

УДК 69.033.8

DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-23-33](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-23-33)

Теоретические и экспериментальные исследования

Коэффициент динамичности модульных зданий при сейсмическом воздействии

Широков В.С.¹

¹АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация

Аннотация: Строительство модульных зданий является актуальным направлением исследований в настоящее время. При возведении модульных зданий в труднодоступных районах отдельное внимание следует уделять рассмотрению сейсмических воздействий. При этом в Российской Федерации имеется не так много исследований, посвященных работе модульных зданий во время динамических воздействий.

В данной статье изучается влияние параметров модульных зданий на коэффициенты динамичности при сейсмическом воздействии. Для исследования влияния жесткостей элементов на коэффициент динамичности использована аналитическая формула определения периода собственных колебаний, полученная для модульных зданий с опорными стойками, жесткими внутримодульными и шарнирными межмодульными соединениями. На основе граничных значений моментов инерции стоек, при которых происходит уменьшение коэффициента динамичности, произведена оценка реальных конструктивных решений при различных соотношениях моментов инерции ригеля и стойки одно-, двух- и трехэтажных модульных зданий. Размеры модулей приняты $3 \times 6 \times 3(h)$ м, нагрузка на перекрытие – 100 кг/м^2 и 150 кг/м^2 .

Выявлено, что при грунтовых условиях III и IV категории практически все рассмотренные конструктивные решения модульных зданий имеют коэффициент динамичности, равный 2,5 даже для трехэтажных зданий. При грунтовых условиях I и II категории наблюдается снижение коэффициента динамичности некоторых конструктивных решений для зданий выше двух этажей. При любых грунтовых условиях для одноэтажных модульных зданий коэффициент динамичности равен 2,5. Наиболее неудачным решением с точки зрения сейсмического воздействия является такое, при котором отношение моментов инерции ригеля и стойки меньше единицы.

Ключевые слова: модульные здания, сейсмическое воздействие, коэффициент динамичности, период колебаний

Для цитирования: Широков В.С. Коэффициент динамичности модульных зданий при сейсмическом воздействии // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 4. С. 23-33 DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-23-33](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-23-33)

Theoretical and experimental studies

Dynamic coefficient of modular buildings during seismic load

V.S. Shirokov¹

¹JSC Research Center of Construction. Moscow, Russian Federation

@ В.С. Широков, 2022

Abstract: Modular buildings are currently a topical area of research. Erection of modular buildings in hard-to-reach areas needs special attention to the consideration of seismic loads. There are not many studies on the work of modular buildings on dynamic impacts in the Russian Federation.

The paper studies the influence of the parameters of modular buildings to the coefficients of dynamic during seismic action. Study of the influence of the elements flexibility on the coefficient of dynamic, an analytical formula for determining the period of natural oscillations was used. This formula was obtained for modular buildings with corner supported columns, rigid intramodular and pin intermodular connections. Based on the boundary values of the moments of inertia of the columns, at which the dynamic coefficient decreases, an assessment of real design solutions was made for various ratios of the moments of inertia of crossbars and columns of one-, two- and three-story modular buildings. The dimensions of the modules are set to be $3 \times 6 \times 3(h)$ m, the dead load on a floor is 100 kg/m^2 and 150 kg/m^2 .

It was found almost all considered design solutions for modular buildings have a dynamic coefficient is 2,5 even for three-story buildings if there is ground categories III and IV. Dynamic coefficient decreases for some two-story buildings if there is ground categories I and II. Dynamic coefficient of one-story buildings is 2,5 for any ground categories. The ratio less than 1 of the moments of inertia of the crossbar and the column is the worst case of design in terms of seismic load.

Keywords: Modular buildings, seismic load, coefficient of dynamic, structural period

For citation: V.S. Shirokov Dynamic coefficient of modular buildings during seismic load. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2022, no. 4, pp. 23-33

DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-23-33](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-23-33)

Введение

Модульное строительство в настоящее время является активно развивающимся направлением во всем мире. Модульные здания широко внедряются в практику строительства в Российской Федерации. При этом, за счет своих преимуществ, таких как кратчайшие сроки, простота возведения объекта и всесезонность монтажа, модульные здания особо целесообразно применять в труднодоступных регионах [1, 2, 3]. В статье [4] отмечается, что для арктической зоны классические технологии строительства (железобетон и кладка) невыгодны с экономической точки зрения, а наиболее предпочтительным является именно модульное строительство.

