

УДК 699.84

© В. А. Петров, канд. техн. наук, главный специалист  
© К. В. Лунёв, главный инженер проекта  
(Проектно-изыскательский институт  
«ГЕО-ПРОЕКТ»)  
E-mail: vpetrov345@yandex.ru, lunev-k@bk.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-4-139-145

© V. A. Petrov, PhD in Sci. Tech., chief specialist  
© K. V. Lunev, chief project engineer  
(Design and Survey Institute «GEO-PROEKT»)  
E-mail: vpetrov345@yandex.ru, lunev-k@bk.ru

## РЕЗЕРВЫ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

### STRENGTH RESERVES OF REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURES UNDER SEISMIC LOADING

Предложена методика расчетной оценки уровня допускаемых повреждений рамных железобетонных конструкций при сейсмических воздействиях, заданных акселерограммой землетрясения. Нелинейные динамические расчеты рам выполняются с учетом трещинообразования в железобетоне и пластического течения арматуры. Для выполнения расчетов используется программный комплекс MIDAS/CIVIL. Возможности методики проиллюстрированы на примере расчета сейсмической реакции плоской рамы. Показано, что зависимости изгибающих моментов от углов поворота сечений носят характер диаграмм Прандтля. Полученная величина коэффициента допускаемых повреждений выше значений, рекомендуемых нормативными документами.

**Ключевые слова:** железобетонная рама, трещинообразование, акселерограмма землетрясения, уровень допускаемых повреждений.

The authors offer a methodology of allowable damage level assessment of concrete frame constructions under seismic loading represented by the earthquake accelerogram. Non-linear dynamic computations of the frames are carried out, taking into account cracking in reinforced concrete and reinforcement yielding. Computations are made by means of the software MIDAS/CIVIL program complex. The methodology opportunities are demonstrated on the example of the plane frame earthquake response computation. It is shown that bending moments dependences as functions of cross-sections rotation angles correlate to the Prandtl diagrams. The obtained value of the allowable damage coefficient is higher than the values recommended by the normative documents.

**Keywords:** concrete frame, cracking, earthquake accelerogram, allowable damage level.

В расчетах сооружений на сейсмические воздействия по нормативной линейно-спектральной теории определяющим параметром инерционной сейсмической нагрузки является коэффициент допускаемых повреждений  $K_1$ . Диапазон значений  $K_1$  для различных категорий зданий и сооружений регламентируется [1, табл. 4] и составляет 0,12...1,0. Соответствующие указания имеются в нормативных документах зарубежных стран [2]. Широкий разброс значений  $K_1$  свидетельствует о том, что сведения о резервах прочности различных типов зданий при сейсмических воздействиях являются неполными. Величины коэффициента могут быть уточнены на основе специальных расчетных исследований,

выполняемых для нелинейных моделей с учетом их пластических свойств.

В настоящее время известно большое число работ, посвященных данному вопросу [3–10]. Однако в большинстве работ рассматриваются простые модели с одной или несколькими степенями свободы. Таким образом, актуальной является проблема определения величины  $K_1$  на основе нелинейного динамического анализа моделей высокого порядка, т. е. на основе компьютерных решений с помощью известных программных комплексов. Ряд модельных решений подобных нелинейных задач позволяет обоснованно выбрать значение  $K_1$  для рассматриваемого типа конструкций и в дальнейшем ввести это

значение в нормативные документы или в рекомендации по их применению.

Наибольшие трудности возникают в расчетах железобетонных конструкций. Эти трудности связаны с необходимостью учета трещинообразования в бетоне и пластических деформаций арматуры. Однако в настоящее время известно сравнительно небольшое число работ, посвященных данной тематике [11–14].

В последние годы в России получил широкое распространение программный комплекс MIDAS/CIVIL производства компании MIDAS IT (Южная Корея, г. Сеул). Комплекс ориентирован на расчеты транспортных и гражданских сооружений. Он верифицирован Научным советом РААСН и позволяет успешно анализировать динамическое поведение конструкций при сейсмических воздействиях с учетом нелинейностей различного происхождения.

