



Review Article

Received: May 16, 2025

Accepted: June 5, 2025

ISSN 2658-5553

Published: July 3, 2025

Inter-module connections in modular construction: A review of terminology in literature and standards

Iakovlev, Nikita Artemovich^{1*} Vatin, Nikolai Ivanovich¹ 

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation;
nik_yakovlev@list.ru (I.N.A.); vatin@mail.ru (V.N.I.)

Correspondence: * email nik_yakovlev@list.ru; contact phone [+79811915449](tel:+79811915449)

Keywords:

Inter-module connections; Modular construction; Construction product; Building structure; Terminology; Standards and regulations; Off-site construction

Abstract:

The object of research is inter-module connections in modular construction, which serve as critical elements ensuring load transfer, spatial rigidity, and structural integrity of modular buildings. The growing application of modular technologies has increased the importance of these connections, yet their classification and regulatory status remain inconsistent. There is an ambiguity between treating inter-module connections as construction products or as parts of building structures, which complicates design, certification, and quality control. **Method.** The research employed a systematic review of scientific publications, regulations and standards. The analysis was based on content examination of definitions, terminology, and requirements, followed by comparative analysis across the three groups of sources. **Results.** The study shows that scientific literature treats inter-module connections both as reproducible industrial products and as structural parts. Terminology in Russian standards is fragmented and inconsistent, allowing for multiple interpretations. In contrast, international standards more consistently define connections within the framework of construction products, with specific requirements for strength, stiffness, durability, fire safety, and documentation. It is proposed to consider inter-module connections as construction products, enabling quality control, traceability, and life-cycle management, while still acknowledging their structural role within modular buildings.

1 Introduction

Модульное строительство превратилось в одно из наиболее динамично развивающихся направлений строительной отрасли, ориентированное на индустриализацию, сокращение сроков возведения зданий [1], повышение качества за счет фабричного производства компонентов [2], а также уменьшение строительных отходов [3]. Модульное строительство является альтернативой традиционному строительству [4]. Согласно [5], модульное строительство представляет собой высшую ступень индустриализации строительных процессов и рассматривается как прорывная технология, способная трансформировать традиционную практику возведения зданий за счет высокой степени заводской готовности модулей и сокращения трудозатрат на строительной площадке.

Наиболее интенсивное развитие получают конструкции на основе объемных стальных модулей, которые позволяют переходить от малоэтажных объектов к средне- и высотным зданиям [6], [7]. Использование объемных модулей также обеспечивает адаптивность архитектурных решений [8].

Согласно [9], конструктивной особенностью модульных зданий является дискретность перекрытий, работающих как независимые диафрагмы, а также ограниченная жесткость межмодульных соединений.

Межмодульные соединения являются конструктивными элементами, обеспечивающими вертикальную и горизонтальную передачу усилий между объемными модулями [10], боковую жесткость и несущую способность здания [11], а также сочетающими конструктивные характеристики с характеристиками промышленной строительной продукции [12]. Кроме того межмодульные соединения обеспечивают целостность, глобальную пространственную жесткость, устойчивость [13] и сейсмостойкость модульных зданий [14], [15]. Межмодульные соединения определяют поведение модульной конструкции под сейсмическими и ветровыми нагрузками [16]. Также данные соединения обеспечивают альтернативные пути передачи усилий и устойчивость модульной конструкции при прогрессирующем обрушении [17], особенно в многоэтажных модульных зданиях [18].

Количество публикаций о межмодульных соединениях резко возросло после 2017 года [19], что только подтверждает их значимость. Главными направлениями исследований являются сейсмическая устойчивость, жесткость и пластичность, рассеивание энергии и возможности демонтажа и повторного использования [19].

Согласно [20], параметры межмодульных соединений, включая модуль сдвига и предельные усилия креплений, оказывают решающее влияние на величину скольжения и сдвиговых деформаций модульной системы, тогда как вариации механических характеристик обшивки оказываются второстепенными. Из данного наблюдения следует необходимость разработки надежных межмодульных соединений. При этом увеличение этажности модульных зданий требует значительного усиления несущей способности межмодульных соединений [21].

Особое внимание в научных публикациях уделяется моделированию и испытаниям соединений. Экспериментальные исследования выявляют закономерности жесткостного и пластического поведения, энергоемкости и характера разрушения [22], [23]. Численные методы, включая моделирование конечными элементами, позволяют оценивать напряженно-деформированное состояние конструкции соединений [24]. Предлагаются также компонентные модели, в которых соединение рассматривается как самостоятельная расчетная единица [25]. Методы машинного обучения позволяют улучшить точность прогнозирования поведения межмодульных соединений под нагрузкой [26]. Методы машинного обучения позволяют быстрее прогнозировать напряженно-деформированное состояние и предельные состояния элементов модульных конструкций и поэтому становятся альтернативой численному моделированию [16].

Однако остается существенный пробел в согласовании терминологии, классификационных схем и критериев эффективности, что препятствует формированию универсальных проектных рекомендаций [27]. Сохраняются также противоречия в подходах к выбору между простотой сборки, возможностью демонтажа и обеспечением прочности: часть исследователей отдает предпочтение механическим соединениям, повышающим потенциал повторного использования [28], тогда как другие исследователи рассматривают сварные или решения с использованием цементирования как приоритетные с точки зрения несущей способности [29], [21], долговечности и сейсмостойкости [30].

Сдерживающими факторами развития модульного строительства остаются отсутствие проектных норм [31], слабая изученность соединений и их сейсмического поведения [32], [33]. Недостаточная проработка нормативных требований для модульных зданий вынуждает инженеров применять существующие стандарты, которые зачастую некорректно описывают динамическое поведение таких систем [4]. В статье [24] также отмечается отсутствие стандартизованных методик проектирования и необходимость испытаний межмодульных соединений на сейсмостойкость.

Согласно [34] сочетание модульного строительства и фотоэлектрических модулей, интегрированных в ограждающие конструкции (Building-integrated photovoltaics), позволяет достигать синергетического эффекта снижения углеродных выбросов на всех стадиях жизненного цикла зданий. Но основные препятствия связаны с отсутствием унифицированных стандартов, высокой сложностью монтажа и эксплуатации интегрированных фотоэлектрических модулей.

Для ускорения и повышения качества проектирования модульных зданий необходимо увеличение объема нормативной и рекомендательной документации [35]. В частности, появляется необходимость точного терминологического разграничения между понятиями «строительное изделие» и «часть строительной конструкции» в отношении модульных

Iakovlev, N.; Vatin, N.

Inter-module connections in modular construction: A review of terminology in literature and standards; 2025; AlfaBuild; 35 Article No 3504. doi: 10.57728/ALF.35.4



конструкций, в особенности межмодульных соединений. Причина данной неоднозначности заключается в том, что межмодульные соединения изготавливаются в заводских условиях, но при этом монтируются и собираются на строительной площадке.

Целью статьи является систематизация и сравнительный анализ научных публикаций, российских и международных нормативных документов и стандартов в части терминологического определения и нормативного статуса межмодульных соединений.

2 Methods

В данной работе применены методы системного и сравнительного анализа. Работа включала несколько последовательных этапов.

На первом этапе был проведен поиск и отбор научных публикаций, посвященных межмодульным соединениям. Основным инструментом для поиска научной литературы стала база данных Scopus. Поисковый запрос был сформирован с использованием ключевых слов и фраз, наиболее релевантных теме исследования: TITLE-ABS-KEY ("inter-modular connection" OR "inter-module connection" OR "inter-modular joint") AND (LIMIT-TO (SUBJAREA,"ENGI")). Данный поиск позволил выявить основную массу актуальных публикаций, посвященных различным аспектам межмодульных соединений в инженерных и строительных проектах. Далее был дополнительно использован метод обратного поиска по пристатейным ссылкам. Это позволило обнаружить дополнительные источники, которые не были охвачены первичным запросом, но играли важную роль в развитии темы.

Для поиска русскоязычных публикаций использовалась электронная библиотека Elibrary, где осуществлялся ручной поиск по запросам «Межмодульные соединения» и «Модульные конструкции». Отбирались только те статьи, которые имели международный идентификатор DOI, что обеспечивало их академическую значимость и доступность.

На втором этапе осуществлялся поиск и анализ российских и международных нормативных документов и стандартов. Главным критерием отбора являлась релевантность используемой терминологии к межмодульным соединениям и их классификационному статусу.

На заключительном этапе применялся метод сравнительного анализа, позволивший выявить различия и совпадения в трактовках межмодульных соединений в научной литературе, российских и международных нормативных источниках.