Одними из главных проблем строительства в труднодоступных регионах с точки зрения строительных конструкций являются значительные ветровые и сейсмические воздействия. В отечественной литературе на данный момент имеется не так много исследований работы модульных зданий при сейсмическом воздействии. Вашпанов К.С. [5] рассматривает вопрос сейсмической устойчивости одноэтажного объемно-модульного здания, как системы с одной степенью свободы, т.е., сам блок считается недеформируемым. На базе НИУ МГСУ были проведены экспериментальные исследования на сейсмическое воздействие полноразмерного двухэтажного фрагмента модульного здания, изготовленного по технологии «Кнауф» [6], согласно полученным результатам сейсмостойкость рассмотренного здания обеспечена при землетрясениях интенсивностью 7–9 баллов.

Из зарубежных авторов можно отметить Annan C.D., Youssef M.A. и El-Naggar M.H. [7-9]. По результатам модального анализа двух-, четырех- и шестиэтажного модульных зданий [9] было установлено, что основная реакция происходит при первой

частоте собственных колебаний. Shi F. с соавторами [10] рассматривают двадцатипятиэтажное здание с разными компоновками модулей в плане. Shi F. отмечает, что следует стремиться к симметричному расположению модулей. Lasey A.W. в работах [11-13] проводит исследования влияния высоты здания на частоты собственных колебаний. Alembagheri M. с соавторами рассматривал влияние стенового заполнения на динамические характеристики модулей [14]. По результатам исследований авторами установлено, что серьезно влияет на частоты собственных колебаний только полное стеновое заполнение, в случае частичного заполнения частоты изменялись незначительно по сравнению с модулями без стен.

Целью данной статьи является изучение влияния параметров модульных зданий на коэффициенты динамичности при сейсмическом воздействии.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

1. Оценены основные конструктивные особенности модульных зданий.
2. Предложена аналитическая формула для выявления границ значений моментов инерции стоек, при которых коэффициенты динамичности начинают убывать.
3. Оценены коэффициенты динамичности реальных конструктивных решений модульных зданий.

Методы исследования

В статье [15] показано, что для анализа модульных зданий на сейсмическое воздействие справедливо применять консольную расчетную модель сооружения, принятую в российских нормах. Согласно СП 14.13330.2018 коэффициент динамичности β_i , зависящий от периода собственных колебаний, изменяется в интервале от 0,8 до 2,5. При этом можно выделить три основных значения периодов колебаний: 0,1 с, 0,4 с и 0,8 с (рисунок 1). Периоды менее 0,1 с характерны очень жестким сооружениям, к которым модульные здания не относятся. При периодах колебаний от 0,1 с до 0,4 с или 0,8 (в зависимости от типа грунта) коэффициент динамичности имеет наибольшее значение, равное 2,5, т.е. это наиболее неудачные значения периодов с точки зрения сейсмического воздействия.

