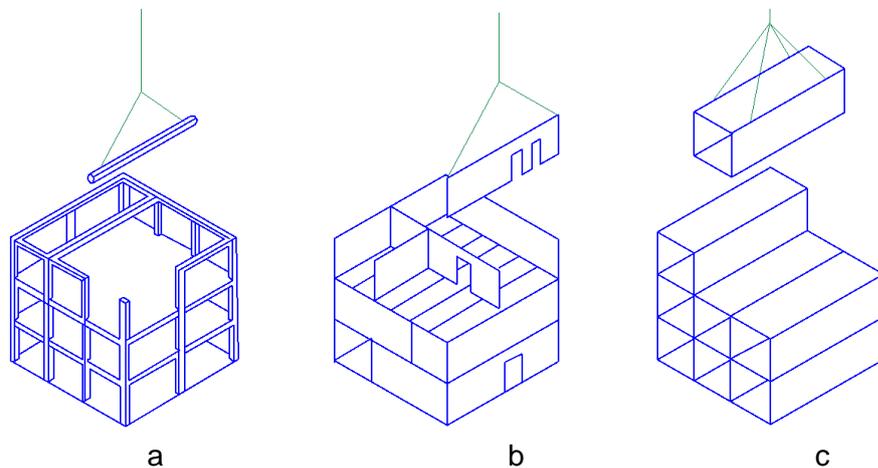


Рис. 3 – Модульные строительные системы (а) элементные (b) панельные (c) объемные [62]
Fig. 3 – Modular building systems (a) elemental (b) panel (c) three-dimensional [62]

В книге [61], а также в работах [63]–[65] представлены схематичные изображения объемных блоков в зависимости от конструктивно-технологического типа: «колпак», «стакан», «лежащий стакан», «труба», «стол», «кольцо» (Рис.4).

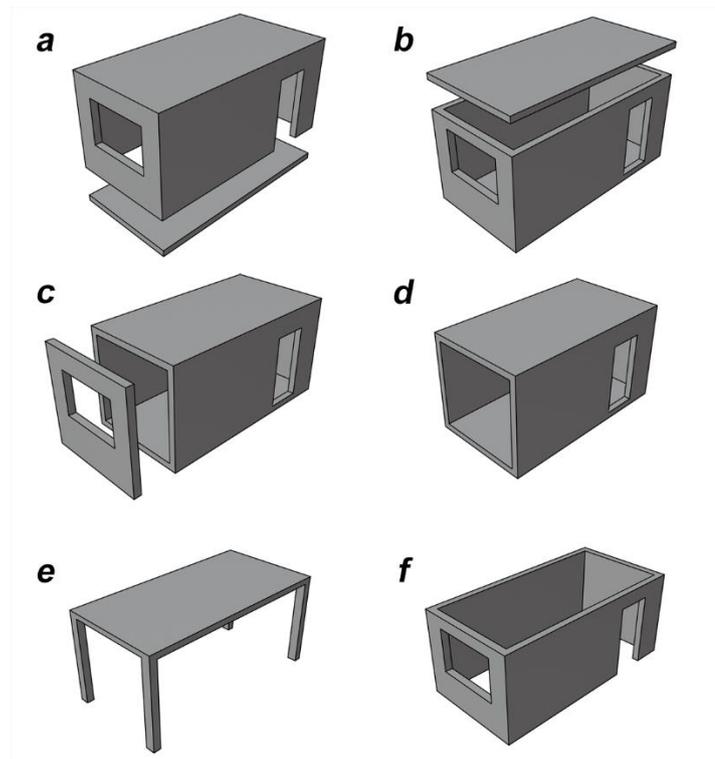


Рис. 4 – Конструктивно-технологические типы блоков (а) колпак; (b) стакан; (c) лежащий стакан; (d) труба; (e) стол; (f) кольцо [61]

Fig. 4 – Structural and technological types of blocks (a) cap; (b) glass; (c) a lying glass; (d) pipe; (e) a table; (f) ring [61]

Также согласно [61] объемные блоки можно классифицировать и по другим признакам.

1. По размерам: на одно помещение; на группу помещений;
2. По назначению: жилое помещение (комната), кухня, санитарно-технический узел, лестница, лифт и лифтовой холл, цокольный, чердачной крыши, прихожая, лоджия, балкон, эркер, коридор, шахта лифта, кровельный, машинное помещение лифта и др.;
3. По замкнутости объема: замкнутые, незамкнутые;
4. По форме плана: прямоугольные, косоугольные, криволинейные;
5. По несущей способности: несущие, ненесущие;
6. По конструктивному решению: каркасные (с открытым или скрытым каркасом), бескаркасные;
7. По условиям опирания (Рис. 5): с точечным опиранием, с линейным опиранием;

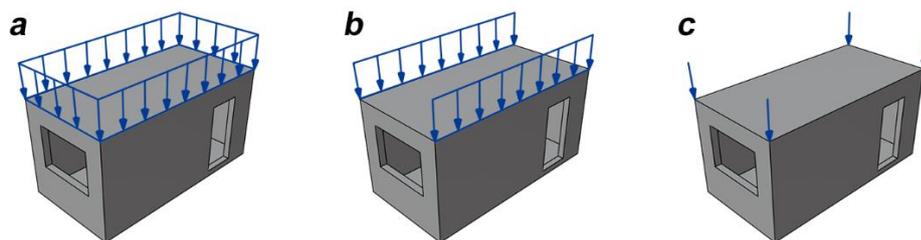


Рис. 5 – Виды опираний блоков (а) по контуру; (b) по граням; (c) по углам [61]

Fig. 5 – Types of block supports (a) along the contour; (b) along the edges; (c) corners [61]

8. По материалу: из бетона, из небетонных материалов, смешанные;
9. По способу изготовления: монолитные (цельноформованные), сборные (составные).