3 Literature review

3.1 Analysis of research literature

Классификация межмодульных соединений является одним из направлений исследований модульного строительства. В настоящем обзоре выделены два основных подхода: интерпретация межмодульных соединений как строительных изделий с нормируемыми эксплуатационными характеристиками и методиками испытаний и рассмотрение их как составных частей строительных конструкций, влияющих на работу здания в целом. Далее каждый из подходов анализируется отдельно.

Ряд работ акцентирует внимание на признаках изделий у межмодульных соединений.

В рамках BIM-моделирования межмодульные соединения рассматриваются как уникальные объекты с атрибутивными параметрами [36], [37], то есть как изделия.

В публикации [12] сформулирован перечень критериев производительности межмодульных соединений, включающий показатели несущей способности, жесткости, энергоемкости, пластичности, долговечности и ремонтопригодности, а также производственные и эксплуатационные характеристики, такие как простота сборки, возможность демонтажа и массовость изготовления. В данной статье межмодульные соединения сопоставляются по признакам массового производства (простая геометрия, малое число уникальных деталей), технологичности и простоте монтажа, допускам и возможности быстрой разборки/замены. Данные признаки являются признаками «изделия» в смысле воспроизводимого промышленного компонента.

В работе [22] предложена систематизация экспериментальных методик, что подчеркивает выделение соединений в качестве самостоятельного объекта испытаний и проектных исследований.

Iakovlev, N.; Vatin, N.

Inter-module connections in modular construction: A review of terminology in literature and standards; 2025; AlfaBuild; 35 Article No 3504. doi: 10.57728/ALF.35.4

Научная литература фиксирует широкий спектр конструктивных решений межмодульных соединений. Существенный вклад в развитие дискуссии вносят работы, посвященные классификации соединений [38], [39]. Наличие классификаций является предпосылкой для каталогизации продуктовых линеек, унификации испытаний и последующей сертификации. В работе [6] предложена типология межмодульных соединений для стальных объемных модулей с разделением их по функциональным признакам и способам передачи усилий. По месту расположения в конструкции здания и количеству соединяемых модулей межмодульные соединения подразделяются на угловые, боковые и внутренние [40], [41]. Также по направлению связи межмодульные соединения делятся на вертикальные, горизонтальные и комбинированные [42].

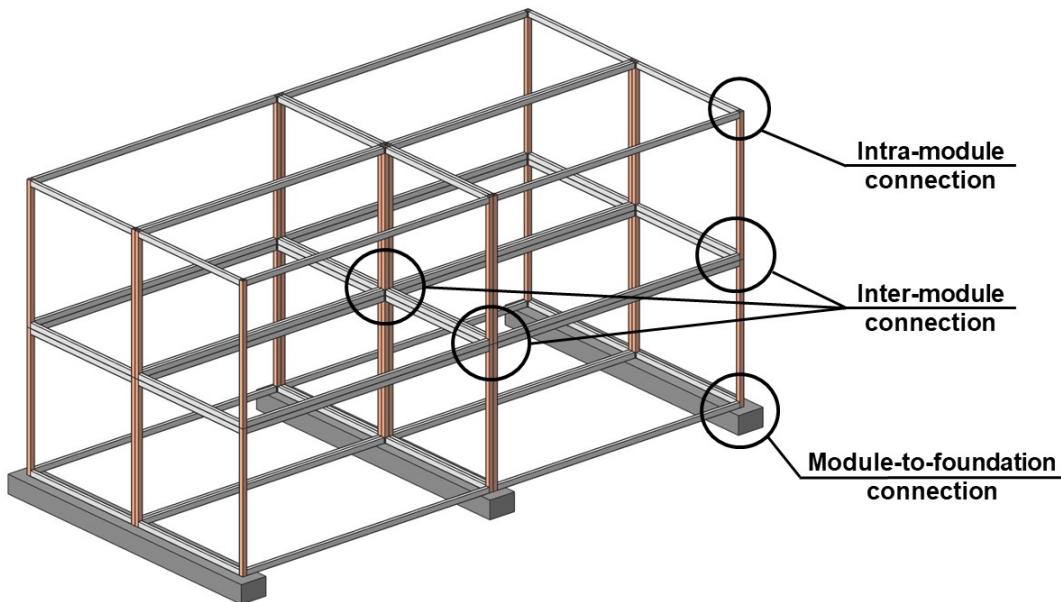


Рис. 1 – Виды модульных соединений
Fig. 1 – Types of modular connections

В работе [43] приведена следующая классификация межмодульных соединений по способу соединения:

1. Сварные межмодульные соединения
2. Болтовые межмодульные соединения
 - 2.1. Болтовые колонные межмодульные соединения
 - 2.2. Болтовые балочные межмодульные соединения
 - 2.3. Болтовые межмодульные соединения с соединительными блоками
3. Самозапирающиеся межмодульные соединения
4. Натяжные стержневые межмодульные соединения (пред- и постнапряженные)

Примером сварного межмодульного соединения является межмодульное сварное соединение с соединительной обоймой, представленное в работе [44]. Особенностью данного соединения является то, что оно демонстрирует поведение полужесткого узла с частичной прочностью, обладая при этом высоким энергопоглощением (h_e до 0.15) и коэффициентом пластичности до 2.03.

В исследовании [45] разработано полностью болтовое самоцентрирующееся соединение, направленное на упрощение монтажа, снижение остаточных деформаций после землетрясений и повышение точности установки. Конструкция соединения позволяет восстанавливать первоначальное положение после циклических нагрузок, обеспечивая ремонтопригодность и надежность.

В статье [32] выполнено экспериментально-численное исследование нового болтового межмодульного соединения и разработана модель, достаточно точно описывающая сейсмическое поведение узла. Результаты показали, что увеличение диаметра болтов повышает жесткость и энергоемкость соединения, а увеличение толщины торцевых пластин обеспечивает более равномерное распределение напряжений. В то же время наличие технологических отверстий в торцевых пластинах существенно снижает сопротивляемость межмодульного

соединения, что подчеркивает критическую роль конструктивных деталей в обеспечении надежности модульных систем.

В исследовании [46] рассмотрено влияние конечной вращательной жесткости фланцевых межмодульных соединений на напряженно-деформированное состояние каркаса модульного здания. Сравнение узлов с болтами с контролируемым натяжением и без него показало, что отсутствие предварительного натяжения снижает трудозатраты и сроки монтажа при минимальном влиянии на несущую способность. Численный анализ подтвердил уменьшение изгибающих моментов в полужестких соединениях на 13–31% по сравнению с жесткими узлами при незначительных изменениях продольных и сдвиговых усилий.

В исследовании [47] представлена упрощенная модель для проектирования и расчета болтового балочного («beam-to-beam») межмодульного соединения. Болтовые балочные межмодульные соединения широко применяются в модульных зданиях, однако их проектирование осложняется нелинейным характером работы и необходимостью учета раскрытия зазора между балками и скольжения.

Болтовые межмодульные соединения с соединительными блоками отличаются своей конструкцией от остальных болтовых соединений. Они имеют соединительные блоки, которые являются одновременно внутримодульными узлами, соединяя колонны и балки модуля, но в основе своей все равно соединяются посредством болтов. Например, роторное межмодульное соединение [48] состоит из верхнего и нижнего соединительных блоков, соединительных пластин, болта с прямоугольной опорной пластиной и роторной шайбы. Использование нержавеющих сталей позволяет повысить долговечность, снизить затраты жизненного цикла и увеличить надежность роторного соединения [49]. При прогрессирующем обрушении колонн происходит локальное выпучивание вблизи соединений, но сами узлы сохраняют целостность, обеспечивая перераспределение усилий [50].

Другой разработкой, относящейся к болтовым межмодульным соединениям с соединительными блоками, являются гибридные межмодульные соединения [51], объединяющие высокодемпфирующие резиновые опоры и стержни из сплавов с памятью формы (SMA). Результаты моделирования, согласующиеся с экспериментальными данными, подтвердили способность соединения локализовать повреждения в узле, снижать остаточные деформации и повышать сейсмическую устойчивость модульных зданий [52]. Конструкция межмодульного соединения предусматривает замену болтовых элементов после землетрясения, что повышает ремонтопригодность и пригодность к повторному использованию [53]. Постнатяжные болтовые межмодульные соединения с соединительными блоками обладают высокой сдвиговой жесткостью и несущей способностью, превосходящей традиционные болтовые соединения, что делает их перспективным решением для модульных стальных зданий [54].

Несогласованность терминологии в исследованиях модульных конструкций и межмодульных соединений затрагивает не только статус самих соединений, но и их детали. Так, например, ранее упомянутые соединительные блоки в некоторых работах называются коннекторами, например в статье [55]. Хотя коннектором логичнее называть деталь, которая непосредственно соединяет соседние модули [43].

