

Влияние податливости внутримодульных узлов на частоту собственных колебаний модульного здания

Вячеслав Сергеевич Широков

Самарский государственный технический университет (СамГТУ); г. Самара, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Внедрение модульных зданий приводит к необходимости развития методов их расчета, в том числе на динамические воздействия. Одним из основных параметров при вычислении нагрузок от динамических воздействий является установление частот собственных колебаний сооружения. Предмет исследования — собственная частота колебаний модульных зданий. Цель исследования — определение влияния податливости внутримодульных узлов на частоты колебаний модульных зданий.

Материалы и методы. Рассматривается вопрос выявления первой собственной частоты колебаний модульного здания с полужесткими внутримодульными узлами и влияния податливости узлов на частоту. Предложена и обоснована аналитическая формула определения собственных частот колебаний, учитывающая жесткостные параметры модульных зданий и податливость внутримодульных узлов. Предложенная формула имеет достаточную точность для инженерных расчетов. При этом она позволяет анализировать частоты колебаний модульных зданий с разными параметрами без построения расчетных схем в вычислительных комплексах, что значительно ускоряет поиск рациональных конструктивных решений.

Результаты. Согласно полученным результатам, расхождение в значениях частот, вычисленных по методу конечных элементов и аналитически, для одноэтажного здания при разных соотношениях вращательных жесткостей узлов не превышает 1,5 %. При рассмотрении многоэтажного модульного здания разность определения собственных частот колебания возрастает с увеличением числа этажей, но не превышает 10 % для трех этажей.

Выводы. На основе рассмотрения примера модульного здания показано, что необходимо учитывать податливость узлов для установления корректного значения собственных частот колебаний. Неучет вращательной жесткости узлов может привести к погрешности определения динамических воздействий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: модульные здания, собственная частота колебаний, динамические воздействия, податливые узлы, рамные узлы, вращательная жесткость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Широков В.С. Влияние податливости внутримодульных узлов на частоту собственных колебаний модульного здания // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 10. С. 1556–1562. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1556-1562

Автор, ответственный за переписку: Вячеслав Сергеевич Широков, ShirokovViacheslav@gmail.com.

Influence of compliance of intramodular joints on the natural vibrations frequency of a modular building

Viacheslav S. Shirokov

Samara State Technical University (SSTU); Samara, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The implementation of modular buildings leads to the necessity to develop methods of their calculation, including dynamic loads too. One of the main parameters in the calculation of loads from dynamic effects is the determination of natural frequencies of vibrations of the structure. The subject of research is the natural vibrational frequency of modular buildings. The aim of the research is to determine the effect of the compliance of intramodular joints on the vibrational frequencies of modular buildings.

Materials and methods. The paper deals with the determination of the first natural frequency of vibration of a modular building with semi-rigid intramodular joints, and the influence of the compliance of the joints on the frequency. The author of the paper proposed and substantiated an analytical formula for determining the natural vibration frequencies, taking into account the stiffness parameters of modular buildings and the rigidity of intramodular joints. The proposed formula has sufficient accuracy for engineering calculations. At the same time, it allows to analyze the natural vibrational frequencies of modular buildings with different parameters without constructing calculation schemes in computer systems, which significantly speeds up the search for rational design solutions.

Results. According to the obtained results, the discrepancy in the frequency values calculated by the finite element method and analytically for a one-storey building with different ratios of the rotational stiffness of the joints does not exceed 1.5 %. For a multi-storey modular building, the difference in determining the natural vibration frequencies increases with the number of storeys, but does not exceed 10 % for three storeys.

Conclusions. Based on the example of a modular building, it is shown that it is necessary to take into account the joint rigidity to determine the correct value of natural vibrational frequencies. Ignoring of the rotational stiffness of the joints can lead to an error in determining the dynamic effects.

KEYWORDS: modular buildings, natural vibration frequency, dynamic loads, semi-rigid joints, rigid joints, rotational stiffness

FOR CITATION: Shirokov V.S. Influence of compliance of intramodular joints on the natural vibrations frequency of a modular building. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(10):1556-1562. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1556-1562 (rus.).

Corresponding author: Viacheslav S. Shirokov, ShirokovViacheslav@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие в практике строительства активно внедряются и применяются модульные здания. Модульное здание представляет собой сооружение из набора связанных между собой модулей. Модуль — законченный пространственный строительный элемент здания, выполняющий несущие, ограждающие и функциональные требования.