Общие конструктивные схемы зданий согласно работе [37] из объемных блок-модулей можно разделить на следующие типы:

1. Однородная блочная (здание строится только из несущих объемных блоков);



2. Блочно-панельная (здание строится из несущих объемных блоков и панелей наружных и внутренних стен, а также перекрытий);
3. Неоднородная блочная (здание строится из несущих и самонесущих объёмных блоков);
4. Блочно-панельная с шахматным расположением блоков;
5. Каркасно-блочная (ненесущие объемные блоки опираются на элементы несущего каркаса);
6. Схема из навесных объемных блоков (ненесущие объемные блоки навешиваются на несущие части зданий, являющиеся, например, ядрами жесткости);
7. Схема из ненесущих (висячих) блоков;
8. Блочно-спиральная, опирающаяся на ядро.

Существует и иная классификация подходов к установке и монтажу модульных блоков, с конструктивной точки зрения:

1. Группирование вокруг ядра. Ядро жесткости может быть как возведенным на месте монолитным, так и сборным или состоять из специальных плоских или объемных стальных модулей, заполняемых бетоном [51].

Этот метод обычно используется для обеспечения устойчивости высотных модульных зданий к разнонаправленным нагрузкам. В таком случае большая часть горизонтальной нагрузки приходится на ядро, а модульные блоки в основном несут свою собственную вертикальную нагрузку [66].

2. Пьедестал (подиум) в качестве фундамента. Как правило, пьедестал комбинируется с ядром для увеличения высоты здания. Подиум проектируется как традиционная стальная, бетонная или гибридная сталебетонная конструкция. Этот метод особенно подходит для зданий смешанного функционального назначения, где подиумная конструкция может обеспечить открытое пространство для розничной торговли, коммерческого использования или использоваться в качестве подземной автостоянки [51].

3. Метод заполненного каркаса. При данном методе модули являются самонесущими и располагаются между балками и колоннами первичной каркасной конструкции, возводимой традиционными методами [51], [67].

Еще одним предметом для классификации модульных конструкций является материал, из которого изготавливаются блоки. Эти материалы обычно такие же, как и в зданиях, построенных на месте, но имеют лучшее качество, поскольку компоненты изготавливаются в контролируемых условиях на заводе и не подвергаются в процессе изготовления разным климатическим факторам. Основными материалами, используемыми для модулей, являются древесина [68]–[75], сталь и бетон из-за их неизменно высокого качества и экономичного производства [37]. Это важный фактор, так как выбор материалов оказывает существенное влияние на грузоподъемность используемой техники, а также на энергетические показатели конструкции, а в дальнейшем всего здания [76]. Выбор материалов для изготовления конструктивных элементов зависит от конфигурации здания. Lawson, R. M. и др. [77], [78] объяснили, что смешанное использование модулей, панелей и стальных каркасов является более подходящим и экономичным для строительства модульного адаптируемого здания.

Подобную классификацию по использованию материалов в модулях рассматривают авторы из Австралии [79], они также отмечают основные достоинства и недостатки каркасов из этих материалов (Таблица 5).

Таблица 5. Классификация модулей по основному материалу
Table 5. Classification of modules by base material

Материал	Применение	Преимущества	Недостатки
Сталь, модульные стальные здания	Отели и гостиницы, жилые квартиры	Подходит для высотных зданий, высокая прочность	Коррозия металла, отсутствие руководства по проектированию
Сталь, модули из ЛСТК	Здания до 10 этажей; 10-25 этажей с дополнительным ядром жесткости	Легкая конструкция	Изучено только для малоэтажных зданий
Железобетон, сборный железобетонный модуль	Гостиница, тюрьма, охраняемое жилье	Огнестойкость, звукоизоляция, отличные теплотехнические характеристики, высокая прочность	Тяжелая конструкция, возможное растрескивание на углах
Древесина, деревянно-каркасный модуль	1-2-х этажные учебные здания, жилье	Прочный материал, простой в изготовлении	Плохая огнестойкость, долговечность

В железобетонных модулях обычно используются бетонные несущие стены для передачи постоянных и длительных нагрузок на фундамент, а также для сопротивления боковым нагрузкам. Как правило, вес бетонного модульного блока составляет от 20 до 35 тонн, что на 20-35 % тяжелее стального модуля весом от 15 до 20 тонн. Кроме того, стальные модульные системы обладают большей гибкостью в архитектурном проектировании благодаря открытой системе каркаса и большим размерам модулей с пролетом балки от 6 до 12 м [3], [57]. Скорость строительства стальной модульной системы также выше, поскольку она обычно включает болтовые соединения, в то время как бетонная модульная система часто требует заливки швов на месте.

