АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ КОНСТРУКЦИЙ СПОРТИВНЫХ СООРУЖЕНИЙ¹

О.В. Мкртычев, В.Б. Дорожинский

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

В связи с проведением крупных международных спортивных соревнований в нашей стране за последнее десятилетие построено множество сооружений и стадионов. Каждое большепролетное сооружение является уникальным объектом со своими особенностями и спецификой.

Предмет исследования: в качестве предмета исследования выбраны конструкции стадионов, особенности и результаты их расчетов.

Цели: целью является обобщение полученных результатов, выводов и опыта для применения при проектировании новых спортивных сооружений.

Материалы и методы: для проведения исследований использовались проектные материалы и расчетные программные комплексы, основанные на методе конечных элементов.

Результаты: приведены данные из расчетов некоторых стадионов. Кратко описаны конструктивные решения, приведены результаты модального анализа конструкций покрытия и расчета блока трибун на согласованное движение зрителей.

Выводы: сделаны заключения о том, что конструкции покрытий целесообразнее проектировать в виде единого жесткого диска с применением наиболее легких материалов, точки опирания кровли целесообразно размещать на более низких отметках по высоте. Все это позволяет уменьшить поперечные сечения элементов покрытия и чаши стадионов, их массу и усилия в них, что особенно актуально для строительства в сейсмических районах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железобетонные конструкции, металлические конструкции, большепролетные спортивные сооружения, напряженно-деформированное состояние (НДС), динамика, сейсмика, землетрясение, расчет конструкций

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мкртычев О.В., Дорожинский В.Б. Анализ конструктивных решений и результатов расчетов конструкций спортивных сооружений // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. Вып. 2 (28). Ст. 2. Режим доступа: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.2.2

THE ANALYSIS OF THE CONSTRUCTION SOLUTIONS AND THE RESULTS OF THE STRUCTURAL ANALYSES OF THE SPORTS FACILITIES

O.V. Mkrtichev, V.B. Dorozhinskiy

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

In connection with holding of the major international sporting events, the set of the facilities and stadiums has been built in our country over the last decade. Each long-span facility is a unique object with its own features and specifics.

Subject of the study: the subject of the study is presented by the stadiums' structures, the features and the results of the analyses related to them.

Objectives: the objective is the generalization of the received results, conclusions and experience for the application for designing the new sports facilities.

Materials and methods: for carrying out the researches, the design documents and the design program complexes based on the finite element method have been used.

Results: the work provides the data on the analysis related to some of the stadiums. The construction solutions are briefly described, and the results of the modal analysis of the roof constructions and the analysis of the block of stands for the coordinated movement of the audience are presented.

Conclusions: the following conclusions have been made: it is more expedient to design the roof constructions in the form of an integral rigid disk with the use of the lightest materials, it is expedient to place the rest points of the roof on the lower height marks. All this allows to reduce the cross sections of the elements of the roof and the bowl of the stadiums, their weight and the efforts in them which is especially relevant for the construction in seismic areas.

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, грант №7.1524.2017/ПЧ.

KEY WORDS: reinforced concrete structures, metal structures, long-span sports facilities, the stress-strain state, dynamics, seismic, earthquake, structural analysis.

FOR CITATION: Mkrtichev O.V., Dorozhinskiy V.B. Analiz konstruktivnykh resheniy i rezul'tatov raschetov konstruktivnykh sportivnykh sooruzheniy [The analysis of the construction solutions and the results of the structural analyses of the sports facilities]. Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie [Construction: Science and Education]. 2018, vol. 8, issue 2 (28), paper 2. Available at: <http://nso-journal.ru>. (In Russian) DOI: 10.22227/2305-5502.2018.2.2