Модульные здания классифицируются по материалу несущих конструкций, конструктивной схеме, исполнению каркаса модулей и узловым соединениям [1]. В настоящем исследовании рассматриваются модульные здания из стальных составленных модулей с несущими угловыми колоннами.

Внедрение модульных зданий приводит к необходимости развития методов их расчета. При этом особое внимание заслуживает работа здания при динамических воздействиях (сеймика, пульсация ветра). Важнейший параметр при вычислении нагрузок от динамических воздействий — определение собственных частот колебаний сооружения. Этим вопросом занимается ряд авторов [2–8]. В статье [4] приводится обобщение существующих результатов установления частот колебаний разных модульных зданий из упомянутых публикаций. Результаты сравниваются с приближенными формулами, указанными в австралийских нормах проектирования. Согласно сравнению, только для определенных частных случаев можно использовать приближенную формулу установления частоты колебаний.

В труде [9] получена формула определения собственных частот колебаний модульного здания с рамными внутримодульными соединениями, учитывающая жесткостные параметры модулей. В работах [10, 11] показано, что соединения ригелей модулей с колоннами на сварке не всегда рамные, существует множество конструктивных решений, при которых эти узлы являются полужесткими (податливыми). Также в настоящее время многие авторы проводят исследования влияния жесткости узлов на работу стальных конструкций [12–19]. Уточнение расчетов, в том числе определение частот колебаний, с учетом податливости узлов — актуальное направление исследований.

Цель данной работы — определение первой собственной частоты колебаний модульного здания с полужесткими внутримодульными узлами и оценка влияния податливости узлов на частоту.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для выявления частоты колебаний модуля необходимо определить коэффициент жесткости одной рамы [9], который вычисляется с помощью горизонтальных перемещений от единичной нагрузки (рис. 1). Суммарное перемещение складывается из упругой деформации, обусловленной жесткостью самой рамы и дополнительными перемещениями от податливости узлов:

$$\Delta = \Delta_E + \Delta_{S1} + \Delta_{S2}, \quad (1)$$

где Δ_E — упругое перемещение; Δ_{S1} , Δ_{S2} — дополнительные перемещения, вызванные податливостью узлов крепления нижнего и верхнего ригелей, соответственно.

Упругое перемещение согласно публикации [9]:

$$\Delta_E = \frac{P \cdot h^3}{24 \cdot E \cdot I_1} \left(1 + \frac{I_1 \cdot l_2}{I_2 \cdot h} \right), \quad (2)$$

где P — единичная горизонтальная нагрузка, приложенная в верхнем узле рамы; h — высота модуля; E — модуль упругости; I_1 , I_2 — моменты инерции стойки и ригеля соответственно; l_2 — пролет ригеля.

Так как узлы обладают конечной жесткостью, то при деформации рамы угол между ригелем и стойкой не сохраняется прямым. Изменение угла, вызванное податливостью крепления, для нижнего узла — φ_1 , для верхнего — φ_2 (рис. 2). В силу симметричности деформации и эпюры изгибающих моментов от единичной горизонтальной нагрузки для определения линейных деформаций для каждого узла рассматривается половина рамы. Тогда дополнительные перемещения от податливости узлов:

$$\Delta_{S1} = \tan(\varphi_1) \frac{h}{2}; \quad (3)$$

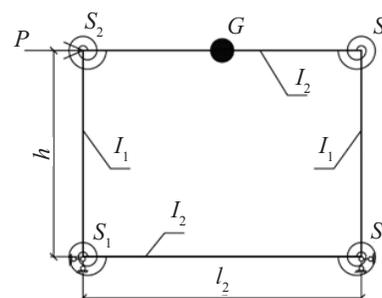


Рис. 1. Расчетная схема рамы

Fig. 1. Frame design scheme

$$\Delta_{S_2} = \tan(\varphi_2) \frac{h}{2}. \quad (4)$$

Углы деформаций связаны с вращательной жесткостью узла следующими выражениями:

$$\varphi_1 = \frac{M}{S_1}; \quad (5)$$

$$\varphi_2 = \frac{M}{S_2}, \quad (6)$$

где S_1, S_2 — вращательные жесткости нижнего и верхнего узлов соответственно; M — момент в узле от единичной нагрузки:

$$M = \frac{P \cdot h}{4}. \quad (7)$$

Подставляя выражения (5) и (6) в (3) и (4) соответственно, с учетом выражения (7) и малости углов получим:

$$\Delta_{S1} = \frac{P \cdot h^2}{8 \cdot S_1}; \quad (8)$$

$$\Delta_{S2} = \frac{P \cdot h^2}{8 \cdot S_2}. \quad (9)$$

В итоге суммарное перемещение от единичной нагрузки:

$$\Delta = \frac{P \cdot h^2}{8} \left(\frac{h}{3 \cdot E \cdot I_1} + \frac{l_2}{3 \cdot E \cdot I_1} + \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} \right). \quad (10)$$

Первая собственная частота колебаний:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \times \sqrt{\frac{8 \cdot g}{c^2 \cdot G \cdot h^2 \cdot \left(\frac{h}{3 \cdot E \cdot I_1} + \frac{l_2}{3 \cdot E \cdot I_1} + \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} \right)}}, \quad (11)$$

где g — ускорение свободного падения; c — количество этажей здания; G — масса, собранная на одну раму.

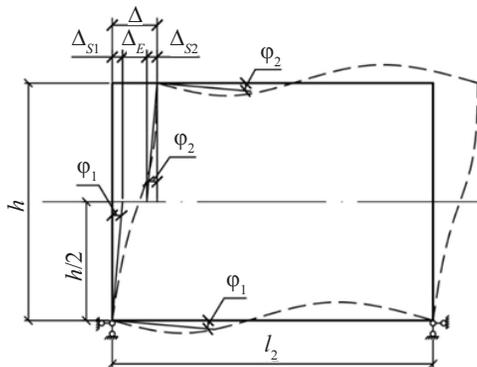


Рис. 2. Схема рамы к определению горизонтальных перемещений

Fig. 2. Frame scheme for displacement definition

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для апробации полученной формулы определения первой собственной частоты колебаний рассмотрено модульное здание с сечениями, принятыми из работы [20]: $I_1 = 561,8 \text{ см}^4$, $I_2 = 1148,38 \text{ см}^4$. Размеры модуля приняты $2,8 \times 6,6 \times 3(h)$ м. Вертикальная нагрузка на перекрытия (нижнее и верхнее) $p = 120 \text{ кг/м}^2$.

Оценка точности установления частоты колебаний при разных значениях вращательных жесткостей нижнего и верхнего узлов выполнена для одноэтажного здания. Данную оценку удобно производить через соотношение вращательных жесткостей:

$$k_S = \frac{S_2}{S_1}. \quad (12)$$

Результаты определения первой собственной частоты методом конечных элементов (МКЭ) и по формуле (11) представлены в табл. 1. В табл. 1 знак ∞ соответствует рамным узлам. Согласно полученным результатам, разность определения собственной частоты колебания одноэтажного модульного здания по формуле (11) и по МКЭ не превышает 1,5 %.

Влияние податливости узлов на частоты колебаний модульного здания установлено при равных вращательных жесткостях узлов для одно-, двух- и трехэтажного здания с параметрами модуля, принятыми выше.

Согласно результатам, представленным в табл. 2, расхождение в значениях частот, вычисленных по МКЭ и аналитически, возрастает с увеличением числа этажей, но не превышает 10 % для трехэтажного здания. Таким образом, предложенная формула имеет достаточную точность для инженерных расчетов. При этом она позволяет анализировать частоты колебаний модульных зданий с разными параметрами без построения расчетных схем в вычислительных комплексах, что значительно ускоряет поиск рациональных конструктивных решений.

В рассмотренном примере разность собственных частот колебаний здания с рамными и податливыми узлами достигает 20 %. Неучет вращательной жесткости узлов может привести к погрешности определения динамических воздействий. При расчете модуля с рамными узлами частота колебаний увеличивается, следовательно, уменьшается коэффициент динамичности ветровой нагрузки, а коэффициент динамичности сейсмического воздействия может уменьшиться.

