

УДК 624.078.4

DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-2-35-42

© В. С. Широков, старший преподаватель
(Самарский государственный технический
университет, Самара, Россия)

© V. S. Shirokov, senior lecturer
(Samara State Technical University,
Samara, Russia)

E-mail: ShirokovViacheslav@gmail.com

E-mail: ShirokovViacheslav@gmail.com

© Т. А. Белаши, д-р техн. наук, профессор
(АО «НИЦ „Строительство“», Москва, Россия)

© T. A. Belash, Dr. Sci. Tech., Professor
(JSC Research Center of Construction, Moscow, Russia)

E-mail: Belashta@mail.ru

E-mail: Belashta@mail.ru

© А. В. Соловьев, канд. техн. наук, доцент
(Самарский государственный технический
университет», Самара, Россия)

© A. V. Solovyev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Samara State Technical University,
Samara, Russia)

E-mail: Savsmr@rambler.ru

E-mail: Savsmr@rambler.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕСТКОСТИ ВНУТРИМОДУЛЬНЫХ УЗЛОВ

EXPERIMENTAL RESEARCH OF INTRA-MODULE JOINT STIFFNESS

Изучение вращательной жесткости узлов для уточнения реальной работы строительных конструкций является актуальным направлением исследований. Данное положение справедливо и для модульных зданий. В основном исследование жесткости соединений проводится численными методами. Целью настоящей работы является сравнение результатов определения вращательной жесткости внутримодульных узлов, полученных методом конечных элементов, с результатами физических испытаний. Авторами предложена схема испытательной установки для определения вращательной жесткости узлов. Проведены физические испытания двух полноразмерных узловых соединений. Полученные результаты хорошо коррелируют с результатами численных исследований.

Ключевые слова: модульные здания, внутримодульные узлы, вращательная жесткость, физический эксперимент.

The study of rotational stiffness of nodal joints in order to clarify the actual performance of building structures is an actual research direction. This point is valid for modular buildings as well. Basically, the study of the nodal joint stiffness is carried out by numerical methods. The purpose of the study is to compare the results of determining the rotational stiffness of intra-module joints obtained by the finite element method with the results of received at physical tests. The authors propose a scheme of a test installation for determining the rotational stiffness of joints. Physical tests of two full-size joints were carried out. The physical tests results obtained have good correlation with the results of numerical studies.

Keywords: modular buildings, intra-module joints, rotational stiffness, physical test.

Введение

В настоящее время уточнение действительной работы строительных конструкций является актуальным направлением исследований. Одним из рассматриваемых вопросов является изучение жесткости узлов стальных конструкций [1–4]. Данное положение относится и к изучению модульных зданий [5–16].

Узлы модульных зданий подразделяются на внутримодульные (соединение ригеля

со стойкой) и межмодульные (соединение модулей друг с другом). В настоящей работе объектом исследования являются внутримодульные узлы. Вращательная жесткость внутримодульных узлов изучалась авторами численными методами [17–19]. Однако применение численных методов исследования связано с рядом некоторых допущений, принимаемых при расчете, поэтому для подтверждения результатов необходимо проводить физические испытания узловых соединений.

Целью исследования является сравнение результатов определения вращательной жесткости внутримодульных узлов, полученных методом конечных элементов (МКЭ), с результатами физических испытаний узлов.

Методы

Классификация узлов по жесткости приведена в Eurocode 3. Согласно данной классификации узлы подразделяются на шарнирные, полужесткие (податливые) и жесткие. Отнесение того или иного узла к указанным классам производится на основе сравнения начальной вращательной жесткости узла $S_{j,ini}$ с изгибной жесткостью ригеля:

$$S_{j,ini} > S_{j,R} = k_b EI_b / L_b \text{ — жесткий узел;}$$

$$S_{j,R} > S_{j,ini} > S_{j,P} \text{ — полужесткий узел;}$$

$$S_{j,ini} < S_{j,P} = 0,5 EI_b / L_b \text{ — шарнирный узел,}$$

где k_b — коэффициент, зависящий от наличия связей в сооружении, для модульных зданий $k_b = 25$; E — модуль упругости стали; I_b — момент инерции ригеля; L_b — пролет ригеля.