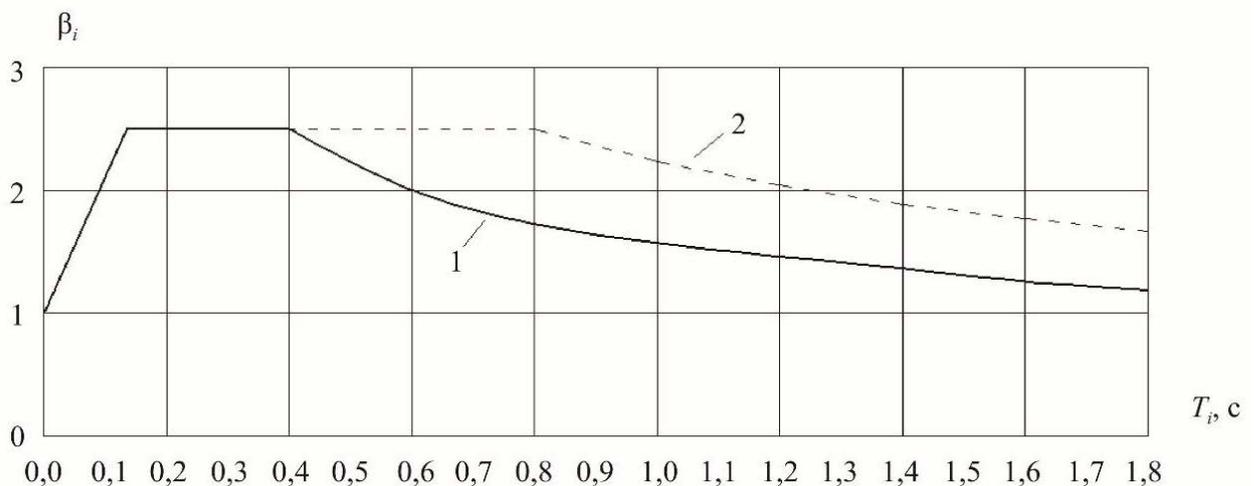


Рисунок 1 – График изменения коэффициента динамичности по СП 14.13330.2018: 1 – для грунтов I и II категории; 2 – для грунтов III и IV категории

Figure 1 – Graph of the dynamic coefficient change according to SP 14.13330.2018: 1 - for soils of categories I and II; 2 - for soils III and IV categories

В статьях [16, 17] предложена и обоснована формула определения первой частоты собственных колебаний модульного здания с опорными колоннами, которая для многоэтажных зданий имеет вид:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{24 \cdot E \cdot I_1 \cdot g}{c^2 \cdot G \cdot h^3 \cdot \left(1 + \frac{I_1 \cdot l_2}{I_2 \cdot h}\right)}} \quad (1)$$

где T – период колебаний;
 E – модуль упругости стали;
 I_1 – момент инерции стойки;
 I_2 – момент инерции ригеля;
 l_2 – пролет модуля в направлении определения моды колебаний;
 G – масса, собранная с перекрытия;
 c – количество этажей;
 h – высота модуля;
 g – ускорение свободного падения.

Формула (1) выведена исходя из следующих допущений:

1. Модули имеют одинаковое конструктивное решение.
2. Сечения верхнего и нижнего ригеля одинаковые.
3. Диск перекрытия (покрытия) не деформируется в своей плоскости.
4. Жесткость стенового ограждения не учитывается.
5. Сопряжение блоков с фундаментами считается шарнирно-неподвижным по углам модулей.
6. Сопряжение блоков друг с другом принято шарнирным в угловых точках горизонтальных рам.
7. Сопряжения всех элементов блока (стоек и горизонтальных рам) друг с другом принято жестким.

Анализируя формулу (1) видим, что значительное влияние на период колебаний здания оказывают геометрические параметры (сечения элементов, генеральные размеры) и масса модулей. Основную часть массы модулей составляют перекрытия, которые в современной строительной практике выполняются с применением эффективных материалов. Масса 1 м² перекрытия (p) обычно составляет 100÷150 кг/м², при отсутствии какого-либо тяжелого оборудования. Так как при увеличении массы период колебаний также увеличивается, то в рамках данной работы рассмотрены наихудшие варианты с минимальной массой.

Размеры модулей обуславливаются объемно-планировочными решениями, технологическими требованиями, а также нормативами на габаритные транспортные размеры, согласно которым максимальные размеры для крупногабаритных грузов составляют: по ширине 3,5 м; по длине 12 м; по высоте 3,9 м. Одним из наиболее распространенных размеров модуля является 3×6×3(h) м, который и был принят в данной статье. Таким образом, масса, собранная с перекрытия (G), составляет 900÷1350 кг.