Соединение, представленное в статье [56], является примером самозапирающегося межмодульного соединения. Оно позволяет выполнять монтаж без сварки, резервирования монтажных отверстий или применения специализированного оборудования. Соединение обеспечивает автоматическую фиксацию модулей и возможность быстрого демонтажа, что значительно сокращает сроки строительства и повышает технологичность.

В исследовании [57] разработано самозапирающееся соединение на основе пружинно-слайдерного механизма. Данное соединение сочетает эффективность монтажа и механическую надежность, обеспечивая симметричную работу при нагрузках в отличие от других самозапирающихся соединений, как правило страдающих от различий жесткостей по разным направлениям и недостаточной прочности.

В работе [58] представлено межмодульное соединение FlexLock, отличающееся сокращенным временем монтажа, предусмотренным демонтажем и последующим повторным использованием, а также высокой несущей способностью. Соединение автоматически фиксируется при опускании модуля, а разблокирование выполняется поворотом цилиндра штатным инструментом, вводимым сверху.

Примером натяжного стержневого межмодульного соединения является пост-напряженный межмодульный узел [59], основанный на использовании высокопрочных стержней внутри колонн Iakovlev, N.; Vatin, N.

и специальных муфт. Конструкция позволяет выполнять монтаж и демонтаж модульных зданий с применением простого инструмента (гайковерт), без необходимости доступа внутрь модуля, что ускоряет строительство, повышает повторное использование и улучшает качество сборки [60]. При действии расчетных ветровых нагрузок данные межмодульные соединения демонстрируют поведение, практически эквивалентное сварным соединениям [61].

Авторы работы [62] представили гибридное межмодульное соединение с высокодемпфирующим резиновым подшипником, направленное на снижение повреждений модулей при сейсмических воздействиях. Соединения показали низкие остаточные перемещения (<0,5% при дрейфе до 2%) и высокий коэффициент вязкого демпфирования, что указывает на перспективность применения рассматриваемой технологии в сейсмоопасных районах.

В исследовании [63] предложена система «mega modularized substructure», в которой межмодульные соединения рассмотрены и оптимизированы как элементы управления вибрациями. Результаты моделирования показали снижение межэтажных смещений до 80 %, что подтверждает важность межмодульных соединений в обеспечении надежности высоких модульных зданий.

Авторы статьи [64] реализовали полное испытание автоматизированного межмодульного соединения в двухэтажном здании. Несмотря на то, что успешное соединение удалось лишь в 2 из 12 узлов, исследование показало потенциал данного соединения как стандартизированного строительного изделия, требующего высокой точности заводского изготовления.

Несмотря на значительные достижения, сохраняется отсутствие унифицированных проектных норм и единых подходов к классификации соединений, что затрудняет разработку универсальных методик проектирования [65]. Дополнительную сложность представляет многообразие функциональных требований [12], включая обеспечение прочности, простоты сборки, возможности демонтажа и повторного использования [66]. В работе [67] отмечается, что из-за многообразия требований существует так много разновидностей межмодульных соединений, и «универсального» соединения не существует.

Одновременно в научной литературе подчеркивается роль межмодульных соединений как элементов, интегрированных в структуру здания и определяющих его глобальные характеристики. Соединения рассматриваются как части конструкции, от которых напрямую зависит формирование несущего каркаса модульного здания. Так, например, исследовании [68] проведены полномасштабные квазистатические испытания двухэтажной модульной композитной стальной рамы с болтовыми межмодульными соединениями. В работе [69] показано, что свойства межмодульных соединений оказывают непосредственное влияние на динамическое поведение модульных систем. Также межмодульные соединения обеспечивают устойчивость к прогрессирующему разрушению [70]. В исследовании [19] рассмотрено влияние соединений на общую пространственную работу высотных модульных зданий и способность воспринимать боковые нагрузки.

В серии публикаций [14] и [71] отмечается, что правильная калибровка моделей соединений имеет решающее значение для корректного описания жесткости и диссипативных свойств всей системы. Похожие выводы отражены в работе [72], посвященной оценке сейсмического поведения модульных зданий с учетом конструктивных параметров и типа межмодульных соединений. Исследованы схемы с опорными стойками, жесткими внутримодульными и шарнирными межмодульными соединениями, а также различные соотношения жесткости ригелей и стоек для зданий различной этажности. Полученные результаты подчеркивают большое значение баланса жесткостей элементов каркаса, в том числе межмодульных соединений, для обеспечения сейсмоустойчивости модульных систем.

В исследовании [73] выявлено, что определяющее влияние на сейсмическое поведение модульных зданий оказывает жесткость межмодульных соединений на линейное смещение («*translational stiffness*»), в то время как вращательная жесткость играет второстепенную роль. Также выявлено, что жесткость межмодульных и внутримодульных соединений влияет на существенно влияет на коэффициент расчетной длины колонн модулей [74], поскольку они соединяются через межмодульные и внутримодульные соединения друг с другом [75].

Исследование [28] показало, что срезные межмодульные соединения изменяют работу колонн при осевом сжатии, инициируя локальную потерю устойчивости. Выявлена недостаточная точность действующих стандартов. Предложены правки к коэффициентам и факторам безопасности и сопротивления для учета увеличенной эффективной длины и локальной потери устойчивости для данного типа межмодульного соединения и колонн.

Iakovlev, N.; Vatin, N.

Inter-module connections in modular construction: A review of terminology in literature and standards; 2025; AlfaBuild; 35 Article No 3504. doi: 10.57728/ALF.35.4

В статье [76] разработана система с модульными железобетонными стенами для многоэтажных модульных зданий, исключающая необходимость монолитных ядер жесткости. Для соединения модульных стен разработан U-образный соединитель, обеспечивающий легкий монтаж, отсутствие повреждений внутренней отделки и надежное обжатие бетона в граничных элементах.

Исследование [77] посвящено устойчивости полностью модульных высотных зданий, чья надежность определяется прочностью и жесткостью межмодульных соединений. Предложена концепция натяжного межмодульного соединения «rocking isolation» с использованием суперэластичных тяг, обеспечивающих контролируемое качательное движение здания при редких и экстремальных землетрясениях. На примере 24-этажного объекта показано, что применение данной концепции позволяет ограничить межэтажные смещения до нормативного уровня.

В совокупности научные источники фиксируют двойственную природу межмодульных соединений. С одной стороны, они описываются как воспроизводимые продуктые решения, обладающие собственными эксплуатационными характеристиками и циклами испытаний. С другой стороны, подчеркивается их существенная роль в структурной целостности зданий и формировании несущей схемы, что сближает соединения с частями строительных конструкций. Данное противоречие формирует основу для продолжающихся дискуссий в научном сообществе и подтверждает актуальность дальнейшего анализа терминологии.

3.2 Terminology in Russian standards and regulations

Русскоязычные нормативные источники представляют фрагментарную и не всегда согласованную картину в части определения межмодульных соединений и их статуса. ГОСТ Р 71617-2024 «Модульные здания и конструкции. Термины и определения. Классификация» [78] фиксирует понятие «модуль» как объемную конструкцию, предназначенную для возведения зданий или использования в качестве отдельно стоящего объекта. Также приводится термин «коннектор». Коннектор является металлическим соединительным элементом, предназначенный длястыковки металлических конструкций соседних модулей между собой. В данном контексте коннектор выступает в качестве составной части межмодульного соединения. Однако ГОСТ Р 71617-2024 не содержит отдельного определения для межмодульного соединения. Вместо данного термина используются термины «стыковка», «монтажный стык», «соединительный элемент» без их четкого разграничения. Документ прямо определяет термины, относящиеся к соединениям, но не устанавливает их чёткий статус как изделия или конструкции.

ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» [79] вводит терминологическое разграничение между понятиями «строительная конструкция» и «строительное изделие» и в то же время допускает их пересечение в отдельных случаях. В соответствии с данным стандартом, под строительной конструкцией понимается часть сооружения, выполняющая несущие, ограждающие или декоративные функции, тогда как изделие трактуется как элемент, предназначенный для применения в составе конструкции. Такие трактовки позволяют рассматривать межмодульные соединения как конструктивные элементы, обеспечивающие пространственную жёсткость и передачу нагрузок, а также как строительные изделия серийного производства. Таким образом, статус межмодульных соединений носит неопределенный характер. Очень похожие определения терминов «строительная конструкция» и «строительное изделие» приводятся в ГОСТ 21.501-2018 «Система проектной документации для строительства. Правила выполнения рабочей документации архитектурных и конструктивных решений» [80].