Вращательная жесткость — момент, вызывающий единичный угол поворота узла. Определение начальной вращательной жесткости производится путем построения зависимости угла поворота узла (φ) от действующего изгибающего момента (M_j) (рис. 1). При этом важным является предельный момент $M_{j,Rd}$ соответствующий развитию пластических деформаций в узле. Начальная вращательная жесткость определяется как отношение $(2/3) \times M_{j,Rd}$ к соответствующему углу поворота узла.

В данной статье рассматривается внутримодульный узел соединения ригеля со стойкой из квадратных труб. При рассмотрении непосредственного крепления на сварке балки из трубы к стойке из трубы узлом является область в виде прямоугольника высотой, равной высоте сечения балки (h_b) плюс два катета швов (k_j), и шириной, равной высоте сечения стойки (h_c) плюс один катет шва (рис. 2, а). При рассмотрении соединения двух труб с вертикальным ребром жесткости

узлом является область высотой, равной размеру ребра (h_p) плюс высота сечения балки и один катет шва, и шириной, равной высоте сечения стойки плюс размер ребра (рис. 2, б).

Внутримодульные узлы характеризуются односторонним примыканием ригеля, поэтому для изучения их вращательной жесткости важно выбрать корректную схему эксперимента. На основе анализа публикаций за прототип выбрана схема испытания, описанная в [16] как наиболее удачная. Общий угол раствора узла (рис. 3) определяется по правилу косинусов с помощью измерения линейной деформации между двумя точками на балке и стойке:

$$\varphi_{общ} = \sin^{-1} \left(\frac{2L_1\Delta + \Delta^2}{2ab} \right), \quad (1)$$

где L_1 — первоначальное расстояние между точками А и В; Δ — линейное удлинение между точками А и В; a, b — расстояния от узла до точек А и В по горизонтали и вертикали соответственно.

Для узла с вертикальным ребром при расположении точек А и В по габаритам ребра угол поворота узла будет равен общему углу раствора:

$$\varphi = \varphi_{общ}, \quad (2)$$

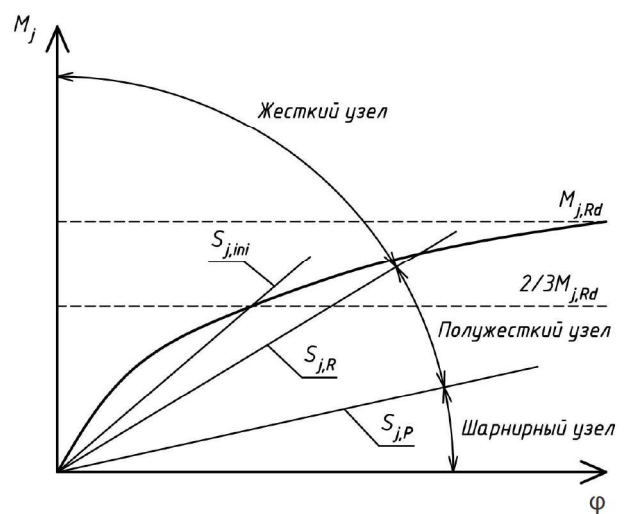


Рис. 1. Классификация жесткости узлов согласно зависимости «момент — угол поворота»

Для узла без ребра жесткости на общий угол раствора влияют также изгибные деформации балки и стойки, которые необходимо вычесть:

$$\varphi = \varphi_{\text{общ}} - \varphi_b - \varphi_c, \quad (3)$$

где φ_b и φ_c — углы поворота в точках A и B балки и колонны соответственно.