Цель настоящей статьи — разработка методики расчетной оценки уровня допускаемых повреждений рамных железобетонных конструкций при сейсмических воздействиях, заданных акселерограммами землетрясений. В задачу работы входит уточнение значения коэффициента допускаемых повреждений  $K_1$  для данного типа конструкций на основе нелинейного динамического анализа моделей высокого порядка. В качестве расчетного инструмента для решения нелинейных задач динамики используется программный комплекс MIDAS/CIVIL.

На первом этапе решения задачи несущая способность элементов рамы определяется предельным изгибающим моментом, вычисляемым в соответствии с [15]. Выполняется линейный расчет рамы на действие акселерограммы. Подбирается значение пикового ускорения акселерограммы  $A_1$ , при котором в элементах рамы возникает предельный изгибающий момент. Такая акселерограмма считается «разрушающей» в классическом понимании.

На втором этапе выполняется нелинейный динамический расчет рамы на действие акселерограммы с учетом трещинообразования в бетоне и пластического течения арматуры. Для учета нелинейных эффектов используются возможности программного комплекса MIDAS/CIVIL. Поперечные сечения разбиваются на волокна сеткой конечных элементов. Вводится сечение

арматурных стержней и их расположение. Задаются кривые деформирования бетона и арматурной стали в осях  $\sigma - \epsilon$ . В каждом волокне бетонного сечения отдельно для растяжения и сжатия после превышения напряжением предельного значения устанавливается и сохраняется в течение всего последующего времени модуль упругости, равный нулю.

Подбирается значение пикового ускорения акселерограммы  $A_2$ , при котором в элементах рамы имеет место разрушение. Разрушением считается состояние конструкции, при котором в сечениях несущих элементов возникают сквозные трещины и пластическое течение стержневой арматуры. Такая акселерограмма считается «разрушающей» фактически.

Программный комплекс позволяет наблюдать за состоянием поперечных сечений элементов железобетонной конструкции во времени. Окончательно величина коэффициента допускаемых повреждений определяется как отношение значений пиковых ускорений  $A_1/A_2$ .

Решена серия модельных задач для плоских рам с медленным нагружением и разгружением. На хронограммах изгибающих моментов в узлах рамы хорошо виден момент времени резкого снижения жесткости сечения. Полученные графики зависимостей изгибающих моментов от углов поворота сечений носят характер диаграмм Прандтля.

Рассматривается модельная задача о сейсмическом отклике плоской железобетонной двухъярусной рамы высотой 12 м (рис. 1). Поперечные сечения элементов прямоугольные, с размерами от  $150 \times 300$  до  $150 \times 150$ . Задано стержневое армирование элементов рамы  $8\varnothing 10\text{AIII}$  (рис. 2). Первая частота собственных колебаний рамы составляет  $v = 1,297$  Гц. В качестве сейсмического воздействия принята известная акселерограмма *El Centro* продолжительностью 10 с и шагом цифровки 0,01 с (рис. 3). Главный пик спектра реакции акселерограммы соответствует частоте 1,724 Гц. Матрица вязкого демпфирования строится в виде линейной комбинации матриц жесткости и масс, соответствующей модальному затуханию величиной 5 % от критического.

Предельный изгибающий момент для анализируемого элемента рамы, вычисленный в соответствии с [15],  $M_{\text{пред.}} = 1,1 \text{ тс} \cdot \text{м}$ . В результате ли-