ГОСТ Р 2.005–2023 «Единая система конструкторской документации. Термины и определения» [81] представляет собой один из основополагающих документов, регламентирующих понятийный аппарат в технической документации, в том числе в отношении проектирования и классификации строительных элементов. ГОСТ Р 2.005–2023 даёт следующее определение термину «изделие»: предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению в организации по конструкторской документации. Также к изготовлению могут быть отнесены операции по сборке, монтажу, подключению, установке, а также иные виды работ, например, выполняемые на месте эксплуатации и направленные на приведение изделия в состояние готовности к эксплуатации. К изделиям допускается относить завершенные и незавершенные предметы производства, в том числе заготовки.

Также в соответствии с данным стандартом изделие может состоять из деталей и составных частей. Изделие, составные части которого подлежат соединению между собой в организации-Iakovlev, N.; Vatin, N.

изготовителем посредством сборочных операций называется сборочной единицей. «Организация-изготовитель» применяется как обобщающее обозначение юридического лица (или его подразделения), ответственного за изготовление изделия в соответствии с конструкторской документацией. В тексте стандарта отсутствует строгая привязка к производственной площадке как исключительно заводскому предприятию: изготовление может происходить как на стационарных, так и на временных или мобильных объектах, включая строительные площадки. Такая трактовка имеет прямое значение в контексте дискуссии о нормативной принадлежности межмодульных соединений. Если соединение спроектировано, изготовлено и поставляется как конструктивно завершенная единица с технической документацией (в том числе паспортом, руководством по монтажу, схемами и чертежами), то оно вполне может рассматриваться как изделие несмотря на то, что окончательное соединение модулей осуществляется уже на строительной площадке. Следует подчеркнуть, что документ оперирует также понятием «документация на изделие», в которую входят чертежи общего вида, спецификации, технические условия и эксплуатационные документы. Для межмодульного соединения, если оно серийно производится и документально сопровождается, наличие такой документации становится аргументом в пользу его статуса как строительного изделия.

Таким образом, с точки зрения [81], межмодульное соединение, собираемое на объекте из заранее подготовленных элементов заводской готовности, вполне может быть признано сборочной единицей, а строительная компания – организацией-изготовителем, при условии соответствия конструкторской документации требованиям системы ЕСКД.

ГОСТ Р ИСО 6707-1-2020 «Здания и сооружения. Общие термины» [82] представляет собой документ, гармонизированный с международным стандартом ISO 6707-1:2020 [83] (то есть являющийся его прямым аналогом). Данный стандарт охватывает около 140 терминов строительной сферы. В контексте исследования межмодульных соединений особый интерес представляют термины: строительное изделие (3.4.1.2), соединение (3.3.5.34), конструкция (3.3.1.2) и конструктивный элемент (3.3.1.3).

Согласно ГОСТ Р ИСО 6707-1-2020 [82], строительным изделием (*product, construction product*) считается предмет, изготовленный или обработанный для употребления в объектах капитального строительства. Соединение (*joint, connection*) определяется как строительная конструкция, образованная двумя или более смежными изделиями, компонентами или сборными конструкциями в ходе сборки. Данное определение придает соединению статус производной конструкции, возникающей в процессе сборки и обеспечивающей связность элементов. Конструкция, в свою очередь, трактуется как упорядоченная система взаимосвязанных элементов, предназначенная для обеспечения определенной меры прочности и жесткости. Конструктивный элемент представляет собой часть конструкции, предназначенная для передачи усилий. Таким образом, в терминологии данного стандарта межмодульное соединение соответствует понятию части конструкции, возникающей при взаимодействии смежных изделий, а не отдельного готового изделия или группы изделий.

СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» [84] рассматривает узел соединения как совокупность деталей, обеспечивающих взаимное жесткое соединение стальных элементов посредством болтов, сварки или клепки. Подчеркивается, что механические соединения подвергаются проектному расчету на сопротивление сдвигу, отрыву и усталости, что относит их к элементам, отвечающим за несущую способность. С данной точки зрения межмодульные соединения рассматриваются как часть конструкции здания.

3.3 Terminology in International standards and regulations

Анализ международных и национальных документов позволяет выявить общую тенденцию к рассмотрению модульных элементов и межмодульных соединений как объектов промышленного производства, подлежащих отдельной сертификации и регулированию. Данные документы отражают состояние международной практики и демонстрируют особенности терминологического разграничения понятий, связанных с объектами строительства, изделиями и их составными элементами.

В документе ISO 15392:2019 [85] «строительные работы» (*«construction works»*) определяются как здания и объекты гражданского строительства, как по отдельности, так и в совокупности. Базовым понятием является данного стандарта является «строительное изделие» (*«construction product»/«building product»*), обозначенное как изделие, изготовленное или обработанное для включения на постоянной основе в объекты строительства. Таким образом, Iakovlev, N.; Vatin, N.

стандарт закрепляет разграничение между строительными изделиями, которые имеют промышленное происхождение и предназначены для постоянного включения в состав объектов, и строительными конструкциями, определяемыми как целостные сооружения. В этой терминологической системе межмодульные соединения могут быть отнесены к категории строительных изделий, поскольку они изготавливаются и обрабатываются для постоянного включения в здания и инженерные сооружения и выполняют функции обеспечения прочности и целостности объекта.

ICC/MBI 1200-2021 [86] устанавливает минимальные требования к планированию, проектированию, изготовлению, транспортировке и сборке элементов внеплощадочного строительства, включая компонентные, панельные и модульные системы. Данный стандарт формулирует терминологию и требования к модульному строительству. ICC/MBI 1200-2021 разграничивает три термина. «Модульным зданием» («*industrialized housing and buildings*») является индустриализированное жилье и здания. Термин «модуль» («*module*») определяется как трехмерный объемный элемент модульного здания, спроектированный и утвержденный для транспортировки в виде одной секции. Термин «модульный компонент» («*modular component*») означает узел, подсистему или комбинацию элементов, включая панельные системы, строительные оболочки и санитарные блоки, предназначенные для использования в качестве части модульного здания, но не являющиеся конструктивно независимыми. В разделе 402 закреплено требование, чтобы соединения модулей обеспечивали передачу усилий и совместную работу здания, а в разделе 804 предусмотрена обязанность производителя предоставлять инструкции по устройству соединений для гарантии прочности, жесткости, огнестойкости и функциональной целостности. Таким образом, стандарт ICC/MBI 1200-2021 систематизирует модульное строительство через категории изделий и компонентов, придавая межмодульным соединениям статус нормативно значимого элемента, обладающего функциональной обособленностью и обязательными характеристиками прочности, жесткости и целостности, что позволяет трактовать межмодульные соединения как строительные изделия в составе модульной системы.

Регламент (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council [87] устанавливает условия для размещения на рынке строительных продуктов. Регламент определяет понятие «строительное изделие» («*construction product*») как любое изделие или комплект, которое произведено и выведено на рынок для постоянного включения в строительные работы или их части и чьи характеристики оказывают влияние на выполнение основных требований к строительным работам. В тексте регламента закрепляется, что под «строительными работами» («*construction works*») понимаются здания и инженерные сооружения («*buildings and civil engineering works*»). Терминологическая система регламента акцентирует внимание на изделии как объекте промышленного производства, поставляемом на рынок и предназначенному для долговременного включения в строительные работы, что нормативно фиксирует его статус самостоятельного объекта регулирования. Регламент увязывает изделия с обеспечением базовых требований для строительных работ, включающих механическую прочность и устойчивость, безопасность при пожаре, гигиену, здоровье и окружающую среду, безопасность и др. Исходя из данных положений межмодульные соединения интерпретируются как строительные изделия, так как представляют собой комплекты или элементы, выпускаемые в промышленном масштабе и встраиваемые в здания в постоянной форме, влияя на выполнение основных требований к строительным объектам.

Европейский стандарт EN 1090-2:2018 [88] устанавливает технические требования к изготовлению и возведению стальных конструкций. EN 1090-2:2018 не формулирует отдельное определение «строительного изделия», однако систематизирует элементы конструкции через категории «изделие», «элемент конструкции» и «составляющая часть». Соединительные элементы (болты, заклепки, сварные узлы, опорные части) в стандарте рассматриваются как самостоятельные объекты нормирования, что позволяет сблизить их с понятием строительного изделия. Соединение выступает в роли функционально обособленного элемента, отвечающего за пространственную жесткость и передачу нагрузок. С точки зрения модульного строительства, межмодульное соединение может быть интерпретировано как совокупность изделий или частей изделия (механических крепежных деталей, сварных узлов, опорных частей), образующих сборочную единицу.