Углы поворота балки и стойки можно определить через уравнение изогнутой линии балки. Угол поворота балки в точке A :

$$\varphi_b = \frac{2\sigma_A \left(a - \frac{h_c}{2} \right)}{Eh_I}, \quad (4)$$

где σ_A — нормальные напряжения в сечении точки A ; a — расстояние от центра узла O до точки A ; h_c — высота сечения стойки; h_b — высота сечения балки; E — модуль упругости стали.

Угол поворота колонны определяется как угол смежности касательных в точке B и в точке D , соответствующей низу балки:

$$\varphi_c = \varphi_D - \varphi_B; \quad (5)$$

$$\varphi_D = \frac{2\sigma_D L_D}{Eh_c}; \quad (6)$$

$$\varphi_B = \frac{2\sigma_B L_B}{Eh_c}, \quad (7)$$

где φ_D и φ_B — углы поворота стойки в точках D и B соответственно; σ_D и σ_B — нормальные

напряжения в сечениях точек D и B соответственно; L_D и L_B — расстояния от закрепления стойки до точек D и B соответственно.

Схема испытания [16], модернизированная авторами с учетом испытываемых образцов и имеющегося оборудования, представлена на рис. 3. В точках A и B сквозь балку и колонну пропущены шпильки, на которые с помощью струбцин закреплялись прогибомеры Аистова с ценой деления 0,01 мм (рис. 4). Измерение напряжений в различных точках балки и стойки производилось тензорезисторами Zemic BF120-10AA(11), подключенными к микропроцессорной многоканальной тензометрической станции ММТС-64.01. Одна из пар датчиков находилась в точках сечения A и B , а один датчик — в точке D сечения. На стенку стойки в точке O наклеена розетка из тензорезисторов для определения эквивалентных напряжений.

Перед проведением испытаний были определены механические характеристики стали труб узлов на трех образцах. Сталь испытанных образцов не имела выраженной площадки текучести. Предел пропорциональности $\sigma_{\text{пл}}$ определен графическим методом согласно ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение». Результаты

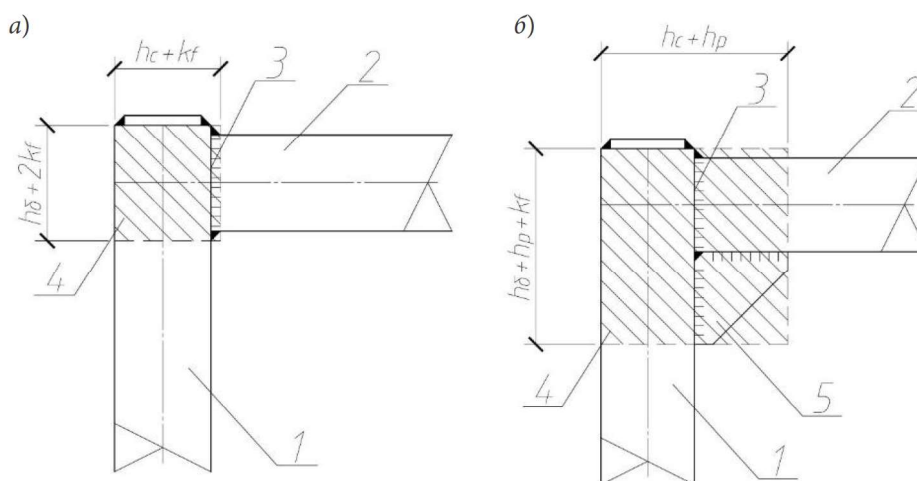


Рис. 2. Внутримодульные узлы из квадратных труб: а — узел без ребра; б — узел с ребром; 1 — колонна; 2 — балка; 3 — сварной шов; 4 — узловая зона; 5 — ребро

