

Сейсмостойкость сооружений

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ НЕЛИНЕЙНОГО СТАТИЧЕСКОГО МЕТОДА АНАЛИЗА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ

Г.А. ДЖИНЧВЕЛАШВИЛИ, *д.т.н., профессор МГСУ*

С.В. БУЛУШЕВ, *инженер*

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

E-mail: guram2004@yandex.ru, sergey.bulushev@gmail.com

В статье рассмотрено практическое применение методики нелинейного статического анализа сейсмостойкости зданий и сооружений. Произведен расчет одноэтажной стальной рамы нелинейным статическим и нелинейным динамическим методами. В результате анализа полученных результатов расчета показана значимость высших форм колебаний и необходимость анализа их влияния на реакцию системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сейсмостойкость, нелинейный метод расчета, нелинейный статический метод расчета, нелинейный динамический метод расчета, акселерограмма.

Основная задача проектирования зданий и сооружений в сейсмических районах – предотвращение обрушения системы в целом при редком (сильном) землетрясении уровня МРЗ [5]. Линейно-спектральный метод не может учесть возможность развития в несущих и ненесущих элементах конструкций неупругих деформаций и локальных хрупких разрушений.

При решении проблемы с помощью положений, удовлетворяющих требованиям СП 14.13330.2014 [9], возникает ряд трудностей [2 – 4, 6 – 8, 13 – 15, 20, 21, 24, 25], к основным из которых относятся: чувствительность к алгоритмам конечно-элементного моделирования, резкая избирательность акселерограмм к отдельным собственным частотам собственных колебаний и отсутствие в нормах «прозрачной» методики.

Линейно-спектральный метод не может учесть возможность развития в несущих и ненесущих элементах конструкций неупругих деформаций и локальных хрупких разрушений. Таким образом, при расчете на МРЗ необходимо применение нелинейных методов.

Нелинейный динамический метод является наиболее точным. Но для его применения необходимо наличие представительного набора акселерограмм. Расчет сложных моделей требует больших затрат машинного времени. Этот метод требует привлечения высококвалифицированных специалистов, и в настоящее время не может быть использован рядовым проектировщиком.

Более простым методом, позволяющим учесть нелинейную работу конструкций, является нелинейный статический метод (НСМ). Для расчета этим методом могут применяться спектры сейсмического воздействия, используемые в линейно-спектральной методике. В настоящее время НСМ применяется при проектировании сейсмостойких конструкций зданий и сооружений в различных странах мира, в том числе, КНР, Индии, США, Иране, стран Евросоюза и др. [2, 4, 5, 7, 10 – 12, 16 – 19, 23]. Входящие в него расчетные процедуры интегрированы в такие комплексы, как SAP2000, ETABS, Midas Gen и др.

Целью данной работы является сравнение результатов расчета типового стального производственного сооружения на 9-ти бальное землетрясение нелинейным статическим методом, по методике, описанной в [1] и нелинейным динамическим методом [2, 4, 6].

В качестве расчетной схемы принята жесткая стальная рама (рис.1). Перекрытие принято абсолютно жестким. Диаграмма деформирования колонн при-

нята упругопластической с упрочнением (рис. 2). Основная частота собственных колебаний конструкции 1.455 Гц.

