

## К оценке сейсмостойкости зданий, изготовленных по объемно-модульной технологии фирмы «КНАУФ»

**Аркадий Вульфович ГРАНОВСКИЙ**, кандидат технических наук, доцент, e-mail: Granovskiy@gmail.com

**Владимир Александрович СМИРНОВ**, кандидат технических наук, зав. лабораторией, e-mail: belohvost@list.ru

**Максим Владимирович ФЕДОРОВ**, зав. лабораторией, e-mail: FedorovMV@mgsu.ru

Научно-исследовательский институт экспериментальной механики ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

**Александр Сергеевич САЗОНОВ**, ведущий инженер, e-mail: sazonov.alexandr@ytproject.ru

**Антон Михайлович ЕЛУТИН**, главный инженер, e-mail: nn.lstk@gmail.com

ООО «Строй-снаб», 603093 Нижний Новгород, ул. Печёрский Съезд 22А, оф. 218

**Амгалан ЭР-ОЧИР**, магистр, e-mail: erka\_khuu@icloud.com

НИУ МГСУ, 129337 Москва, Ярославское ш., 26

***Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований по оценке сейсмостойкости модульных зданий при действии динамических нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия при землетрясениях 7–9 баллов по шкале MSK-64. Конструктивные решения модульных зданий разработаны компанией «Новый дом» на основе использования конструкций заводского изготовления по технологии фирмы «КНАУФ». Динамические испытания проводились на экспериментальной установке, разработанной в Научно-исследовательском институте экспериментальной механики НИУ МГСУ. Опытная установка включала в себя специальные подвижные опоры, гидроцилиндры и современную измерительную аппаратуру, позволяющую оценивать в процессе испытаний силовые воздействия, ускорения, перемещения и деформации в любом элементе стенда. Установлены факторы, влияющие на обеспечение сейсмостойкости сборной модульной конструкции при действии динамических нагрузок и исключают ее разрушение и появление в ней трещин. В процессе испытаний получены данные по ускорениям и деформациям конструкций двухэтажного экспериментального фрагмента в заданных точках. Приведены рекомендации по повышению прочности и жесткости соединений модулей по высоте здания, что позволит повысить надежность объемно-модульных конструкций при сейсмических воздействиях.*

***Ключевые слова:** модульные здания, динамические воздействия, динамические гидроцилиндры, ускорения, сейсмостойкость сооружений.*

### TO THE ASSESSMENT OF SEISMIC RESISTANCE OF BUILDINGS MADE USING THE VOLUME-MODULAR TECHNOLOGY OF THE COMPANY “KNAUF”

**Arkadiy V. GRANOVSKY**, e-mail: Granovskiy@gmail.com, **Vladimir A. SMIRNOV**, e-mail: belohvost@list.ru

**Maksim V. FEDOROV**, e-mail: FedorovMV@mgsu.ru

Research Institute of Experimental Mechanics Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

**Aleksandr S. SAZONOV**, e-mail: sazonov.alexandr@ytproject.ru, **Anton M. ELUTIN**, e-mail: nn.lstk@gmail.com

Stroy-snab, ul. Pecherskiy S'ezd, 22A, of. 218, Nizhniy Novgorod 603093, Russian Federation

**Amgалан ER-OCHIR**, e-mail: erka\_khuu@icloud.com

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

***Abstract.** The results of experimental studies on the assessment of seismic stability of modular buildings under the action of dynamic loads that simulate seismic effects in earthquakes of 7-9 points on the scale of MSK-64 are presented. Design solutions for modular buildings were developed by "Novy Dom" LLC on the basis of the use of factory-made structures using KNAUF technology. Dynamic tests were carried out on an experimental setup developed at the Research Institute of Experimental Mechanics of the Moscow State University of Civil Engineering. The pilot plant included special movable supports, hydraulic cylinders, and modern measuring equipment that make it possible to evaluating the force effects, acceleration, displacement, and deformation in any element of the stand during testing. The factors that influence the seismic stability of the combined modular structure under the action of dynamic loads and exclude its destruction and the appearance of cracks in it are established. During the tests, data were obtained on the values of accelerations and deformations of the structures of the two-story experimental fragment at the specified points. Recommendations are given for increasing the strength and rigidity of the module connections in the height of the building, which will increase the reliability of volume-modular structures in case of seismic impacts.*

***Key words:** modular buildings, dynamic impacts, dynamic hydraulic cylinders, accelerations, earthquake resistance of structures.*

**М**одульное домостроение — оперативный метод решения задач по обеспечению жильем людей, в том числе в случае разрушения зданий при техногенных катастрофах и стихийных бедствиях. В России появление объемно-модульного домостроения относится к началу 1950-х гг. В работе [1] подробно проанализирован опыт модульного строительства в нашей стране и за рубежом. С момента возникновения оно было связано с технологией быстровозводимых зданий и позволяло обеспечивать население доступным и комфортным жильем при улучшении жилищных условий, а также в случае расселения людей из ветхого и аварийного жилья.