Согласно работе [53] модули, в которых используются легкие стальные каркасы можно условно разделить на две группы:

- структурные модули — функционируют как несущая стальная рама, каркас таких модулей выполняет роль несущей конструкции для модулей вышележащих этажей;
- неструктурные модули — поддерживаются структурной рамой или прочным основанием. Эти модули могут быть расположены между основными конструктивными элементами или использоваться как ненесущие конструкции.

Несущие стальные модули (структурные модули) согласно [79]–[81] разделяются на модули с опорой на четыре колонны и модули с непрерывной опорой на колонны (Рис. 6).



Рис. 6 – Несущие стальные модули (а) с опорой на четыре колонны (б) с непрерывной опорой на колонны

Fig. 6 – Load-bearing steel modules (a) supported by four columns (b) supported continuously by columns

Ненесущие модули могут выдерживать только свой вес и подъемную силу крана. Они могут как опираться на соседние элементы или модули, так и стоять на готовых перекрытиях для передачи внешних нагрузок. Примерами ненесущих модулей являются модули лестничных клеток, кухонь, а также сантехнические модули [3], [43], [44].

Взаимосвязь элементов каркаса и модулей имеет решающее значение для способности модульных зданий выдерживать приложенные нагрузки [82]. Соединения сгруппированы по трем типам: межмодульные, внутримодульные и модульно-фундаментные, как показано на Рис. 7.

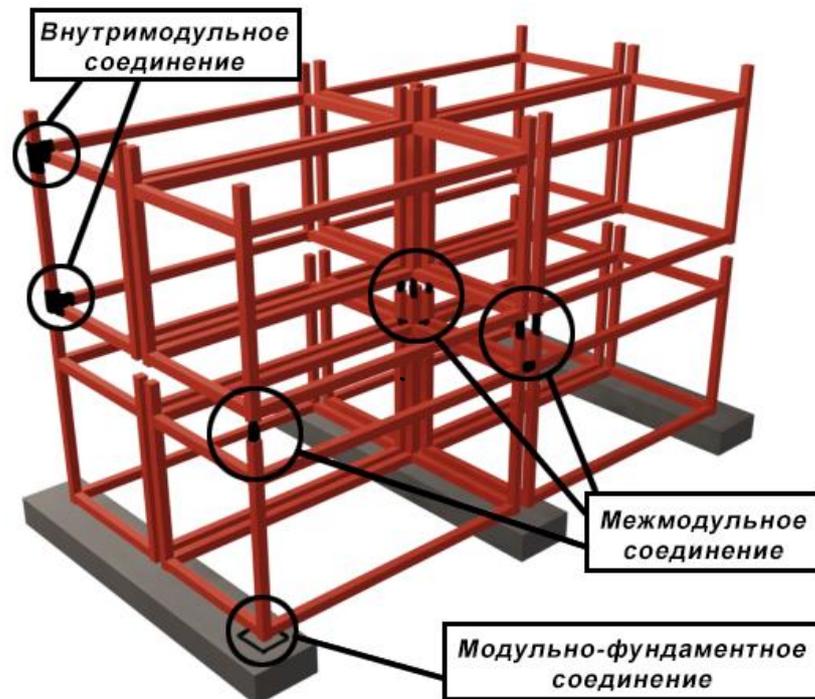


Рис. 7 – Виды модульных соединений
Fig. 7 – Types of modular connections

В Таблице 6 приведены сводные данные о соединениях для стальных модулей.

Таблица 6. Данные о соединениях в стальных модулях
Table 6. Connection data in steel modules

Тип	Подтип	Преимущества	Недостатки
Межмодульное	Болтовое	Сокращение работы на площадке; съёмность	Натяжение болтов; скольжение
	Сварное	Компенсация несоосности; отсутствие скольжения	Работа на площадке; неразборность
	Композитное (бетон-сталь)	Прочность; отсутствие скольжения	Работа на площадке; неразборность
Внутримодульное	Болтовое	Разборность; возможность сборки вне строительной площадки	Относительно низкая допустимая нагрузка по моменту, пластичность и способность к вращению
	Сварное	Подходит для заводской сборки	Не допускается вращение
Модульно-фундаментное соединение	Цепь/Трос/Удерживающая пластина	Бюджетность	Ограничено малоэтажным строительством; требования к натяжению
	Приварка на месте к опорной плите	Жесткое соединение	Дополнительное производство на строительной площадке; огневые работы
	Закрепление к опорной плите анкерными болтами	Пластичность	Коррозия металла
	Опорная плита встроена в бетон	Прочность колонн и хорошая пластичность	Позиционирование колонны во время твердения бетона; сварка на месте

Аналогичная классификация соединений приводится в научных работах [62], [83]–[90].

В статьях [51], [91] также сами межмодульные соединения подразделяются на угловые, боковые (внешние) и внутренние (Рис. 8).