Зависимость периода колебаний от сечений элементов удобно представить с помощью соотношения моментов инерции ригеля и стойки:

$$r = \frac{I_2}{I_1} \quad (2)$$

С учетом (2) можно преобразовать выражение (1):

$$T = 2 \cdot \pi \sqrt{c} \sqrt{\frac{G \cdot h^3 \cdot \left(1 + \frac{l_2}{r \cdot h}\right)}{24 \cdot E \cdot I_1 \cdot g}} \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что период колебаний зависит от высоты здания и жесткостей ригеля и стойки. Для выявления границ значений моментов инерции стоек, при которых коэффициенты динамичности начинают убывать, формулу (3) можно преобразовать:

$$I_1 = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot c^2 \cdot G \cdot h^3 \cdot \left(1 + \frac{l_2}{r \cdot h}\right)}{24 \cdot E \cdot g \cdot T^2} \quad (4)$$

Результаты исследования

При подстановке в формулу (4) значений периодов колебаний 0,4 с и 0,8 с, соответствующих разным типам грунта, можно получить граничные кривые, при которых коэффициент динамичности равен 2,5. Данные кривые представлены на рисунках 2 и 3 для грунтов I, II и III, IV категорий, соответственно, при нагрузках на перекрытия 100 кг/м² и 150 кг/м².

На графиках 2 и 3 пунктирная линия для одноэтажных зданий, штрих-пунктирная для двухэтажных, сплошная для трехэтажных. Для оценки коэффициентов динамичности реальных модульных зданий на графиках также отмечены значения, полученные на основе сечений элементов модулей из статей [18-26]. Параметры, а также вычисленные периоды колебаний рассмотренных модульных заданий приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры модульных зданий

Table 1 – Modular buildings parameters

Ссылка	Колонна	Балка	$I_1, \text{см}^4$	$I_2, \text{см}^4$	r	$T, \text{с}$		
						1 эт.	2 эт.	3 эт.
[18]	HSS200x100x6	C250x100x4	1703	1682	0,99	0,167	0,333	0,500
[19]	HSS150x150x8	RHS250x150x8	1411	4886	3,46	0,132	0,265	0,397
[20]	HSS125x125x6	C200x75x6	643	1179	1,83	0,226	0,452	0,678
[21]	HSS150x150x8	C250x140x10	1411	5048	3,58	0,132	0,263	0,395
[22]	HSS150x150x8	HSS150x150x8	1411	1411	1,00	0,183	0,365	0,548
[23]	HSS200x200x10	HSS200x200x8	4251	3566	0,84	0,112	0,223	0,335
[24, 25]	RHS150x100x6	C350x100x6	834	5481	6,57	0,157	0,313	0,470
[26]	Гн. уголок 160x4	Швеллер 16	453	747	1,65	0,277	0,553	0,830