Европейский документ EAD 130087-00-0204 [89] определяет модульную систему как комплект строительных изделий («*wood based kit*»), включающий стандартизованные деревянные Iakovlev, N.; Vatin, N.

Inter-module connections in modular construction: A review of terminology in literature and standards; 2025; AlfaBuild; 35 Article No 3504. doi: 10.57728/ALF.35.4

модули, специальные элементы (угловые, для проемов и сопряжений), а также соединительные компоненты в виде стальных уголков, анкеров, kleев, крепежа и теплоизоляции. Каждая составляющая подлежит сертификации, что закрепляет их статус самостоятельных строительных изделий. Вместо трактовки через понятия «строительная конструкция» или «часть конструкции» EAD 130087-00-0204 определяет межмодульные соединения как составные строительные изделия, входящие в комплект модульной системы в целом и обладающие нормативно установленными характеристиками прочности, жесткости, огнестойкости и долговечности.

Стандарт CSA A277 «Procedure for certification of prefabricated buildings, modules and panels» [90] ориентирован на сертификацию заводских систем качества и продукции, включающей «prefabricated buildings», «modules» и «panels». Документ рассматривает перечисленные объекты как готовые изделия, подлежащие проверке на соответствие применимым строительным кодам и техническим нормам до доставки на строительную площадку. Объектом оценки выступает продукт заводского изготовления («factory-built product»), то есть законченное изделие, изготовленное и проверенное в условиях завода. Составные элементы модулей (в том числе соединительные узлы) не описываются как самостоятельные конструкции, а входят в состав изделия, подлежащего инспекции в комплексе. Таким образом, межмодульные соединения трактуются как составные части сертифицируемого изделия. Стандарт выводит монтаж на площадке за пределы сертификации, что дополнительно подтверждает понимание соединений в статусе изделия, входящего в готовый модульный комплект, а не как строительной конструкции, формируемой уже на объекте.

Стандарт CSA Z250:2021 [91] определяет процесс доставки объемных модульных зданий. Анализ документа показывает, что соединительные элементы модулей оцениваются в рамках серийного производственного процесса и поставляются как части готового изделия.

Стоит также упомянуть, что на момент написания данной статьи разрабатывается [92] стандарт CFOC/ICC 1220 Standard on Configurations and Connections for Off-Site Construction. Цель документа состоит в установлении четких требований к межмодульным соединениям («module-to-module connections») и соединениям между модулем и зданием («building-to-module connections»). Появление данного стандарта имеет существенное значение, так как отражает тенденцию к выделению межмодульных соединений в отдельную категорию нормативного регулирования и подтверждает целесообразность их интерпретации в качестве строительных изделий.

3.4 Comparison analysis and discussion

Сравнение научных публикаций, российских нормативных документов и международных стандартов показывает, что подходы к определению статуса межмодульных соединений остаются неоднозначными, но в целом развиваются в сторону признания их строительными изделиями.

В научной литературе подчеркивается двойственная природа межмодульных соединений. С одной стороны, они описываются как промышленные продукты, для которых разрабатываются собственные характеристики надежности, долговечности, ремонтопригодности, а также методы испытаний и цифровые модели. С другой стороны, соединения рассматриваются как части несущей конструкции здания, от которых напрямую зависят пространственная жесткость, сейсмоустойчивость и работа каркаса в целом. Такой двойной взгляд отражает реальную ситуацию: соединение обладает признаками изделия по способу производства и обращения на рынке, но в то же время играет конструктивную роль в структуре здания.

Российские нормативные документы демонстрируют разрозненность и отсутствие единого определения. В ГОСТах присутствуют термины «модуль», «коннектор», «монтажный стык», но нет четкой фиксации самого понятия «межмодульное соединение». В одних документах соединение ближе к «строительной конструкции», в других может быть отнесено к «изделию» при условии серийного изготовления и наличия конструкторской документации. Такая неопределенность приводит к тому, что проектировщики вынуждены трактовать статус соединений в зависимости от контекста, что снижает предсказуемость проектных решений и усложняет сертификацию.

Международные стандарты более последовательны и в целом рассматривают соединения именно как изделия. ISO 15392:2019 [85] и Регламент (EU) No 305/2011 [87] закрепляют понятие «строительного изделия» как продукта, предназначенного для постоянного включения в строительные работы. EN 1090-2:2018 [88] и EAD 130087-00-0204 [89] акцентируют внимание на соединительных элементах как на объектах нормирования, что сближает их с изделиями. Стандарты CSA A277 [90] и CSA Z250 [91] трактуют модули и панели как готовые сертифицируемые изделия, а соединительные узлы рассматриваются как части этих изделий, Iakovlev, N.; Vatin, N.

проверяемые в комплексе на заводе. В ICC/MBI 1200-2021 содержатся прямые требования к прочности и жесткости межмодульных соединений, а также к инструкциям по их монтажу. Наконец, разработка стандарта CFOC/ICC 1220, полностью посвященного конфигурациям и соединениям [92], показывает, что международное сообщество видит в соединениях отдельный объект нормативного регулирования.

Сравнительный анализ нормативных документов и стандартов представлен в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ нормативных документов и стандартов
Table 1. Comparison analysis of regulations and standards

Документ	Релевантные термины	Трактовка межмодульного соединения
ГОСТ Р 71617-2024 [78]	«Модуль», «коннектор»	Статус не определен
ГОСТ 27751-2014 [79]	«Строительная конструкция», «строительное изделие»	Двойственная трактовка
ГОСТ 21.501-2018 [80]	«Конструкция», «изделие»	Двойственная трактовка
ГОСТ Р 2.005–2023 [81]	«Изделие», «сборочная единица»	Возможен статус изделия
ГОСТ Р ИСО 6707-1-2020 [82]	«Construction product», «joint», «construction»	Часть конструкции
СП 16.13330.2017 [84]	«Узел соединения»	Часть конструкции
ISO 6707-1:2020 [83]	«Construction product», «joint», «construction»	Часть конструкции
ISO 15392:2019 [85]	«Construction product», «construction works»	Изделие
ICC/MBI 1200-2021 [86]	«Module», «modular component»	Изделие
Regulation (EU) No 305/2011 [87]	«Construction product», «construction works»	Изделие (как объект рынка)
EN 1090-2:2018 [88]	«Изделие», «элемент конструкции»	Составное изделие (сборочная единица)
EAD 130087-00-0204 [89]	«Wood based kit»	Изделие, входящее в комплект модульной системы
CSA A277 [90]	«Factory-built product»	Часть изделия
CSA Z250:2021 [91]	«Module»	Часть изделия
CFOC/ICC 1220 (в разработке [92])	«Module-to-module connection», «building-to-module connection»	Изделие как отдельный объект нормативного регулирования

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что рациональнее трактовать межмодульные соединения именно как строительные изделия. Далее представлены аргументы в пользу такой трактовки.

Во-первых, межмодульные соединения обладают признаками серийного промышленного производства. Они производятся в заводских условиях, имеют повторяемость форм, стандартизованные материалы, паспорта с характеристиками, требованиями, технической документацией и инструкциями.

Во-вторых, межмодульные соединения являются функционально законченным продуктом, то есть обладающим конкретной функцией. Функция межмодульных соединений заключается в обеспечении соединения модулей, передаче нагрузок и тем самым обеспечении жесткости всей

конструкции. Эта функция не меняется от одного типа межмодульного соединения к другому. Таким образом, даже многокомпонентное межмодульное соединение, монтируемое на строительной площадке, может квалифицироваться как строительное изделие комплектной поставки, или даже как часть более крупного строительного изделия (модуля).

В-третьих, рынок требует прослеживаемости и ответственности производителя за характеристики продукта, что возможно только в рамках продуктовой модели.

В-четвертых, управление жизненным циклом соединений удобнее вести как для изделий. Данный подход облегчает ремонт, замену, повторное использование и утилизацию.

В-пятых, межмодульные соединения выполняют роль стыков между модулями, и их требования по допускам, герметичности, огнестойкости и интеграции инженерных систем проще фиксировать через продуктовые спецификации.

В-шестых, цифровое проектирование (BIM) предполагает наличие параметрических карточек объектов, что также соответствует логике изделия.

4 Conclusions

На основе анализа научной литературы, российских и международных нормативных документов получены следующие научные результаты.

1. Установлено, что межмодульные соединения занимают пограничное положение между понятием строительного изделия и понятием части строительной конструкции. В научных публикациях фиксируется их двойственная природа. С одной стороны, межмодульные соединения рассматриваются как промышленные продукты с собственными эксплуатационными характеристиками и методами испытаний. С другой стороны, они трактуются как элементы конструктивной системы здания, определяющие пространственную жесткость и сейсмостойкость.