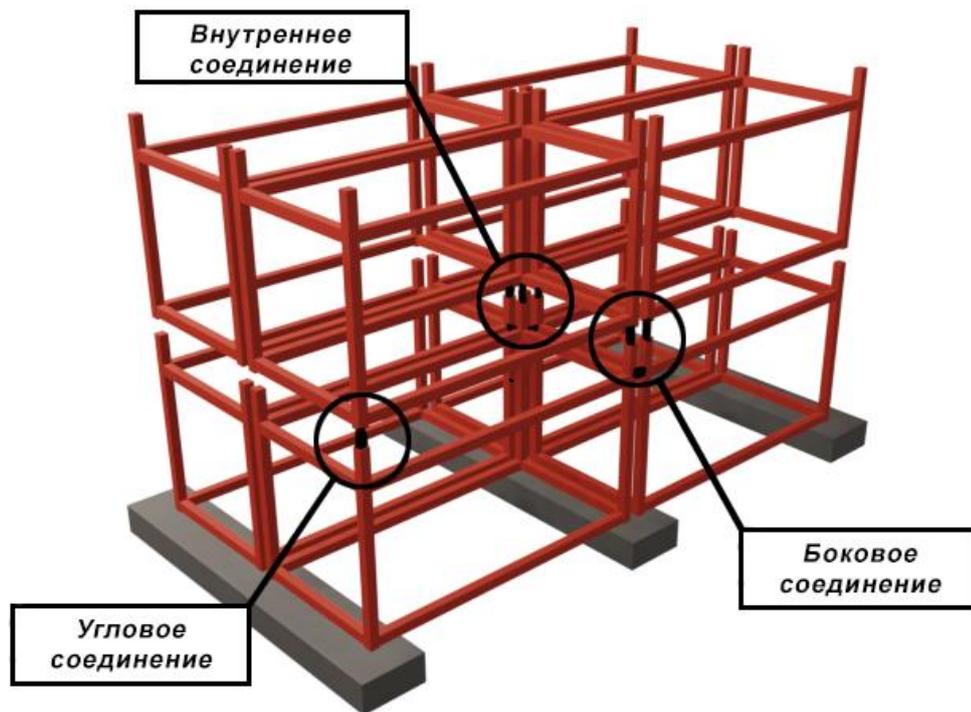


Рис. 8 – Виды межмодульных соединений
Fig. 8 – Types of intermodular connections

4 Conclusions / Выводы

Большинство традиционных строительных норм и стандартов не учитывают особенности модульных зданий. Нехватка соответствующих руководств и стандартов по проектированию и возведению этих зданий является жизненно важным препятствием на пути к их широкому использованию.

Анализ существующего мирового опыта по строительству зданий из объемных блоков показал, что это направление является перспективным. Торговая марка Modulbau, общество с ограниченной ответственностью ООО «Инжиниринговая компания Генезис», дочерняя компания общества с ограниченной ответственностью «КНАУФ-ГИПС» - «Новый дом» занимаются производством и возведением зданий из модулей. Зарубежными организациями, работающими в этом направлении, являются Broad Sustainable, Yorkon, Daiwa, Toyota Homes, Sekisui Heim, а также Skanska и другие.

В ходе обзора были систематизированы данные по существующим классификациям и терминам в области модульного строительства. Рассмотрены классификации зданий из объемных блоков по функциональному назначению, по используемым материалам, по конструктивным особенностям, а также разобраны типы модульных соединений.

5 Acknowledgements

Авторы выражают благодарность Лаборатории самовосстанавливающихся конструкционных материалов Центра национальной технологической инициативы «Новые производственные технологии» (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Россия) за полезные рекомендации и нужные советы.

6 Fundings

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта 21-19-00324, <https://rscf.ru/project/21-19-00324/> (дата обращения: 16 июня 2022 г.).