Однако опыт применения объемно-модульных блоков показал свою эффективность в основном для малоэтажного строительства [2, 3]. Развитие строительной отрасли, увеличение объемов научных исследований [4, 5], а также новые задачи, поставленные перед отраслью в связи с освоением Арктической зоны РФ [6] обусловили расширение сферы использования модульного домостроения благодаря совершенствованию технологии и монтажа, а также конструктивным решениям модульных блоков [7, 8].

На V Международном форуме «День инноваций в архитектуре», который состоялся 4 декабря 2019 г. в Москве, в рамках



**Рис. 1.** Одноэтажные модули после сборки на заводе

«круглого стола» «Тенденции развития индустриального модульного домостроения» отмечалось, что вслед за Европой на российский рынок вышел новый уникальный инновационный строительный продукт, отвечающий современному представлению широких слоев общества с различными экономическими возможностями о комфортном жилье, — модульное домостроение. Оно позволяет решать задачу оперативного обеспечения людей комфортным жильем в случае разрушительного действия стихии (пожары, землетрясения, наводнения, ураганы и т. д.), техногенных аварий, а также при расселении людей из ветхого и аварийного жилья. По данным специалистов фирмы «КНАУФ», около 30 % зданий в Европе возводят с

использованием систем модульного домостроения.

В настоящее время компанией ООО «Новый дом» разработаны и внедряются на российском строительном рынке объемно-модульные технологии, конструкции которых изготавливают на специализированных заводах «КНАУФ» (рис. 1).

На открытии завода модульного домостроения в Красногорске (2019 г.) губернатор Московской обл. А. Ю. Воробьев подчеркнул, что 10–15 % рынка жилья в области возводится из объемных модулей фирмы «КНАУФ».

Следует отметить, что аналогов такому проекту жилищного домостроения пока нет. Скорость возведения двух-четырёхэтажных жилых и общественных комплексов составляет 3–4 мес при стоимости 1 м<sup>2</sup> от 35–40 тыс. р. Типовые проекты жилых и общественных малоэтажных зданий из модулей «КНАУФ» показаны на рис. 2. Элементы здания с полной внутренней отделкой и инженерией поставляются на стройплощадку в виде готовых 3D-структур, которые устанавливают в проектное положение, соединяют с фундаментом и между собой.

В настоящее время рассматривается возможность применения объемно-модульной технологии в районах с сейсмической активностью. В этой связи Научно-исследовательским институтом экс-

**Рис. 2.** Общественное (а) и жилое (б) здания из модулей «КНАУФ»



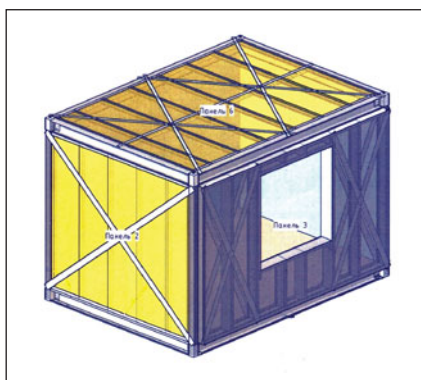


Рис. 3. Экспериментальный образец одноэтажного модуля

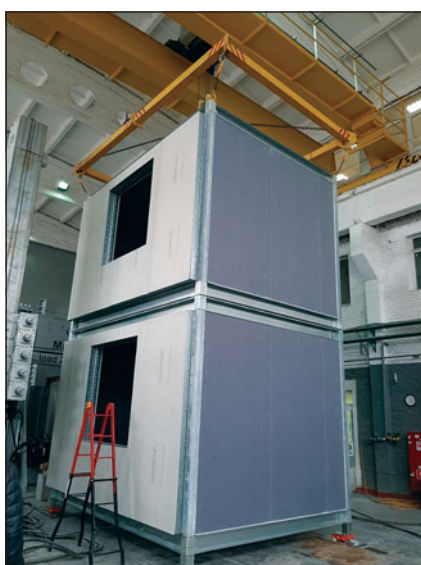


Рис. 4. Двухэтажный экспериментальный модуль

периментальной механики НИУ МГСУ были выполнены экспериментальные исследования по оценке сейсмостойкости двухэтажного фрагмента здания, который состоял из двух одноэтажных модулей, изготовленных на заводе «КНАУФ». Ранее оценку сейсмостойкости модульных блоков не проводили, за исключением отдельных численных исследований [9, 10].