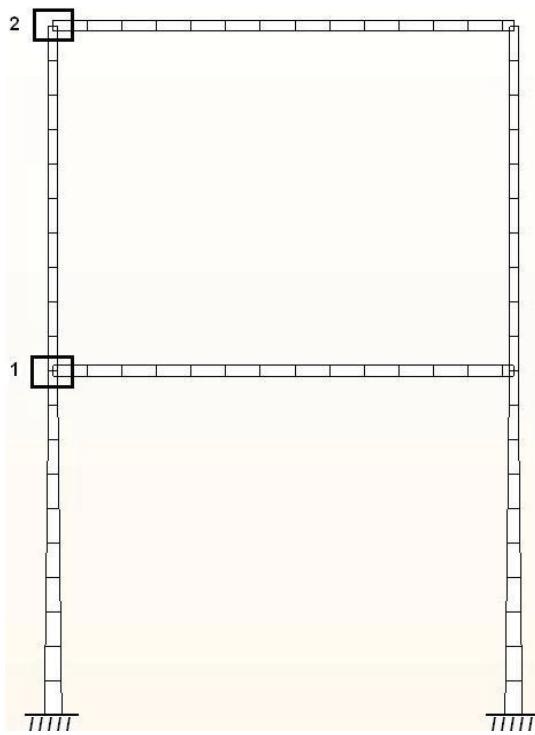


Рис. 1. Расчетная схема рамы. Цифрами показаны номера точек выдачи результатов

нейного расчета рамы на действие акселерограммы и нормативной нагрузки от собственного веса конструкции подобрано пиковое значение сейсмического воздействия  $A_1 = 0,303g$ , при котором в элементе рамы возникает изгибающий момент  $M = M_{\text{пред}}$ .

При данном пиковом значении акселерограммы максимальные горизонтальные перемещения верхнего ригеля рамы составили  $u_x = 9,67$  см, максимальные горизонтальные ускорения  $a_x = 0,808g$ . Главные пики спектров перемещений и ускорений соответствуют частоте 1,172 Гц.

На рис. 4 показаны хронограммы изгибающих моментов в элементах наблюдения, полученные в результате линейного расчета.

Выполнен нелинейный динамический расчет рамы на действие акселерограммы и нормативной нагрузки от собственного веса с учетом трещинообразования в бетоне и пластического течения арматуры. Подобрано значение пикового ускорения акселерограммы  $A_2 = 0,680g$ , при котором в элементах наблюдения имеет место фактическое разрушение, т. е. сквозные трещины в бетоне и пластическое течение арматуры.

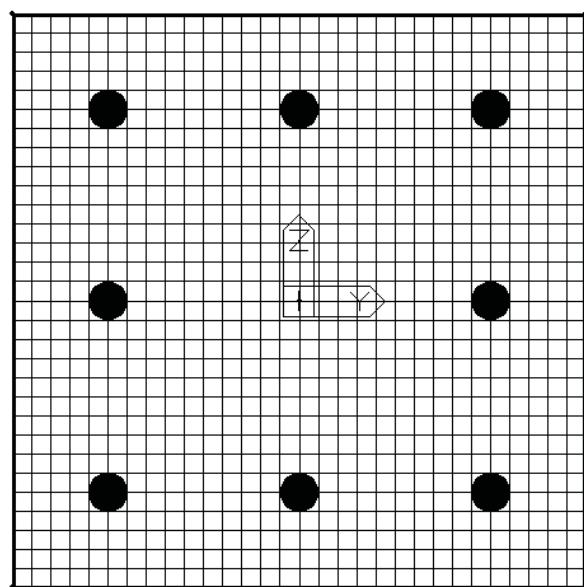


Рис. 2. Армированное сечение стойки рамы

Разрушение рассматриваемого сечения четко прослеживается по хронограмме изгибающих моментов в элементах рамы (рис. 5). После достижения пикового значения изгибающего момента  $M_{\text{max}} = 1,205$  тс · м ( $t = 4,45$  с) диапазон значений моментов резко падает. Изменение сплошности бетонного сечения и течение арматуры можно наблюдать на протяжении всего времени анализа при помощи инструментов программного комплекса MIDAS/CIVIL.

При найденном пиковом значении акселерограммы максимальные горизонтальные перемещения верхнего ригеля рамы составили  $u_x = 26,25$  см, максимальные горизонтальные ускорения  $a_x = 1,18g$ . Главные пики спектров перемещений и ускорений соответствуют частоте 0,98 Гц.

На рис. 6 показано изменение изгибающего момента  $M$  во времени в зависимости от угла поворота сечения  $\varphi$ . Характер кривой при основном сейсмическом ударе подобен диаграмме Прандтля. Площадь петли диаграммы равна энергии, рассеиваемой за один цикл колебаний.

По результатам расчета вычислен коэффициент допускаемых повреждений:

$$K_1 = A_1/A_2 = 0,445.$$

Полученное значение коэффициента допускаемых повреждений заметно выше рекомендуемой в [1, табл. 4] величины  $K_1 = 0,35$  для зданий с железобетонным каркасом без вертикальных диафрагм или связей.

