

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2022, №3, Том 14 / 2022, No 3, Vol 14 <https://esj.today/issue-3-2022.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/03SAVN322.pdf>

DOI: 10.15862/03SAVN322 (<https://doi.org/10.15862/03SAVN322>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Широков, В. С. Конструктивные особенности модульных зданий / В. С. Широков // Вестник евразийской науки. — 2022. — Т. 14. — № 3. — URL: <https://esj.today/PDF/03SAVN322.pdf> DOI: 10.15862/03SAVN322

For citation:

Shirokov V.S. Design features of modular buildings. *The Eurasian Scientific Journal*, 14(3): 03SAVN322. Available at: <https://esj.today/PDF/03SAVN322.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.15862/03SAVN322

Широков Вячеслав Сергеевич

ООО «СамараНИПИнефть», Самара, Россия
Ведущий инженер

E-mail: ShirokovViacheslav@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6285-8895>

РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=665300

Researcher ID: <https://www.researcherid.com/rid/N-5278-2016>

Research Gate: <https://www.researchgate.net/profile/Viacheslav-Shirokov>

Конструктивные особенности модульных зданий

Аннотация. Статья посвящена актуальной на сегодняшний день теме — модульному строительству. В последние годы появляется значительное количество исследований по данной теме как в России, так и за рубежом. Для систематизации исследований необходимо провести классификацию модульных зданий и выделить их конструктивные особенности.

Главной отличительной особенностью модульного строительства является возведение сооружения из изготовленных на заводе объемных модульных блоков, каждый из которых так же должен полностью отвечать требованиям функциональной, технической, экономической целесообразности и архитектурной выразительности.

Модульные здания чаще всего изготавливаются с каркасом из стали или дерева. Стальные модульные здания получили более широкое распространение за счет большей несущей способности. Поэтому в статье приведена классификация модульных зданий со стальным каркасом.

Модульные здания классифицируются по следующим признакам: конструктивная система здания (взаимное расположение и совместная работа модулей друг с другом); каркас модулей (несущие конструкции отдельных модулей); узловые соединения. Узловые соединения подразделяются на два вида: межмодульные (узлы соединения модулей друг с другом) и внутримодульные (узлы соединения балок и колонн внутри модуля).

На основе проведенного обзора литературных источников и анализа преимуществ и недостатков выявлены наиболее распространенные конструктивные решения модульных зданий в Российской Федерации: здания из составленных модулей с опорными колоннами, межмодульными соединениями на сварке через стыковочные пластины и сварными внутримодульными соединениями. Однако, данное положение не исключает проведения исследований модульных зданий других конструктивных решений.

Ключевые слова: строительные конструкции; модульные здания; модули с опорными колоннами; модули с несущими стенами; межмодульные соединения; внутримодульные соединения

Введение

В XXI веке возник значительный интерес к модульному строительству как в России, так и за рубежом. Несмотря на то, что первые модульные здания строились еще в начале XX века, бурное развитие их внедрения и изучения наблюдается именно в настоящее время. В первую очередь это связано с появлением современных материалов и технологий изготовления конструкций с высокой точностью.

Многие авторы отмечают актуальность модульного строительства. Обзор литературных источников показывает, что российские авторы сконцентрированы больше на преимуществах данной технологии, но при этом отсутствует классификация модульных зданий [1–15]. Для систематизации и определения направлений исследований необходимо провести классификацию модульных зданий на основе зарубежного опыта и выделить их основные конструктивные особенности, а также выделить наиболее актуальные решения в Российской Федерации.

Объемно-модульные здания (модульные здания) — это здания, возводимые из унифицированных объемных модулей.

Объемный модуль (блок-бокс, блок-контейнер) — это пространственная конструкция, изготовленная в заводских условиях, имеющая несущие и ограждающие конструкции, обеспечивающих заданные теплотехнические параметры, физико-механические свойства конструкций, устойчивость, жесткость, прочность и неизменяемость геометрических размеров при транспортировании и монтаже.

Главной отличительной особенностью модульного строительства является возведение сооружения из изготовленных на заводе объемных модульных блоков, каждый из которых так же является полноценным строительным элементом. Поэтому конструктивные решения блоков должны отвечать требованиям по прочности, устойчивости и жесткости каждого модуля как самостоятельной конструкции, так и в качестве части сооружения.

Модули должны быть пригодными для транспортирования, т. е. объемные блоки должны иметь габариты, позволяющие их перевезти от завода до строительной площадки. Согласно правилам дорожного движения в Российской Федерации на перевозку грузов установлены следующие габариты:

- для габаритных грузов длина не должна превышать 12 м, ширина 2,55 м, высота от проезжей части не более 4 м;
- для крупногабаритных грузов допускается увеличение размеров по ширине до 3,5 м и высоте до 4,5 м.

С учетом размеров транспортных средств усредненные максимальные размеры модульных блоков:

- габаритные модули: ширина 2,55 м, длина 12 м, высота 3,4 м.
- крупногабаритные модули: ширина 3,5 м, длина 12 м, высота 3,9 м.

Основными конструктивными материалами модульных зданий являются сталь и дерево, что отличает их от объемно-блочных зданий, изготавливаемых из железобетона. Сталь является более предпочтительным материалом для модульных зданий, т. к. она обладает наиболее высокой несущей способностью.

Классификация модульных зданий

Модульные здания классифицируются по следующим признакам: конструктивная схема здания, каркас модулей, узловые соединения [16–25].

По конструктивной схеме модульные здания подразделяются на:

1. Схема из составленных модулей (рисунок 1а).
2. Схема с ядром жесткости (рисунок 1б, в).
3. Схема с внешним стальным каркасом (рисунок 1г).