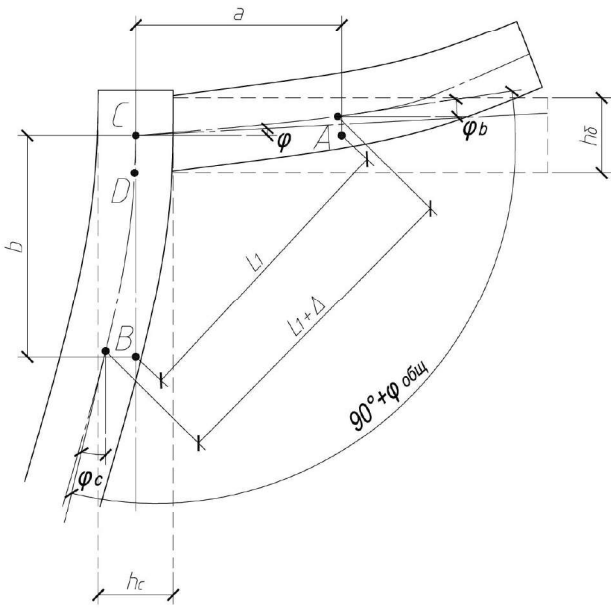


Рис. 3. Схема определения угла раствора

определения механических характеристик стали образцов приведены в табл. 1.

Результаты

Физические испытания внутримодульных узлов были проведены на двух образцах с сечениями стойки и балки из квадратной трубы 100×4. Образец О1 выполнен без ребра жесткости, образец О2 — с ребром жесткости. Размер ребра образца О2 выбран $h_p = 130$ мм, толщина ребра $t_p = 4$ мм.

Испытания образцов узлов проведены до их разрушения. Вид узлов после испытаний приведен на рис. 5, а, б.

Разрушение образца О1 без ребра жесткости произошло вследствие разрыва сварного шва крепления балки к стойке в угловой зоне. Разрушающая нагрузка составила $P_{max 1} = 26$ кН. Плечо приложения нагрузки

$e = 0,5$ м, таким образом, максимальный момент $M_{max 1} = 13$ кНм.

Разрушение образца О2 с ребром жесткости произошло вследствие местной потери устойчивости полки стойки. Разрушающая нагрузка составила $P_{max 2} = 41,4$ кН, максимальный момент $M_{max 2} = 20,7$ кНм.

По характеру разрушения образцов полученные результаты хорошо согласуются с численными исследованиями.

Начальная вращательная жесткость узла определяется в зависимости от предельного момента $M_{j,Rd}$ при котором напряжения в узле достигают предела текучести. Для образца О1 эквивалентные напряжения в стенке стойки достигли $\sigma_{пл} = 308,26$ МПа при величине момента $M_{j,Rd 1} = 7,07$ кНм, для образца О2 $M_{j,Rd 2} = 9,64$ кНм. Данные значения также хорошо коррелируют с результатами численных экспериментов, в которых предельные моменты равны $M_{j,Rd 1} = 6,6$ кНм и $M_{j,Rd 2} = 9,4$ кНм для узлов О1 и О2 соответственно.

По результатам испытаний построены графики зависимости угла поворота узла от изгибающего момента. Графики представлены на рис. 6, а, б. На них пунктирными линиями изображены результаты, полученные методом конечных элементов, сплошными — при физических испытаниях.

Результаты определения вращательной жесткости узлов приведены в табл. 2.

Обсуждение

Качественная картина зависимости углов поворота от момента, полученных экспериментально и численно, схожа. Разница в максимальных моментах, полученных при

Таблица 1

Механические характеристики стали испытанных образцов

№	t, мм	b, мм	F ₀ , мм ²	P _{вр} , кН	σ _{вр} , МПа	P _{пл} , кН	σ _{пл} , МПа	Среднее σ _{вр} , МПа	Среднее σ _{пл} , МПа
1	3,6	29,4	105,84	43,2	408,16	32,02	302,57	403,37	308,26
2	3,7	28,1	103,97	40,6	390,50	30,30	291,40		
3	3,6	32,0	115,20	47,4	411,46	38,11	330,80		

