

УДК 69.07

DOI 10.25628/UNIP.2020.44.1.013

ЗУБРИЦКИЙ М. А.
УШАКОВ О. Ю.
САБИТОВ Л. С.



**Зубрицкий
Максим
Александрович**

главный специалист
ООО «УралКонцептПроект»,
Екатеринбург,
Российская Федерация

e-mail:
zubrickiy_maksim@mail.ru



**Ушаков
Олег
Юрьевич**

кандидат технических наук,
доцент кафедры САПРОС
ИСИА УрФУ, Екатеринбург,
Российская Федерация

e-mail:
ushakovoleg@yandex.ru



**Сабитов
Линар
Салихзанович**

кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Биомедицинской
инженерии и управления
инновациями»,
Казанский федеральный
университет, Казань,
Российская Федерация

e-mail:
sabitov-kgasu@mail.ru

Учет высших форм колебаний при оценке сейсмостойкости многоэтажных стальных рам нелинейным статическим методом

В статье предложена методика учета высших форм колебаний при оценке сейсмостойкости многоэтажных стальных однопролетных рам нелинейным статическим методом. Также усовершенствован поиск характеристической точки при сейсмическом воздействии. В рамках исследования выполнена верификация предложенной методики прямым динамическим методом. Установлено, что предложенная методика позволяет значительно снизить машиноёмкость расчетов, исключая при этом дефицит сейсмостойкости.

Ключевые слова: сейсмическое воздействие, проектное землетрясение, максимальное расчетное землетрясение, линейно-спектральный анализ, нелинейный статический метод (Pushover Analysis), прямой динамический метод, стальные конструкции.

ZUBRITSKY M. A., USHAKOV O. Yu., SABITOV L. S.

ACCOUNT FOR THE CONTRIBUTION OF HIGHER VIBRATION MODES UNDER SEISMIC RESISTANCE ESTIMATION OF MULTISTORY STEEL FRAMES BY NONLINEAR STATIC METHOD

The article presents higher vibration modes accounting method to evaluate single-span multistory steel frames seismic resistance by nonlinear static method. Additionally characteristic point search was improved. As part of the study, in order to verify the proposed method series of nonlinear time history analysis was performed. Multimodal pushover analysis can significantly reduce calculation time excluding the earthquake resistance lack.

Keywords: seismic impact, strength level earthquake, ductility level earthquake, response spectrum analysis, nonlinear static method (Pushover Analysis), time history analysis, steel structures.

Введение

Ежегодно в мире происходит около 300 тыс. землетрясений. Эпицентр большинства из них находится вдали от населенных пунктов, а магнитуда воздействия достаточно мала. Однако некоторые землетрясения оказывают катастрофические воздействия на целые города, разрушая их и нанося колоссальный экономический ущерб. Повышение сейсмостойкости зданий и сооружений — одна из самых актуальных проблем при строительстве в сейсмически опасных зонах.

Согласно [1], при выполнении расчетов строительных конструкций с учетом сейсмиче-

ских воздействий необходимо рассмотреть две расчетные ситуации: сейсмические нагрузки, соответствующие уровню «Проектное землетрясение» (ПЗ); сейсмические нагрузки, соответствующие уровню «Максимальное расчетное землетрясение» (МРЗ).

Целью расчетов на ПЗ является определение проектных решений, позволяющих предотвратить частичную или полную потерю эксплуатационных свойств. Расчеты выполняются на основании линейно-спектральной теории в упругой постановке.

На действие МРЗ рассчитываются сконструированные по результатам ПЗ сечения и эле-

менты зданий и сооружений. Целью расчетов на МРЗ является оценка общей устойчивости, неизменяемости, однородности конструкций сооружения, допустимость уровня ускорений, перемещений, скоростей в элементах здания, сооружения, способность конструкций здания к перераспределению внешнего сейсмического воздействия за счет формирования пластических шарниров и иных нелинейных эффектов. Оценка сейсмостойкости при сейсмическом воздействии уровня МРЗ выполняется на основании прямого динамического метода путем интегрирования уравнений движения во временной области с использованием набора инструментальных записей ускорений основания при землетрясениях, наиболее опасных для сооружения, или синтезированных акселерограмм. Такие расчеты требуют ресурса времени, сложного программного обеспечения и специальной квалификации проектировщика.