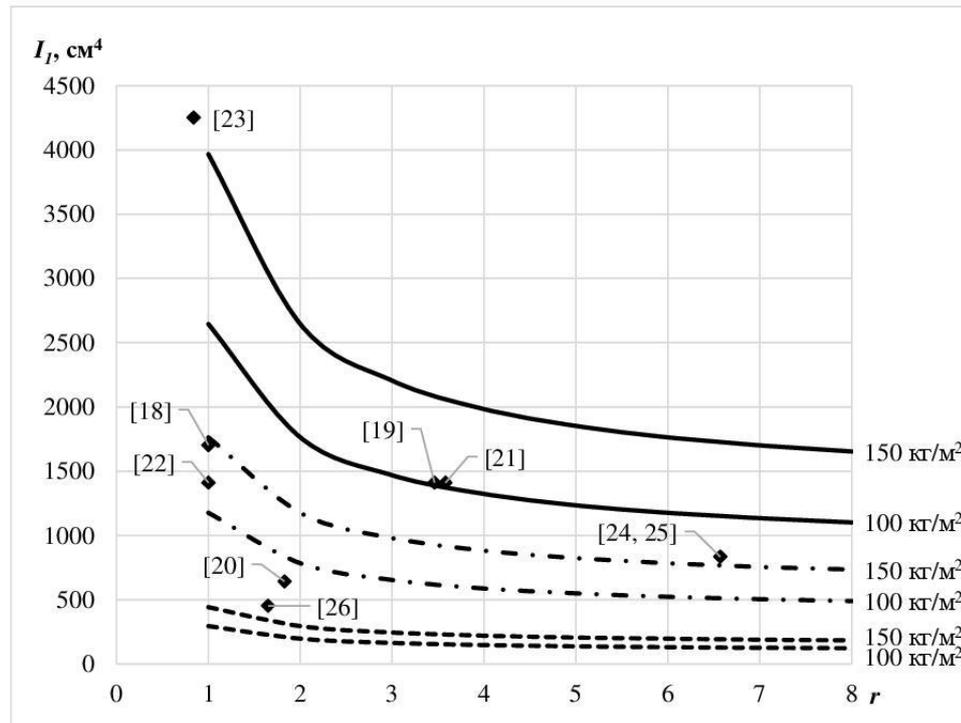


Рисунок 2 – График изменения момента инерции стойки, при котором происходит уменьшение коэффициента динамичности модульного здания для грунтов I и II категории

Figure 2 – Graph of the column moment of inertia change, at which there is a decrease in the coefficient of dynamism of modular growth for soils of categories I and II

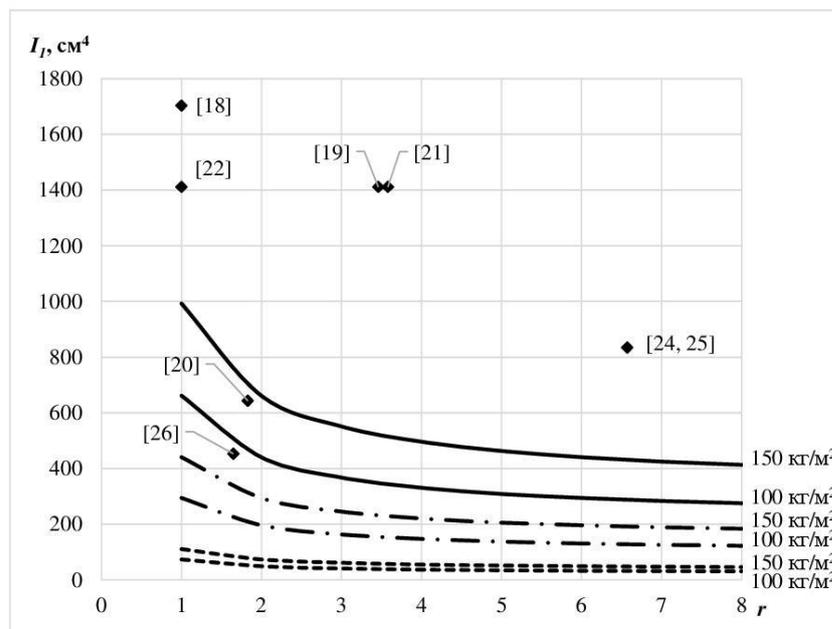


Рисунок 3 – График изменения момента инерции стойки, при котором происходит уменьшение коэффициента динамичности модульного здания для грунтов III и IV категории

Figure 3 – Graph of the column moment of inertia change, at which there is a decrease in the coefficient of dynamism of modular growth for soils of categories III and IV

Для модульных зданий с конструктивными решениями, которые находятся выше кривых, представленных на графиках 2 и 3, коэффициент динамичности равен 2,5. При грунтовых условиях III и IV категории практически все рассмотренные конструктивные решения модульных зданий располагаются выше кривой даже для трехэтажных зданий. При грунтовых условиях I и II категории наблюдается снижение коэффициента динамичности для двухэтажных зданий с решениями согласно [20, 26], для трехэтажных зданий с решениями согласно [18, 22, 24, 25]. При любых грунтовых условиях для одноэтажных модульных зданий коэффициент динамичности равен 2,5. Отдельно стоит отметить, что наиболее неудачным конструктивным решением является такое, при котором отношение жесткости ригеля к жесткости стойки (r) меньше единицы [23]. При $r < 1$ происходит довольно резкое увеличение минимального момента инерции стойки, при котором коэффициент динамичности меньше 2,5.