ВВЕДЕНИЕ

Сотрудниками научно-исследовательской лаборатории «Надежность и сейсмостойкость сооружений» НИУ МГСУ за прошедшие годы выполнено научно-техническое сопровождение некоторых большепролетных спортивных сооружений футбольных стадионов. Данный класс сооружений имеет повышенный уровень ответственности, для каждого объекта характерны свои уникальные особенности и принятые конструктивные решения.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Основные вопросы, этапы проектирования и расчетов конструкций отдельных стадионов более подробно рассмотрены в работах научно-исследовательских организаций, таких как ОАО «ЦНИИП-промзданий», «НИЦ «Строительство» [1–4]. Одной из особенностей таких сооружений является необходимость обеспечения комфортности зрителей на трибунах при согласованном движении толпы людей [5–8]. Отдельными вопросами стоят проектирование большепролетных конструкций в сейсмически опасных районах и определение снеговых и ветровых нагрузок по результатам испытаний [9–20].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчеты выполнялись как в линейной постановке, так и с учетом геометрической и физической нелинейностей в нелинейной статической и нелинейной динамической постановках. Для решения нелинейных статических задач использовался метод Ньютона—Рафсона, при решении динамических задач использовались явные схемы прямого интегрирования уравнений движения. Результаты получены в таких программных комплексах, как ПК ЛИРА и ПК LS-Dyna, связка которых позволяет проводить все необходимые исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В большинстве случаев футбольные стадионы представляют собой сооружения овальной формы, в которых выделяются, в основном, конструкции трибунных блоков (чаша стадиона) и металлические конструкции кровли [1–3]. Конструкции чаши

выполняются в виде полного рамного каркаса из монолитного железобетона и разделены на температурно-усадочные блоки. Временные трибуны из сборного металлического каркаса обычно располагаются на верхних ярусах.

Покрытие может опираться на трибуны как в уровне верхней отметки конструкций чаши (рис. 1, а), так и в уровне нескольких отметок (рис. 1, б), а также на отдельные массивные опорные элементы в нижней части (рис. 1, в) [4]. Конструкции выполняются в виде рамного каркаса или системы радиальных и кольцевых ферм, объединенных системой связей и распорок.

Несущие конструкции чаши стадиона представляют собой в плане радиально-кольцевую каркасную рамную (в двух направлениях) систему, состоящую из колонн, стен и диафрагм жесткости, а также перекрытий и балок в двух направлениях. Со стороны футбольного поля рамы имеют наклонные балки со ступенчатой верхней гранью для устройства трибун. Одним из главных требований, предъявляемых к конструкциям трибун, является обеспечение несущей способности конструкций и комфортности зрителей при динамическом воздействии, обусловленным согласованными движениями большого числа людей [5–8]. Минимальная частота локальных колебаний трибун в горизонтальном направлении ограничивается величиной 3 Гц, в вертикальном направлении — 6 Гц. Расчеты выполнялись во временной области [9–12].

Основные результаты для трибун стадиона в г. Саранске приведены на рис. 2 и в табл. 1, 2.

Конструкции покрытия в большинстве случаев состоят из радиальных и кольцевых ферм (см. рис. 1, а, в) или рам (см. рис. 1, а, б), объединенных системой связей и распорок. Форма, размеры и конструктивные особенности зависят от архитектурного облика стадиона. Так, для стадиона в г. Санкт-Петербурге можно дополнительно выделить две ездые фермы (пролетом 251 м), по которым перемещается раздвижная крыша, и конструкции восьми несущих наклонных пилонов (высотой 108 м), к которым с помощью вант подвешена основная часть крыши (см. рис. 1, в). Покрытие выполняется как в виде единого жесткого диска (см. рис. 3, а), так и в виде отдельных температурных блоков (см. рис. 3, б).