Альтернативой прямого динамического расчета является нелинейный статический метод — *Pushover analysis* [2–4], при котором конструкция подвержена монотонно возрастающим горизонтальным усилиям. Для нахождения наиболее неблагоприятного отклика системы нелинейным статическим методом необходимо выполнить минимум два расчета с различным распределением инерционных горизонтальных сил по высоте системы:

- система инерционных сил, соответствующая главной форме собственных колебаний системы. Оценку сейсмостойкости системы с заданным распределением возможно выполнить, только если модальная масса рассматриваемой формы не менее 75%;
- система инерционных сил, полученная на основании суперпозиции инерционных сил нескольких форм колебаний. При этом суммарная модальная масса рассматриваемых колебаний не должна быть меньше 90%;
- универсальное распределение системы сил пропорционально сосредоточенным массам в узлах системы;
- адаптивная система инерционных сил, изменяющаяся в зависимости от перемещения узлов системы в процессе нагружения.

Дальнейший поиск характеристической точки на графике несущей способности системы, посредством которой оценивается ее сейсмостойкость, — процесс, требующий построения громоздких графиков

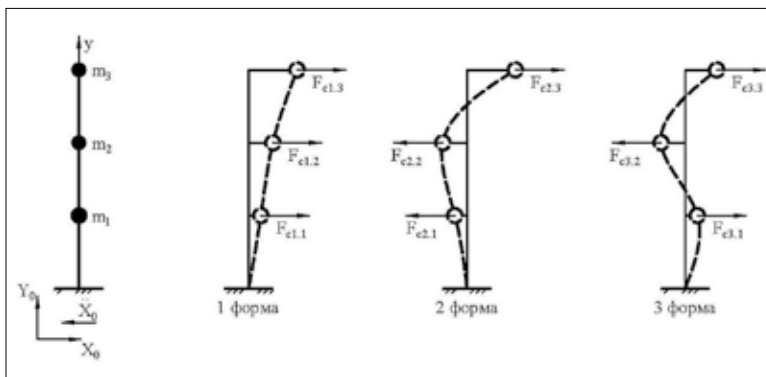


Иллюстрация 1. Графическое представление метода суммирования модальных откликов «Корень квадратный суммы квадратов». Автор М. А. Зубрицкий

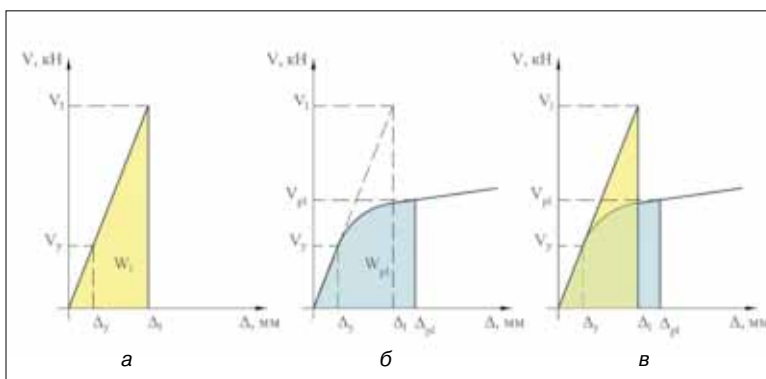


Иллюстрация 2. Определение энергии при упругом и упругопластическом поведении системы с одной степенью свободы: а — упругая работа; б — упругопластическая работа; в — равенство энергии при упругой и упругопластической работе. Автор М. А. Зубрицкий

и нетривиальных вычислений. В современных программных комплексах нелинейный статический метод реализован только на основании системы инерционных сил, соответствующей только одной из форм колебаний. Кроме того, отклик конструкции при заданном воздействии значительно меньше результатов, полученных на основании прямого динамического метода, посредством которого возможно наиболее точно оценить отклик конструкции на заданное сейсмическое воздействие [5].

Целью исследования является усовершенствование нелинейного статического метода в части учета высших форм колебаний, а также упрощения поиска характеристической точки применительно к стальным однопролетным многоэтажным рамам.

Методика учета высших форм колебаний

Для определения отклика системы с учетом влияния высших форм колебаний рассмотрим следующий метод, для чего введем понятие *модифицированной системы инерционных сил*.

Под *модифицированной системой инерционных сил* будем понимать систему сил, полученную на основании

суперпозиции сил методом «Корень квадратный суммы квадратов» [6], при которой перемещение верха рассматриваемой расчетной модели будет соответствовать суммарным перемещениям, полученным на основании линейно-спектрального анализа. Графическое представление сложения инерционных сил представлено на Иллюстрации 1.