Конструктивные схемы характеризуют взаимное расположение модулей в пространстве здания и восприятие, и передачу ими нагрузок. Схема из составленных модулей образуется непосредственным соединением модулей друг с другом в плане и по высоте здания. В данном случае вертикальные и горизонтальные нагрузки воспринимаются каждым модулем. Прочностные и деформационные характеристики здания обуславливаются каркасом каждого модуля и узловыми соединениями модулей друг с другом. В схеме из составленных модулей происходит передача и накопление нагрузки от одного модуля к другому, например, нижележащему. В таком случае нельзя оценивать прочность и устойчивость здания в целом, рассматривая только лишь один модуль без учета остальных, особенно при горизонтальных воздействиях: ветер и сейсмика. Данная схема получила наибольшее распространения в Российской Федерации.

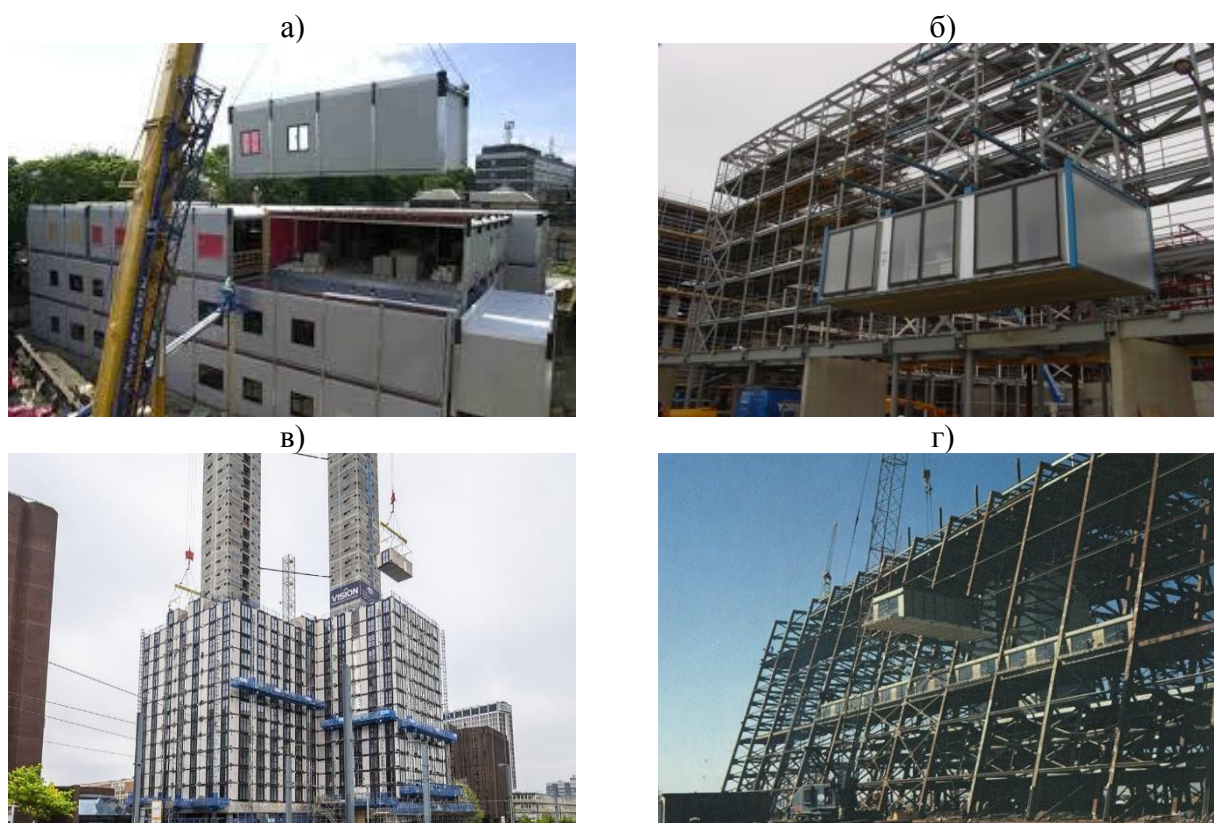


Рисунок 1. Конструктивные схемы модульных зданий: а) из составных модулей (https://www.steelconstruction.info/Modular_construction); б) со стальным ядром жесткости [19]; в) с железобетонным ядром жесткости [23]; г) с внешним каркасом [23]

Для высотных модульных зданий обычно применяется схема со стальным или железобетонным ядром жесткости. В данной схеме ядро жесткости воспринимает все горизонтальные воздействия, а каркас модулей только вертикальные.

Схема с внешним стальным каркасом предполагает устройство внешнего несущего остова, который воспринимает все вертикальные и горизонтальные нагрузки. В данной схеме модули работают отдельно друг от друга и являются ненесущими.

По каркасу модулей выделяют следующие системы:

1. Модули с опорными угловыми колоннами (рисунок 2а).
2. Модули с несущими стенами (рисунок 2б).
3. Ненесущие модули.



Рисунок 2. Каркасные системы модулей: а) с опорными угловыми стойками (<https://www.stentprojects.co.uk/modular/#about-modular>); б) с несущими стенами [18]

Каркас модулей с несущими стенами образуется раскосной или крестовой решеткой, расположенной в плоскости стен. В данной системе все нагрузки воспринимаются этой решеткой, что обеспечивает прочность и неизменяемость модуля. В системе с несущими стенами соединение элементов каркаса может реализовываться шарнирным по принципу формирования ферм. Преимуществами данной системы являются возможность использования элементов меньшего сечения и создание модулей больших габаритов. Главный недостаток системы с несущими стенами — ограниченность помещения размерами модуля.