Основными нагрузками, действующими на покрытие, являются снеговая нагрузка и нагрузка от

Рис. 1. Варианты опирания конструкций покрытия: *а* — опирание на одном уровне (стадион в г. Саранске); *б* — опирание в нескольких уровнях (стадион в г. Ростове-на-Дону и г. Екатеринбурге); *в* — опирание на железобетонные массивы (стадион в г. Санкт-Петербурге)

Табл. 1. Условие необходимости проверки трибун стадиона по предельным состояниям первой и второй групп

Конструкция	Частота локальных колебаний	
	Максимальное значение $f_{\max}$, Гц	Предельное минимальное значение $f_{\min}$, Гц
Блок трибун (горизонтальные колебания)	3,1	3,0
Блок трибун (вертикальные колебания)	8,4	6,0
Трибуна нижнего яруса	16,1	12,5
Трибуна среднего яруса	15,8	12,5
Трибуна верхнего яруса	21,3	12,5

Табл. 2. Оценка динамической комфортности пребывания людей на трибунах

Конструкция	Ускорения по направлению оси Y		Ускорения по направлению оси Z	
	Максимальное значение $a_{y(x),\max}$, м/с ²	Предельное максимальное значение $0,25\sqrt{f}$, м/с ²	Максимальное значение $a_{z,\max}$, м/с ²	Предельное максимальное значение $0,5\sqrt{f}$, м/с ²
Трибуна нижнего яруса	0,28	1,00	0,70	2,00
Трибуна среднего яруса	0,10	0,99	0,43	1,99
Трибуна верхнего яруса	0,27	1,15	0,45	2,31

Рис. 2. Формы колебаний конструкций трибун (стадион в г. Саранске): а — горизонтальная форма для блока трибун, частота $f = 3,1$ Гц; б — локальная вертикальная форма, частота $f = 16,01$ Гц

a

б

Рис. 3. Первая форма и частота колебаний (стадион в г. Саранске): *a* — единое покрытие, частота $f_1 = 0,42$ Гц; *б* — разделенное покрытие, частота $f_1 = 0,75$ Гц

кровельного покрытия [13, 14]. Значения снеговых нагрузок определялись по результатам аэродинамических испытаний, нагрузка от кровли составляла 0,6...0,7 кН/м².

ВЫВОДЫ

Можно сделать следующие выводы:

1. Опирающие конструкции покрытия на железобетонные элементы более рационально осуществлять на нижних отметках. Такое решение позволяет снизить усилия в вертикальных элементах чаши.

2. Конструкции покрытия в виде единого диска по сравнению с разрезанными конструкциями имеют большую жесткость и надежность, что особенно актуально при сейсмических и аварийных воздействиях [15–17].