Модифицированная система инерционных сил определяется выражением (1):

$$R_{sum} = \alpha \left(\sum_{i=1}^n R_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где R_i — модальный отклик конструкции, соответствующий i -й форме собственных колебаний.

Согласно [7, 8] для разрушения материала, независимо от того, какая будет приложена нагрузка (т. е. статическое медленное нагружение, динамическое — быстрое нагружение, однократное или многократное), необходимо затратить одно и то же количество энергии. Энергия деформации линейной системы с модифицированной системой инерционных сил тождественна энергии деформации системы с учетом пластических деформаций. Целевое значение

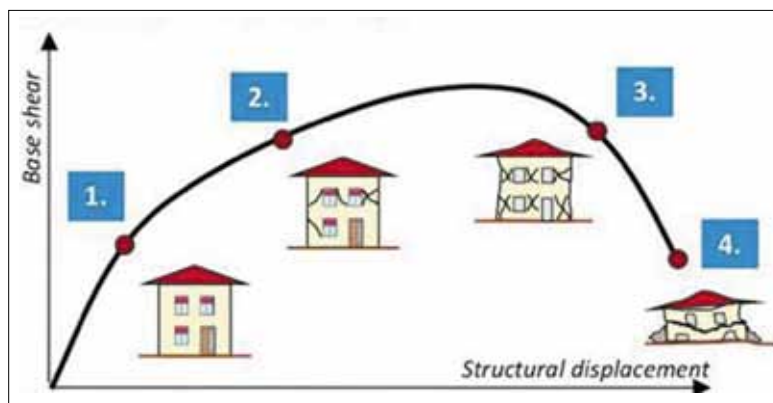


Иллюстрация 3. Кривая несущей способности с указанием критериев оценки надежности конструкции. Источник: Eurocodes — Design of steel buildings with worked examples

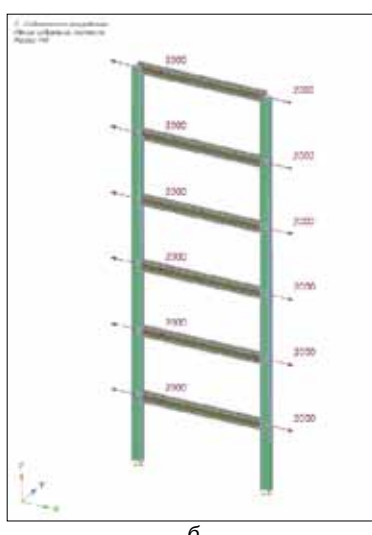
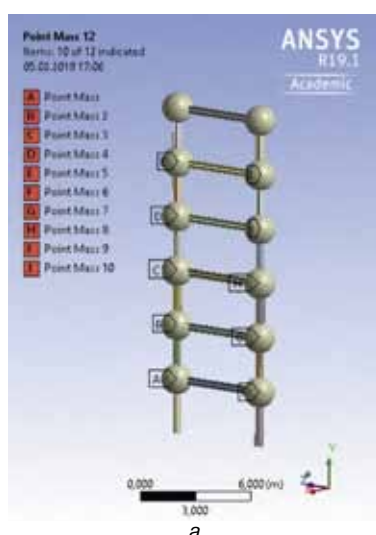


Иллюстрация 4. Схема расчетной динамической модели:
а — ANSYS R18.2 Academic version; б — Lira 10.6. Автор М. А. Зубрицкий

энергоемкости системы возможно определить на основании модифицированной системы инерционных сил (Иллюстрация 2):

$$W_I = \frac{V_I \Delta_I}{2}, \quad (2)$$

где V_I — сдвигающая сила в основании системы, полученная на основании линейно-спектрального анализа; Δ_I — перемещение верха системы.

Следующим этапом оценки сейсмостойкости является построение на основании нелинейного статического расчета системы с одной степенью свободы при действии модифицированной системы инерционных сил графика зависимости «Усилие в основании V — Смещение верха системы Δ » — график несущей способности. Учитывая, что энергии упругой и упругопластической деформации равны, полученное значение перемещения верха системы Δ_{pl} является целевым значением

для оценки сейсмостойкости всей системы в целом, на основании которого возможно определить междуэтажные смещения, внутренние усилия в элементах системы, а также проанализировать заупругую работу узлов и элементов системы.