Результаты определения частот собственных колебаний модульного здания с разным количеством этажей приведены на рис. 3. На графике сплошными линиями показано изменение частоты, вычисленной в ПК Лира-САПР, штрихпунктирными — по формуле (11). Для одноэтажного здания частоты, вычисленные аналитически и по МКЭ, практически совпадают. Штриховой линией на рис. 3 показано значение частоты колебаний здания с рамными узлами, опре-

Табл. 1. Результаты вычисления частот колебаний при разных соотношениях жесткостей узлов

Table 1. Results of vibrational frequencies calculation for different joint stiffness ratio

$S_{j,i}$, кНм/рад kNm/rad	Метод Method	Соотношение k_s / k_s ratio					
		1	2	4	8	16	∞
2000	МКЭ / FEM	2,673	2,809	2,892	2,938	2,963	2,989
	Формула (11) / Formula (11)	2,670	2,798	2,87	2,907	2,927	2,947
4000	МКЭ / FEM	2,948	3,034	3,082	3,108	3,121	3,135
	Формула (11) / Formula (11)	2,947	3,031	3,075	3,098	3,110	3,122
6000	МКЭ / FEM	3,061	3,123	3,157	3,175	3,184	3,193
	Формула (11) / Formula (11)	3,060	3,122	3,154	3,171	3,179	3,187
8000	МКЭ / FEM	3,122	3,171	3,197	3,211	3,218	3,225
	Формула (11) / Formula (11)	3,122	3,171	3,196	3,209	3,215	3,222
10 000	МКЭ / FEM	3,161	3,201	3,222	3,233	3,239	3,244
	Формула (11) / Formula (11)	3,161	3,201	3,222	3,232	3,238	3,243
12 000	МКЭ / FEM	3,187	3,221	3,239	3,248	3,253	3,258
	Формула (11) / Formula (11)	3,187	3,222	3,240	3,248	3,253	3,257
14 000	МКЭ / FEM	3,206	3,226	3,242	3,250	3,254	3,258
	Формула (11) / Formula (11)	3,207	3,237	3,252	3,260	3,264	3,268
16 000	МКЭ / FEM	3,221	3,230	3,244	3,251	3,254	3,258
	Формула (11) / Formula (11)	3,222	3,248	3,262	3,269	3,272	3,276
18 000	МКЭ / FEM	3,233	3,256	3,269	3,275	3,278	3,281
	Формула (11) / Formula (11)	3,234	3,257	3,270	3,276	3,279	3,282
20 000	МКЭ / FEM	3,242	3,263	3,274	3,280	3,283	3,286
	Формула (11) / Formula (11)	3,243	3,265	3,276	3,281	3,284	3,287
22 000	МКЭ / FEM	3,250	3,269	3,279	3,284	3,287	3,290
	Формула (11) / Formula (11)	3,251	3,271	3,281	3,286	3,288	3,291
24 000	МКЭ / FEM	3,256	3,274	3,283	3,288	3,290	3,293
	Формула (11) / Formula (11)	3,257	3,276	3,285	3,290	3,292	3,294
26 000	МКЭ / FEM	3,262	3,278	3,287	3,291	3,293	3,296
	Формула (11) / Formula (11)	3,263	3,280	3,288	3,293	3,295	3,297
28 000	МКЭ / FEM	3,266	3,282	3,290	3,294	3,296	3,298
	Формула (11) / Formula (11)	3,268	3,284	3,292	3,296	3,298	3,300
30 000	МКЭ / FEM	3,271	3,285	3,293	3,296	3,298	3,300
	Формула (11) / Formula (11)	3,272	3,287	3,294	3,298	3,300	3,302
∞	МКЭ / FEM	3,330	3,330	3,330	3,330	3,330	3,330
	Формула (11) / Formula (11)	3,332	3,332	3,332	3,332	3,332	3,332

деленное по МКЭ. Вертикальные линии на графике: значение вращательной жесткости узлов, определенное авторами [20] ($S_{j,i} = 2235$ кНм/рад), и значение вращательной жесткости, при которой внутримодульные узлы можно классифицировать как рамные согласно Eurocode 3 ($S_{j,i} = 24\,293$ кНм/рад).

Как следует из графика (рис. 3), частота колебаний зданий имеет нелинейную зависимость от вращательной жесткости внутримодульных узлов. При низких значениях вращательных жесткостей наблюдается значительное расхождение частот по сравнению с рамными узлами. На примере рассмотренного здания ($S_{j,i} = 2235$ кНм/рад) видно, что необходимо учитывать податливость узлов для

определения корректного значения собственных частот колебаний. При значениях вращательных жесткостей узлов, близких к рамным узлам по классификации Eurocode 3, частоты колебаний здания с учетом податливости достаточно близки к частотам здания с рамными узлами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе выполненной работы можно сделать следующие выводы.