3. Одним из способов снижения сейсмической нагрузки на несущие конструкции зданий и сооружений является снижение веса используемых при строительстве материалов, поэтому в качестве кровельного покрытия целесообразно использовать пленки-мембраны из ETFE (этилен тетрафторэтилен), вес которых составляет 0,03 кН/м² [18–20]. При этом усилия могут снижаться до 10 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nagy Z., Cristutiu M. Local and global stability analysis of a large free span steel roof structure // Proceedings of the International Conference on Computational Structures Technology. 2012. No. 11. Pp. 1–11.
2. Siko L., Botis M. Arched hollow section trusses in long span structures // Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series I: Engineering Sciences. 2013. Vol. 6 (55). No. 2. Pp. 117–122.
3. Семенов А.А., Порываев И.А., Шигалов Р.Р. и др. Вариантное проектирование стадиона «Фишт» в городе Сочи // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 6 (45). С. 7–33.
4. Гранев В.В., Келасьев Н.Г. Особенности конструктивных решений футбольного стадиона на 45000 зрителей в Ростове-на-Дону // Деловая слава России. 2015. № 50. С. 28–30.
5. Назаров Ю.П., Симбиркин В.Н. Анализ и ограничение колебаний конструкций при воздействии людей // Вестник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Исследования по теории сооружений. 2009. № 1 (XXVI). С. 10–18.
6. Назаров Ю.П., Позняк Е.В. Теория квазистатического расчета трибун спортивных сооружений на согласованные действия зрителей // Научный журнал строительства и архитектуры. 2017. № 1. С. 100–112.
7. Sim J.H. *Human-Structure Interaction in Cantilever Grandstands*: Ph.D. Thesis. University of Oxford, 2006.
8. Živanović S., Pavić A., Reynolds P. Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review // Journal of Sound and Vibration. 2005. Vol. 279. No. 1–2. Pp. 1–74. DOI:10.1016/j.jsv.2004.01.019
9. Mkrtychev O.V., Andreev V.I., Dzinchvelashvili G.A., Bunov A.A. Settlement Researches of Seismically Isolated Buildings // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vols. 752–753. Pp. 599–604. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.752-753.599>
10. Mkrtychev O.V., Dzinchvelashvili G.A., Busalova M.S. Calculation of a multi-storey monolithic concrete building on the earthquake in nonlinear dynamic formulation // Procedia Engineering. 2015. Vol. 111. Pp. 545–549. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.039>
11. Мкртычев О.В., Андреев М.И. Расчет уникального высотного здания на землетрясения в нелинейной динамической постановке // Вестник МГСУ. 2016. № 6. С. 25–33. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.6.25-33
12. Мкртычев О.В., Бунов А.А., Дорожнинский В.Б. Сравнение линейно-спектрального и нелинейного динамического методов расчета на примере здания рамно-связевой конструктивной схемы при землетрясении // Вестник МГСУ. 2016. № 1. С. 57–67. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.1.57-67
13. Попов Н.А., Лебедева И.В., Богачев Д.С., Березин М.М. Воздействие ветровых и снеговых нагрузок на большепролетные покрытия // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 12. С. 71–76.
14. Лебедич И.Н., Павловский Р.Н., Жданов А.И. Исследование аэродинамических особенностей навеса над зрительскими трибунами стадиона ФК «Днепр» в городе Днепропетровске // Металлические конструкции. 2007. Т. 13. № 2. С. 65–78.
15. Антикаев Ф.Ф. Меры по снижению ущерба от землетрясений // Природные опасности России. 2000. № 7. С. 165–195.
16. Pintoa P.E., Giannini R., Franchin P. Seismic reliability analysis of Structures. IUSS Press, 2004. P. 370.
17. Мкртычев О.В., Джинчвелашвили Г.А. Оценка нелинейной работы зданий и сооружений при аварийных воздействиях // Проблемы безопасности российского общества. 2012. № 3. С. 17–31.
18. Mushchanov V., Gorokhov Y., Vardanyan A. et al. Particular features of calculation and design of

long-span membrane roofs. Procedia Engineering. 2015. Vol. 117. Pp. 990–1000. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.208>

19. Седов А.В., Радзиевский Е.Е. Анализ светопрозрачных конструкций при помощи математиче-

ского моделирования // Естественные и технические науки. 2015. № 6 (84). С. 415–417.

20. Еремеев П.Г. Тентовые мембраны для ограждающих конструкций покрытий над трибунами стадионов // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 4. С. 33–36.

Поступила в редакцию 29 сентября 2017 г.

Принята в доработанном виде 19 октября 2017 г.

Одобрена для публикации 29 мая 2018 г.

О Б А В Т О Р А Х: **Мкртычев Олег Вартанович** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сопротивления материалов, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Надежность и сейсмостойкость сооружений», **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, mkrtychev@yandex.ru;

Дорожнинский Владимир Богданович — кандидат технических наук, ассистент кафедры сопротивления материалов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, dorozhinski@mail.ru.

INTRODUCTION

The staff members of the MGSU research laboratory “The Reliability and Seismic Stability of Constructions” over the years have executed the scientific and technical maintenance of some of the long-span sports facilities of the football stadiums. This class of facilities has the increased level of responsibility, and there are the unique features and the made construction solutions characteristic for each object.

LITERATURE REVIEW

The main issues, the design stages and the stages of the structural analyses of the certain stadiums are considered in more detail in the works of the research organizations, such as JSC “TSNIIPromzdany”, “The Research Center “Construction” [1–4]. One of the features of such constructions is the need of ensuring the comfort of the audience in the stands during the coordinated movement of a crowd of people [5–8]. The design of the long-span structures in the seismically dangerous areas and the determination of the snow and wind loads according to the results of tests are usually considered as the separate issues [9–20].