**Цель испытаний** — оценка действительной работы, сейсмостойкости несущих и ограждающих конструкций, а также узловых соединений двухэтажного модуля жилого дома при действии динамических нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия



Рис. 5. Подвижная опора модели

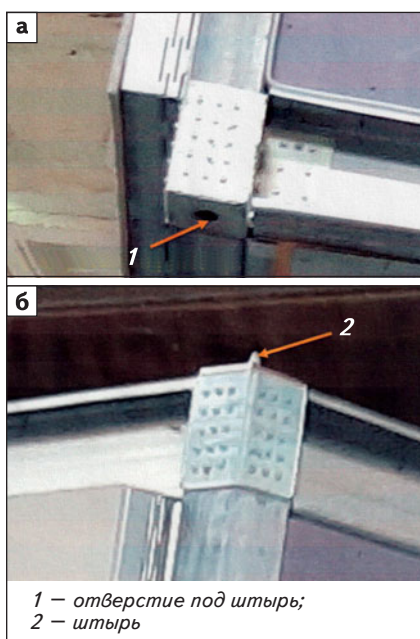


Рис. 6. Конструкция соединения блоков по высоте модуля

при землетрясениях интенсивностью 7–9 баллов по ГОСТ Р 57546.

Конструктивно каждый одноэтажный модуль двухэтажного экспериментального фрагмента запроектирован по стоечно-балочной схеме (рис. 3). Он включал в себя следующие элементы: стойки-колонны из труб квадратного профиля сечением 100×4 мм с горячеоцинкованным покрытием, несущие балки швеллерного профиля № 20, конструкции каркаса панелей из гнутых профилей 200×12 мм, связывающие и распорные элементы.

Монтаж модели здания из изделий фирмы «КНАУФ» (рис. 4) состоял из следующих этапов.

1. На бетонное основание лабораторного корпуса устанавливали металлические опорные пластины толщиной 30 мм, на которые монтировали четыре подкатные опоры CRA-4 грузоподъемностью 60 кН каждая. На подкатные опоры с помощью сварки крепили элементы опорных стоек модели (рис. 5).

2. На специальный штырь, расположенный в верхней опорной зоне стойки нижнего модуля, устанавливали верхний блок двухэтажного экспериментального фрагмента (рис. 6).

3. Блоки модуля скрепляли между собой по высоте экспериментального фрагмента с помощью накладной пластины, а также с использованием штыревого соединения (см. рис. 6). Принятая конструкция соединения блоков модуля позволяет исключить сдвиг верхнего модуля относительно нижнего при действии горизонтальной статической или динамической нагрузок.

4. Динамические гидроцилиндры (рис. 7) создавали воздействия, параметры которых на каждом этапе нагружения определялись программой испытаний: ускорения — от 0,2 до 4 м/с<sup>2</sup>; частотный спектр воздействий — от 1 до 30 Гц; амплитуда перемещений штока гидроцилиндров в зависимости от частоты — от ±50 до ±150 мм. С помощью двух стальных упоров, жестко связанных с основанием, обеспечивалась передача динамической нагрузки от гидроцилиндров на экспериментальный фрагмент.

5. Измерительная аппаратура элементов стенда включала в себя одно- и трехосные акселерометры, тензорезисторы, комплекс оборудования для регистрации данных измерительных приборов. Следует отметить, что используемая система задания динамической нагрузки позволяет моделировать циклическую и произвольную акселерограммы, получае-