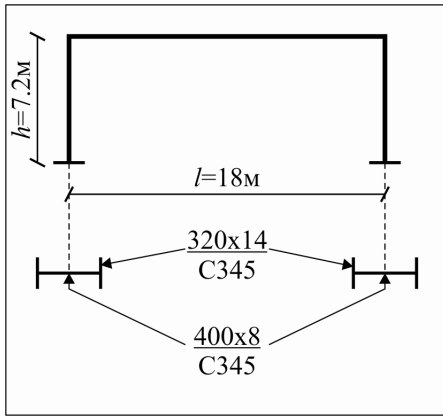


Рис. 1. Расчетная схема

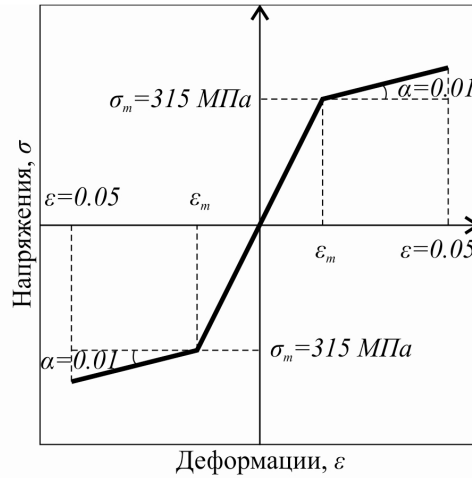


Рис. 2. Диаграмма деформирования стали

Расчет нелинейным динамическим методом производился в программном комплексе LS-DYNA на три различные акселерограммы: Бухарестского землетрясения (рис. 3), Спитакского землетрясения (рис. 4) и Калифорнийского землетрясения (рис. 5).

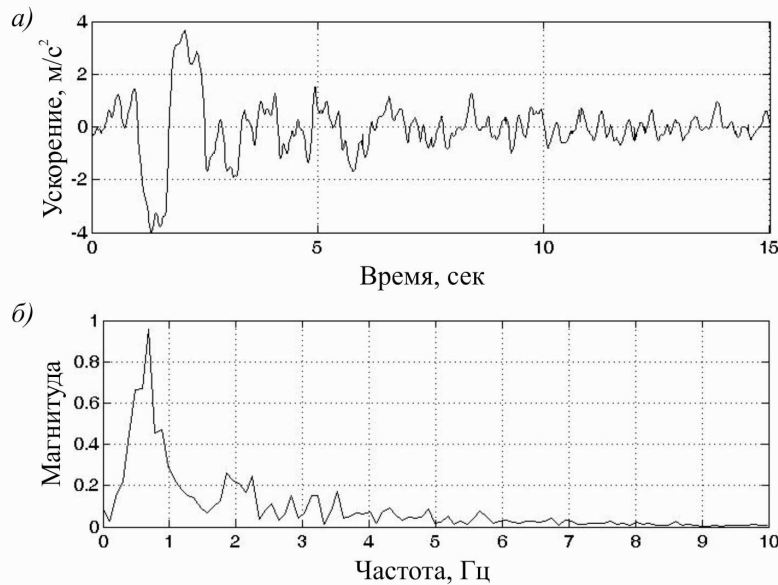


Рис. 3. Бухарестское землетрясение (4.03.1977):
а) акселерограмма; б) спектральный состав

Расчет нелинейным статическим методом производился в программном комплексе LIRA 10.4 по методике, описанной в [1]. Боковая нагрузка по высоте сооружения прикладывалась согласно распределению сейсмических сил по п. 5.5-5.10 [9]. Расчет производился с учетом Р-Δ эффекта.

Далее приведены результаты расчета. На графиках показаны максимальные перемещения верха конструкции (в спектральных координатах), полученные нелинейным статическим методом (рис. 6, а), и перемещения верха конструкции во временной области, полученные нелинейным динамическим методом (рис. 6, б-з).

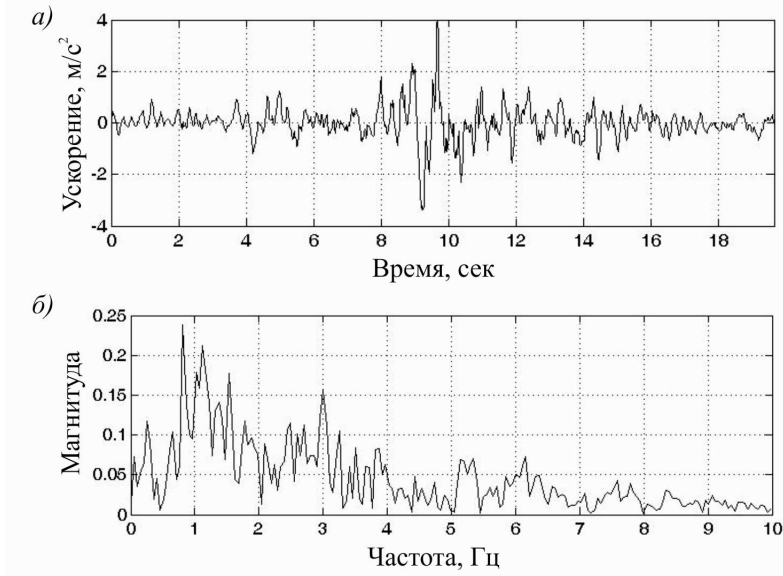


Рис. 4. Спитакское землетрясение (7.12.1988):
а) акселерограмма; б) спектральный состав