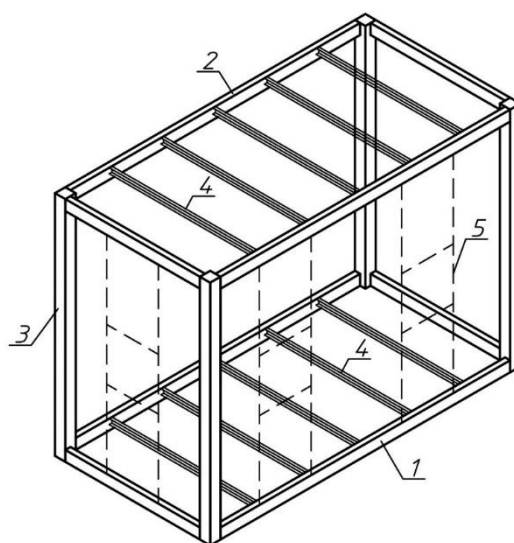


Рисунок 3. Типовой каркас модуля с опорными колоннами: 1 — нижняя горизонтальная рама; 2 — верхняя горизонтальная рама; 3 — колонна; 4 — балки настила; 5 — стеновое ограждение (при необходимости) (разработано автором)

Система с опорными колоннами состоит из горизонтальных рам и опорных стоек (рис. 3), расположенных в углах модуля. Вертикальные нагрузки воспринимаются горизонтальными рамами от балок настила и передаются на колонны. Горизонтальные нагрузки полностью воспринимаются опорными стойками. Недостатками данной системы являются необходимость применения более мощных сечений балок и колонн, а также конструирование более сложных узловых соединений элементов каркаса, обеспечивающих неизменяемость модулей. Главным преимуществом по сравнению с системой с несущими стенами является возможность создания более свободной планировки. За счет этого преимущества система с опорными колоннами получила более широкое распространение в Российской Федерации.

Колонны модулей выполняются из квадратных или прямоугольных труб [17; 19; 24; 26–57], а также из холодногнутых угловых сечений [58–62]. К угловым сечениям удобно осуществлять крепление ограждающих конструкций, однако данные сечения обладают низкой несущей способностью на изгиб, поэтому в системе с опорными колоннами предпочтительнее применение трубчатых сечений. Часто используемые в модульных зданиях размеры квадратных труб составляют от 100×100 мм до 150×150 мм [38].

Горизонтальные рамы работают в основном на изгиб, поэтому для них применяются двутавры [24; 33–37; 39; 44; 50; 52; 56], швеллеры [20; 21; 24; 46; 57; 60; 63], холодногнутые С-образные элементы [19; 41–43; 45; 53; 54; 64–66], а также квадратные и прямоугольные трубы [17; 24; 26; 33; 36; 40; 41; 47–49; 51; 55; 56]. При выборе типа сечения балок важную роль играет конструкция их узлового соединения с колоннами.

Узловые соединения модульных зданий (рис. 4) классифицируются по расположению в пространстве сооружения на [67]:

1. Внутримодульные соединения.
2. Межмодульные соединения.
3. Соединения с фундаментом.
4. Соединения с ядром жесткости (при наличии).

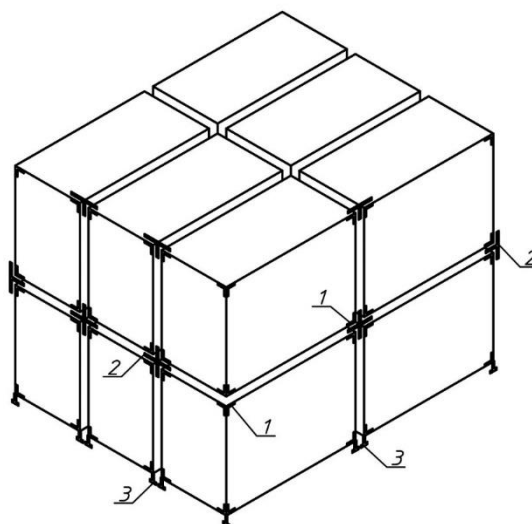


Рисунок 4. Классификация соединений в модульных зданиях:

1 — внутримодульные; 2 — межмодульные; 3 — с фундаментом (разработано автором)

Соединения с фундаментами бывают трех основных типов:

1. Заделка стойки в бетон (рисунок 5а).
2. Через анкерные болты (рисунок 5б).
3. Приварка к стальному ростверку или закладной детали фундамента (рисунок 5в).

Как и для традиционных строительных конструкций узловые соединения модулей с фундаментами должны обеспечивать: восприятие и передачу нагрузки; заданное положение при монтаже. В Российской Федерации широкое распространение получили узловые крепления к фундаментам через опорные пластины на сварке. Данные соединения просты в монтаже, а также позволяют компенсировать неточности устройства фундаментов.