Уточнение расчетов модульных зданий, в том числе установление собственных частот колебаний, с учетом податливости узлов является актуальным направлением исследований в настоящее время.

Табл. 2. Результаты вычисления частот колебаний для модульных зданий с разным количеством этажей

Table 2. Results of vibrational frequencies calculation for different numbers of storeys

$S_1 = S_2, \text{ кНм/рад}$ kNm/rad	МКЭ / FEM			Формула (11) / Formula (11)			Разность, % / Discrepancy, %		
	1-этажное 1-storey	2-этажное 2-storey	3-этажное 3-storey	1-этажное 1-storey	2-этажное 2-storey	3-этажное	1-этажное 1-storey	2-этажное 2-storey	3-этажное 3-storey
2000	2,673	1,449	0,980	2,670	1,335	0,890	0,11	7,87	9,18
4000	2,948	1,600	1,082	2,947	1,473	0,982	0,03	7,94	9,24
6000	3,061	1,662	1,124	3,060	1,530	1,020	0,03	7,94	9,25
8000	3,122	1,695	1,147	3,122	1,561	1,041	0	7,91	9,24
10 000	3,161	1,716	1,161	3,161	1,580	1,054	0	7,93	9,22
12 000	3,187	1,731	1,171	3,187	1,594	1,062	0	7,91	9,31
14 000	3,206	1,742	1,178	3,207	1,603	1,069	-0,03	7,98	9,25
16 000	3,221	1,750	1,184	3,222	1,611	1,074	-0,03	7,94	9,29
18 000	3,233	1,756	1,188	3,234	1,617	1,078	-0,03	7,92	9,26
20 000	3,242	1,761	1,192	3,243	1,622	1,081	-0,03	7,89	9,31
22 000	3,250	1,766	1,195	3,251	1,625	1,084	-0,03	7,98	9,29
24 000	3,256	1,769	1,197	3,257	1,629	1,086	-0,03	7,91	9,27
26 000	3,262	1,772	1,199	3,263	1,632	1,088	-0,03	7,9	9,26
28 000	3,266	1,775	1,201	3,268	1,634	1,089	-0,06	7,94	9,33
30 000	3,271	1,777	1,202	3,272	1,636	1,091	-0,03	7,93	9,23
∞	3,330	1,810	1,225	3,332	1,666	1,111	-0,06	7,96	9,31

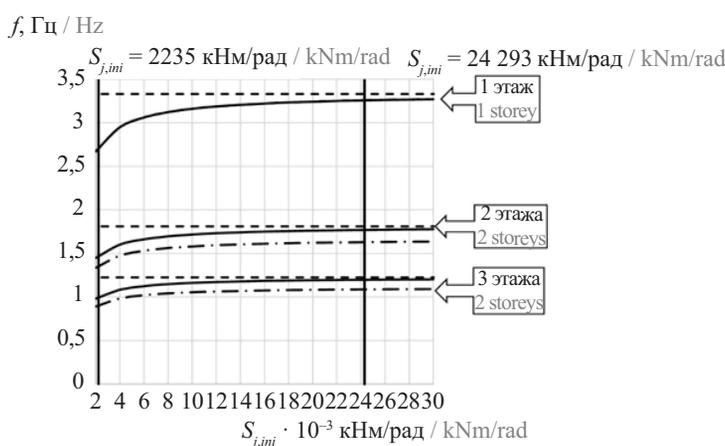


Рис. 3. Изменение первой частоты собственных колебаний модульного здания различной этажности

Fig. 3. First mode natural vibrational frequency changing for different numbers of storeys

Автором работы предложена и обоснована аналитическая формула определения собственных частот колебаний, учитывающая жесткостные параметры модульных зданий и податливость внутримодульных узлов. Предложенная формула имеет достаточную точность для инженерных расчетов. При этом она позволяет анализировать частоты колебаний модульных зданий с разными параметрами без построения расчетных схем в вычислительных комплексах, что значительно ускоряет поиск рациональных конструктивных решений.