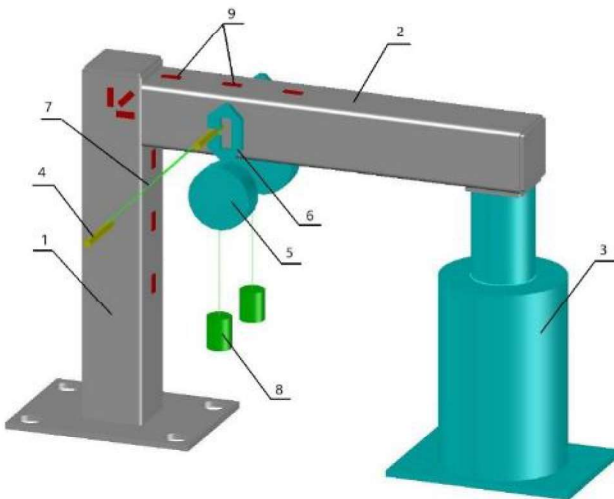


Рис. 4. Схема испытательной установки: 1 — стойка; 2 — балки; 3 — домкрат; 4 — шпилька; 5 — прогибомер Аистова; 6 — струбина; 7 — стальная проволока; 8 — грузик; 9 — тензодатчики

физических испытаниях и методом конечных элементов, объясняется отсутствием площадки текучести стали испытанных образцов.

Узел без ребра при физических испытаниях показал более высокую жесткость по сравнению с МКЭ, узел с ребром жесткости наоборот. Однако порядок полученных значений близок.

Классификация узлов по жесткости зависит от пролета ригеля. Узел О1 согласно результатам физических испытаний являет-

ся жестким при пролете балки больше 2,68 м. При меньшей величине узел классифицируется как полужесткий. Поперечный размер модульного блока обычно не превышает 3 м. Для габаритных модулей из условия транспортировки поперечный размер должен быть менее 2,55 м. Таким образом, для модульных зданий узел без ребра жесткости в общем случае является полужестким.

Узел О2 с ребром классифицируется как жесткий при пролете ригеля более 0,6 м. Таким образом, данный узел является жестким при всех технически применяемых размерах модулей.

Выводы

На основе полученных результатов физических испытаний полноразмерных узлов модульных зданий и сопоставления их с результатами численных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Предложена и реализована схема экспериментального определения зависимости момента вращения от угла поворота. Данная схема позволяет определить фактическую вращательную жесткость узла.
2. Результаты физических и численных экспериментов хорошо коррелируют друг с другом. Механика разрушения образцов, характер деформирования и предельные моменты для определения начальной враща-