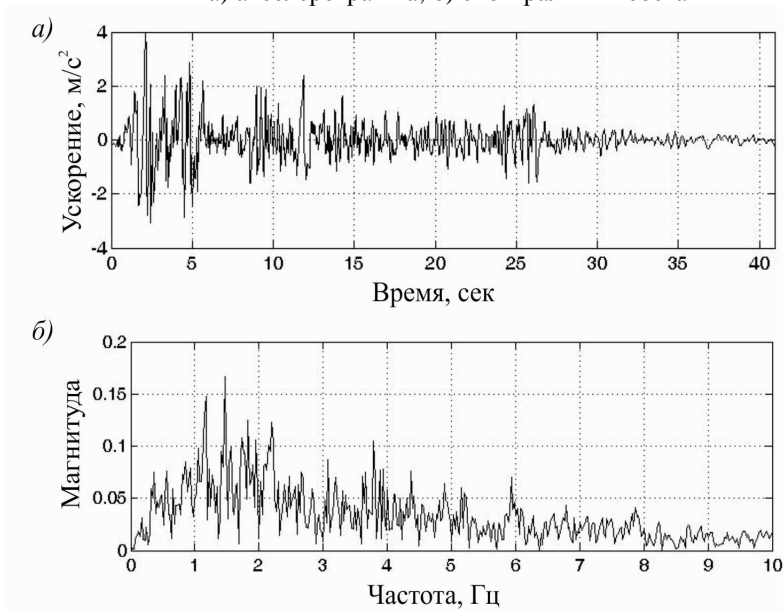


Рис. 5. Калифорнийское землетрясение (18.05.1940): а) акселерограмма;
б) спектральный состав

Далее приведены графики зависимости поперечной силы в основании от перемещения верха конструкции для нелинейного статического и нелинейного динамического методов (рис. 7, а-в).

Результаты расчета сведены в табл. 1.

Заключение

1. Апробирована методика нелинейного статического анализа, предложенная в [1].

2. Апробация предложенной методики нелинейного статического расчета в сравнении с нелинейным динамическим расчетом показала приемлемые результаты для Спитакского землетрясения и большие расхождения для Бухарестского и Калифорнийского землетрясений.