Жесткость внутримодульных узлов может оказывать существенное влияние на собственные частоты

колебаний, что было продемонстрировано на примере рассмотренного модульного здания.

В рамках данного исследования показано, что податливость узлов соединения ригеля и стойки модульных зданий влияет на их напряженно-деформированное состояние. Предложенная аналитическая формула имеет хорошую сходимость с методом конечных элементов. Поиск рациональных конструктивных решений удобно вести с помощью аналитических методов расчета. Например, с применением вращательной жесткости внутримодульных узлов можно регулировать частоты колебания здания и, следовательно, усилия в элементах конструкции при динамических воздействиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Широков В.С. Конструктивные особенности модульных зданий // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14. № 3. DOI: 10.15862/03SAVN322
2. 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. Vol. 213. P. 110628. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110628
3. 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. 2018.
4. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Structural Response of Modular Buildings — An Overview // Journal of Building Engineering. 2018. Vol. 16. Pp. 45–56. DOI: 10.1016/j.job.2017.12.008
5. Annan C.D., Youssef M.A., El Naggar M.H. Seismic vulnerability assessment of modular steel buildings // Journal of Earthquake Engineering. 2009. Vol. 13. Issue 8. Pp. 1065–1088. DOI: 10.1080/13632460902933881
6. Fathieh A., Mercan O. Seismic evaluation of modular steel buildings // Engineering Structures. 2016. Vol. 122. Pp. 83–92. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.04.054
7. Malo K.A., Abrahamsen R.B., Bjertnæs M.A. Some structural design issues of the 14-storey timber framed building “Treef” in Norway // European Journal of Wood and Wood Products. 2016. Vol. 74. Issue 3. Pp. 407–424. DOI: 10.1007/s00107-016-1022-5
8. Choi K.-S., Lee H.-C., Kim H.-J. Influence of analytical models on the seismic response of modular structures // Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection. 2016. Vol. 20. Issue 2. Pp. 74–85. DOI: 10.11112/jksmi.2016.20.2.074
9. Shirokov V.S., Kholopov I.S., Solovjev A.V. Determination of the frequency of natural vibrations of a modular building // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. Pp. 655–661. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.218
10. Широков В.С., Алтатов В.Ю., Гордеев Е.А. Исследование жесткости узлов соединений ригеля и стойки модульных быстровозводимых зданий // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 1. С. 20–29. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.20-29. EDN BTOSZA.
11. Широков В.С., Гордеева Т.Е. Исследование жесткости узла соединения ригеля со стойкой модульного здания // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 6 (83). С. 90–96. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-6-90-96. EDN CCDCQT.
12. Туснина В.М., Коляго А.А. К вопросу действительной работы податливых узлов стальных каркасов многоэтажных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 2. С. 28–34. EDN YTCEAU.
13. Туснина В.М. Податливые соединения стальных балок с колоннами // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 5 (73). С. 25–39. DOI: 10.18720/MCE.73.3
14. Рюмин В.В. Анализ податливости рамных узлов на высокопрочных болтах // Современные строительные конструкции из металла и древесины. 2012. № 16 (1). С. 216–223.
15. Tusnina O.A., Danilov A.I. The stiffness of rigid joints of beam with hollow section column // Magazine of Civil Engineering. 2016. Vol. 64. Issue 04. Pp. 40–51. DOI: 10.5862/MCE.64.4
16. Бакианский И.С., Жабинский А.Н. Влияние конструктивных особенностей болтовых фланцевых узлов на распределение внутренних усилий в поперечной раме здания // Проблемы современного строительства : мат. Междунар. науч.-техн. конф. 2019. С. 49–59.
17. Туснина В.М., Платонова В.Д. Численный анализ жесткости фланцевых узлов «балка-колонна» // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 9. С. 28–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.28-33. EDN ELLLJF.
18. Багаутдинов Р.И., Комаров Ю.П., Мостовский Н.Н., Дауров З.С. Numerical model of beam-to-column joint finite stiffness // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 2 (125). С. 179–187. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.179-187. EDN YXZHON.
19. Алтатов В.Ю., Лукин А.О., Сахаров А.А. Исследования жесткости узла базы стальной колонны, состоящей из одной опорной плиты // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 9. С. 9–14. EDN UKFKDV.
20. 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. Vol. 9. Issue 2. Pp. 100–103.