В зависимости от положения характеристической точки на кривой несущей способности возможно оценить общий характер повреждения конструкции в целом (Иллюстрация 3).

Численное моделирование сейсмического воздействия

Численное моделирование сейсмического воздействия прямым динамическим методом выполнено в программном комплексе ANSYS R18.2 (Academic version); нелинейным статическим методом — в программном комплексе Lira 10.6.

В качестве материала конструкций для расчетной динамической модели

(РДМ) принята сталь, диаграмма деформирования которой представлена на Иллюстрации 4. Для описания нелинейной работы элементов системы принята модель изотропного упрочнения материала (*Bilinear Kinematic Hardening*) [9]. Диаграммы деформирования стали при растяжении и сжатии принимают одинаковыми, с учетом нормируемых сопротивлений стали растяжению и сжатию. Поверхность текучести описывается критерием Вон-Мизеса и представляет из себя цилиндр, ось которого совпадает с осью гидростатического сжатия в осях главных напряжений.

Сейсмические воздействия заданы следующими однокомпонентными акселерограммами, действующими в плоскости YoZ: Iran, 1978 г. (Erthq1); El Centro, USA (California), 1979 г. (Erthq2); Duzce, Turkey, 1999 г. (Erthq3).

Записи акселерограмм взяты из базы данных [10].

В качестве РДМ принята однопролетная шестизэтажная рама с двенадцатью равномерно распределенными по высоте сосредоточенными массами. Для каждой из акселерограмм подобрано значение сосредоточенной массы так, чтобы отклик системы на сейсмическое воздействие происходил в заупругой стадии.

Общий вид представлен на Иллюстрации 4. Жесткостные и частотные характеристики систем приведены в Таблице 1.

Оценка сейсмостойкости мультимодальным нелинейным статическим методом

Для оценки погрешности откликов РДМ, полученных мультимодальным нелинейным статическим методом (МНСМ), сравним результаты с откликами, полученными на основании прямого динамического метода с использованием записей ускорений *Erthq1–3*.

Оценка погрешности результатов расчетов представлена в Таблице 2.

Для оценки качества полученных данных выполним их статистическую обработку:

- среднее значение погрешности горизонтальных смещений узлов системы составило 8,34%; среднеквадратичное отклонение — 7,95%;
- среднее значение погрешности изгибающих моментов в элементах системы составило 14,6%; среднеквадратичное отклонение — 0,89%;
- среднее значение погрешности поперечных сил в элементах системы составило 12,29%; среднеквадратичное отклонение — 0,52%.

Таблица 1. Общие характеристики РДМ

№ п/п	Наименование	Значение		
		Erthq. 1	Erthq. 2	Erthq. 3
1	Сечение вертикальных элементов, мм	400 (h) × 300 (b) × 12.5 (b _i) × 10 (b _w)		
2	Сечение горизонтальных элементов, мм	400 (h) × 300 (b) × 12 (b _i) × 8 (b _w)		
3	Высота яруса, мм	3000		
4	Количество ярусов	6		
5	Пролет, мм	6000		
6	Модуль деформации, Па	2e ¹¹		
7	Предел упругости, МПа	270		
8	Тангенциальный модуль деформации, МПа	5.361e ⁹		
9	Сосредоточенные массы m ₁ = ... = m ₁₂ , кг	2000	9000	8000
10	Первая частота собственных колебаний f ₁ , Гц	1.8836	0.9358	1.0095
11	Вторая частота собственных колебаний f ₂ , Гц	6.0731	3.0161	3.2563
12	Третья частота собственных колебаний f ₃ , Гц	11.366	5.643	6.0835
13	Параметр демпфирования α _д , с ⁻¹	1.000593	0.49706	0.536159
14	Параметр демпфирования β _д , с	0.001184	0.002384	0.002211