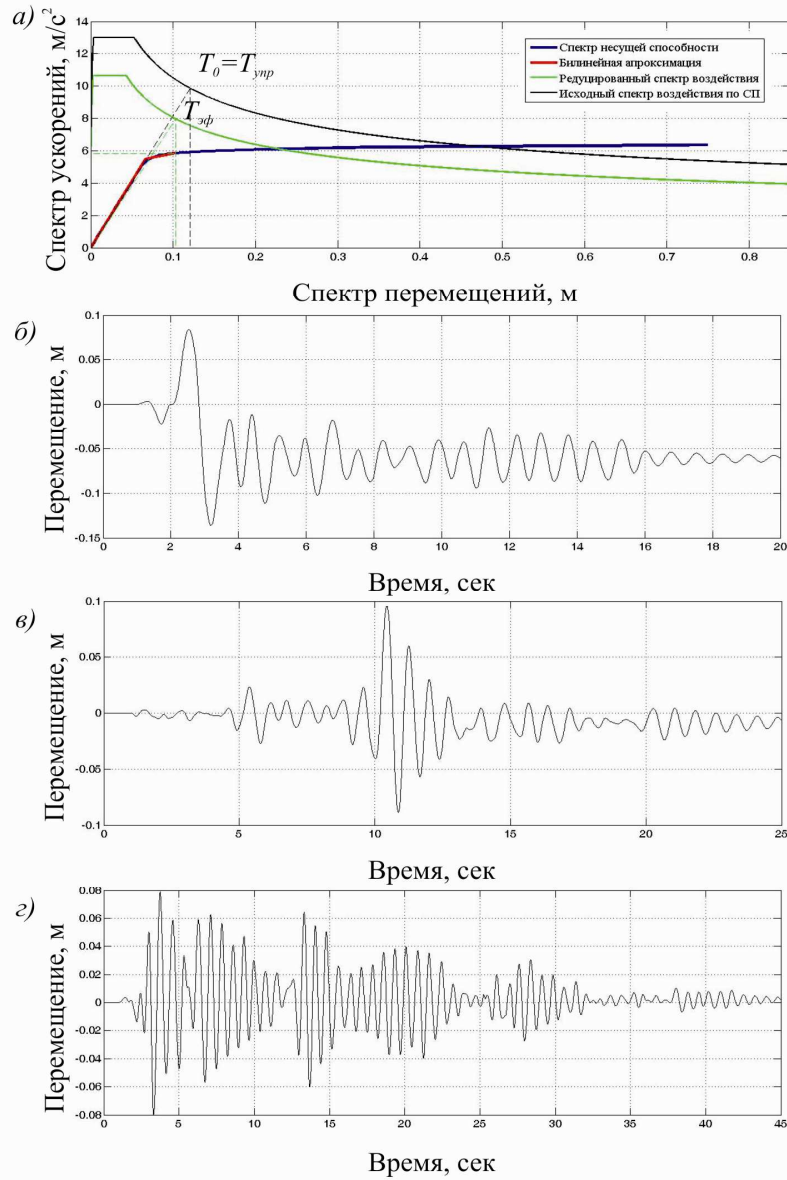


Рис. 6. Перемещения верха конструкции: а) нелинейный статический метод; нелинейный динамический метод; б) Бухарестское землетрясение; в) Спитакское землетрясение; г) Калифорнийское землетрясение

Таблица 1. Результаты расчета

Методы расчета		Доминирующая частота воздействия, Гц	Разница с основной собственной частотой конструкции, %	Магнитуда	Максимальное перемещение верха, м	Разница с нелинейным статическим методом, %
Нелинейный статический метод		-	-	-	0.103	-
Нелинейный динамический метод	Бухарестское землетрясение	0.684	-52.99	0.958	0.136	32.04
	Спитакское землетрясение	0.815	-43.99	0.238	0.095	-7.77
	Калифорнийское землетрясение	1.47	1.03	0.166	0.080	-22.33