References

1. Asaul, A.N., Kazakov, Y.N., Bykov, V.L., Knyaz', I.P., Erofeev, P.Y. Teoriya i praktika ispolzovaniya bystrovovodimyyh zdaniy v obychnyyh usloviyakh i chrezvychajnyh situatsiyah v Rossii i za rubezhom2004. 472 p. ISBN:5860501994.
2. Xu, Z., Zayed, T., Niu, Y. Comparative analysis of modular construction practices in mainland China, Hong Kong and Singapore. *Journal of Cleaner Production*. 2020. 245. Pp. 118861. DOI:10.1016/J.JCLEPRO.2019.118861.
3. Chen, Z., Khan, K., Khan, A., Javed, K., Liu, J. Exploration of the multidirectional stability and response of prefabricated volumetric modular steel structures. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021. 184. Pp. 106826. DOI:10.1016/J.JCSR.2021.106826.
4. Tavares, V., Gregory, J., Kirchain, R., Freire, F. What is the potential for prefabricated buildings to decrease costs and contribute to meeting EU environmental targets? *Building and Environment*. 2021. 206. Pp. 108382. DOI:10.1016/J.BUILDENV.2021.108382.
5. Zakharova, M.V., Ponomaryov, A.B. Volume-modular construction's experience of buildings and structures. *Sovremennyye tekhnologii v stroitelstve. teoriya i praktika*. 2017. (2). Pp. 190–198.
6. Navaratnam, S., Satheeskumar, A., Zhang, G., Nguyen, K., Venkatesan, S., Poologanathan, K. The challenges confronting the growth of sustainable prefabricated building construction in Australia: Construction industry views. *Journal of Building Engineering*. 2022. 48. DOI:10.1016/J.JOBE.2021.103935.
7. Jiang, Y., Zhao, D., Wang, D., Xing, Y. Sustainable performance of buildings through modular prefabrication in the construction phase: A comparative study. *Sustainability (Switzerland)*. 2019. 11(20). DOI:10.3390/SU11205658.
8. Boafu, F.E., Kim, J.H., Kim, J.T. Performance of Modular Prefabricated Architecture: Case Study-Based Review and Future Pathways. *Sustainability 2016*, Vol. 8, Page 558. 2016. 8(6). Pp. 558. DOI:10.3390/SU8060558. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/8/6/558/htm> (date of application: 25.04.2022).
9. Dave, M., Watson, B., Prasad, D. Performance and Perception in Prefab Housing: An Exploratory Industry Survey on Sustainability and Affordability. *Procedia Engineering*. 2017. 180. Pp. 676–686. DOI:10.1016/J.PROENG.2017.04.227.
10. Kamali, M., Hewage, K. Life cycle performance of modular buildings: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. 62. Pp. 1171–1183. DOI:10.1016/J.RSER.2016.05.031.
11. Perera, D., Poologanathan, K., Gatheeshgar, P., Upasiri, I.R., Sherlock, P., Rajanayagam, H., Nagaratnam, B. Fire performance of modular wall panels: Numerical analysis. *Structures*. 2021. 34. Pp. 1048–1067. DOI:10.1016/j.istruc.2021.06.111.
12. Abey, S.T., Anand, K.B. Embodied Energy Comparison of Prefabricated and Conventional Building Construction. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*. 2019. 100(4). Pp. 777–790. DOI:10.1007/S40030-019-00394-8.
13. Hong, J., Shen, G.Q., Li, Z., Zhang, B., Zhang, W. Barriers to promoting prefabricated construction in China: A cost–benefit analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2018. 172. Pp. 649–660. DOI:10.1016/J.JCLEPRO.2017.10.171.
14. Abdelmageed, S., Zayed, T. A study of literature in modular integrated construction - Critical review and future directions. *Journal of Cleaner Production*. 2020. 277. Pp. 124044. DOI:10.1016/J.JCLEPRO.2020.124044.
15. Liu, W., Zhang, H., Wang, Q., Hua, T., Xue, H. A Review and Scientometric Analysis of Global Research on Prefabricated Buildings. *Advances in Civil Engineering*. 2021. 2021. DOI:10.1155/2021/8869315.
16. Kamali, M., Hewage, K., Sadiq, R. Conventional versus modular construction methods: A comparative cradle-to-gate LCA for residential buildings. *Energy and Buildings*. 2019. 204. Pp. 109479. DOI:10.1016/J.ENBUILD.2019.109479.
17. Liew, J.Y.R., Chua, Y.S., Dai, Z. Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings. *Structures*. 2019. 21. Pp. 135–149. DOI:10.1016/J.ISTRUC.2019.02.010.
18. Hwang, B.G., Shan, M., Looi, K.Y. Key constraints and mitigation strategies for prefabricated prefinished volumetric construction. *Journal of Cleaner Production*. 2018. 183. Pp. 183–193. DOI:10.1016/J.JCLEPRO.2018.02.136.