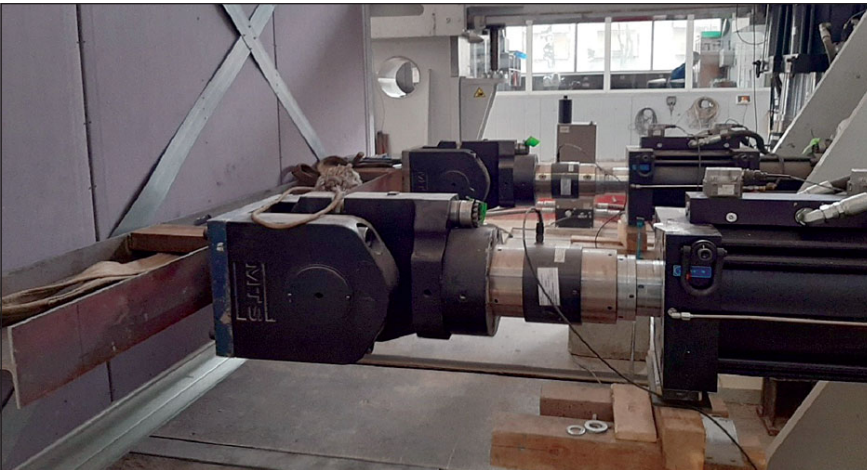


Рис. 7. Расположение гидроцилиндров относительно модуля

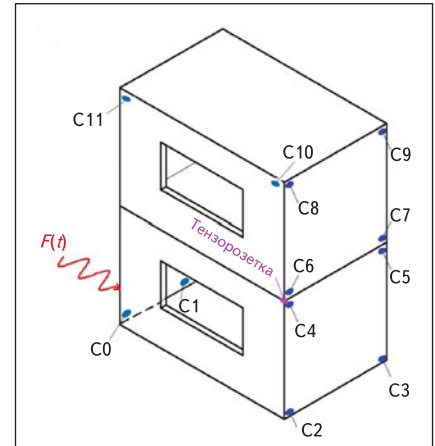


Рис. 8. Схема расстановки акселерометров и тензорезисторов на модуле

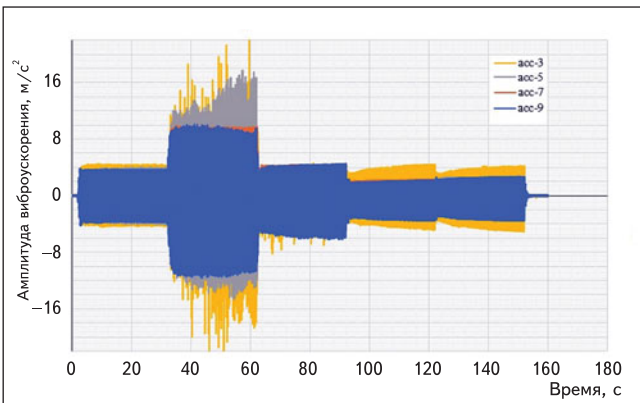


Рис. 9. Акселерограмма виброускорения в точках 3, 5, 7 и 9

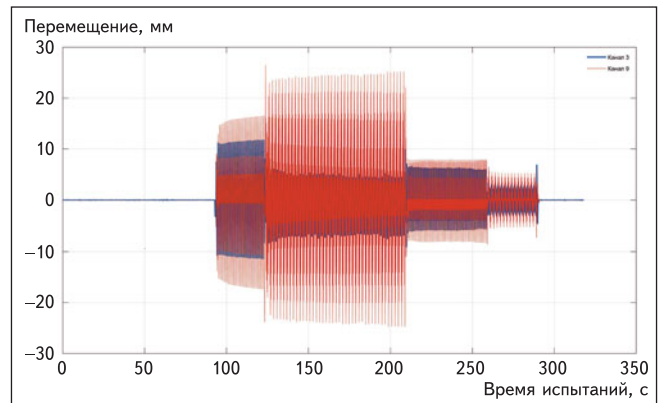


Рис. 10. Акселерограмма виброперемещений в верхнем и нижнем уровнях модели

мые при землетрясениях. Схемы приложения динамической нагрузки к стенду и места установки приборов на двухэтажном фрагменте приведены на рис. 8.

**Программа и методика испытаний.** Эквивалентное сейсмическое воздействие моделировалось горизонтальными синусоидальными колебаниями фрагмента экспериментального образца, которые возбуждались перемещением с заданной частотой и амплитудой штоков гидроцилиндров, жестко закрепленных к конструкции стенда. Гидроцилиндром управлял цифровой контроллер MTS Flex Test с возможностью изменения его параметров в процессе работ. Уровень динамического воздействия задавался в соответствии с про-

граммой испытаний и включал в себя следующие этапы ускорений:  $a_1 = 1 \text{ м/с}^2$ ,  $a_2 = 2 \text{ м/с}^2$ ,  $a_3 = 4 \text{ м/с}^2$ ,  $a_4 = 4 \text{ м/с}^2$  при частотах колебаний системы от 3 до 5 Гц, близких к собственной частоте фрагмента (установлена по результатам расчета модуля на ЭВМ). Виброускорения пересчитывали в виброперемещения и задавали гидроцилиндрам в качестве входного воздействия (сигнала). Контроль задаваемого виброускорения осуществляли с помощью датчиков перемещений.