Таблица 2. Оценка погрешности МНСМ для РДМ

Сравниваемый параметр		Прямой динамический метод*	Нелинейный статический метод*	Погрешность, %*
Горизонтальные смещения, мм	6-й ярус	178.3/166.98/161.78	175.1/162.88/170.5	-1.79/-2.46/+5.11
	5-й ярус	162.2/150.84/147.02	160.5/149.26/157.73	-1.05/-1.05/+6.79
	4-й ярус	136.9/126.18/124.00	138.91/128.59/137.24	+1.47/+2.41/+9.65
	3-й ярус	102.7/94.125/94.15	109.06/100.82/109.41	+5.83/+6.64/+13.94
	2-й ярус	62.2/57.25/58.81	70.62/65.55/72.51	+11.92/+12.66/+18.40
	1-й ярус	23.6/21.76/22.94	28.90/26.81/30.42	+18.3/+18.83/+24.59
Максимальный изгибающий момент в заделке, кНм		428.31/420.93/433.18	496.32/489.36/505.39	+13.70/+15.82/+14.29
Максимальная поперечная сила в основании системы, кН		390.62/384.38/402.08	442.98/441.9/457.04	+11.82/+13.02/+12.03

* В таблице приведены значения в следующем порядке: Iran, 1978 г. (Erthq1)/El Centro, USA (California), 1979 г. (Erthq2)/Duzce, Turkey, 1999 г. (Erthq3).

Закключение

В процессе математического исследования выполнены расчеты во временной области с использованием записей трех ускорений, построены кривые несущей способности, выполнены нелинейные статические расчеты и модальные анализы для расчетной модели однопролетной многоэтажной стальной рамы.

Для учета влияния высших форм колебаний при оценке сейсмостойкости систем предложена методика поиска начальных инерционных сил для последующего нахождения характеристической точки на графике несущей способности системы — мультимодальный нелинейный статический метод. По результатам выполненного комплекса расчетов можно сделать вывод о целесообразности применения предложенной методики. Среднее значение разницы в результатах, полученных прямым динамическим методом, с результатами на основе мультимодального нелинейного статического метода по всем критериям отклика конструкции не превышает 15%, обеспечивая при этом запас при оценке сейсмостойкости. Авторами предложен алгоритм, позволяющий автоматизировать предложенную методику [11].

Стоит отметить, что при меньших затратах машинного времени мультимодальный нелинейный статический

метод может быть достойной альтернативой прямому динамическому методу.

Список использованной литературы

1 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019667065. Мультимодальный нелинейный статический метод при оценке сейсмостойкости систем МРА-1. Правообладатель: Зубрицкий Максим Александрович. Авторы: Сабитов Л. С., Зубрицкий М. А., Ушаков О. Ю. Заявка 2019663503; дата гос. регистр. в реестре программ для ЭВМ 18.12.19 г. — 1 с.

2 Свод правил: СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах: нормативно-технический материал. — М.: [б. и.], 2014. — 125 с.

3 Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. — СПб.: Наука, 1998. — 255 с.

4 Мкртычев О. В. Безопасность зданий и сооружений при сейсмических и аварийных воздействиях: монография / ГОУ ВПО Моск. гос. строит. ун-т. — М.: МГСУ, 2010. — 152 с.

5 Мкртычев О. В., Джинчвелашвили О. В. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения): монография / М-во образо-