Заключение

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для одноэтажных модульных зданий при любых грунтовых условиях, а также при грунтовых условиях III и IV категории для зданий вплоть до трех этажей, коэффициент динамичности равен 2,5 в большинстве случаев.
2. При грунтовых условиях I и II категории имеются конструктивные решения модульных зданий выше двух этажей, для которых коэффициент динамичности меньше 2,5. Т.е., с точки зрения сейсмического воздействия многоэтажные модульные здания более предпочтительны.
3. Наиболее неудачное конструктивное решение – при котором соотношение моментов инерции ригеля и стойки меньше единицы. Следует проектировать модульные здания с более гибкими стойками и более жесткими ригелями, при выполнении требований по прочности, устойчивости и жесткости.

Список литературы

1. Бадьин Г.М., Сычев С.А. Анализ дефектов монтажа и эксплуатации быстровозводимых конструкций // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 2–1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=21019> (дата обращения: 01.08.2022)
2. Исходжанова Г.Р. Перспективы применения блочно-модульных структур зданий для условий высокогорья // *Вестник КPCУ*. 2013. Т. 13, № 7. С. 151 – 155.
3. Муксинов Р.М., Семенов В.С., Акбаралиев Р.Ш. Сейсмобезопасные, быстровозводимые и мобильные здания для жизнеобеспечения населения в чрезвычайных ситуациях // *Вестник КPCУ*. 2012. Т. 12. № 7. С. 110 –114.
4. Тимощенко А.А., Куправа Л.Р., Москалев М.Б., Чарник Д.Г. Особенности строительства модульных зданий в высоких широтах // *Вестник студенческого научного общества*. 2018. № 2. С. 154 –156.
5. Вашпанов К.С. Сейсмостойкость объемно-модульных зданий // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2012. № 4. С. 7–11.
6. Грановский А.В., Смирнов В.А., Федоров М.В., Сазонов А.С., Елутин А.М., Эр-Очир А. К оценке сейсмостойкости зданий, изготовленных по объемно-модульной технологии фирмы «Кнауф» // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 2. С. 34 – 39. Doi: 10.33622/0869-7019.2020.02.34-39
7. 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

8. 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
9. 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
10. 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, 101396. Doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101396
11. 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, 110628. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110628
12. 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.
13. 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
14. Alembagheri M., Sharafi P., Rashidi M., Bigdeli A., Farajian M. Natural dynamic characteristics of volumetric steel modules with gypsum sheathed LSF walls: Experimental study. *Structures*. 2021, V. 33, pp. 272–282. Doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.068
15. Shirokov V.S., Gordeeva T.E., Bocharov A.Yu. Analytic method of structural analysis of modular buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, V. 775, 012148. Doi:10.1088/1757-899X/775/1/012148
16. Shirokov V.S., Kholopov I.S., Solovjev A.V. Determination of the frequency of natural vibrations of a modular building. *Procedia Engineering*. 2016, V. 153, pp. 655–661. Doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.218
17. Shirokov V., Soloviev A., Gordeeva T. Determining internal forces in modular building elements under action wind load. *MATEC Web of Conferences*. 2018, V. 196, 02010. Doi.org/10.1051/mateconf/201819602010
18. 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, 1929. Doi.org/10.3390/app9091929
19. 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
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, V. 9, pp. 83–86. Doi.org/10.5281/zenodo.1098106
21. 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, 111858. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111858
22. 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, 3468. Doi:10.3390/app9173468
23. 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, pp. 407–419. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.028
24. Lee S., Park J., Kwak E., Shon S., Kang C., Choi H. Verification of the seismic performance of a rigidly connected modular system depending on the shape and size of the ceiling bracket. *Materials*. 2017, V. 10 (3), p. 263. Doi.org/10.3390/ma10030263

25. 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, pp. 298–325. Doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.08.008
26. Широков В.С., Холопов И.С., Соловьев А.В. Расчет модульного здания, собираемого из блок-боксов. В сборнике: Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство. Сборник статей. под ред. М.И. Бальзанникова, К.С. Галицкова, В.П. Попова; Самарский государственный архитектурно-строительный университет. Самара, 2015. С. 84–89.