19. Tachkov, M.A., Shcherbatyuk, P.A., Kirik, E.S., Gravit, M.V., Kotlyarskaya (Vasileva), I.L. Design solutions for residential multi-storey steel modular building. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022. 102(3). Pp. 50. DOI:10.4123/CUBS.101.2.
20. Chua, Y.S., Pang, S.D., Liew, J.Y.R., Dai, Z. Robustness of inter-module connections and steel modular buildings under column loss scenarios. *Journal of Building Engineering*. 2022. 47. Pp. 103888. DOI:10.1016/J.JOBE.2021.103888.
21. Khubaev, A.O., Saakyan, S.S., Makaev, N.V. World practice in the field of modular construction. *Construction and Geotechnics*. 2020. 11(2). Pp. 99–108.
22. Chen, L.-K., Yuan, R.-P., Ji, X.-J., Lu, X.-Y., Xiao, J., Tao, J.-B., Kang, X., Li, X., He, Z.-H., Quan, S., Jiang, L.-Z. Modular composite building in urgent emergency engineering projects: A case study of accelerated design and construction of Wuhan Thunder God Mountain/Leishenshan hospital to COVID-19 pandemic. *Automation in Construction*. 2021. 124. Pp. 103555. DOI:10.1016/j.autcon.2021.103555.
23. Navaratnam, S., Ngo, T., Gunawardena, T., Henderson, D. Performance Review of Prefabricated Building Systems and Future Research in Australia. *Buildings*. 2019. 9(38). Pp. 1–14. DOI:10.3390/buildings9020038. URL: www.mdpi.com/journal/buildings (date of application: 31.05.2022).
24. Newton, C., Backhouse, S., Aibinu, A.A., Cleveland, B., Crawford, R.H., Holzer, D., Soccio, P., Kvan, T. Plug n play: Future prefab for smart green schools. *Buildings*. 2018. 8(7). DOI:10.3390/BUILDINGS8070088.
25. Fahmy, Y.A., Othman, A.A.E. Flexible Design: An Innovative Approach for Achieving Sustainability in Primary Public Schools in Egypt. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 974(1). DOI:10.1088/1757-899X/974/1/012018.
26. Sutrisna, M., Ramnauth, V., Zaman, A. Towards adopting off-site construction in housing sectors as a potential source of competitive advantage for builders. *Architectural Engineering and Design Management*. 2022. 18(3). Pp. 165–183. DOI:10.1080/17452007.2020.1807306.
27. Gunawardena, T., Mendis, P., Ngo, T., Rismanchi, B., Aye, L. Effective use of offsite manufacturing for public infrastructure projects in Australia. *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019, ICSIC 2019: Driving Data-Informed Decision-Making*. 2019. Pp. 267–273. DOI:10.1680/ICSIC.64669.267.
28. Jiao, L., Li, X.D. Application of Prefabricated Concrete in Residential Buildings and its Safety Management. *Archives of Civil Engineering*. 2018. 64(2). Pp. 21–35. DOI:10.2478/ACE-2018-0014.
29. Fifield, L.J., Lomas, K.J., Giridharan, R., Allinson, D. Hospital wards and modular construction: Summertime overheating and energy efficiency. *Building and Environment*. 2018. 141. Pp. 28–44. DOI:10.1016/J.BUILDENV.2018.05.041.
30. Wang, J., Wang, W., Zhu, Q., Sumatra, T., Kustiani,), Perdana, R., Luo, Y., Cheng, D., Yu, H. Reshaping Dormitory by Modular Steel Structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 690(1). Pp. 012016. DOI:10.1088/1757-899X/690/1/012016.
31. Jia, J., Liu, B., Ma, L., Wang, H., Li, D., Wang, Y. Energy saving performance optimization and regional adaptability of prefabricated buildings with PCM in different climates. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. 26. DOI:10.1016/J.CSITE.2021.101164.
32. Sendanayake, S.V., Thambiratnam, D.P., Perera, N.J., Chan, T.H.T., Aghdamy, S. Enhancing the lateral performance of modular buildings through innovative inter-modular connections. *Structures*. 2021. 29. Pp. 167–184. DOI:10.1016/j.istruc.2020.10.047.
33. Ma, R., Xia, J., Chang, H., Xu, B., Zhang, L. Experimental and numerical investigation of mechanical properties on novel modular connections with superimposed beams. *Engineering Structures*. 2021. 232. Pp. 111858. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.111858.
34. Lee, S.S., Park, K.S., Jung, J.S., Lee, K.S. Evaluation of the structural performance of a novel methodology for connecting modular units using straight and cross-shaped connector plates in modular buildings. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020. 10(22). Pp. 1–18. DOI:10.3390/APP10228186.
35. Russian State Standard GOST 6707-1-2020 “Buildings and constructions. General terms.” . 2020URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200177284>.
36. Russian State Standard GOST 28984-2011 “Modular size coordination in construction.” . 2011URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293789/4293789429.pdf>.
37. Abramyan, S.G., Burlachenko, O. V., Galda, Z.Y. Three-dimensional block modules as a variety



- of modular structures of prefabricated building systems. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo rkhitektura. 2021. 1(82). Pp. 5–13.
38. SP 501.1325800.2021 Building from large modules. Design and construction code. Basic statements. . 2021URL: <https://docs.cntd.ru/document/607168489>.
 39. SP 70.13330.2012 Load-bearing and separating constructions. . 2012URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200097510>.
 40. GOST 23118-2019 Building steel structures. General specifications. . 2021URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200174657>.
 41. GOST R 58759-2019 Mobile (inventory) buildings. Classification. Terms and definitions. . 2019URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200170184>.
 42. Alekseeva, N.A., Tolkachev, Y.A. ANALYSIS OF THE CONSTRAINTS HINDERING THE DEVELOPMENT OF HIGH-RISE MODULAR BUILDINGS. Social'no-ekonomicheskoe upravlenie: teorija i praktika. 2021. 17(4). Pp. 12–18. DOI:10.22213/2618-9763-2021-4-12-18. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47371156> (date of application: 16.06.2022).
 43. Cisse, M., Kosterev, D.A., Vasileva, I.L., Nemova, D.V. Design of Modular Structures and Use of Prefabricated Sanitary Modules. A Review. 2021. 16(1). Pp. 1602. DOI:10.34910/ALF.16.2.
 44. Vatin, N.I., Sinelnikov, A.S., Cisse, M., Vasileva, I.L. Base's structure of Prefabricated Sanitary Module: erection and life stages. Construction of Unique Buildings and Structures. 2021. 99(5). Pp. 9803–9803. DOI:10.4123/CUBS.98.3. URL: <https://unistroy.spbstu.ru/article/2021.99.3> (date of application: 17.03.2022).
 45. Brajcev, E.V., Sisse, M., Vatin, N.I. Opredelenie zvukoizolyacii vozdušnogo shuma peregorodok gotovyh santekhnicheskikh modulej kompanii «Modulbau» Rossiya. Nedelya nauki. 2021. Pp. 123–126.
 46. Fasadnyj stenovoj modul TOPWALL (prefab tekhnologiya). URL: https://topwall.ru/?utm_source=cpc&utm_medium=modulbau&utm_campaign=site.
 47. Andreeva, T.A., Kozikova, I.N. Sistema G-TECH v stroitel'stve vysotnyh zdaniy. Novye tekhnologii v uchebnom processe i proizvodstve. 2019. Pp. 248–250.
 48. Industrializaciya fasadnyh reshenij MODULNAYA NAVESNAYA FASADNAYA SISTEMA GENESIS. URL: www.genesistp.ru.
 49. Konceptciya PREFAB tekhnologii. URL: <https://kpc-prefab.ru/> (date of application: 16.06.2022).
 50. Teshev, I.D., Korosteleva, G.K., Popova, M.A. Space block house prefabrication. Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2016. 3. Pp. 26–33.
 51. Thai, H.T., Ngo, T., Uy, B. A review on modular construction for high-rise buildings. Structures. 2020. 28. Pp. 1265–1290. DOI:10.1016/J.ISTRUC.2020.09.070.
 52. J57 Mini Sky City. .
 53. S.G.Abramyan, R.H.Ishmametov, O.V.Oganesyan, I.A.Ulanovskij, A.A.Dikmedzhyan. Modulnye konstrukcii i energoeffektivnaya rekonstrukciya sovremennyh stroitel'nyh sistem. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. 6.
 54. Matsuda, T., Shimizu, T. Study on correspondence between evaluation of vibration sensation, average method, and measurement density of acceleration levels for impact vibration in prefabricated housing floor. Journal of Building Engineering. 2017. 10. Pp. 124–139. DOI:10.1016/J.JOBE.2017.02.009.
 55. Doe, R.M. An open, integrated modular format: For flexible and intelligible architecture, engineering and construction design and production. International Journal of Architectural Computing. 2021. 19(1). Pp. 23–36. DOI:10.1177/1478077120943795.
 56. Ponomarenko, A.M. Sovremennye bystrovozvodimye modul'nye zhilye zdaniya. Arhitektura i gradostroitel'stvo. 2021. Pp. 585–592.
 57. Lawson, M., Ogden, R., Goodier, C. Design in Modular Construction 2014. 76 p. ISBN:9780203870785.
 58. Gibb, A.G.F. Off-site Fabrication: Prefabrication, Pre-assembly and Modularisation 1999. 288 p.
 59. Teribele, A., Turkienicz, B. Generative model and fixing guidelines for modular volumetric architecture. Revista de la Construcción. 2019. 17(3). Pp. 517–530. DOI:10.7764/RDLC.17.3.517.
 60. Lobov, M., Shestopal, L. Types of modular elements in the construction of social residential buildings. Vestnik Donbasskoj Nacionalnoj Akademii stroitel'stva i arhitektury. 2019. 2(136). Pp. 150–153.
 61. Bronnikov, P.I. Obemno-blochnoe domostroenie. Strojizdat . Moscow, 1979. 160 p.