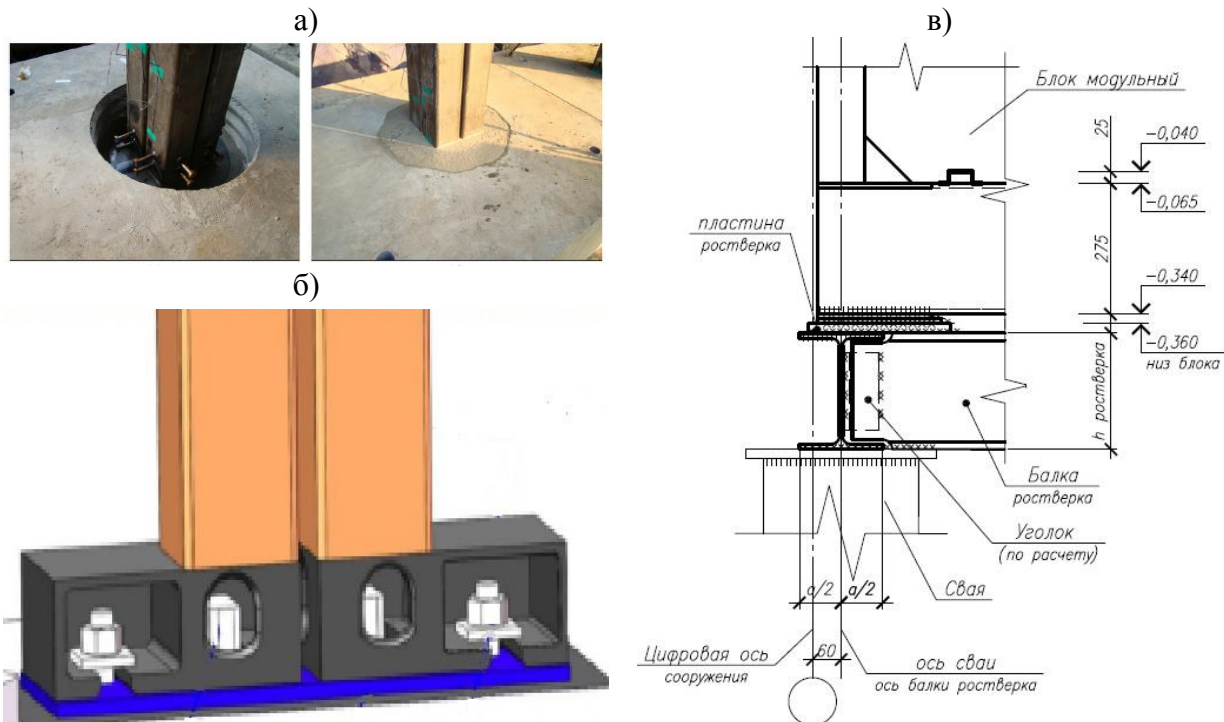


Рисунок 5. Варианты крепления модульных блоков к фундаментам:
а) с заделкой в тело фундамента [48]; б) на анкерных болтах [53]; в) приварка к стальному ростверку (разработано автором)

Межмодульные соединения служат для соединения модулей друг с другом и конструируются [16; 17; 20–24; 48; 69]:

1. На болтах (рисунок 6а).
2. На сварке (рисунок 6б).
3. На коннекторах (рисунок 6в).

Главным преимуществом межмодульных узлов на коннекторах является простота и надежность монтажа соединений [41; 45; 50; 56; 59; 70; 71]. Однако сами коннекторы часто имеют довольно сложную конструкцию и разрабатываются под свой технологических процесс предприятиями, производящими объемные модули. Наиболее известным примером служат коннекторы Vector Praxis (рисунок 6в), которые представляют собой литую стальную деталь сложной формы, с резьбовыми отверстиями для осуществления межмодульных соединений на высокопрочных болтах.

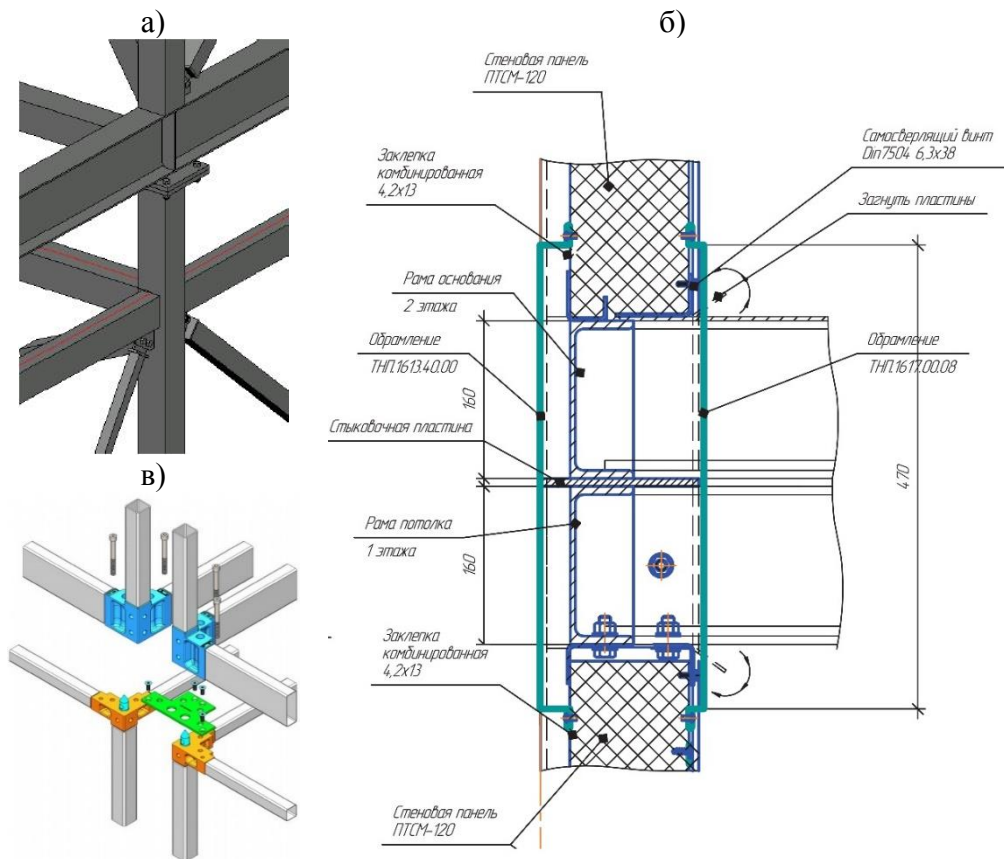


Рисунок 6. Типы межмодульных соединений: а) на болтах [30]; б) на сварке (ОАО «Электроцит»); в) на коннекторе Vector Praxis [23]

Болтовые межмодульные соединения просты в монтаже и обеспечивают возможность разборки модульного здания [17–22; 39; 40; 44; 46; 47; 51; 52; 64; 72]. Однако для их устройства необходимо наличие дополнительных пластин или фланцев. Соединительные элементы увеличивают габарит узла, а также усложняют устройство ограждающих конструкций.