Поступила в редакцию 9 апреля 2023 г.

Принята в доработанном виде 11 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 13 июля 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: Вячеслав Сергеевич Широков — старший преподаватель кафедры металлических и деревянных конструкций; Самарский государственный технический университет (СамГТУ); 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; РИНЦ ID: 665300, ResearcherID: N-5278-2016, ORCID: 0000-0001-6285-8895; ShirokovViacheslav@gmail.com.

REFERENCES

1. Shirokov V.S. Design features of modular buildings. *The Eurasian Scientific Journal*. 2022; 3. DOI: 10.15862/03SAVN322 (rus.).
2. 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; 213:110628. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110628
3. 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*. 2018.
4. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Structural Response of Modular Buildings — An Overview. *Journal of Building Engineering*. 2018; 16:45-56. DOI: 10.1016/j.jobe.2017.12.008
5. Annan C.D., Youssef M.A., El Naggar M.H. Seismic vulnerability assessment of modular steel buildings. *Journal of Earthquake Engineering*. 2009; 13(8):1065-1088. DOI: 10.1080/13632460902933881
6. Fathieh A., Mercan O. Seismic evaluation of modular steel buildings. *Engineering Structures*. 2016; 122:83-92. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.04.054
7. Malo K.A., Abrahamsen R.B., Bjertnæs M.A. Some structural design issues of the 14-storey timber framed building “Treet” in Norway. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2016; 74(3):407-424. DOI: 10.1007/s00107-016-1022-5
8. Choi K.-S., Lee H.-C., Kim H.-J. Influence of analytical models on the seismic response of modular structures. *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*. 2016; 20(2):74-85. DOI: 10.11112/jksmi.2016.20.2.074
9. Shirokov V.S., Kholopov I.S., Solovjev A.V. Determination of the frequency of natural vibrations of a modular building. *Procedia Engineering*. 2016; 153:655-661. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.218
10. Shirokov V.S., Alpatov V.Yu., Gordeyev E.A. Research into the stiffness of beam-column joints of modular prefabricated buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(1):20-29. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.20-29. EDN BTOSZA. (rus.).
11. Shirokov V.S., Gordeeva T.E. Research of joint connection rigidity of crossbar and column in a modular building. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 6(83):90-96. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-6-90-96. EDN CCDCQT. (rus.).
12. Tusnina V.M., Kolyago A.A. To the issue of actual work of pliable nodes of steel frames of multi-story buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 2:28-34. EDN YTCEAU. (rus.).
13. Tusnina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 5(73):25-39. DOI: 10.18720/MCE.73.3 (rus.).
14. Rumin V.V. Analysis of rigidity of beam to column moment connections with high strength bolts. *Modern Metal and Wood Building Structures*. 2012; 16:216-223. (rus.).
15. Tusnina O.A., Danilov A.I. The stiffness of rigid joints of beam with hollow section column. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 64(04):40-51. DOI: 10.5862/MCE.64.4
16. Bakshanskiy I.S., Zhabinskiy A.N. Influence of constructive features of bolt flange units on the distribution of internal forces in the transverse frame of a building. *Problems of modern construction : materials of the International Scientific and Technical Conference: BNTU*. 2019; 49-59. (rus.).
17. Tusnina V.M., Platonova V.D. Numerical analysis of the stiffness of the “beam-column” flange joints. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 9:28-33. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.28-33. EDN ELLLFJ. (rus.).
18. Bagautdinov R.I., Komarov Yu.P., Mostovskiy N.N., Daurov Z.S. Numerical model of beam-to-column joint finite stiffness. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(2):(125):179-187. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.179-187. EDN YXZHOH. (rus.).
19. Alpatov V.Yu., Lukin A.O., Saharov A.A. The study of rigidity of a steel column base assembly consisting of a support plate. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 9:9-14. EDN UKFKDV. (rus.).
20. 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; 9(2):100-103.

Received April 9, 2023.

Adopted in revised form on April 11, 2023.

Approved for publication on July 13, 2023.

B I O N O T E S : Viacheslav S. Shirokov — senior lecturer of the Department of Metal and Wood Structures; Samara State Technical University (SSTU); 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; ID RSCI: 665300, ResearcherID: N-5278-2016, ORCID: 0000-0001-6285-8895; ShirokovViacheslav@gmail.com.