Kotlyarskaya, I.; Sinelnikov, A.; Iakovlev, N.; Vatin, N.; Gravit, M.

Structural and technological features of modular multi-storey buildings. A review; 2022; *AlfaBuild*; 23 Article No 2304. doi: 10.57728/ALF.23.4



62. Dan-Adrian, C., Tsavdaridis, K.D. A comprehensive review and classification of inter-module connections for hot-rolled steel modular building systems. *Journal of Building Engineering*. 2022. 50. DOI:10.1016/J.JOBE.2022.104006.
63. Adilbekova, A.K., Shaidulla, M.R. Development prospects modular housing. *Nauka i innovacionnye tekhnologii*. 2021. 20(3). Pp. 28–33.
64. Samsonova, M.G., Semenova, E.E., Sotnikova, O.A. Analiz razvitiya obemno–blochnogo domostroeniya v Rossii. *Innovacionnye metody proektirovaniya stroitelnyh konstrukcij zdanij i sooruzhenij. Sbornik nauchnyh trudov 2–j Vserossijskoj nauchno–prakticheskoy konferencii*. 2020. Pp. 233–239.
65. Halturina, L.V., Halturin, Y.V. Sovremennye tendencii razvitiya obemno–blochnogo domostroeniya. *Polzunovskij Imanah*. 2020. 2(2). Pp. 81–86.
66. Hou, J., Wang, X., Liu, J., Chen, Z., Zhong, X. Study on the stability bearing capacity of multi-column wall in modular steel building. *Engineering Structures*. 2020. 214. Pp. 110648. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2020.110648.
67. Park, H.K., Ock, J.H. Unit modular in-fill construction method for high-rise buildings. *KSCE Journal of Civil Engineering* 2016 20:4. 2015. 20(4). Pp. 1201–1210. DOI:10.1007/S12205-015-0198-2. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-015-0198-2> (date of application: 26.05.2022).
68. Malesza, J., Miedzialowski, C., Ustinovichius, L. Analytical model tracing deformations in multistorey large timber panel building. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2019. 25(1). Pp. 19–26. DOI:10.3846/JCEM.2019.7738.
69. Bukauskas, A., Mayencourt, P., Shepherd, P., Sharma, B., Mueller, C., Walker, P., Bregulla, J. Whole timber construction: A state of the art review. *Construction and Building Materials*. 2019. 213. Pp. 748–769. DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.03.043.
70. Loss, C., Davison, B. Innovative composite steel-timber floors with prefabricated modular components. *Engineering Structures*. 2017. 132. Pp. 695–713. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2016.11.062.
71. Dind, A., Lufkin, S., Rey, E. A modular timber construction system for the sustainable vertical extension of office buildings. *Designs*. 2018. 2(3). Pp. 1–14. DOI:10.3390/DESIGNS2030030.
72. Kokas, B., Balogh, J., Borsos, A., Medvegy, G., Bachmann, B. Harmonization of structural and functional lifespans of prefabricated residential buildings. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*. 2020. 15(2). Pp. 161–165. DOI:10.18280/IJDNE.150204.
73. Svatoš-Ražnjević, H., Orozco, L., Menges, A. Advanced Timber Construction Industry: A Review of 350 Multi-Storey Timber Projects from 2000–2021. *Buildings* 2022, Vol. 12, Page 404. 2022. 12(4). Pp. 404. DOI:10.3390/BUILDINGS12040404. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/4/404/htm> (date of application: 16.06.2022).
74. Amoruso, F.M., Schuetze, T. Hybrid timber-based systems for low-carbon, deep renovation of aged buildings: Three exemplary buildings in the Republic of Korea. *Building and Environment*. 2022. 214. Pp. 108889. DOI:10.1016/J.BUILDENV.2022.108889.
75. Kovarova, B. Use of Prefabrication in Staircase Solutions in Multi-storey Apartment Blocks Based on Wooden Structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 603(2). Pp. 022015. DOI:10.1088/1757-899X/603/2/022015.
76. Aye, L., Ngo, T., Crawford, R.H., Gammampila, R., Mendis, P. Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules. *Energy and Buildings*. 2012. 47. Pp. 159–168. DOI:10.1016/J.ENBUILD.2011.11.049.
77. Lawson, R.M., Ogden, R.G. 'Hybrid' light steel panel and modular systems. *Thin-Walled Structures*. 2008. 46(7–9). Pp. 720–730. DOI:10.1016/J.TWS.2008.01.042.
78. Lawson, R.M., Ogden, R.G., Pedreschi, R., Grubb, P.J., Popo-Ola, S.O. Developments in prefabricated systems in light steel and modular construction. *Structural Engineer*. 2005. 83(6). Pp. 28–35.
79. Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H., Bi, K. Structural response of modular buildings – An overview. *Journal of Building Engineering*. 2018. 16. Pp. 45–56. DOI:10.1016/J.JOBE.2017.12.008.
80. Lawson, M., Polo-Ola, S. Modular Construction using Light Steel Framing. *New steel construction*. 2001. 9(3). Pp. 21–23. URL: https://www.steelconstruction.info/images/2/2f/SCI_P302.pdf (date of application: 3.05.2022).
81. Thirunavukkarasu, K., Kanthasamy, E., Gatheeshgar, P., Poologanathan, K., Rajanayagam, H., Suntharalingam, T., Dissanayake, M. Sustainable Performance of a Modular Building System