Межмодульные соединения на сварке относительно трудоемкие в устройстве и являются неразборными [36; 38; 44]. Данные недостатки компенсируются тем, что узлы на сварке являются наиболее компактными и обладают большей несущей способностью по сравнению с болтовыми.

В практике отечественного строительства наибольшее распространение получили сварные межмодульные соединения через стыковочные пластины. Такой тип узлов обладает высокой сдвиговой жесткостью и надежностью, что позволяет не учитывать дополнительных деформаций соединения при проектировании модульных зданий.

Значительное влияние на силовую работу и неизменяемость модульных зданий оказывают внутримодульные соединения балки с колонной, которые выполняются [16; 17; 20–24; 38; 69]:

1. На болтах (рис. 7а).
2. На сварке (рис. 7б).

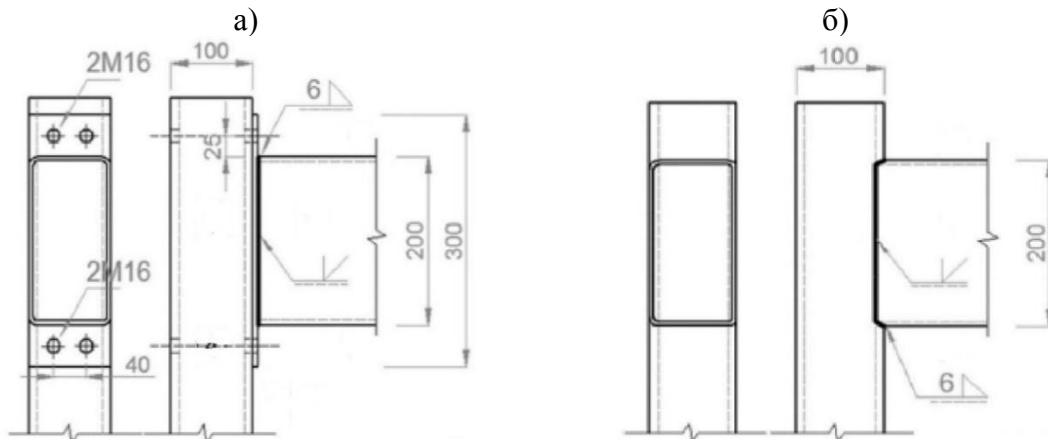


Рисунок 7. Типы внутримодульных соединений: а) на болтах [38]; б) на сварке [38]

Внутримодульные соединения на болтах выполняются через фасонки [65; 66], фланцы [38; 45; 65; 66] или коннекторы [41; 59; 70]. Для повышения жесткости узла устраиваются элементы жесткости [38; 41]. Главными преимуществами соединений на болтах являются простота сборки и возможность разборки. Основными недостатками являются податливость; низкая несущая способность и малая жесткость соединения.

Соединения на сварке выполняются с непосредственной приваркой балки к колонне [35; 38–40; 42; 44; 46; 51; 64] и с устройством ребер жесткости [39; 40; 49; 51; 64]. Соединения на сварке обеспечивают постоянство геометрии модуля и обладают более высокой несущей способностью и жесткостью. Однако данные соединения являются неразъемными и более трудоемкими.

Трудоемкость устройства сварных внутримодульных соединений нивелируется их производством в заводских условиях. Возможность разборки модулей не является обязательным требованием. Поэтому за счет своих преимуществ внутримодульные соединения на сварке применяются гораздо чаще в Российской Федерации.

Заключение

В рамках статьи отмечены основные отличительные особенности модульных зданий от традиционных сооружений. На основе анализа зарубежного опыта приведена классификация и рассмотрены конструктивные особенности модульных зданий.

На основе проведенного обзора литературных источников и анализа преимуществ и недостатков выявлены наиболее распространенные конструктивные решения модульных зданий в Российской Федерации:

1. Сталь является наиболее эффективным конструкционным материалом для модульных зданий, так как является наиболее легким конструкционным материалом.
2. В практике отечественного строительства наиболее широкое распространение получила система модулей с опорными колоннами, так как она позволяет создавать более свободные объемно-планировочные решения по сравнению с модулями с несущими стенами.
3. Трубчатые сечения являются наиболее рациональными для стоек модулей с опорными колоннами. Квадратные и прямоугольные трубы обладают достаточной несущей способностью на сжатие и изгиб, и к ним удобно крепить горизонтальные несущие элементы.

4. В практике отечественного строительства наибольшее распространение получили сварные межмодульные соединения через стыковочные пластины. Данные соединения обладают высокой сдвиговой жесткостью и довольно просты в монтаже.
5. Внутримодульные соединения на сварке обеспечивают постоянство геометрии модуля и обладают более высокой несущей способностью и жесткостью, поэтому являются более предпочтительными по сравнению с болтовыми.

Наиболее актуальными на данный момент можно считать исследования модульных зданий с указанными конструктивными решениями. Однако следует также развивать исследования модульных зданий, обладающих иными конструктивными решениями, указанными в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Generalova E.M., Generalov V.P., Kuznetsova A.A. Modular buildings in modern construction // *Procedia Engineering*. 2016. V. 153. Pp. 167–172. Doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.098.
2. Зуева, А.Н. Быстровозводимые здания и модульное строительство / А.Н. Зуева // *Молодой учёный*. — 2016. — № 3(107). — С. 100–103.
3. Исходжанова, Г.Р. Перспективы применения блочно-модульных структур зданий для условий высокогорья / Г.Р. Исходжанова // *Вестник КРСУ*. — 2013. — Т. 13, № 7. — С. 151–155.
4. Клевцова, К.С. Инновационное модульное строительство / К.С. Клевцова // *Молодой учёный*. — 2017. — № 3(137). — С. 103–105.
5. Петров, В.Э. Малоэтажное модульное жилое строительство на основе экологического подхода / В.Э. Петров // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. — 2015. — № 41(60). — С. 85–92.
6. Радыгина, А.Е. Концепция модульных быстровозводимых общественных зданий / А.Е. Радыгина, М.Б. Пермяков // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. — 2014. — Т. 2. — С. 48–49.
7. Расулова, В.Р. Схемы быстровозводимых модульных зданий / В.Р. Расулова // *Студенческий вестник*. — 2017. — № 3(3), ч. 3. — С. 9–11.
8. Семикин, П.П. Модульность в архитектуре высотных зданий — П.П. Семикин, Т.П. Бацунова, П.В. Семикин // *Известия вузов. Строительство*. — 2015. — № 5. — С. 64–69.
9. Чибирикова, Д.А. Использование готовых модульных компонентов при проектировании и конструировании зданий / Д.А. Чибирикова, Б.С. Атаев // *Студент года 2021. Сборник статей Международного учебно-исследовательского конкурса в 6-ти частях*. Петрозаводск, 2021. — С. 216–223.