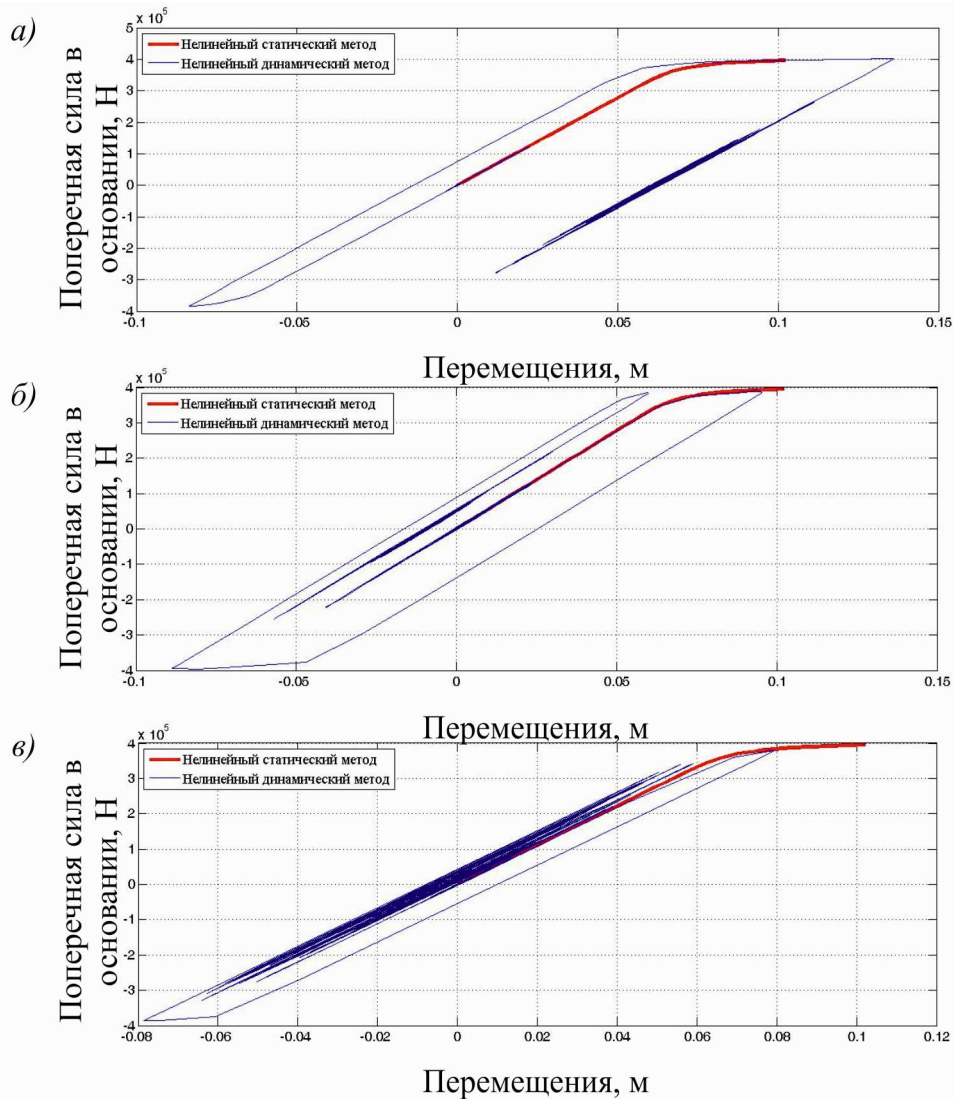


Рис. 7. Зависимость поперечной силы в основании от перемещения верха конструкции: а) Бухарестское землетрясение; б) Спитакское землетрясение; в) Калифорнийское землетрясение

3. Это связано с тем, что:

а) Бухарестское землетрясение содержит узкий спектр частот, сосредоточенный на частоте, близкой к основной частоте колебаний конструкции. Это приводит к неконсервативной оценке реакции системы с помощью нелинейного статического метода;

б) Спитакское землетрясение содержит несколько доминантных частот, близких к основной частоте колебаний конструкции. Таким образом, нелинейный статический метод с использованием проектного спектра воздействия достаточно точно описывает реакцию системы;

в) Калифорнийское землетрясение содержит широкий спектр частот, которые вносят свой вклад в реакцию конструкции. Тем самым, расчет нелинейным статическим методом по первой форме колебаний завышает реакцию системы.

4. Проведенное исследование показывает значимость высших форм колебаний и необходимость анализа их влияния на реакцию системы [2, 13].