- Made of Built-Up Cold-Formed Steel Beams. Buildings. 2021. 11(10). Pp. 460. DOI:10.3390/buildings11100460.
82. Park, K.S., Moon, J., Lee, S.S., Bae, K.W., Roeder, C.W. Embedded steel column-to-foundation connection for a modular structural system. Engineering Structures. 2016. 110. Pp. 244–257. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2015.11.034.
 83. Srisangeerthan, S., Hashemi, M.J., Rajeev, P., Gad, E., Fernando, S. Review of performance requirements for inter-module connections in multi-story modular buildings. Journal of Building Engineering. 2020. 28. Pp. 101087. DOI:10.1016/j.jobe.2019.101087.
 84. Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H., Bi, K. New interlocking inter-module connection for modular steel buildings: Simplified structural behaviours. Engineering Structures. 2021. 227. Pp. 111409. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2020.111409.
 85. Chua, Y.S., Liew, J.Y.R., Pang, S.D. Modelling of connections and lateral behavior of high-rise modular steel buildings. Journal of Constructional Steel Research. 2020. 166. Pp. 105901. DOI:10.1016/J.JCSR.2019.105901.
 86. Peng, J., Hou, C., Shen, L. Lateral resistance of multi-story modular buildings using tenon-connected inter-module connections. Journal of Constructional Steel Research. 2021. 177. Pp. 106453. DOI:10.1016/j.jcsr.2020.106453.
 87. Chen, Z., Liu, J., Yu, Y., Zhou, C., Yan, R. Experimental study of an innovative modular steel building connection. Journal of Constructional Steel Research. 2017. 139. Pp. 69–82. DOI:10.1016/J.JCSR.2017.09.008.
 88. Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H. Experimental methods for inter-module joints in modular building structures – A state-of-the-art review. Journal of Building Engineering. 2022. 46. Pp. 103792. DOI:10.1016/j.jobe.2021.103792.
 89. Rajanayagam, H., Poologanathan, K., Gatheeshgar, P., Varelis, G.E., Sherlock, P., Nagaratnam, B., Hackney, P. A-State-Of-The-Art review on modular building connections. Structures. 2021. 34. Pp. 1903–1922. DOI:10.1016/J.ISTRUC.2021.08.114.
 90. Srisangeerthan, S., Hashemi, M.J., Rajeev, P., Gad, E., Fernando, S. Fully-Modular Buildings Through a Proposed Inter-module Connection. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. 94. Pp. 303–312. DOI:10.1007/978-981-15-7222-7_26.
 91. Wang, Z., Tsavdaridis, K.D. Optimality criteria-based minimum-weight design method for modular building systems subjected to generalised stiffness constraints: A comparative study. Engineering Structures. 2022. 251. Pp. 113472. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.113472.