Рис. 5. Образцы после испытаний: а — О1; б — О2

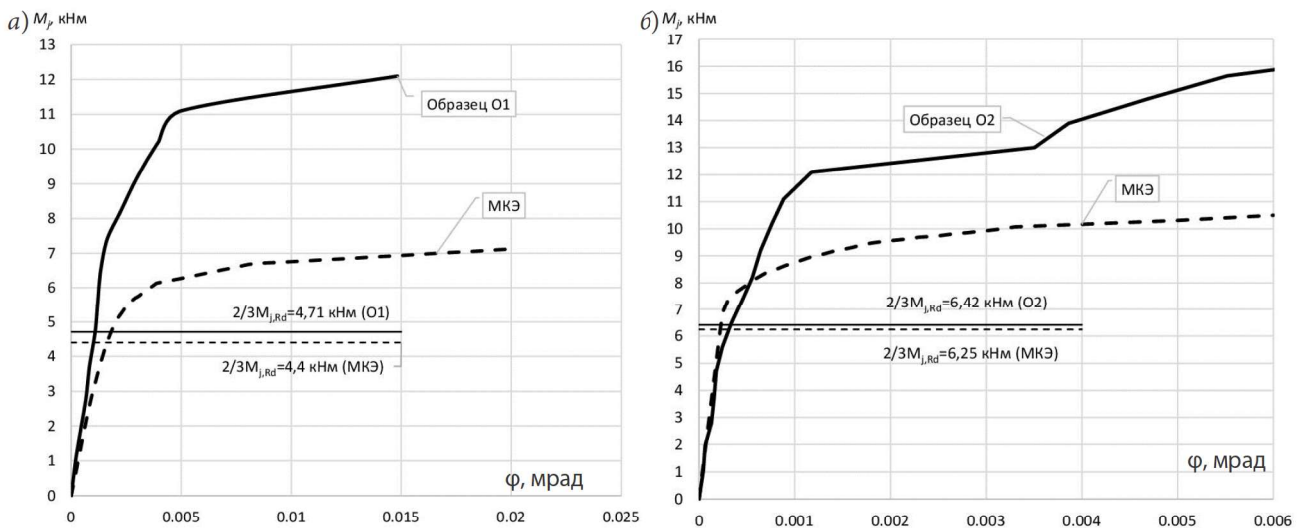


Рис. 6. График зависимости момента от угла поворота: а — образец О1; б — образец О2

Таблица 2

Результаты определения вращательной жесткости узлов

Узел	МКЭ			Эксперимент		
	$M_{j,Rd}$, кНм	$2/3 M_{j,Rd}$, кНм	$S_{j,ini}$, кНм/рад	$M_{j,Rd}$, кНм	$2/3 M_{j,Rd}$, кНм	$S_{j,ini}$, кНм/рад
О1	6,6	4,4	2700	9,64	4,71	4320
О2	9,4	6,25	28 000	7,07	6,42	19 500

тельной жесткости имеют высокую степень совпадения.

3. Согласно классификации Eurocode для модульных зданий узел без ребра в общем случае следует рассматривать как полужесткий, рассмотренный узел с ребром как жесткий.

4. При других параметрах узла (сечения элементов, размеры и расположение ребра) будет иной начальная вращательная жесткость, а следовательно, и классификация типа узла. Определение вращательной жесткости можно проводить методом конечных элементов.

Благодарности

Авторы статьи выражают искреннюю благодарность ООО «ПК „Стил“» и лично генеральному директору Андрею Дмитриевичу Максиму за неоценимую помощь, оказанную при закупке материалов и измерительной аппаратуры для испытаний. Так-

же авторы выражают благодарность учебному мастеру кафедры «Металлических и деревянных конструкций» СамГТУ Евгению Михайловичу Сапареву за помощь в изготовлении образцов.

Библиографический список

1. 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.
2. Бакианский И. С., Жабинский А. Н. Влияние конструктивных особенностей болтовых фланцевых узлов на распределение внутренних усилий в поперечной раме здания // Проблемы современного строительства: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 28 мая 2019 г. Минск: БНТУ, 2019. С. 49–59.
3. Надольский В. В. Расчет и конструирование фланцевого соединения элементов прямоугольного сечения, подверженных центральному растяжению // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2018. № 8. С. 121–130.

4. Рюмин В. В. Анализ податливости рамных узлов на высокопрочных болтах // Современные строительные конструкции из металла и древесины. 2012. № 16 (1). С. 216–223.

5. Bong-Ho C., Jae-Sub L., Hongjin K., Dae-Jin K. Structural performance of a new blind-bolted frame modular beam-column connection under lateral loading // Applied Sciences. 2019. Vol. 9 (9). 1929. DOI 10.3390/app9091929.

6. Lacey A. W., Wensu Ch., Hong H., Kaiming B. New interlocking inter-module connection for modular steel buildings: Experimental and numerical studies // Engineering Structures. 2019. № 198. 109465. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109465>.

7. Lacey A. W., Wensu Ch., Hong H., Kaiming B. 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. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110628>.

8. Zhang J.-F., Zhao J.-J., Deng E.-F., et al. Component method based rotation performance and design method for the connection in ATLS modular house // Thin-Walled Structures. 2021. № 164. 107803. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107803>.