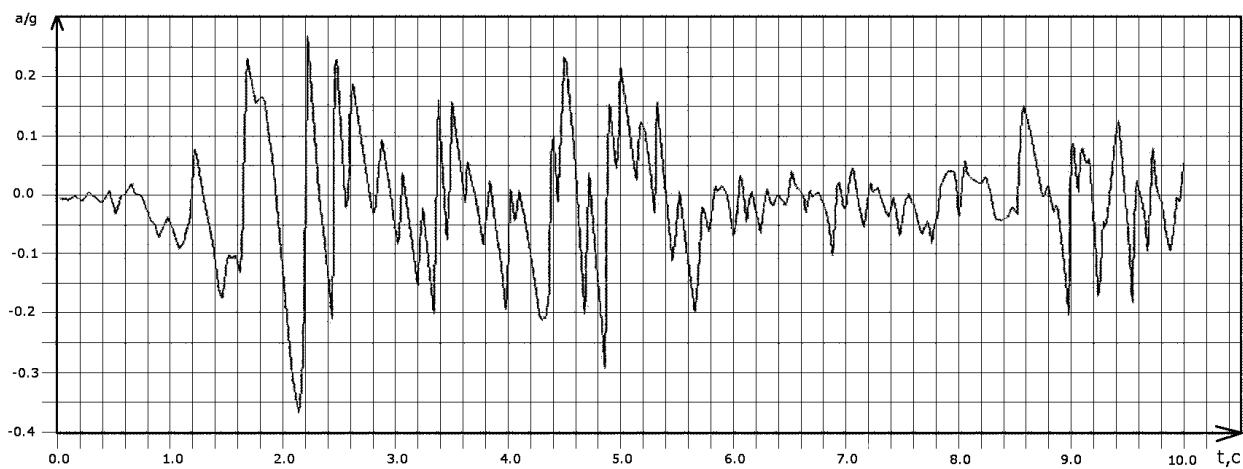


Рис. 3. Акселерограмма землетрясения *El Centro*

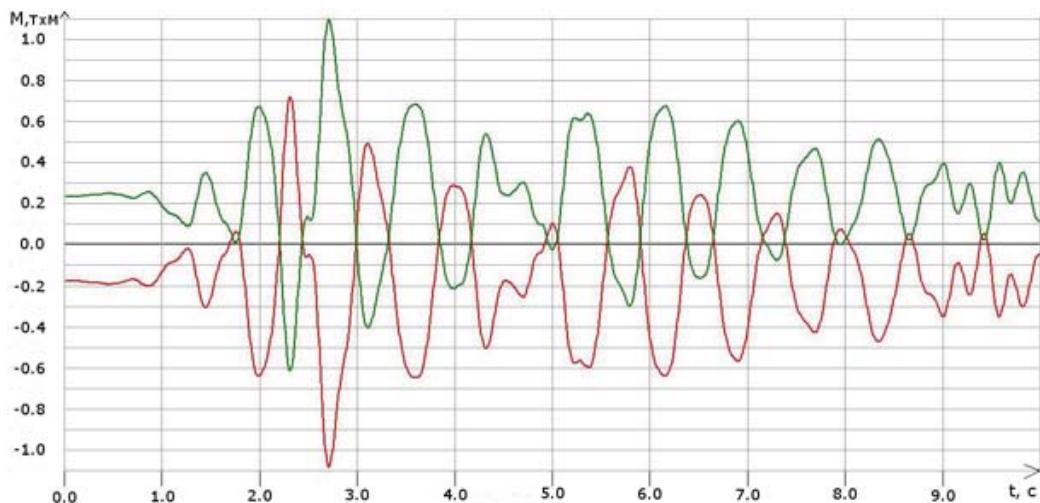


Рис. 4. Хронограммы изгибающих моментов элементов рамы. Линейная задача.  
Красный цвет — точка 1 (см. рис. 1), зеленый цвет — точка 2

