Технология и организация строительства

УДК 620.92

© Ю. Н. Казаков, д-р техн. наук, профессор

© О. А. Тимошук, канд. техн. наук, доцент

© Е. Д. Соколов, магистрант

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: kazakov@spbgasu.ru, Oleg-tima@mail.ru,

EgorSokov96@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-6-132-139

© Yu. N. Kazakov, Dr. Sci. Tech., Professor

© O. A. Timoschuk, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© E. D. Sokovikov, undergraduate

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: kazakov@spbgasu.ru, Oleg-tima@mail.ru,

EgorSokov96@gmail.com

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНТАЖА ЗДАНИЙ ИЗ ОБЪЕМНЫХ БЛОКОВ СО СТАЛЬНЫМ КАРКАСОМ МЕТОДОМ АВТОМАТИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТЕРЖНЕЙ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН

IMPROVING THE TECHNOLOGY OF ERECTING BUILDINGS FROM BOX-SHAPED MODULES WITH A STEEL FRAME BY THE AUTOMATIC CONNECTION METHOD USING VERTICAL RODS AND HORIZONTAL PLATES

Предложено усовершенствование технологии монтажа зданий из блоков на основе метода их автоматического соединения и новой композитной легкой модульной системы, использующей преимущества как бетона, так и стали. Композитные балки и бетонные трубчатые колонны предлагаются с плюсами бетонной системы: долговечность, устойчивость к воздействию воды, более высокая звукоизоляция, а также с плюсами стальной системы: меньший вес, более легкий и быстрый монтаж. Научная новизна метода заключается в том, что вертикальные стержни соединяют колонны по вертикали, а пластины и горизонтальная стяжная пластина соединяют соседние модули горизонтально. Отличие разработанного решения от существующих технологий заключается в том, что в этом соединении вертикальная связь между верхним и нижним модулями осуществляется вертикальным стержнем для сопротивления растягивающим усилиям, в то время как колонны сопротивляются силе сжатия. Усилия на сдвиг между верхней и нижней колоннами передаются с помощью опоры на опорную плиту, которая приваривается в нижней части колонны верхнего модуля.

Ключевые слова: композитные балки, эффективное крепление, экономичность, материалоемкость, модульная конструкция, инновационная технология.

It is proposed to improve the technology of erecting buildings from blocks based on using the method of automatic connection and a new composite light modular system including the advantages of both materials, concrete and steel. The authors offer using composite beams and concrete tubular columns, combining in this way the advantages of the concrete system (durability, resistance to water, higher sound insulation) with the advantages of the steel system (less weight, easier and faster installation). The scientific novelty of the method is that the vertical rods connect the columns vertically, and the plates and the horizontal draw plate connect adjacent modules horizontally. The difference between the developed solution and currently used technologies is that in this connection, the vertical connection between the upper and lower modules is carried out by a vertical rod to resist tensile forces, while the columns resist the compressive force. The shear forces between the upper and lower columns are transmitted by means of a support to the base plate, which is welded at the bottom of the column of the upper module.

Keywords: composite beams, effective fastening, profitability, material consumption, modular design, innovation technology.

Введение

Исследования авторов, проведенные в ходе НИР на кафедре ТСП СПбГАСУ в 2018–2020 гг., показали, что объемно-блочный метод монтажа зданий является достаточно прогрессивным и более технологичным по сравнению с кирпичными и монолитными способами строительства в РФ и за рубежом. Однако в то же время существующие методы монтажа зданий из блоков все-таки имеют следующие недостатки: высокую трудоемкость и стоимость монтажных работ, недостаточное качество и точность монтажа, низкую технологичность процессов соединения бетонных типовых конструкций^{1,2,3} [1–3, 5–7, 9–10].

Целью настоящего научного исследования является усовершенствование существующей технологии монтажа зданий из блоков на основе метода их нового более быстрого автоматического соединения и новой композитной легкой модульной системы, включающей в себя использование преимуществ как бетона, так и стали. Исходя из обобщения накопленного российского и зарубежного опыта и собственных исследований, нужно проанализировать методы различных вариантов организационно-технологических решений для строительства жилых и общественных зданий из объемных блоков и дать оценку эффективности нового метода с точки зрения практичности, экономичности и трудоемкости.

Для достижения указанной цели авторами статьи были решены следующие **задачи**:

- выполнен анализ существующего опыта использования технологии строительства из объемных блоков за рубежом и в России;
- выявлены недостатки существующих блочных технологий;
- разработана новая технология на основе принципа автоматического соединения соседних блоков с помощью стержней и пластин;
- исследована эффективность разработанного метода.