2. Выявлен системный пробел в российской нормативной базе (ГОСТ Р 71617-2024, ГОСТ 27751-2014, ГОСТ 21.501-2018, ГОСТ Р 2.005-2023, ГОСТ Р ИСО 6707-1-2020, СП 16.13330.2017), выражющийся в отсутствии единой терминологии и критериев классификации межмодульных соединений.

3. Международные стандарты (ISO 6707-1:2020, ISO 15392:2019, ICC/MBI 1200-2021, Regulation (EU) No 305/2011, EN 1090-2:2018, EAD 130087-00-0204, CSA A277, CSA Z250:2021, CFC/ICC 1220) последовательно формируют трактовку межмодульных соединений как строительных изделий с собственными характеристиками и процедурами сертификации.

4. В результате сравнительного анализа наиболее рациональным предложено рассмотрение межмодульных соединений как строительных изделий несмотря на то, что они участвуют в работе конструкции здания и монтируются на строительной площадке. Такая интерпретация отражает промышленную природу межмодульных соединений, обеспечивает прослеживаемость, контроль качества и ответственность производителя, а также открывает возможности для управления жизненным циклом, повторного использования и интеграции в цифровые среды проектирования. Кроме того, такой подход позволяет закрепить их характеристики на нормативном уровне, повысить предсказуемость проектных решений, обеспечить контроль качества и упростить сертификацию.

5. Стоит отметить, что понимание соединений как изделий не исключает их конструктивной роли в формировании пространственной системы здания, но позволяет дополнить структурное измерение нормативным закреплением продуктовых характеристик.

6. Результаты проведенного обзора позволяют заключить, что закрепление терминологического статуса межмодульных соединений в качестве строительных изделий позволит устранить терминологические противоречия, унифицировать подходы к проектированию и испытаниям, а также повысить предсказуемость и надежность проектных решений.

References

- 1 Gunawardena, T. and Mendis, P. (2022) Prefabricated Building Systems—Design and Construction. *Encyclopedia*, MDPI AG, **2**, 70–95. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2010006>.
- 2 Rajanayagam, H., Poologanathan, K., Gatheeshgar, P., Varelis, G.E., Sherlock, P., Nagaratnam, B. and Hackney, P. (2021) A-State-Of-The-Art Review on Modular Building Connections. *Structures*, Elsevier, **34**, 1903–1922. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.114>

Iakovlev, N.; Vatin, N.

Inter-module connections in modular construction: A review of terminology in literature and standards; 2025; AlfaBuild; 35 Article No 3504. doi: 10.57728/ALF.35.4



- 3 Zhang, Y., Pan, W., Teng, Y. and Chen, S. (2024) Construction Waste Reduction in Buildings through Modular and Offsite Construction. *Journal of Management in Engineering*, American Society of Civil Engineers, **40**, 04024026. <https://doi.org/10.1061/JMENEA.MEENG-5828>
- 4 Morsy, O., Thai, H.T. and Lumantarna, E. (2025) Evaluating the Seismic Performance of Mid-Rise Composite Modular Buildings in Low-to-Moderate Seismicity Regions. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **108**, 112933. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2025.112933>
- 5 Bai, J., Yang, B., Xie, B. and Yang, J. (2024) Design and Experimental Study on RC Modular Superimposed Shear Wall Boundary Elements with New Inter-Module Connections. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **95**, 110193. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.110193>
- 6 Dan-Adrian, C. and Tsavdaridis, K.D. (2022) A Comprehensive Review and Classification of Inter-Module Connections for Hot-Rolled Steel Modular Building Systems. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **50**, 104006. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104006>
- 7 Xu, B., Xia, J., Chang, H., Ma, R. and Zhang, L. (2022) Evaluation of Superimposed Bending Behaviour of Laminated Channel Beams in Modular Steel Buildings Subjected to Lateral Load. *Thin-Walled Structures*, **175**, 109234. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109234>
- 8 Doan, D.T., Mai, T.P.A., GhaffarianHoseini, A., Ghaffarianhoseini, A. and Naismith, N. (2024) A Review of the Current State and Future Trends in Modern Methods of Construction Research. *Construction Innovation: Information Process Management* 2024, Emerald Publishing. <https://doi.org/10.1108/CI-02-2023-0029>
- 9 Wang, C., Tian, P. and Chan, T.M. (2024) Seismic Behavior of Modular Buildings with Reinforced Concrete (RC) Structural Walls as Seismic Force Resisting System. *Engineering Structures*, Elsevier, **315**, 118378. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118378>
- 10 Liu, Y., Tang, J., Chen, Z., Liu, J. and Degefe, A.T. (2025) A Review on the Mechanical Properties of MSBs Based on Discontinuous Members. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, **228**, 109388. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2025.109388>
- 11 Deng, E.F., Du, Y.P., Lian, J.Y., Zhang, Z., Qian, H., Zhang, J.F. and Liu, C.Z. (2024) Shear Behavior of the Fully Prefabricated Liftable Connection for Modular Steel Construction. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **92**, 109793. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109793>
- 12 Srisangeerthanan, S., Hashemi, M.J., Rajeev, P., Gad, E. and Fernando, S. (2020) Review of Performance Requirements for Inter-Module Connections in Multi-Story Modular Buildings. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **28**, 101087. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101087>
- 13 Ye, Z., Giriunas, K., Sezen, H., Wu, G. and Feng, D.-C. (2021) State-of-the-Art Review and Investigation of Structural Stability in Multi-Story Modular Buildings. *Journal of Building Engineering*, **33**, 101844. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101844>
- 14 Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H. and Bi, K. (2019) Review of Bolted Inter-Module Connections in Modular Steel Buildings. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **23**, 207–219. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.01.035>
- 15 Farajian, M. and Khodakarami, M.I. (2024) The Influence of Inter-Connections Characteristics on the Lateral Performance of Braced-Frame Modular Steel Buildings. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, **12**, 86–102. <https://doi.org/10.22075/jrce.2023.31689.1894>
- 16 Tusnin, A.R., Alekseytsev, A.V. and Tusnina, O. (2024) Using Machine Learning Technologies to Design Modular Buildings. *Buildings*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), **14**, 2213. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS14072213>
- 17 Moeini, M.E., Yekrangnia, M. and Alembagheri, M. (2024) Damage Mitigation Strategies for Progressive Collapse of Modular Steel Buildings Following Sudden Corner Module Removal. *Earthquake Engineering and Resilience*, John Wiley and Sons Inc, **3**, 372–387. <https://doi.org/10.1002/eer2.88>
- 18 Swami, G., Thai, H.T. and Liu, X. (2025) Robustness Analysis for Innovative Tall Composite Modular Buildings with Composite Shear Walls. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **107**, 112712. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2025.112712>
- 19 Liu, X., Hou, C., Peng, J., Wang, Y. and Rasmussen, K.J.R. (2025) Recent Advancements of Inter-Module Connections for Modular Buildings: An Overview and Multi-Dimensional Assessment. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **335**, 120378. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120378>
- 20 Maharjan, R., Kuai, L., Vessby, J. and Ormarsson, S. (2025) A Numerical Study of Prefabricated Full-Scale Light-Frame Timber Modules Including Inter-Modular Connections. *Structures*,
Iakovlev, N.; Vatin, N.