MATERIALS AND METHODS

The analyses have been carried out using the linear statement, and also taking into account the geometrical and physical nonlinearities in the nonlinear static and nonlinear dynamic statements. For the solution of the nonlinear static tasks the Newton-Rafson method was used, and at the solution of the dynamic tasks the obvious schemes of the direct integration of the equations of the movement were used. The results were obtained in such program complexes as the LIRA PC

and the LS-Dyna PC the linkage of which allows to conduct all necessary researches.

RESEARCH RESULTS

In the majority of cases the football stadiums are the constructions of an oval form which consist of the structures of the blocks of stands (the stadium bowl) and the metal structures of the roof [1–3]. The bowl structures are usually made in the form of a full channel frame made of the monolithic reinforced concrete and are divided into the temperature and shrinkable blocks. The temporary stands made of the combined metal framework are usually settled down on the top tiers.

The roof can lean on the stands both at the level of the top mark of the bowl structures (figure 1, *a*), and at the level of the several marks (figure 1, *b*) and also on the separate massive basic elements in the lower part (figure 1, *c*) [4]. The structures are carried out in the form of the channel frame or the system of the radial and ring girders connected with the help of lacing and struts.

The bearing structures of the stadium bowl are presented in the plan as the radial ring channel frame (in the two directions) system consisting of the columns, walls and diaphragms of rigidity and also the overlappings and beams in the two directions. From the football field the frames have the inclined beams with a step top side for making of the stands. One of the major requirements imposed to the constructions of stands is ensuring the bearing ability of the constructions and the comfort of the audience at the dynamic influence, caused by the coordinated movements of a large number of people [5–8]. The minimum frequency of local fluctuations of the stands in the horizontal direction is limited to 3 Hz, in the vertical direction — 6 Hz. The analyses were carried out in the time domain [9–12].

Figure 1. The options of the roof constructions' rest: *a* — the rest at the same level (the stadium in Saransk); *b* — the rest at the several levels (the stadiums in Rostov-on-Don and Yekaterinburg); *c* — the rest on the reinforced concrete solid monoliths (the stadium in St. Petersburg)

Table 1. The condition of necessity of checking of the stadium stands according to the limit states of the first and the second groups

The construction	Frequency of the local fluctuations	
	The peak value $f_{\max}$, Hz	The extreme peak value f_{extreme} , Hz
The block of stands (horizontal fluctuations)	3,1	3,0
The block of stands (vertical fluctuations)	8,4	6,0
The stand of the lower tier	16,1	12,5
The stand of the middle tier	15,8	12,5
The stand of the top tier	21,3	12,5

Table 2. The assessment of the dynamic comfort of stay of people in the stands

The construction	The accelerations in the direction of axis Y		The accelerations in the direction of axis Z	
	The peak value $a_{y(x),\max}$, m/s ²	The extreme peak value $0,25\sqrt{f}$, m/s ²	The peak value $a_{z,\max}$, m/s ²	The extreme peak value $0,5\sqrt{f}$, m/s ²
The stand of the lower tier	0.28	1.00	0.70	2.00
The stand of the middle tier	0.10	0.99	0.43	1.99
The stand of the top tier	0.27	1.15	0.45	2.31

Figure 2. The vibration modes of the stands constructions (the stadium in Saransk): *a* — the horizontal form for the block of stands, the frequency $f = 3.1$ Hz; *b* — the local vertical form, the frequency $f = 16.01$ Hz

Figure 3. The first form and the frequency of fluctuations (the stadium in Saransk): *a* — the integrated roofing, the frequency $f_1 = 0.42$ Hz; *b* — the divided roofing, the frequency $f_1 = 0.75$ Hz

The core results for the stands of the stadium in Saransk are presented in fig. 2 and in tables 1, 2.

The roof construction in most cases consists of the radial and ring girders (see figure 1, *a, c*) or the frames (see figure 1, *a, b*) connected with the help of lacing and struts. The form, the sizes and the design features depend on the architectural treatment of the stadium. Thus, for the stadium in St. Petersburg it is possible to allocate in addition the two riding grids (with the aperture of 251 m) on which there are the shifting sliding roof and the constructions of the eight bearing inclined poles (with the height of 108 m) on which, by means of the guy roosts, the main part of the roof is suspended (see figure 1, *c*). The roof is carried out both in the form of an integral rigid disk (see figure. 3, *a*) and in the form of the separate temperature blocks (see figure 3, *b*).