К несущим стальным элементам двухэтажного фрагмента на высоте 800 и 6000 мм крепили акселерометры для определения ускорений в ортогональных направлениях. На стальные элементы фрагмента эксперименталь-

ной модели устанавливали также тензорезисторы для определения возникающих в элементах деформаций.

**Результаты испытаний и их анализ.** Проанализируем результаты динамических испытаний двухэтажного фрагмента на четвертом этапе исследований (частотный спектр от 3 до 5 Гц,  $a_4 = 4 \text{ м/с}^2$ ). Ускорения элементов конструкции (входное динамическое воздействие с ускорением  $a_4 = 4 \text{ м/с}^2$ ) представлены на рис. 9. Ускорение конструкции в верхней точке двухэтажного фрагмента в зависимости от частоты воздействия гидроцилиндров изменялось от 0,2 до 22  $\text{м/с}^2$ . Как видно из графика акселерограммы (см. рис. 9), при частоте 3,5 Гц имел место резонанс.

нанс. При этом повреждений элементов несущих и ограждающих конструкций не установлено. Перемещения верха фрагмента модуля в зависимости от частотного спектра воздействий изменялись от 8,7 до 26,1 мм (рис. 10), амплитуды усилий на гидроцилиндрах (т. е. усилия, которые передавались на стенд) — от 8 до 21 кН. Таким образом, распределенная нагрузка на 1 м<sup>2</sup> модуля от динамического воздействия гидроцилиндров составляла ~ 2,6 кН.

Деформации стальных накладок в зависимости от частотного спектра воздействий варьировались от  $0,5 \cdot 10^{-4}$  до  $3 \cdot 10^{-4}$ , при этом максимальное напряжение в накладке вдоль действия динамической нагрузки составило 63 МПа.

До начала проведения экспериментальных исследований спе-

циалистами ООО «Строй-снаб» был выполнен расчет двухэтажного модуля при моделировании сейсмического воздействия с помощью ПК Autodesk Robot Structural Analysis Professional (RSAPRO). По результатам работы было установлено, что при собственной частоте колебаний здания 3,52 Гц первая форма колебаний характеризовалась сдвигом вдоль длинной стороны модуля, при частоте 4,86 Гц вторая форма колебаний — кручением здания, при 5,09 Гц третья форма колебаний — сдвигом по короткой стороне здания.

Данные динамического расчета достаточно хорошо соответствуют с результатами исследования: резонанс сооружения в эксперименте был зафиксирован в интервале частот от 3 до 5 Гц. На основе анализа результатов динамических испыта-

ний и расчета рекомендована замена плоских стальных связей на уголкового (в местах стыковки опорных стоек по высоте сооружения), которые обеспечивают восприятие горизонтальных нагрузок, действующих как вдоль, так и поперек модулей.

### Вывод

Проведенные испытания показали, что сейсмостойкость несущих и ограждающих конструкций двухэтажного модуля жилого дома из изделий фирмы «КНАУФ» при действии динамических нагрузок (в том числе при резонансе), моделирующих сейсмические воздействия интенсивностью 7–9 баллов по шкале MSK-64, обеспечена. Модульные здания системы «КНАУФ» могут быть рекомендованы для применения как в обычных, так и в сейсмоопасных регионах РФ.