9. 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. Vol. 17 (1). Pp. 1–9. DOI 10.18057/IJASC.2021.17.1.1.

10. Choi K.-S., Kim H.-J. An Analytical Study on Rotational Capacity of Beam-Column Joints in Unit Modular Frames // International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering. 2015. Vol. 2. Pp. 100–103. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1098106>.

11. Renwei Ma, Junwu Xia, Hongfei Chang, et al. Experimental and numerical investigation of mechanical properties on novel modular connections with superimposed beams // Engineering Structures. 2021. Vol. 232. 111858. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111858>.

12. Yongrui Wang, Junwu Xia, Renwei Ma, et al. Experimental study on the flexural behavior of an innovative modular steel building connection with installed bolts in the columns // Applied Science. 2019. Vol. 9 (17). 3468. <https://doi.org/10.3390/app9173468>.

13. En-Feng Deng, Liang Zong, Yang Ding, et al. Monotonic and cyclic response of bolted connections with welded cover plate for modular steel construction // Engineering Structures. 2018. № 167. Pp. 407–419. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.028>.

14. Seungjae Lee, Jaeseong Park, Euishin Kwak, et al. Verification of the seismic performance of a rigidly

connected modular system depending on the shape and size of the ceiling bracket // Materials. 2017. № 10 (3). 263. <https://doi.org/10.3390/ma10030263>.

15. Seungjae Lee, Jaeseong Park, Sudeok Shon, et al. Seismic performance evaluation of the ceiling-bracket-type modular joint with various bracket parameters // Journal of Constructional Steel Research. 2018. Vol. 150. Pp. 298–325. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.08.008>.

16. Fu Jia Luo, Chenting Ding, Styles A., Yu Bai. End Plate-Stiffener Connection for SHS Column and RHS Beam in Steel-Framed Building Modules // International Journal of Steel Structures. 2019. Vol. 19 (1). Pp. 1353–1365. <https://doi.org/10.1007/s13296-019-00214-6>.

17. Широков В. С., Алпатов 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.

18. 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.

19. Широков В. С., Белаиш Т. А. Вращательная жесткость внутримодульных узловых соединений с горизонтальными ребрами // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 4. С. 57–63. DOI 10.33622/0869-7019.2022.04.57-63.

References

1. Tusnina V. M., Platonova V. D. *Chislenniy analiz zhestkosti flantsevykh uzlov «balka-kolonna»* [Numerical analysis of stiffness of “beam-column” flange assemblies]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Engineering*, 2020, no. 9, pp. 28–33. DOI 10.33622/0869-7019.2020.09.28-33.

2. Bakshanskiy I. S., Zhabinskiy A. N. *Vliyanie konstruktivnykh osobennostey boltovykh flantsevykh uzlov na raspredelenie vnutrennikh usiliy v poperechnoy rame zdaniya* [Influence of design features of bolted flange assemblies on the distribution of internal forces in the transverse frame of the building]. *Trudy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Minsk, 28 maya 2019 g. «Problemy sovremennogo stroitel'stva»* [Proceedings of the Int. sci.-techn. conf. Minsk, May 28, 2019 “Problems of modern construction”]. Minsk, BNTU Publ., 2019, pp. 49–59.

3. Nadoł'skiy V. V. *Raschet i konstruirovaniye flantseвого soedineniya elementov pryamougol'nogo secheniya, podverzhennykh tsentral'nomu rastyazheniyu* [Calculation and design of flange connection of elements of rectangular cross-section subjected to central tension]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya*

F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki – Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Sciences, 2018, no. 8, pp. 121–130.

4. Ryumin V. V. *Analiz podatlivosti ramnykh uzlov na vysokoprochnykh boltakh* [Analysis of pliability of frame assemblies on high-strength bolts]. *Sovremennye stroitel'nye konstruktsii iz metalla i drevesiny – Modern building structures from metal and wood*, 2012, no. 16 (1), pp. 216–223.