The main loads imposed on the roof are the snow load and the load from the roof cladding [13, 14]. The values of the snow loads were determined according to the results of the aerodynamic tests, the load from the roof cladding was 0.6...0.7 kN/m².

CONCLUSIONS

It is possible to make the following conclusions:

1. It is more rational to make the rest of the roof constructions on the reinforced concrete elements on the lower marks. Such decision allows to reduce the efforts in the vertical elements of the bowl.

2. The roof constructions in the form of an integral disk in comparison with the cut constructions have big rigidity and reliability which is especially actual for the cases of the seismic and emergency exposures [15–17].

3. One of the ways of decreasing the seismic load on the bearing structures of buildings and constructions is the reduction in weight of the materials used at construction and therefore it is expedient to use the films-membranes from ETFE (ethylene tetrafluoro-ethylene) as the roof cladding, the weight of which is 0.03 kN/m² [18–20]. At the same time the efforts can decrease until they reach the level of 10 %.

REFERENCES

1. Nagy Z., Cristutiu M. Local and global stability analysis of a large free span steel roof structure. *Proceedings of the International Conference on Computational Structures Technology*. 2012, no. 11, pp. 1–11. (In Russian)
2. Siko L., Botis M. Arched hollow section trusses in long span structures. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series I: Engineering Sciences*. 2013, vol. 6 (55), no. 2, pp. 117–122.
3. Semenov A.A., Poryvaev I.A., Shigalov R.R. et al. Variantnoe proektirovanie stadiona «Fisht» v gorode Sochi [Trial design of the Fisht Olympic Stadium roof in Sochi]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy* [Construction of Unique Buildings and Structures]. 2016, no. 6 (45), pp. 7–33. (In Russian)
4. Granev V.V., Kelas'ev N.G. Osobennosti konstruktivnykh resheniy futbol'nogo stadiona na 45000 zriteley v Rostove-na-Donu [Features of constructive decisions of a football stadium for 45000 spectators in Rostov-on-Don]. *Delovaya slava Rossii* [Business glory of Russia]. 2015, no. 50, pp. 28–30. (In Russian)
5. Nazarov Yu.P., Simbirkin V.N. Analiz i ograniichenie kolebaniy konstruktsey pri vozdeystvii lyudey [Analysis and limitation of structural vibrations under the influence of people]. *Vestnik TSNIISK im. V.A. Kucherenko. Issledovaniya po teorii sooruzheniy* [Bulletin of the V.A. Kucherenko TSNIISK. Studies on the theory of structures]. 2009, no. 1 (XXVI), pp. 10–18. (In Russian)
6. Nazarov Yu.P., Poznyak E.V. Teoriya kvazistaticheskogo rascheta tribun sportivnykh sooruzheniy na soglasovannye deystviya zriteley [Theory of a quasi-static analysis of sport grandstands under loads from concerted actions of spectators]. *Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arkhitektury* [Russian Journal of Building Construction and Architecture]. 2017, no. 1, pp. 100–112. (In Russian)
7. Sim J.H. *Human-Structure Interaction in Cantilever Grandstands: Ph.D. Thesis*. University of Oxford, 2006.
8. Živanović S., Pavić A., Reynolds P. Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review. *Journal of Sound and Vibration*. 2005, vol. 279, no. 1–2, pp. 1–74. DOI: 10.1016/j.jsv.2004.01.019
9. Mkrtychev O.V., Andreev V.I., Dzhinchvelashvili G.A., Bunov A.A. Settlement Researches of Seismically Isolated Buildings. *Applied Mechanics and Materials*. 2015, vols. 752–753, pp. 599–604. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.752-753.599>
10. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A., Busalova M.S. Calculation of a multi-storey monolithic concrete building on the earthquake in nonlinear dynamic formulation. *Procedia Engineering*. 2015, vol. 111, pp. 545–549. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.PROENG.2015.07.039](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.039)
11. Mkrtychev O.V., Andreev M.I. Raschet unikal'nogo vysoznogo zdaniya na zemletryaseniya v

ne-lineynoy dinamicheskoy postanovke [Calculation of the unique high-rise building for earthquakes in nonlinear dynamic formulation]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2016, no. 6, pp. 25–33. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2016.6.25-33