10. Захарова, М.В. Опыт строительства зданий и сооружений по модульной технологии / М.В. Захарова, А.Б. Пономарев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. — 2017. — Т. 8, № 1. — С. 148–155. Doi: 10.15593/2224-9826/2017.1.13.
11. Лукьяненко, Л.А. Модульное строительство как современное направление возведения доступного жилья / Л.А. Лукьяненко, Ю.В. Артемьева, Н.И. Шайбакова // Социально-экономическое управление: теория и практика. — 2018. — № 2(33). — С. 102–106.
12. Мушинский, А.Н. Строительство быстровозводимых зданий и сооружений / А.Н. Мушинский, С.С. Зимин // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2015. — № 4(31). — С. 182–193.
13. Абрамян, С.Г. Преимущества применения объемных модульных блоков при реконструкции зданий и высотном строительстве / С.Г. Абрамян, О.В. Оганесян, З.Ю. Галда, А.А. Дикмеджян // Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса. — 2019. — С. 129–133.
14. Курманова, Е.Е. Модульные здания: преимущества и недостатки / Е.Е. Курманова, В.Д. Таратута // Вестник науки. — 2020. — Т. 3. — № 6. — С. 158–160.
15. Абрамян, С.Г. Объемные блок-модули как разновидность модульных конструкций быстровозводимых строительных систем / С.Г. Абрамян, О.В. Бурлаченко, З.Ю. Галда // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2021. — № 1. — С. 5–13.
16. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Structural Response of Modular Buildings — An Overview // Journal of Building Engineering. — 2018. — V. 23. — Pp. 45–56. Doi.org/10.1016/j.jobe.2017.12.008.
17. Deng E.-F., Zong L., Ding Y., Zhang Z., Zhang J.-F., Shi F.-W., Cai L.-M., Gao S.-C. Seismic performance of mid-to-high rise modular steel construction — A critical review // Thin-Walled Structures. — 2020. — V. 155. — P. 106924. Doi.org/10.1016/j.tws.2020.106924.
18. Lawson R.M., Ogden R., Pedreschi R., Grubb P., Popo-Ola S. Developments in pre-fabricated systems in light steel and modular construction // The Structural engineer. — 2005. — V. 83. — Pp. 28–35.
19. Lawson R.M., Richards J. Modular design for high-rise buildings // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Structures and Buildings. — 2010. — V. 163. — Pp. 151–164. Doi.org/10.1680/stbu.2010.163.3.151.
20. Liew J.Y.R. Innovation in modular building construction // Ninth International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS'2018). — 2018. — P. K–05. DOI: 10.18057/ICASS2018.K.05.
21. Liew J.Y.R., Dai Z., Chua Y.S. Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings // 12th International Conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures (ASCCS 2018) Universitat Politècnica de València, València, Spain, June 27–29, 2018. — 2018. — Pp. 59–65. Doi.org/10.4995/ASCCS2018.2018.7220.

22. Liew J.Y.R., Dai Z., Chua Y.S. Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings // Structures. — 2019. — V. 21. — Pp. 135–149. Doi.org/10.1016/j.istruc.2019.02.010.
23. Thai H.-T., Ngo T., Uy B. A review on modular construction for high-rise buildings // Structures. — 2020. — V. 28. — Pp. 1265–1290. Doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.070.
24. 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. — V. 184. — P. 106826. Doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106826.
25. Мировая практика стального строительства. Жилые здания: рекомендации архитекторам, проектировщикам и строителям; [пер. с англ.: И.И. Ведяков, Д.В. Конин, А.Д. Яковлева]. — Москва: АКЦИОМ ГРАФИКС ЮНИОН, 2015. — 58 с.
26. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Effect of inter-module connection stiffness on structural response of a modular steel building subjected to wind and earthquake load // Engineering Structures. — 2020. — V. 213. — P. 110628. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110628.
27. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Lateral behaviour of modular steel building with simplified models of new inter-module connections // Engineering Structures. — 2021. — V. 236. — P. 112103. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112103.
28. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. New interlocking inter-module connection for modular steel buildings: Experimental and numerical studies // Engineering Structures. — 2019. — V. 198. — P. 109465. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109465.
29. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. New interlocking inter-module connection for modular steel buildings: Simplified structural behaviours // Engineering Structures. — 2020. — V. 227. — P. 111409. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111409.
30. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Numerical study of the structural response to wind loading: modular building case study // 13th International Conference on Steel, Space and Composite Structures 31 January — 2 February 2018, Perth, Australia. — 2018. — P. 1025.
31. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K., Tallowin F.J. Shear behavior of post-tensioned inter-module connection for modular steel buildings // Journal of Constructional Steel Research. — 2019. — V. 162. — P. 105707. Doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105707.
32. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Shear stiffness of bolted inter-module connections for modular steel buildings // 11th International Conference of the IFHS on Extreme Engineering 28–30 August, 2019, Singapore. — 2019.
33. Annan C.D., Youssef M.A., El-Naggar M.H. Analytical investigation of semi-rigid floor beams connection in modular steel structures // 33rd Annual General Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, June 2–4, Toronto, Ontario, Canada. — 2005. — P. GC–352. DOI: 10.13140/2.1.2010.3687.
34. Annan C.D., Youssef M.A., El-Naggar M.H. Effect of directly welded stringer-to-beam connections on the analysis and design of modular steel building floors // Advances in Structural Engineering. — 2009. — V. 12(3). — Pp. 373–383. Doi: 10.1260/136943309788708400.