References

1. Bad'in G.M., Sychev S.A. Analysis an error of the installation and operation of prefabricated structures. *Modern problems of science and education*. 2015, V. 2–1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=21019> (date: 01.08.2022)
2. Iskhodzhanova G.R. Prospects for the use of block-modular structures of buildings for high altitude conditions. *Vestnik KRSU*. 2013, V.7, pp. 151–155. [In Russian]
3. Muksinov R.M., Semenov V.S., Akbaraliev R.Sh. Seismic-safe, prefabricated and mobile buildings for the life support of the population in emergency situations. *Vestnik KRSU*. 2012, V. 7, pp. 110–114. [In Russian]
4. Timoshchenko A.A., Kuprava L.R., Moskalev M.B., Charnik D.G. Features of the construction of modular buildings in high latitudes. *Vestnik studencheskogo nauchnogo obshchestva*. 2018, V. 2, pp. 154–156. [In Russian]
5. Vashpanov K.S. Seismic resistance of modular buildings. *Cherepovets State University Bulletin*. 2012, V. 4, pp. 7–11. [In Russian]
6. Granovsky A. V., Smirnov V. A., Fedorov M. V. et al. To the assessment of seismic resistance of buildings made using the volume-modular technology of the company “KNAUF”. *Industrial and Civil Engineering*. 2020, V. 2, pp. 34–39. Doi: 10.33622/0869-7019.2020.02.34-39 [In Russian]
7. 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
8. 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
9. 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
10. 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, 101396. Doi.org/10.1016/j.job.2020.101396
11. 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, pp. 110628. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110628
12. 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, 1025
13. 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.job.2017.12.008

14. Alembagheri M., Sharafi P., Rashidi M., Bigdeli A., Farajian M. Natural dynamic characteristics of volumetric steel modules with gypsum sheathed LSF walls: Experimental study. *Structures*. 2021, V. 33, pp. 272–282. Doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.068
15. Широков В.С., Гордеева Т.Е., Боcharov А.Ю. Analytic method of structural analysis of modular buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, V. 775, 012148. Doi:10.1088/1757-899X/775/1/012148 [In Russian]
16. Широков В.С., Kholopov I.S., Solovjev A.V. Determination of the frequency of natural vibrations of a modular building. *Procedia Engineering*. 2016, V. 153, pp. 655–661. Doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.218 [In Russian]
17. Широков В., Soloviev A., Гордеева Т. Determining internal forces in modular building elements under action wind load. *MATEC Web of Conferences*. 2018, V. 196, 02010. Doi.org/10.1051/mateconf/201819602010 [In Russian]
18. 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, 1929. Doi.org/10.3390/app9091929
19. 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
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, V. 9, pp. 83–86. Doi.org/10.5281/zenodo.1098106
21. 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, 111858. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111858
22. 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, 3468. Doi:10.3390/app9173468
23. 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, pp. 407–419. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.028
24. Lee S., Park J., Kwak E., Shon S., Kang C., Choi H. Verification of the seismic performance of a rigidly connected modular system depending on the shape and size of the ceiling bracket. *Materials*. 2017, V. 10 (3), 263. Doi.org/10.3390/ma10030263
25. 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
26. Широков В.С., Kholopov I.S., Solovev A.V. Design of a modular building assembled from block boxes. Traditions and innovations in construction and architecture. *Construction. Digest of articles*. Samara, 2015, pp. 84–89. [In Russian]

Данные об авторе / Information about author

Широков Вячеслав Сергеевич

Соискатель АО «НИЦ «Строительство»

адрес: 443110, г. Самара, ул. Ново-Садовая, д. 30, кв. 425

e-mail: ShirokovViacheslav@gmail.com

тел.: +7-927-659-55-19

Viacheslav S. Shirokov

External PhD student of JSC RCC

address: Novo-Sadovaya str., 30-425, Samara 443110, Russian Federation

e-mail: ShirokovViacheslav@gmail.com

tel.: +7-927-659-55-19