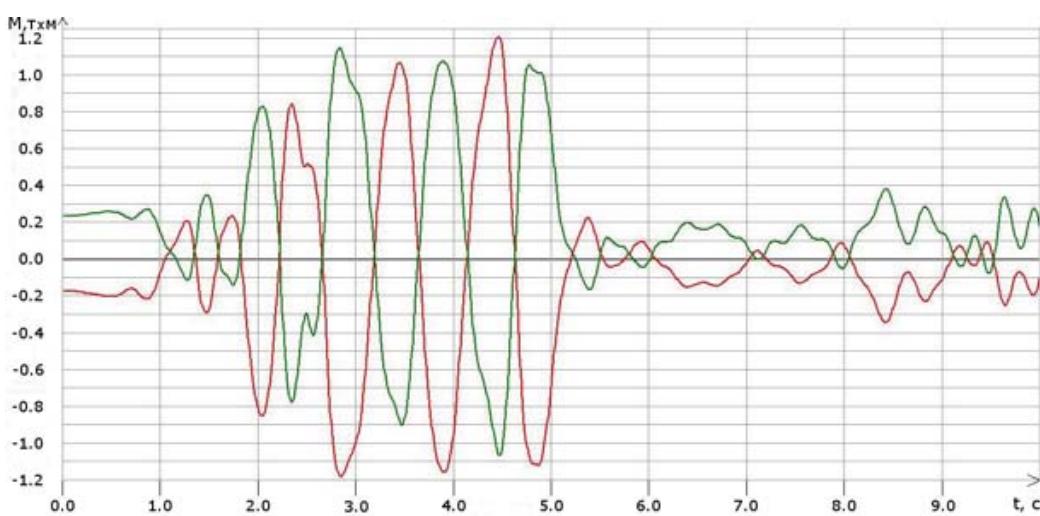
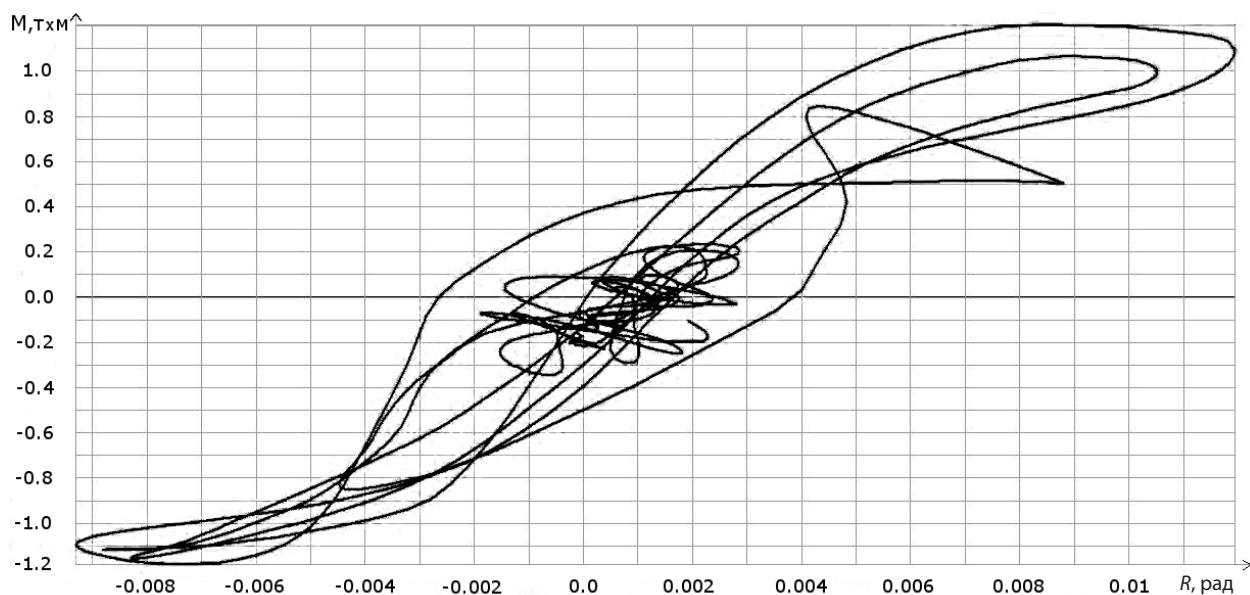


Рис. 5. Хронограммы изгибающих моментов элементов рамы. Нелинейная задача.  
Условные обозначения см. на рис. 4

Рис. 6. График изменения изгибающего момента  $M$  от угла поворота  $R$  в точке 1. Нелинейная задача

Выполненные расчетные исследования показали, что уровень допускаемых повреждений железобетонных рамных конструкций при сейсмических воздействиях, а также соответствующее значение коэффициента  $K_1$  могут быть оценены на основе нелинейных динамических расчетов с использованием программных комплексов, реализующих МКЭ. Результат подтверждает вывод о том, что подобные исследования необходимы для различных видов конструкций.