Объект исследования — технология строительного производства из объемных блоков.

Теоретико-методологические основы исследования: сбор литературных данных; системный анализ существующих конструкций и технологий; выявление существенных недостатков современных конструкций и технологий в данной сфере; моделирование и системный синтез новых технологических решений для устранения недостатков; эксперимент и оценка их эффективности; разработка рекомендаций по технологии монтажа новых блоков.

Рабочая гипотеза исследования основывается на том, что разработанная новая технология монтажа позволит существенно снизить трудоемкость и сроки строительства за счет автоматического соединения блоков и исключения многодельных процессов сварки, замоноличивания и болтового соединения, имеющихся в существующих способах.

Значение исследования состоит в том, что разработанный метод может быть использован в практической деятельности строительных организаций.

Раскроем сущность решения поставленных задач и предлагаемой технологии монтажа композитных легких модульных блоков.

Во-первых, поясним разработанную новую конструкцию блоков. Поскольку вес и размеры модулей ограничены требованиями по транспортировке и подъему, предлагается композитная легкая модульная система на основе совместного применения стальных и бетонных элементов (рис. 1). Вес пола и стенок может быть потенциально уменьшен, так как они являются двумя наиболее тяжелыми элементами модуля из металлического каркаса. Проведенный нами анализ распределения веса элементов в типовом существующем блоке-модуле с металлическим каркасом показал необходимость облегчения именно панелей пола и стен (рис. 2).

Таким образом, конструкционный легкий бетон может быть использован в плите пола, чтобы уменьшить вес модулей до 25–40 %. При этом легкий заполняющий бетон дешевле конструкционных металлических элементов и способен обеспечить хорошую теплоизоляцию и огнестойкость конструкции при эксплуатации. Кроме того, сверхлегкие перегородки из пенобетона

¹ Design for manufacturing and assembly (DfMA). Prefabricated prefabricated volumetric construction / Building and Construction Authority. URL: https://www.bca.gov.sg/Professionals/Technology/others/PPVC_Guidebook.pdf

² Design for manufacturing and assembly (DfMA). Prefabricated mechanical electrical and plumbing (MEP) systems / Building and Construction Authority. URL: https://www.bca.gov.sg/cpc/others/MEP_Guidebook_final.pdf

³ Handbook for the design of modular structures. Modular Construction Codes Board. Australia: Monash University, 2017.

Рис. 1. Предлагаемая модель новой легкой композитной системы из объемных блоков со стальными и бетонными элементами

могут быть встроены в данную модульную систему, так как они не являются несущими, но могут обеспечить требуемую акустическую и тепловую изоляцию^{4,5,6} [1–3, 5–7, 9–10].

Кроме того, создание большего свободного пространства внутри модулей — одна из актуальных задач в модульном строительстве. Композитная конструкция балки может быть применена с помощью установки опорных штифтов, так что композитное действие может быть достигнуто между сечением стальной балки и бетонной плитой, как показано на рис. 3. Расчет был выполнен авторами для систем балок и перекрытий, показанных на рис. 4, для примера массового строительства типовых жилых зданий из модулей [5]. На построенных диаграммах (см. рис. 4) отражена толщина конструкции пола, а также сравнение веса стали. Как видно, свободное пространство в модулях может быть увеличено на 20–30 % по сравнению с конструкцией из чистой стали (см. рис. 3). Тонкая балка может быть введена в систему для дальнейшего

расширения имеющегося пространства путем уменьшения толщины конструкций на 50–75 мм по сравнению с традиционной композитной балкой с плитой поверх стальной балки.

Использование колонн из чистой стали, без бетона, в модульных многоэтажных зданиях может привести к тому, что размер профиля колонны будет больше, и, таким образом, это будет приводить к более высоким затратам и меньшему свободному пространству [6]. Однако, как показано на рис. 4, введение тонких полов может не внести значительного вклада в изменение веса стали, особенно для модулей с пролетом менее

Рис. 2. Анализ распределения веса элементов в обычном типовом существующем блоке-модуле с металлическим каркасом

⁴ Design for manufacturing and assembly (DfMA). Prefabricated prefinished volumetric construction / Building and Construction Authority. URL: https://www.bca.gov.sg/Professionals/Technology/others/PPVC_Guidebook.pdf

⁵ Design for manufacturing and assembly (DfMA). Prefabricated mechanical electrical and plumbing (MEP) systems / Building and Construction Authority. URL: https://www.bca.gov.sg/cpc/others/MEP_Guidebook_final.pdf

⁶ Handbook for the design of modular structures. Modular Construction Codes Board. Australia: Monash University, 2017.