35. Annan C.D., Youssef M.A., El-Naggar M.H. Experimental evaluation of the seismic performance of modular steel-braced frames // *Engineering Structures*. — 2009. — V. 31. — Pp. 1435–1446. Doi: 10.1016/j.engstruct.2009.02.024.
36. Annan C.D., Youssef M.A., El-Naggar M.H. Seismic overstrength in braced frames of modular steel buildings // *Journal of Earthquake Engineering*. — 2009. — V. 13. — Pp. 1–21. Doi: 10.1080/13632460802212576.
37. Annan C.D., Youssef M.A., El-Naggar M.H. Seismic vulnerability assessment of modular steel buildings // *Journal of Earthquake Engineering*. — 2009. — V. 13. — Pp. 1065–1088. Doi: 10.1080/13632460902933881.
38. Luo F.J., Ding C., Styles A., Bai Y. End Plate-Stiffener Connection for SHS Column and RHS Beam in Steel-Framed Building Modules // *International Journal of Steel Structures*. — 2019. — V. 19. — Pp. 1353–1365. Doi.org/10.1007/s13296-019-00214-6.
39. Zhang G., Xu L.-H., Li Z.-X. Development and seismic retrofit of an innovative modular steel structure connection using symmetrical self-centering haunch braces // *Engineering Structures*. — 2021. — V. 229. — P. 111671. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111671.
40. Lian J.-Y., Deng E.-F., He J.-M., Cai L.-M., Gao S.-C., Zhou J.-J. Numerical analysis on seismic performance of corner fitting connection in modular steel building // *Structures*. — 2021. — V. 33. — Pp. 1659–1676. Doi.org/10.1016/j.istruc.2021.05.044.
41. Khan K., Yan J.-B. Numerical studies on the seismic behaviour of a prefabricated multi-storey modular steel building with new-type bolted joints // *Advanced Steel Construction*. — 2021. — V. 17. — Pp. 1–9. Doi:10.18057/IJASC.2021.17.1.1.
42. Choi K.-S., Kim H.-J. An Analytical Study on Rotational Capacity of Beam-Column Joints in Unit Modular Frames // *International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering*. — 2015. — V. 9. — Pp. 83–86. Doi.org/10.5281/zenodo.1098106.
43. Lawson R.M. Design of high-rise modular open buildings // *Open and Sustainable Building*. — 2010. — Pp. 438–448.
44. Sultana P., Youssef M.A. Seismic performance of modular steel braced frames utilizing superelastic shape memory alloy bolts in the vertical module connections // *Journal of Earthquake Engineering*. — 2020. — V. 24. — Pp. 628–652. Doi.org/10.1080/13632469.2018.1453394.
45. 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. — V. 232. — P. 111858. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111858.
46. 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 Science*. — 2020. — V. 10. — P. 8186. Doi:10.3390/app10228186.
47. Sendanayake S.V., Thambiratnam D.P., Perera N., Chan T., Aghdamy S. Seismic mitigation of steel modular building structures through innovative inter-modular connections // *Heliyon*. — 2019. — V. 5. — P. e02751. Doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02751.

48. Pang S.D., Liew J.Y.R., Dai Z., Wang Y. Prefabricated prefinished volumetric construction joining techniques review // *Modular and Offsite Construction (MOC) Summit* Edmonton, Alberta, Canada, September 29 — October 01, 2016. — 2016. — Pp. 249–259. Doi.org/10.29173/mocs31.
49. Wang Y., Xia J., Ma R., Xu B., Wang T. Experimental study on the flexural behavior of an innovative modular steel building connection with installed bolts in the columns // *Applied Science*. — 2019. — V. 9. — P. 3468. Doi:10.3390/app9173468.
50. Chen C., Cai Y.Q., Chiew S.P. Finite element analysis of up-down steel connectors for volumetric modular construction // *Proceedings of the 12th International Conference on Steel, Space & Composite Structures*. Prague, Czech Republic 28–30 May 2014. — 2014. — Pp. 173–179.
51. Deng E.-F., Zong L., Ding Y., Dai X.-M., Lou., Chen Y. Monotonic and cyclic response of bolted connections with welded cover plate for modular steel construction // *Engineering Structures*. — 2018. — V. 167. — P. 407–419. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.028.
52. Zhao F., Yu Y., Lin S., Ding F. Evaluation of the working mechanisms and simplified models of endplate-type inter-module connections // *Structures*. — 2021. — V. 32. — P. 562–577. Doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.034.
53. Hong. S.G., Lee E.J. Response modification factor for lightweight steel panel-modular structures // *15th World Conference on Earthquake Engineering* Lisbon, Portugal, 2012. — V. 5. — P. 3733–3742.
54. Lee S., Park J., Shon S., Kang C. Seismic performance evaluation of the ceiling-bracket-type modular joint with various bracket parameters // *Journal of Constructional Steel Research*. — 2018. — V. 150. — P. 298–325. Doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.08.008.
55. Sanches R., Mercan O. Vertical post-tensioned connection for modular steel buildings // *Proceedings of the 12th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Quebec, Canada. — 2019.
56. Chen, Z., Wang, J., Liu, J., Khan, K. Seismic behavior and moment transfer capacity of an innovative self-locking inter-module connection for modular steel building // *Engineering Structures*. — 2021. — V. 245. — P. 112978. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112978.
57. Грановский, А.В. К оценке сейсмостойкости зданий, изготовленных по объемно-модульной технологии фирмы «Кнауф» / А.В. грановский, В.А. Смирнов, М.В. Федеров, А.С. Сазонов, А.М. Елутин // *Промышленное и гражданское строительство*. — 2020. — № 2. — С. 34–39. Doi: 10.33622/0869-7019.2020.02.34-39.
58. Zhang J.-F., Pang S.-Y., Zhou Y.-S., Deng E.-F., Wang B., Wen M.-G., Ye L., Guo X.-S. Axial compressive behavior of non-symmetric cold-formed angular column with complex edge // *Thin-Walled Structures*. — 2021. — V. 162. — P. 107625. Doi.org/10.1016/j.tws.2021.107625.
59. Zhang J.-F., Zhao J.-J., Deng E.-F., Wang H., He J.-M., Yu H.-X., Fan Y.-F. Component method based rotation performance and design method for the connection in ATLS modular house // *Thin-Walled Structures*. — 2021. — V. 164. — P. 107803. Doi.org/10.1016/j.tws.2021.107803.