Л и т е р а т у р а

1. Джинчвелашивили Г.А., Булушев С.В., Колесников А.В. Нелинейный статический метод анализа сейсмостойкости зданий и сооружений // Журнал «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений». 2016, № 5, С. 39-47.
2. Джинчвелашивили Г.А. Нелинейные динамические методы расчета зданий и сооружений с заданной обеспеченностью сейсмостойкости //автореферат дисс. на соискание ученой степени докт. техн. наук. – М.: МГСУ, 2015. – 46 с.
3. Задоян П.М. Оценка сейсмостойкости методом спектра несущей способности. // Известия Ереванского государственного университета архитектуры и строительства, 2/2009.
4. Мкртычев О.В., Джинчвелашивили Г.А. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения) // Москва: МГСУ, 2012. (Библиотека научных разработок и проектов МГСУ). - 192 с.
5. Мкртычев О.В., Джинчвелашивили Г.А., Дзержинский Р.И. Философия многоуровневого проектирования в свете обеспечения сейсмостойкости сооружений // Геология и геофизика Юга России. 2016. № 1. - с. 71-81.
6. Мкртычев О.В., Джинчвелашивили Г.А. Оценка работы зданий и сооружений за пределами упругости при сейсмических воздействиях // XXI Russian-Slovak-Polish Seminar, "Theoretical Foundation of Civil Engineering", Moscow-Archangelsk 03.07 – 06.07.2012. - pp. 177 – 186.
7. Немчинов Ю.И., Марьенков Н.Г., Хавкин А.К., Бабик К.Н. Проектирование зданий с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости (с учетом рекомендаций ЕВРОКОДА 8, международных стандартов и требований ДБН): монография/ - Киев: Минрегион Украины, ГП НИИСК, – 2012. – 53 с.
8. Соснин А.В. Об особенностях методологии нелинейного статического анализа и его согласованности с базовой нормативной методикой расчета зданий и сооружений на действие сейсмических сил // Bulletin of the South Ural University . Ser. Construction Engineering and Architecture. 2016, vol. 16, No 1 - pp. 12 – 19.
9. СП 14.13330.2014. «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*», М., 2014;
10. Applied Technology Council (ATC). «Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings». Rep. No. ATC-40, Volumes 1 and 2, Redwood City, CA, 1996.
11. Applied Technology Council (ATC). «Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures». Rep. No. ATC-55, Redwood City, CA, 2005.
12. Building Seismic Safety Council. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA-273, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 1997.
13. Chopra A.K. Capacity-demand diagram methods based on inelastic design spectrum/ Chopra A.K., Goel R.K. // Proceedings of 12 World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000: - paper №1612.
14. Clough R. W., Penzien J. Dynamics of Structures (Third Edition). - Computers & Structures, Inc. 1995 University Ave., Berkeley, CA 94704, USA. – 752 p.
15. Datta T.K. Seismic Analysis of Structures, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd. 2010. – p. 464.
16. European Standard. Eurocode-Basis of structural design: EN 1990: 2002(E). – April, 2002. – 87 p.
17. FEMA 273. Federal Emergency Management Agency. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington, D.C. – October, 1997.
18. FEMA-274. Federal Emergency Management Agency. NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington, D.C. – October, 1997.
19. FEMA 356. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. American Society of Civil Engineers (ASCE), Washington, D.C. – November, 2000.
20. Fajfar P., Krawinkler H. (2004), 'Performance-Based Seismic Design Concepts and Implementation - Proceedings of the International Workshop Bled, Slovenia, June 28 - July 1, 2004. PEER Report 2004/05, College of Engineering, University of California, Berkeley.
21. Gupta B., (1998) 'Enhanced pushover procedure and inelastic demand estimation for performance-based seismic evaluation of buildings', Ph.D. Dissertation, Orlando, Florida, University of Central Florida.

22. *Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A., Busalova M.S.* Calculation accelerograms parameters for a "Construction-Basis" model, nonlinear properties of the soil taken into account / *Procedia Engineering* –2014 - vol.91, pp. 54-57.
23. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures. Part 1: 1997 Edition. Building Seismic Safety Council (USA), - 342p.
24. *Paz M.* Structural Dynamics: Theory and Computation / by Mario Paz, William Leigh. – 5th ed., 2004. – 844p.
25. *Themelis S.* Pushover analysis for seismic assessment and design of structures, Heriot-Watt University, School of Built Environment, 2008.