- 21 Elsevier, **76**, 108865. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2025.108865>
- 22 Qi, Q., Peng, J. and Hou, C. (2025) Structural Behaviour and Strength Calculation of Inter-Module Connections with Pegged Tenons in CFST Modular Buildings. *Thin-Walled Structures*, Elsevier, **215**, 113430. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113430>
- 23 Lacey, A.W., Chen, W. and Hao, H. (2022) Experimental Methods for Inter-Module Joints in Modular Building Structures – A State-of-the-Art Review. *Journal of Building Engineering*, **46**, 103792. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103792>
- 24 Bazarchi, E., Davaran, A., Lamarche, C.P., Roy, N. and Parent, S. (2023) Experimental and Numerical Investigation of a Novel Vertically Unconstrained Steel Inter-Modular Connection. *Thin-Walled Structures*, Elsevier Ltd., **183**, 110364. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110364>
- 25 Han, T. Van, Jeong, M.S., Kim, Y.N., Lee, D., Cuong, N.H. and Lee, K. (2025) Experimental and Numerical Evaluation of the Structural Performance of Novel S-CN Connections in Modular Construction. *Structures*, Elsevier Ltd, **71**, 107930. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107930>
- 26 Lim, R.Z.C., Looi, D.T.W., Chen, M.-T., Tsang, H.-H. and Wilson, J.L. (2023) A Component-Based Macro-Mechanical Model for Inter-Module Connections in Steel Volumetric Buildings. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier Ltd, **207**, 107954. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.107954>
- 27 Elsayed, K., Mutalib, A.A., Elsayed, M. and Azmi, M.R. (2024) Optimising Plate Thickness in Interlocking Inter-Module Connections for Modular Steel Buildings: A Finite Element and Random Forest Approach. *Buildings*, **14**, 1254. <https://doi.org/10.3390/buildings14051254>
- 28 Srisangeerthanan, S., Hashemi, M.J., Rajeev, P., Gad, E. and Fernando, S. (2021) Fully-Modular Buildings Through a Proposed Inter-Module Connection. *Lecture Notes in Civil Engineering*, **94**, 303–312. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7222-7_26
- 29 Khan, K., Chen, Z., Youssef, M.A. and Abbas, D. (2024) Numerical and Theoretical Studies on Axial Compression Performance of Modular Steel Tubular Columns Grouped with Shear-Key Connectors. *Buildings*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **14**, 2018. <https://doi.org/10.3390/buildings14072018>
- 30 Thulasirangan Lakshmidevi, M., Reddy, K.S.K.K., Al-Ameri, R. and Kafle, B. (2025) A Review on Design Considerations and Connection Techniques in Modular Composite Construction. *Applied Sciences (Switzerland)*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **15**, 5256. <https://doi.org/10.3390/app15105256>
- 31 Khan, K., Yang, K., Xie, X., Lou, H., Lu, T., Chen, Z. and Tsavdaridis, K.D. (2025) Experimental and Analytical Investigation on Seismic Behavior of Precast Modular Walls with Through-Reinforced and Bolted Vertical Connections. *Structures*, Elsevier, **76**, 108927. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108927>
- 32 Brissi, S.G., Debs, L. and Elwakil, E. (2021) A Review on the Factors Affecting the Use of Offsite Construction in Multifamily Housing in the United States. *Buildings*, MDPI AG, **11**, 5. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS11010005>
- 33 Jiang, J., Chen, Z., Liu, Y., Liu, X., Lu, G. and Lin, X. (2025) Experimental and Numerical Investigation on the Seismic Behavior of a Novel Bolted Inter-Module Connection. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, **224**, 109101. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.109101>
- 34 Ahmed, F., Gkantou, M., Nikitas, G., Ferentinou, M., Bras, A. and Riley, M. (2025) A Review of Recent Developments in Structural Elements of Modular Steel Building Systems. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **111**, 113087. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113087>
- 35 Bao, Y. and Xiang, C. (2025) Integration of BIPV Technology with Modular Prefabricated Building - A Review. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **102**, 111940. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2025.111940>
- 36 Trekin, N., Kodysh, E., Kelasiev, N., Terekhov, I., Gasiev, A. and Shmakov, S. (2024) Standardization of Modular Buildings and Their Design Solutions. *Academia. Architecture and construction*, 161–170. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2024-3-161-170>
- 37 Mansoori, S., Harkonen, J. and Haapasalo, H. (2023) Productization and Product Structure Enabling BIM Implementation in Construction. *Engineering, Construction and Architectural Management*, Emerald Publishing, **30**, 2155–2184. <https://doi.org/10.1108/ECAM-09-2021-0848>
- 38 Kang, J., Dong, W. and Huang, Y. (2023) A Bim-Based Automatic Design Optimization Method for Modular Steel Structures: Rectangular Modules as an Example. *Buildings*, **13**, 1410. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13061410>
- 39 Chourasia, A., Singhal, S. and Manivannan. (2022) Prefabricated Volumetric Modular
- Iakovlev, N.; Vatin, N.

- Construction: A Review on Current Systems, Challenges, and Future Prospects. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, **28**, 03122009. <https://doi.org/10.1061/PPSCFX.SCENG-1185>
- 39 Shirokov, V. (2022) Design Features of Modular Buildings. *The Eurasian Scientific Journal*, **14**, 1–15. <https://doi.org/10.15862/03savn322>
- 40 Chen, Z., Khan, K., Khan, A., Javed, K. and Liu, J. (2021) Exploration of the Multidirectional Stability and Response of Prefabricated Volumetric Modular Steel Structures. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier Ltd, **184**, 106826. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2021.106826>
- 41 Thai, H.T., Ngo, T. and Uy, B. (2020) A Review on Modular Construction for High-Rise Buildings. *Structures*, Elsevier Ltd, **28**, 1265–1290. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2020.09.070>
- 42 Nadeem, G., Safiee, N.A., Bakar, N.A., Karim, I.A. and Nasir, N.A.M. (2021) Connection Design in Modular Steel Construction: A Review. *Structures*, Elsevier Ltd, **33**, 3239–3256. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.060>
- 43 Iakovlev, N.A. and Khrapponova, L.V. (2025) Inter-Module Connections in Modular Construction: A Comprehensive Review and Classification. *AlfaBuild*, **33**, 45. <https://doi.org/10.57728/ALF.33.4>
- 44 Mou, B., Li, S., Song, H., Wu, C., Wang, X., Zhu, Z. and Yu, H. (2025) Development and Seismic Performance Assessment of Welded Connections in Modular Steel Structures for High-Rise Buildings. *Structures*, Elsevier, **76**, 108919. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2025.108919>
- 45 Deng, E.F., Du, Y.P., Qian, H., Zhang, Y.Z. and Gao, H.C. (2025) Seismic Behavior of the Fully Bolted Self-Centering Connection for Modular Steel Buildings. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **111**, 113590. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113590>
- 46 Vedyakov, I.I., Suslov, L.S., Marisiuk, A.A., Kashin, O. V. and Novozhilov, M. V. (2023) Bearing Capacity of a Steel Frame of a Multi-Storey Modular Building with Consideration of the Rigidity of Quick-Assembled Connections. *Earthquake Engineering. Construction Safety*, 8–44. <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-6-8-44>
- 47 Zhang, J., A. Mutalib, A., Elsayed, K. and Huang, J. (2025) Simplified Design and Seismic Performance Analysis of Beam-to-Beam Bolted Connections in Modular Construction. *Jurnal Kejuruteraan*, National University of Malaysia, **37**, 591–607. [https://doi.org/10.17576/jukm-2025-37\(2\)-04](https://doi.org/10.17576/jukm-2025-37(2)-04)
- 48 Liu, Y., Chen, Z., Liu, J., Bai, Y., Zhong, X. and Wang, X. (2020) Lateral Stiffness Evaluation on Corner-Supported Thin Walled Modular Steel Structures. *Thin-Walled Structures*, Elsevier Ltd, **157**, 106967. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106967>
- 49 Liang, X., Song, Y. and Hou, C. (2025) Numerical Study of Stainless Steel Rotary Inter-Module Connections Subjected to Axial Tension. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, **226**, 109270. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2024.109270>
- 50 Yang, K., Khan, K., Yang, Y., Jiang, L. and Chen, Z. (2025) Impact of Inter-Modular Connections on Progressive Compressive Behavior of Prefabricated Column-Supported Volumetric Modular Steel Frames. *Crystals*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), **15**, 413. <https://doi.org/10.3390/CRYST15050413>
- 51 Corfar, D.A. and Tsavdaridis, K.D. (2023) A Hybrid Inter-Module Connection for Steel Modular Building Systems with SMA and High-Damping Rubber Components. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **289**, 116281. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116281>
- 52 Corfar, D.A. and Tsavdaridis, K.D. (2025) Numerical Analysis of Hybrid Inter-Module Joints for Enhanced Seismic Resilience of Modular Buildings. *Thin-Walled Structures*, Elsevier, **216**, 113736. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113736>
- 53 Corfar, D.A. and Tsavdaridis, K.D. (2024) Testing Novel Hybrid Inter-Module Joints for Steel Modular Buildings under Cyclic Load. *Engineering Structures*, Elsevier, **315**, 118495. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118495>
- 54 Kujawa, M., Smakosz, Iwicki, P., Perliński, A. and Teichman, J. (2025) Mechanical Performance Investigations of a Post-Tensioned Inter-Module Connection in Steel Buildings. *Structures*, Elsevier, **71**, 108187. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108187>
- 55 Deng, E.-F., Du, Y.-P., Gao, J.-D., Zhang, Z. and Wang, Y.-B. (2024) Seismic Performance of an Innovative Self-Centering and Repairable Connection with SMA Bolts in Modular Steel Construction. *Thin-Walled Structures*, Elsevier, **205**, 112377. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112377>
- 56 Liu, X., Meng, Q., Xu, L., Liu, Y. and Tian, X. (2025) Modular Steel Buildings Based on Self-Iakovlev, N.; Vatin, N.