Рис. 4. Диаграммы толщины конструкции пола и веса стали в блоках, изготовленных по различным технологиям

9 м, по сравнению с традиционными конструкциями из-за большого размера балки, требуемого при тонкой полосовой конструкции. Таким образом, тонкая система полок более выгодна для модульного пролета 9 м и выше, поэтому использование стали оптимизировано, в то время как доступное пространство для монтажа увеличилось по сравнению с обычной системой из стальных полов [5].

Далее, с учетом улучшений в предложенных блоках, раскроем разработанную новую технологию их более быстрого монтажа.

Так, межмодульные соединения в модульном здании нацелены на быстрый и простой монтаж,

но в состоянии обеспечить достаточную прочность и стойкость конструкции [6]. Как показано на рис. 5 и 6, для обеспечения жесткости и прочности модульного каркаса предусмотрены жесткие сварные соединения «балка–колонна» [9]. Сварка балок и колонн может проводиться на заводе. Соединение модуля со смежными модулями по углам осуществляется через соединения балок и колонн, как показано на рис. 5. Мы предлагаем использовать балочно-балочное соединение — это соединение балок пола верхнего модуля и потолочных балок нижнего модуля, оно может быть достигнуто с помощью сварки или болтового соединения.

Рис. 5. Предлагаемая технология варианта болтовых межмодульных соединений для композитных модулей: 1 — общий вид; 2 — колонна; 3 — опирание балки; 4 — болты; 5 — вариант крепления со вставками

Сварное соединение также не является предпочтительным на строительной площадке для межмодульного соединения, так как для работы в ограниченном пространстве требуется высококвалифицированный персонал. Таким образом, нами были предложены соединения с помощью различных болтовых технологий (см. рис. 5). Наши исследования показывают, что эти соединения могут быть сконструированы таким образом, чтобы быть одновременно и пластичными, и достаточно прочными, чтобы выдерживать даже динамические, сейсмические нагрузки в стальной модульной системе [10]. С одной стороны, такой тип соединения может привести к образованию жестких соединений, в результате чего модульная конструкция будет такой же, как и обычная рамная конструкция. С другой стороны, такая конструкция соединения может быть принята за штыревые соединения при моделировании и расчете рамы.

В болтовых балочных соединениях, как показано на рис. 5, могут быть добавлены короткие сегменты как вставное устройство, предназначенные для обеспечения непрерывности между колоннами верхнего и нижнего модулей. Увеличение длины и толщины этих коротких сегмен-

тов может уменьшить длину колонны, участвующую в соединении в модуле, от 10 до 40 %.

Исследования авторов показали, что болтовые соединения требуют более строгих допусков при изготовлении, чем сварные⁷ [4, 8–11]. Большое количество болтов обычно приводит к повышению сроков монтажа на строительной площадке. Кроме того, для выполнения болтовых соединений необходимы отверстия для болтов в каждом потолке и полу модулей [5, 8]. Это может привести к необходимости выполнения внутренних работ и дорогостоящей доработки на строительной площадке. Несмотря на то что обеспечение большего допуска для болтового соединения может упростить установку, для боковой устойчивости высотного модульного здания это нежелательно. Более того, в современной практике в модульной конструкции часто требуется 100 %-ная отделка стен, поэтому отверстия для доступа с помощью болтов и с этой точки зрения не желательны [5]. Поэтому болтовое балочное соединение не может быть идеальным для нашей стальной модульной системы.

Для решения вышеперечисленных вопросов авторами статьи и была разработана новая технология соединения — это соединение колонн

⁷ Handbook for the design of modular structures. Modular Construction Codes Board. Australia: Monash University, 2017.

Рис. 6. Разработанный усовершенствованный способ монтажа колонн модульных блоков на основе автоматического соединения стальных стержней и пластин: 1 — состав элементов; 2 — принцип действия

верхнего модуля с колоннами нижних модулей, а такие соединения могут быть выполнены вне модулей. На рис. 6 показано соединение «колонны — столбы», при котором вертикальные стержни соединяют колонны вертикально, а пластины и горизонтальная стяжная пластина соединяют соседние модули горизонтально [5, 11]. Научная новизна и отличие разработанного решения от существующих технологий заключается в том, что в этом соединении вертикальная связь между верхним и нижним модулями осуществляется *вертикальным стержнем* для сопротивления растягивающим усилиям, в то время как колонны сопротивляются силе сжатия [7]. Усилия на сдвиг между верхней и нижней колоннами передаются с помощью опоры на *опорную плиту*, которая приваривается в нижней части колонны верхнего модуля.