12. Mkrtychev O.V., Bunov A.A., Dorozhinskiy V.B. Sravnenie lineynno-spektral'nogo i neli-ney-nogo dinamicheskogo metodov rascheta na primere zdaniya ramno-svyazevoy konstruktivnoy skhemy pri zemletryaseni [Comparison of linear spectral and nonlinear dynamic calculation method for tie frame building structure in case of earthquakes]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2016, no. 1, pp. 57–67. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2016.1.57-67

13. Popov N.A., Lebedeva I.V., Bogachev D.S., Berezin M.M. Vozdeystvie vetrovykh i snegovykh nagruzok na bol'sheproletnye pokrytiya [Impact of Wind and Snow Loads on Large-Span Roofs]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2016, no. 12, pp. 71–76. (In Russian)

14. Lebedich I.N., Pavlovskiy R.N., Zhdanov A.I. Issledovanie aerodinamicheskikh osobennostey navesa nad zritel'skimi tribunami stadiona FK «Dnepr» v gorode Dnepropetrovske [Investigation of the aerodynamic features of the canopy over spectator stands of FC Dnipro in the city of Dnepropetrovsk]. *Metallicheskie konstruktsii* [Metal structures]. 2007, vol. 13, no. 2, pp. 65–78. (In Russian)

15. Aptikaev F.F. Mery po snizheniyu ushcherba ot zemletryaseni [Measures to reduce damage from earthquakes]. *Prirodnye opasnosti Rossii* [Natural hazards of Russia]. 2000, no. 7, pp. 165–195.

16. Pintoa P.E., Giannini R., Franchin P. *Seismic reliability analysis of Structures*. IUSS Press, 2004. P. 370. (In Russian)

17. Mkrtychev O.V., Dzinchvelashvili G.A. Ot-senka nelineynoy raboty zdaniy i sooruzheniy pri avari-nykh vozdeystviyakh [Evaluation of nonlinear operation of buildings and structures under emergency influences]. *Problemy bezopasnosti rossiyskogo obshchestva* [Problems of safety of Russian society]. 2012, no. 3, pp. 17–31. (In Russian)

18. Mushchanov V., Gorokhov Y., Vardanyan A. et al. Particular features of calculation and design of long-span membrane roofs. *Procedia Engineering*. 2015. vol. 117, pp. 990–1000. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.208>

19. Sedov A.V., Radzievskiy E.E. Analiz svetopro-zrachnykh konstruksiy pri pomoshchi matematicheskogo modelirovaniya [Analysis of translucent structures using mathematical modeling]. *Estestvennye i tekhnicheskoe nauki* [Natural and technical sciences]. 2015, no. 6 (84), pp. 415–417. (In Russian)

20. Ereemeev P.G. Tentovye membrany dlya ograzhdayushchikh konstruksiy pokrytiy nad tribuna-mi stadionov [Tent Membranes for Enveloping Structures of Roof over Stadium Tribunes]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2015, no. 4, pp. 33–36. (In Russian)

Received September 29, 2017.

Adopted in final form on October 19, 2017.

Approved for publication May 29, 2018.

ABOUT THE AUTHORS: **Mkrtychev Oleg Vartanovich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Strength of Materials, Chief of The Research Laboratory, Research Laboratory “Reliability and Earthquake Engineering”, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, mkrtychev@yandex.ru, ResearcherID: Q-2370-2017;

Dorozhinskiy Vladimir Bogdanovich — Candidate of Technical Sciences, Assistant, Department of Strength of Materials, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; dorozhinski@mail.ru.