5. Bong-Ho C., Jae-Sub L., Hongjin K., Dae-Jin K. Structural performance of a new blind-bolted frame modular beam-column connection under lateral loading. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9 (9), 1929. DOI 10.3390/app9091929.

6. Lacey A. W., Wensu Ch., Hong H., Kaiming B. New interlocking inter-module connection for modular steel buildings: Experimental and numerical studies. *Engineering Structures*, 2019, no. 198, 109465. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109465>.

7. Lacey A. W., Wensu Ch., Hong H., Kaiming B. Effect of inter-module connection stiffness on structural response of a modular steel building subjected to wind and earthquake load. *Engineering Structures*, 2020, no. 213, 110628. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110628>.

8. Zhang J.-F., et al. Component method based rotation performance and design method for the connection in ATLS modular house. *Thin-Walled Structures*, 2021, no. 164, 107803. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107803>.

9. Khan K., Yan J.-B. Numerical studies on the seismic behavior of a prefabricated multi-storey modular steel building with new-type bolted joints. *Advanced Steel Construction*, 2021, vol. 17 (1), pp. 1–9. DOI 10.18057/IJASC.2021.17.1.1.

10. Choi K.-S., Kim H.-J. An analytical study on rotational capacity of beam-column joints in unit modular frames. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 2015, vol. 2, pp. 100–103. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1098106>.

11. Renwei Ma, et al. Experimental and numerical investigation of mechanical properties on novel modular connections with superimposed beams. *Engineering Structures*, 2021, vol. 232, 111858. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111858>.

12. Yongrui Wang, et al. Experimental study on the flexural behavior of an innovative modular steel building connection with installed bolts in the columns. *Applied Science*, 2019, vol. 9 (17), 3468. <https://doi.org/10.3390/app9173468>.

13. En-Feng Deng, et al. Monotonic and cyclic response of bolted connections with welded cover plate for modular steel construction. *Engineering Structures*, 2018, no. 167, pp. 407–419. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.028>.

14. Seungjae Lee, et al. Verification of the seismic performance of a rigidly connected modular system depending on the shape and size of the ceiling bracket. *Materials*, 2017, no. 10 (3), 263. <https://doi.org/10.3390/ma10030263>.

15. Seungjae Lee, et al. Seismic performance evaluation of the ceiling-bracket-type modular joint with various bracket parameters. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, vol. 150, pp. 298–325. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.08.008>.

16. Fu Jia Luo, Chenting Ding, Styles A., Yu Bai. End plate-stiffener connection for SHS column and RHS beam in steel-framed building modules. *International Journal of Steel Structures*, 2019, vol. 19 (1), pp. 1353–1365. <https://doi.org/10.1007/s13296-019-00214-6>.

17. Shirokov V. S., Alpatov V. Yu., Gordeev E. A. *Issledovanie zhestkosti uzlov soedineniy rigelya i stoyki modul'nykh bystrovovodimyykh zdaniy* [Investigation of rigidity of joints of transom and column nodes of modular fast-erected buildings]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MSCU*, 2021, vol. 16, no. 1, pp. 20–29. DOI 10.22227/1997-0935.2021.1.20-29.

18. Shirokov V. S., Gordeeva T. E. *Issledovanie zhestkosti uzla soedineniya rigelya so stoykoy modul'nogo zdaniya* [Investigation of stiffness of the node of connection of a transom with a column of a modular building]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 6 (83), pp. 90–96. DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-6-90-96.

19. Shirokov V. S., Belash T. A. *Vrashchatel'naya zhestkost' vnutrimodul'nykh uzlovykh soedineniy s gorizontальnymi rebrami* [Rotational stiffness of intramodular nodal connections with horizontal ribs]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Engineering*, 2022, no. 4, pp. 57–63. DOI 10.33622/0869-7019.2022.04.57-63.