60. Холопов, И.С. Анализ напряженно-деформированного состояния быстровозводимого модульного здания / И.С. Холопов, В.С. Широков, А.В. Соловьев, Ю.Д. Макаров // Промышленное и гражданское строительство. — 2015. — № 6. — С. 15–19.
61. Холопов, И.С. Усиление несущих конструкций и узловых соединений быстровозводимого модульного здания с целью обеспечения его безопасной эксплуатации / И.С. Холопов, В.С. Широков, А.В. Соловьев // Вестник липецкого государственного технического университета. — 2015. — № 4. — С. 56–62.
62. Широков, В.С. Анализ конструктивного исполнения серийных модульных зданий / В.С. Широков, А.В. Соловьев // Градостроительство и архитектура. — 2018. — Т. 8, № 1. — С. 24–27. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.01.4.
63. 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. — V. 110. — Pp. 244–257. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.11.034.
64. Cho B.-H., Lee J.-S., Kim H., Kim D.-J. Structural performance of a new blind-bolted frame modular beam-column connection under lateral loading // Applied Sciences. — 2019. — V. 9. — P. 1929. Doi.org/10.3390/app9091929.
65. Gatheeshgar P., Parker S., Askew K., Poologanathan K., Navaratnam S., McIntosh A., Small D.W. Flexural behaviour and design of modular construction optimised beams // Structures. — 2021. — V. 32. — Pp. 1048–1068. Doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.009.
66. Hong. S.G, Lee E.J. Response modification factor for lightweight steel panel-modular structures // 15th World Conference on Earthquake Engineering Lisbon, Portugal, 2012. — V. 5. — P. 3733–3742.
67. 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. — V. 34. — P. 1903–1922. Doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.114.
68. Shi F., Wang H., Zong L., Ding Y., Su J. Seismic behavior of high-rise modular steel constructions with various module layouts // Journal of Building Engineering. — 2020. — V. 31. — P. 101396. Doi.org/10.1016/j.jobeb.2020.101396.
69. Teribele A., Turkienicz B. Generative model and fixing guidelines for modular volumetric architecture // Revista de la Construcción. — 2018. — V. 17, n. 3. — Pp. 517–530. DOI: 10.7764/RDLC.17.3.517.
70. Doh J.H., Ho N.M., Miller D., Peters T., Carlson D. Steel Bracket Connection on Modular Buildings // Journal of Steel Structures & Construction. — 2016. — V. 2. — P. 1000121. Doi: 10.4172/2472-0437.1000121.
71. Srisangeerthan S., Hashemi M.J., Rajeev P., Gad E., Fernando S. Fully-modular buildings through a proposed inter-module connection // Proceedings of the 10th International Conference on Structural Engineering and Construction Management (ICSECM 2019). — 2020. — V. 94. — Pp. 303–312. Doi.org/10.1007/978-981-15-7222-7_26.
72. Farajian M., Sharafi P., Kildashti K. The influence of inter-module connections on the effective length of columns in multi-story modular steel frames // Journal of Constructional Steel Research. — 2021. — V. 177. — P. 106450. Doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106450.

Shirokov Viacheslav Sergeevich

LLC «SamaraNIPIneft», Samara, Russia

E-mail: ShirokovViacheslav@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6285-8895>

RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=665300

Researcher ID: <https://www.researcherid.com/rid/N-5278-2016>

Research Gate: <https://www.researchgate.net/profile/Viacheslav-Shirokov>

Design features of modular buildings

Abstract. The paper is devoted to modular buildings as a current topic of modern construction. A significant number of studies on this topic have appeared both in Russia and abroad in last years. It is necessary to classify modular buildings and highlight their design features to systematize the research.

The main distinguishing feature of modular construction is the erection of a structure from volumetric modular blocks manufactured at the factory, each of which must also fully meet the requirements of functional, technical, economic feasibility and architectural expressiveness.

Steel or wood is a common materials for modular constructions. Steel modular buildings have become more widespread due to their greater bearing capacity, so the paper provides a classification of modular buildings with a steel structure.

Modular buildings are classified according to the following features: structural system of the building (arrangement and load transmission from one module to other); framework of modules (bearing structures of individual modules); nodal connections. There is two types of nodal connections: intermodular (joints of modules to each other) and intramodular (joints of beams and columns inside the module).

Based on a review of literature sources and an analysis of advantages and disadvantages, the most common structural solutions for modular buildings in the Russian Federation were identified: buildings from stacked modules with support columns, intermodular joints on welding and welded intramodular joints. However, this provision does not limit research on modular buildings of other design solutions.

Keywords: building structures; modular buildings; column supported modules; load-bearing wall module; intermodule connections; intramodule connections