References

1. *Dzhinchvelashvili G.A., Bulushev S.V., Kolesnikov A.V.* Nelinejnyj staticheskiy metod analiza sejsmostojkosti zdaniy i sooruzhenij // *Zhurnal «Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij»*. 2016, № 5, pp. 39-47.
2. *Dzhinchvelashvili G.A.* Nelinejnye dinamicheskie metody rascheta zda-nij i sooruzhenij s zadannoj obespechennost'ju sejsmostojkosti //avtoreferat diss. na soiskanie uchenoj stepeni dokt. tehn. nauk. – M.: MGSU, 2015. – 46 p.
3. *Zadojan P.M.* Ocenka sejsmostojkosti metodom spektra nesushhej sposobnosti. // *Izvestija Erevanskogo gosudarstvennogo universiteta arhitektury i stroitel'stva*, 2/2009.
4. *Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A.* Problemy ucheta nelinejnostej v teorii sejsmostojkosti (gipotezy i zabluzhdenija) // Moskva: MGSU, 2012. (Biblioteka nauchnyh razrabotok i proektov MGSU). - 192 p.
5. *Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A., Dzerzhinskij R.I.* Filosofija mnogourovnevnogo proektirovanija v svete obespechenija sejsmostojkosti sooruzhenij // *Geologija i geofizika Juga Rossii*. 2016. № 1. - pp. 71-81.
6. *Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A.* Ocenka raboty zdaniy i sooruzhenij za predelami uprugosti pri sejsmicheskikh vozdeystvijah // XXI Russian-Slovak-Polish Seminar, "Theoretical Foundation of Civil Engineering", Moscow-Archangelsk 03.07 – 06.07.2012. - pp. 177 – 186.
7. *Nemchinov Ju.I., Mar'enkov N.G., Havkin A.K., Babik K.N.* Proektirovanie zdaniy s zadannym urovnem obespechenija sejsmostojkosti (s uchetom rekomendacij EVROKODA 8, mezhdunarodnyh standartov i trebovanij DBN): monografija/ - Kiev: Minregion Ukrainy, GP NIISK, – 2012. – 53 p.
8. *Sosnin A.V.* Ob osobennostjah metodologii nelinejnogo staticheskogo analiza i ego soglasovannosti s bazovoj normativnoj metodikoj rascheta zdaniy i sooruzhenij na dejstvie sejsmicheskikh sil // *Bulletin of the South Ural University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2016, vol. 16, No 1 - pp. 12 – 19.
9. SP 14.13330.2014. «Stroitel'stvo v sejsmicheskikh rajonah. Aktualizirovannaja redakcija SNiP II-7-81*», M., 2014;
10. Applied Technology Council (ATC). «Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings». Rep. No. ATC-40, Volumes 1 and 2, Redwood City, CA, 1996.
11. Applied Technology Council (ATC). «Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures». Rep. No. ATC-55, Redwood City, CA, 2005.
12. Building Seismic Safety Council. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA-273, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 1997.
13. *Chopra A.K.* Capacity-demand diagram methods based on inelastic design spectrum/ *Chopra A.K., Goel R.K.* // *Proceedings of 12 World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000: - paper №1612.*
14. *Clough R.W., Penzien J.* Dynamics of Structures (Third Edition). - Computers & Structures, Inc. 1995 University Ave., Berkeley, CA 94704, USA. – 752 p.
15. *Datta T.K.* Seismic Analysis of Structures, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd. 2010. – p. 464.
16. European Standard. Eurocode-Basis of structural design: EN 1990: 2002(E). – April, 2002. – 87 r.
17. FEMA 273. Federal Emergency Management Agency. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington, D.C. – October, 1997.
18. FEMA-274. Federal Emergency Management Agency. NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington, D.C. – October, 1997.
19. FEMA 356. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. American Society of Civil Engineers (ASCE), Washington, D.C. – November, 2000.
20. *Fajfar P., Krawinkler H.* (2004), 'Performance-Based Seismic Design Concepts and Implementation - Proceedings of the International Workshop Bled, Slovenia, June 28 - July 1, 2004. PEER Report 2004/05, College of Engineering, University of California, Berkeley.

21. *Gupta B.*, (1998) 'Enhanced pushover procedure and inelastic demand estimation for performance-based seismic evaluation of buildings', Ph.D. Dissertation, Orlando, Florida, University of Central Florida.
22. *Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A., Busalova M.S.* Calculation accelerograms parameters for a "Construction-Basis" model, nonlinear properties of the soil taken into account / *Procedia Engineering* –2014 - vol.91, pp. 54-57.
23. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures. Part 1: 1997 Edition. Building Seismic Safety Council (USA), - 342p.
24. *Paz M.* Structural Dynamics: Theory and Computation / by Mario Paz, Wil-liam Leigh. – 5th ed., 2004. – 844p.
25. *Themelis S.* Pushover analysis for seismic assessment and design of structures, Heriot-Watt University, School of Built Enviroment, 2008.

ACCURACY EVALUATION OF THE NONLINEAR STATIC ANALYSIS METHOD OF THE STRUCTURES SEISMIC RESISTANCE

G.A. DZHINCHVELASHVILI, S.V. BULUSHEV

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),
129337, Moscow, Russia*

The article considers the practical **application** of a technique of nonlinear static analysis of seismic resistance of buildings and structures. The calculation of one-storey steel frame, by nonlinear static and nonlinear dynamic methods is fulfilled. As a result of analysis of the calculation, results show the importance of higher vibration modes and the need to analyze their effects on the system response.

Key words: seismic resistance, nonlinear analysis method, nonlinear static analysis method, nonlinear dynamic analysis method, pushover analysis, accelerogram