Для соединения, показанного на рис. 6 (2), четыре стержня внутри прямоугольных бетонных трубных колонн предварительно напряжены, чтобы предотвратить деформацию колонн при экстремальных боковых нагрузках, таких, например, как ветровая на высоте или сейсмическая нагрузка.

В 2020 г. разработанная технология была экспериментально применена авторами на трех стройках Санкт-Петербурга в ООО «МСК».

Фотофиксация и хронометраж на этих зданиях показали снижение трудоемкости и стоимости монтажа на 7–15 % по сравнению с существующими методами монтажа традиционных бетонных блоков без стальных элементов с помощью типовых болтовых и сварочных операций.

Выводы

1. Показано, что требования к транспортировке и подъему ограничивают вес и габариты модуля, поэтому предлагается новая композитная и более легкая (по сравнению с существующими железобетонными блоками в РФ и за рубежом) модульная система, включающая в себя использование преимуществ как бетона, так и стали. Композитные балки и бетонные трубчатые колонны предлагаются для модульной конструкции, используя преимущества бетонной системы: долговечность, устойчивость к воздействию воды, более высокая звукоизоляция, а также преимущества стальной системы: гибкий и длинный пролет, более легкий и быстрый мон-

таж. Легкая бетонная плита и легкие перегородки позволяют снизить вес модуля до 50 %, что приводит к снижению необходимой грузоподъемности и стоимости использования крана и общей трудоемкости монтажа.

2. Показано, что разработанная новая модульная конструкция с длинным пролетом до 12 м позволяет сократить количество колонн, что обеспечивает большее открытое пространство и меньшее количество соединений, которые необходимо выполнить на строительной площадке. Таким образом, применение предложенных облегченных модульных конструкций может быть расширено — от строительства жилых и коммерческих зданий до более широких областей применения, таких как промышленные и складские здания, требующие большего открытого пространства, но с более высокой конструктивной нагрузкой на пол модуля.

3. Предложена усовершенствованная технология монтажа объемных блоков таким образом, чтобы модули могли соединяться автоматически с помощью балок и колонн, как из верхнего, так и из нижнего модулей. Соединения балок с колоннами внутри модуля должны быть спроектированы как жесткие. Для модулей с полной внутренней отделкой соединения между модулями должны соединяться снаружи модулей. Для облегчения такой работы предлагается конструкция стыков, соединяющая модули через вертикальный стержень и горизонтальную соединительную пластину. Рекомендуется моделировать вертикальные стяжные соединения между верхним и нижним модулями как штыревые.

4. Показано, что, так как модули соединены по углам, плита перекрытия каждого модуля действует как отдельная оболочка для передачи горизонтальной нагрузки на систему балок, что сильно отличает модульные конструкции от зданий, построенных традиционными технологиями. Рекомендуется, чтобы при монтаже всего модульного здания учитывался этот факт для обеспечения общей жесткости здания. Предложенная технология существенно сокращает трудоемкость монтажа блоков и срок строительства всего здания.

5. В 2020 г. разработанная технология была экспериментально применена авторами на трех стройках Санкт-Петербурга в ООО «МСК».

Фотофиксация и хронометраж на этих зданиях показали снижение трудоемкости и стоимости монтажа на 7–15 % по сравнению с существующими методами монтажа традиционных бетонных блоков без стальных элементов с помощью типовых болтовых и сварочных операций.