### ЛИТЕРАТУРА

- Захарова М. В., Пономарев А. Б. Опыт объемно-модульного строительства зданий и сооружений // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2017. Т. 2. С. 190–198.
- Галустьян В. В. Объемно-модульное домостроение — малоэтажному строительству // Промышленное и гражданское строительство. 2007. № 12. С. 14–15.
- Евдокимов В. О., Чиликина К. В., Скороходов А. К., Ризатдинова А. Р. Строительство модульного жилья из блок-контейнеров // Тр. конф. «Роль науки в формировании современной виртуальной реальности». Новосибирск, 2018. С. 11–14.
- Абрамян С. Г., Улановский И. А. Модульное строительство и возможность применения модульных конструкций при надстройке зданий // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4(51). С. 238.
- Зуева Н. И., Николаева Е. Ю. Исследования НДС структурных блоков типа «ЦНИИСК» размерами 8×12 м // Вестник ПНИПУ. 2017. № 2. С. 64–75.
- Русланова А. В., Лабудин Б. В., Мелехов В. И., Филиппов В. В. Применение объемно-модульного домостроения как перспективное развитие Арктической зоны РФ // Тр. VIII междунар. науч.-техн. конф. «Строительная наука-XXI: теория, образование, практика, инновации Северо-Арктическому региону». Архангельск: Свое издательство, 2017. С. 242–250.
- Сычев С. А. Исследования изменения трудозатрат монтажа сварочного объемно-модульного строительства // Промышленное гражданское строительство. 2015. № 11. С. 67–70.
- Холопов И. С., Широков В. С., Соловьев А. В. Анализ напряженно-деформированного состояния быстровозводимого модульного здания // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 6. С. 15–19.
- Вашпанов К. С. Сейсмостойкость объемно-модульных зданий // Вестник Череповецкого государственного университета. 2012. № 4(42). С. 7–11.
- Широков В. С. Определение напряженно-деформированного состояния модульных зданий при действии динамических нагрузок // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Самара: СГТУ, 2017. С. 23–27.
- Шаблинский Г. Э., Зубков Д. А. Натурные динамические исследования строительных конструкций. М.: АСВ, 2009. 216 с.

### REFERENCES

- Zakharova M. V., Ponomarev A. B. Volume-modular construction's experience of buildings and structures. *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika*, 2017, vol. 2, pp. 190–198. (In Russian).

2. Galustyan V. V. Three-dimensional building modules for low-rise housing. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2007, no. 12, pp. 14–15. (In Russian).
3. Evdokimov V. O., Chilikina K. V., Skorokhodov A. K., Rizatdinova A. R. Sconstruction of modular housing from block containers. *Tr. konf. "Rol' nauki v formirovaniy sovremennoy virtual'noy real'nosti"*. [Proc. "The role of science in shaping modern virtual reality"], Novosibirsk, 2018, pp. 11–14. (In Russian).
4. Abramyan S. G., Ulanovskiy I. A. Modular construction and opportunities to use of modular structures in building superstructures. *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2018, no. 4(51), pp. 238. (In Russian).
5. Zueva N. I., Nikolaeva E. Yu. Investigation of the stress-strain state of structural units of the type "TSNIISK" size 18×12 m. *Vestnik PNIPU*, 2017, no. 2, pp. 64–75. (In Russian).
6. Ruslanova A. V., Labudin B. V., Melekhov V. I., Filippov V. V. Volume and modular domostroyeniю for the high latitude of the arctic. *Sb. tr. konferentsii "Stroitel'naya nauka-XXI: teoriya, obrazovanie, praktika, innovatsii Severo-Arkticheskomu regionu"* ["Construction science-XXI: theory, education, practice, innovation for the North-Arctic region"]. Arkhangelsk, Svoe izdatel'stvo Publ., 2017, pp. 242–250. (In Russian).
7. Sychev S. A. Study of changes in labor costs of installation of high-speed volumetric modular construction. *Promyshlennoe grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2015, no. 11, pp. 67–70. (In Russian).
8. Kholopov I. S., Shirokov V. S., Solov'ev A. V. The strain-stress state analysis of a prefab building. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2015, no. 6, pp. 15–19. (In Russian).
9. Vashpanov K. S. Seismic resistance of volume-modular buildings. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 4(42), pp. 7–11. (In Russian).
10. Shirokov V. S. Determination of the stress-strain state of modular buildings under dynamic loads. *Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture* [Traditions and innovations in construction and architecture]. Samara, SGTU Publ., 2017, pp. 23–27. (In Russian).
11. Shablinskiy G. E., Zubkov D. A. *Naturnye dinamicheskie issledovaniya stroitel'nykh konstruktсий* [Full-scale dynamic studies of building structures]. Moscow, ASV Publ., 2009. 216 p. (In Russian).

Для цитирования: 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.

For citation: Granovsky A. V., Smirnov V. A., Fedorov M. V., Sazonov A. S., Elutin A. M., Er-Ochir A. To the Assessment of Seismic Resistance of Buildings Made Using the Volume-Modular Technology of the Company "KNAUF". *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2020, no. 2, pp. 34–39. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2020.02.34-39. ■