- вания и науки Рос. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». — М.: МГСУ, 2012. — 192 с. (Биб-ка научных разработок и проектов МГСУ).
- 6 Applied Technology Council: ATC-40. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. — Redwood, CA, 1996. — 334 p.
 - 7 Chopra A.K., Geol R.K. Capacity-demand-diagram methods based on inelastic design spectrum // *Earthquake Spectra*, 1999. — P. 637–656.
 - 8 Chopra A. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. — Prentice Hall, 1995. — 944 p.
 - 9 Chopra A.K., Goel R.K. Evaluation of NSP to estimate seismic deformation of SDF systems // *J. of Structural Engineering*. — 2000. — № 126 (4). — P. 482–490.
 - 10 EUROPEAN STANDARD: EUR 25204 EN. Eurocode 8: Seismic Design of Buildings — Worked examples. — Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012. — 522 p.
 - 11 FEMA-356. Prestandard and Commentary for the seismic rehabilitation of buildings — American Society of Civil Engineers (ASCE). — Reston, VA, 2000. — 519 p.
 - 12 Zubritskiy M. A., Ushakov O. Y., Sabitov L. S. Account for the contribution of higher modes under system seismic resistance estimation by nonlinear static method // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2019. — Vol. 570. — № 1. — 7 p.
 - 13 Zubritskiy M. A., Ushakov O. Y., Sabitov L. S. Account for the contribution of higher vibration modes under seismic resistance estimation of system with elastomeric supports by nonlinear static method // *J. of Physics: Conference Series*. — 2020. — Vol. 1425. — № 1. — 7 p.
 - 14 Zubritskiy M. A., Ushakov O. Y., Sabitov L. S. Performance-based seismic evaluation methods for the estimation of inelastic deformation demands // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2019. — Vol. 570. — № 1. — 7 p.
 - 15 ANSYS HELP. — URL: <https://ansyshelp.ansys.com/>.
 - 16 PEER Ground Motion Database. — URL: <https://ngawest2.berkeley.edu/>.
 - 7 Chopra A.K., Geol R.K. Capacity-demand-diagram methods based on inelastic design spectrum // *Earthquake Spectra*, 1999. — P. 637–656.
 - 8 Chopra A. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. — Prentice Hall, 1995. — 944 p.
 - 9 Chopra A.K., Goel R.K. Evaluation of NSP to estimate seismic deformation of SDF systems // *J. of Structural Engineering*. — 2000. — № 126 (4). — P. 482–490.
 - 10 EUROPEAN STANDARD: EUR 25204 EN. Eurocode 8: Seismic Design of Buildings — Worked examples. — Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012. — 522 p.
 - 11 FEMA-356. Prestandard and Commentary for the seismic rehabilitation of buildings — American Society of Civil Engineers (ASCE). — Reston, VA, 2000. — 519 p.
 - 12 Zubritskiy M. A., Ushakov O. Y., Sabitov L. S. Account for the contribution of higher modes under system seismic resistance estimation by nonlinear static method // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2019. — Vol. 570. — № 1. — 7 p.
 - 13 Zubritskiy M. A., Ushakov O. Y., Sabitov L. S. Account for the contribution of higher vibration modes under seismic resistance estimation of system with elastomeric supports by nonlinear static method // *J. of Physics: Conference Series*. — 2020. — Vol. 1425. — № 1. — 7 p.
 - 14 Zubritskiy M. A., Ushakov O. Y., Sabitov L. S. Performance-based seismic evaluation methods for the estimation of inelastic deformation demands // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2019. — Vol. 570. — № 1. — 7 p.
 - 15 ANSYS HELP. — URL: <https://ansyshelp.ansys.com/>.
 - 16 PEER Ground Motion Database. — URL: <https://ngawest2.berkeley.edu/>.

References

- 1 Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2019667065. Mul'timodal'nyj nelinejnyj staticheskij metod pri ocenke sejsmostojkosti sistem MPA-1. Pravoobladatel': Zubrickij Maksim Aleksandrovich. Avtory: Sabitov L. S., Zubrickij M. A., Ushakov O. Yu. Zayavka 2019663503; data gos. registr. v reestre programm dlya EVM 18.12.19 g. — 1 s.
- 2 Svod pravil: SP 14.13330.2014. Stroitel'stvo v seismicheskikh rajonah: normativno-tekhnicheskij material. — M.: [b. i.], 2014. — 125 s.
- 3 Birbraer A. N. Raschet konstrukcij na sejsmostojkost'. — SPb.: Nauka, 1998. — 255 s.
- 4 Mkrtychev O. V. Bezopasnost' zdaniy i sooruzhenij pri seismicheskikh i avarijnyh vozdeystviyah: monografiya / GOU VPO Mosk. gos. stroit. un-t. — M.: MGSU, 2010. — 152 s.
- 5 Mkrtychev O. V., Dzhinchvelashvili O. V. Problemy ucheta nelinejnostej v teorii sejsmostojkosti (gipotezy i zabluzhdeniya): monografiya / M-vo obrazovaniya i nauki Ros. Federacii, FGBOU VPO «Mosk. gos. stroit. un-t». — M.: MGSU, 2012. — 192 s. (Bib-ka nauchnyh razrabotok i projektov MGSU).
- 6 Applied Technology Council: ATC-40. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. — Redwood, CA, 1996. — 334 p.

Maxim Zubritsky

Chief specialist of LLC «Uralkonzeptproekt», Yekaterinburg, Russian Federation
e-mail: zubrickiy_maksim@mail.ru

Oleg Ushakov

Candidate of Engineering Science' Associate Professor at the SAPROS ISIA URFU, Yekaterinburg, Russian Federation
e-mail: ushakovoleg@yandex.ru

Linar Sabitov

Candidate of Engineering Science' Associate Professor of the Department of Biomedical engineering and innovation management, Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation
e-mail: sabitov-kgasu@mail.ru

Статья поступила в редакцию в декабре 2019 г.
Опубликована в марте 2020 г.