Библиографический список

1. Казаков Ю. Н., Копанская Л. Д., Тишкин Д. Д., Захаров В. П. Основы строительного производства. СПб.: СПбГАСУ, 2016. 120 с.
2. Никольский М. С., Хренов В. И., Казаков Ю. Н. Строительство жилых домов на основе панелей типа «сэндвич». СПб.: СПбГАСУ, 2015. 110 с.
3. Казаков Ю. Н. Технологии быстрого строительства экономичных малоэтажных жилых домов на основе оптимизированных легких сэндвич-панельных систем // *Academia. Архитектура и строительство*. 2017. № 4. С. 95–102.
4. Сычёв С. А., Бадьин Г. М. Перспективные технологии строительства и реконструкции зданий. СПб.: Лань, 2017. 292 с.
5. Соколов Е. Д. Совершенствование монтажа жилых домов из блоков: дис. ... магистра. СПб.: СПбГАСУ, 2020. 98 с.
6. Liew JYR, Dai Z, Wang Y. Prefabricated prefinished volumetric construction in high-rise buildings // *Proceedings of the 11th Pacific Structural Steel*, Shanghai, China, 2016. Pp. 223–230.
7. Pang SD, Liew JYR, Dai Z, Wang Y. Prefabricated prefinished volumetric construction joining techniques review // *Proceedings of the Modular and Site Construction Summit*, Edmonton, Canada, 2016. Pp. 249–256.
8. Srisangeerthanan S., Hashemi J., Rajeev P., Gad E., Fernando S. Numerical study on the effects of diaphragm stiffness and strength on the seismic response of multi-story modular buildings // *Eng. Struct.* 2018. Vol. 163. Pp. 25–37.
9. Farnsworth D. Modular tall building design at Atlantic Yards B2 // *Proceedings of CTBUH 2014 International Conference*, Shanghai, China, 2014. Pp. 492–499.
10. Torbaghan M. K., Sohrabi M. R., Kazemi H. H. Investigating the behavior of specially pre-fabricated steel moment connection under cyclic loading // *Adv. Steel Constr.* 2018. Vol. 14 (3). Pp. 412–423.
11. Deng E. F., Yan J. B., Ding Y., Zong L., Li Z. X., Dai X. M. Analytical and numerical studies on steel columns with novel connections in modular construction // *Int. J. Steel Struct.* 2017. Vol. 17 (4). Pp. 1613–1626.

References

1. Kazakov Yu. N., Kopanskaya L. D., Tishkin D. D., Zakharov V. P. *Osnovy stroitel'nogo proizvodstva* [Fundamentals of construction production]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2016, 120 p.
2. Nikol'skiy M. S., Khrenov V. I., Kazakov Yu. N. *Stroitel'stvo zhilykh domov na osnove paneley tipa «sendvich»* [Construction of residential buildings based on using “sandwich” type panels]. St. Petersburg, SPbGASU, 2015, 110 p.
3. Kazakov Yu. N. *Tekhnologii bystrogo stroitel'stva ekonomichnykh maloetazhnykh zhilykh domov na osnove optimizirovannykh legkikh sendvich-panel'nykh sistem* [Technologies of rapid construction of economical low-rise residential buildings based on using optimized light sandwich panel systems]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo – Academia. Architecture and construction*, 2017, no 4, pp. 95–102.
4. Sychyov S. A., Bad'in G. M. *Perspektivnye tekhnologii stroitel'stva i rekonstruktsii zdaniy* [Cutting-edge technologies of construction and reconstruction of buildings]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2017, 292 p.
5. Sokovikov E. D. *Sovershenstvovanie montazha zhilykh domov iz blokov. Disc. Magistra* [Improving the installation of residential buildings from blocks. MSc diss.]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2020, 98 p.
6. Liew JYR, Dai Z, Wang Y. *Prefabricated prefinished volumetric construction in high-rise buildings*. *Proceedings of the 11-th Pacific Structural Steel Conference*, Shanghai, China, 2016, pp. 223–230.
7. Pang SD, Liew JYR, Dai Z, Wang Y. *Prefabricated prefinished volumetric construction joining techniques review*. *Proceedings of the Modular and Site Construction Summit*, Edmonton, Canada, 2016, pp. 249–256.
8. Srisangeerthanan S., Hashemi J., Rajeev P., Gad E., Fernando S. Numerical study on the effects of diaphragm stiffness and strength on the seismic response of multi-story modular buildings. *Eng. Struct.*, 2018, vol. 163, pp. 25–37.
9. Farnsworth D. Modular tall building design at Atlantic Yards B2. *Proceedings of CTBUH 2014 International Conference*, Shanghai, China, 2014, pp. 492–499.
10. Torbaghan M. K., Sohrabi M. R., Kazemi H. H. Investigating the behavior of specially pre-fabricated steel moment connection under cyclic loading. *Adv. Steel Constr.*, 2018, vol. 14 (3), pp. 412–423.
11. Deng E. F., Yan J. B., Ding Y., Zong L., Li Z. X., Dai X. M. Analytical and numerical studies on steel columns with novel connections in modular construction. *Int. J. Steel Struct.*, 2017, vol. 17 (4), pp. 1613–1626.