- Locking-Unlockable Connections Seismic Performance Analysis. *Buildings*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **15**, 678. <https://doi.org/10.3390/buildings15050678>
- 57 Li, P., Li, H., Chen, G., Ye, G., Zhang, T., Xiong, G. and Chen, E. (2025) Axial Tensile Performance and Stiffness Prediction of Novel Self-Locking Modular Connections: Experimental, Numerical and Theoretical Investigation. *Engineering Structures*, Elsevier, **343**, 121044. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.121044>
- 58 Lian, J.Y., Zhang, W.Y. and Ding, Y.K. (2024) Development of an Innovative FlexLock Connector for Prefabricated Prefinished Volumetric Construction. *Structures*, Elsevier, **68**, 107060. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107060>
- 59 Lee, K., Rasmussen, K.J.R. and Cho, B.H. (2024) Bolt-Free Post-Tensioned Connection for Steel-Framed Modular Buildings and Design for Optimal Preloading. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier Ltd, **218**, 108703. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108703>
- 60 Lee, K., Cho, B.H., Rasmussen, K.J.R. and Jung, D. (2024) Experimental and Numerical Investigation of Bolt-Free Preloaded Connection for Steel-Framed Modular Buildings. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, **220**, 108827. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108827>
- 61 Lee, K., Rasmussen, K.J.R. and Cho, B.H. (2025) Structural Performance of Multi-Storey Modular Buildings with Bolt-Free Post-Tensioned Inter-Module Connections. *Engineering Structures*, Elsevier, **342**, 120511. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120511>
- 62 Tsavdaridis, K.D. and Corfar, D.A. (2024) Cyclic Tests on Hybrid Inter-Module Joints with High-Damping Rubber. *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer, Cham, **519 LNCE**, 302–313. https://doi.org/10.1007/978-3-031-62884-9_27
- 63 Jiang, L., Zuo, H., Bi, K., Hao, H. and Chen, W. (2025) Seismic-Induced Vibration Control of Modular High-Rise Buildings Using Mega Modularized Substructure. *Structures*, Elsevier, **78**, 109333. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109333>
- 64 Picard, L., Blanchet, P. and Bégin-Drolet, A. (2024) Full-Scale Implementation of an Automated Connecting Device for Modular Construction. *Buildings*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **14**, 496. <https://doi.org/10.3390/buildings14020496>
- 65 Liu, J., Cao, X., Yan, S., Chen, Z., Liu, Y. and Lu, G. (2024) Research on Seismic Behavior of Tapered-Head Bolted Inter-Module Connection of Modular Steel Buildings. *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, **304**, 117586. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117586>
- 66 Yang, Y., Luk, C., Zheng, B., Hu, Y. and Chan, A.P.-C. (2025) Disassembly and Reuse of Demountable Modular Building Systems. *Journal of Management in Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), **41**, 05024012. <https://doi.org/10.1061/JMENEA.MEENG-6243;WGROUP:STRING:PUBLICATION>
- 67 Tsavdaridis, K.D. and Corfar, D.A. (2022) Modular Building Connections: A Review. *3th International Conference Coordinating Engineering for Sustainability and Resilience*, Irbid. https://www.researchgate.net/publication/360547402_Modular_Building_Connections_-_A_review
- 68 Liu, Y., Lin, X., Chen, Z., Liu, J. and Liu, X. (2025) Experimental Research and Numerical Simulation of a Modular Composite Steel Frame Structure. *Structures*, Elsevier, **71**, 107914. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107914>
- 69 Farajian, M., Kildashti, K., Sharafi, P. and Eslamnia, H. (2022) Quantification of Seismic Performance Factors for Modular Corner-Supported Steel Bracing System. *Structures*, Elsevier, **45**, 257–274. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2022.09.032>
- 70 Emamikoupaei, A., Tsavdaridis, K.D., Bigdeli, A. and Saffarzadeh, K. (2025) Fragility-Based Robustness Assessment of Steel Modular Building Systems: Connection and Building Height. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, **226**, 109199. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.109199>
- 71 Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H. and Bi, K. (2020) Simplified Structural Behaviours of Post-Tensioned Inter-Module Connection for Modular Buildings. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier Ltd, **175**, 106347. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106347>
- 72 Shirokov, V.S. (2022) Dynamic Coefficient of Modular Buildings during Seismic Load. *Earthquake Engineering. Construction Safety*, 23–33. <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-23-33>
- 73 Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H. and Bi, K. (2020) Effect of Inter-Module Connection Stiffness on Structural Response of a Modular Steel Building Subjected to Wind and Earthquake Load. *Engineering Structures*, Elsevier, **213**, 110628. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110628>
- 74 Deng, L.J., He, X.H.C. and Song, W.G. (2025) Effect of Inter-/Intra-Module Joints on the Effective Iakovlev, N.; Vatin, N.

- Length Factor of Modular Columns. *Structures*, Elsevier, 76, 109012. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109012>
- 75 Anbarasu, M., Vivek, K.S. and Dar, M.A. (2024) Inelastic Stability of Axially Compressed CFS Hollow Stub Columns with Edge-Stiffened Perforations. *Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council, SSRC 2024*. https://files.ssrcweb.org/proceedings/2024/Anbarasu_et_al_SSRC_2024.pdf
- 76 Bai, J., Yang, B., Deng, Z. and Yang, J. (2025) Design and Axial Compression Tests on RC Modular Superimposed Shear Wall Boundary Elements with Efficient Inter-Module Connectors. *Structural Concrete*, John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/suco.70131>
- 77 Li, S., Lam, N. and Tsang, H.H. (2025) Lateral Stability Design and Modelling of High-Rise Fully Modular Buildings with Superelastic Tendon Restrained Rocking Isolation. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, 99, 111589. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111589>
- 78 GOST R 71617-2024 Modular Buildings and Structures. Terms and Definitions. Classification. Russian Institute of Standardization, Russian Federation. <https://docs.cntd.ru/document/1307432437>
- 79 GOST 27751-2014 Reliability for Constructions and Foundations. General Principles. Interstate council for standardization, metrology and certification, Russian Federation. <https://docs.cntd.ru/document/1200115736>
- 80 GOST 21.501-2018 System of Design Documentation for Construction. Rules for Execution of the Working Documentation of Architectural and Construction Solutions. Interstate council for standardization, metrology and certification, Russian Federation. <https://docs.cntd.ru/document/1200161804>
- 81 GOST R 2.005-2023 Unified System for Design Documentation. Terms and Definitions. Russian Institute of Standardization, Russian Federation. <https://docs.cntd.ru/document/1303687642>.
- 82 GOST R ISO 6707-1-2020 Buildings and Constructions. General Terms. Russian Federation. <https://docs.cntd.ru/document/1200177284>
- 83 ISO 6707-1:2020, Buildings and Civil Engineering Works - Vocabulary - Part 1: General Terms. <https://www.iso.org/standard/77077.html>
- 84 SP 16.13330.2017. Steel Structures. Central Scientific Research Institute for Building Structures, Russian Federation. <https://docs.cntd.ru/document/456069588>
- 85 ISO 15392:2019 Sustainability in Buildings and Civil Engineering Works — General Principles. <https://www.iso.org/standard/69947.html>
- 86 2021 ICC/MBI 1200 Standard for Off-Site Construction: Planning, Design, Fabrication and Assembly. <https://codes.iccsafe.org/content/ICC12002021P1>
- 87 Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 Laying down Harmonised Conditions for the Marketing of Construction Products and Repealing Council Directive 89/106/EEC. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2011/305/oj/eng>
- 88 EN 1090-2:2018 Execution of Steel Structures and Aluminium Structures - Part 2: Technical Requirements for Steel Structures. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/dace6bce-f81f-496e-9d3e-fc539c2dd8b6/en-1090-2-2018>
- 89 EAD 130087-00-0204 Modular Construction System. 2017. <https://doi.org/10.1201/9780203741771>
- 90 CSA A277 Procedure for Certification of Prefabricated Buildings, Modules and Panels. 2021. <https://www.intertek.com/building/standards/csa-a277/>
- 91 CSA Z250:2021 Process for Delivery of Volumetric Modular Buildings. <https://www.csagroup.org/store/product/2428877/>
- 92 Center for Offsite Construction. Modular Interface Standards. <https://www.nyit.edu/academics/architecture-and-design/center-for-offsite-construction/modular-interface-standards/>