В ходе дальнейших исследований авторы планируют уточнить критерии разрушения железобетонных элементов, а также проанализировать значения коэффициента  $K_1$  для акселерограмм различного частотного состава и для рамных конструкций различной геометрии и жесткости.

### Библиографический список

1. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\*. М.: Минрегион РФ, 2016. 84 с.
2. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 8: Проектирование сейсмостойких конструкций: Руководство для проектировщиков к EN 1998-1 и EN 1998-5. Еврокод 8: Общие нормы проектирования сейсмостойких конструкций, сейсмические воздействия, правила проектирования зданий и подпорных сооружений: пер. с англ. / М. Фардис и др.; ред. серии Х. Гульванесян; науч. ред. пер. Г. А. Джинчвелашили. М.: МГСУ, 2013. 484 с.
3. Соснин А. В. Об уточнении коэффициента допускаемых повреждений  $K_1$  и его согласованности с концепцией редукции сейсмических сил в постановке спектрального метода (в порядке обсуждения) // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 1 (60). С. 92–114.
4. Джинчвелашили Г. А., Соснин А. В. Анализ некоторых особенностей учета нелинейной работы конструкций в нормативных документах по сейсмостойкому строительству // Подсекция «Строительная механика и теория надежности конструкций» 71-й науч.-методич. и науч.-исслед. конф. (с международным молодежным участием). Тез. докл. 29 января — 7 февраля 2013 г. М.: МАДИ, 2013. С. 67–69.
5. Мкртычев О. В., Джинчвелашили Г. А. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения). М.: Изд-во МГСУ, 2012. 192 с.
6. Симборт Э. Х. С., Рутман Ю. Л. Выбор коэффициента редукции сейсмических нагрузок на основе анализа пластического ресурса конструкции // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 2 (27). С. 78–81.
7. Симборт Э. Х. С. Методика выбора коэффициента редукции сейсмических нагрузок  $K_1$  при заданном уровне коэффициента пластичности // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 1. С. 44–52.
8. Назаров Ю. П., Ойзерман В. И. Метод трех моделей в расчетах сооружений на сейсмические воздействия // Строительная механика и расчет сооружений. 2007. № 6. С. 6–8.
9. Ньюмарк Н., Розенблют Э. Основы сейсмостойкого строительства / сокр. пер. с англ. Г. Ш. Подольского; под ред. Я. М. Айзенберга. М.: Стройиздат, 1980. 344 с.

10. Соснин А. В. Об особенностях методологии нелинейного статического анализа и его согласованности с базовой нормативной методикой расчета зданий и сооружений на действие сейсмических сил // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2016. Т. 16. № 1. С. 12–19.

11. Бенин А. В. Деформирование и разрушение железобетона: Аналитические, численные и экспериментальные исследования. СПб.: ПГУПС, 2006. 127 с.

12. Белов Н. Н., Кабанцев О. В., Копаница Д. Г., Югов Н. Т. Расчетно-экспериментальный метод анализа динамической прочности элементов железобетонных конструкций. Томск: СТТ, 2008. 292 с.

13. Соснин А. В. Применение метода нелинейного статического анализа в оценке влияния сдвиговой несущей способности диафрагм жесткости на сейсмостойкость многоэтажного железобетонного рамно-связевого каркаса (в среде SAP2000) // Ежегодн. междунар. академ. чтения Российской академии архитектуры и строительных наук (Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения), 19–20 ноября 2015 г. Курск: КГУ, 2015. С. 204–219.

14. Мамаева Г. В. Динамические характеристики каркасных зданий // Строительная механика и расчет сооружений. 1988. № 5. С. 46–51.

15. СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003», М.: Минрегион РФ. 147 с.

## References

1. SP 14.13330.2014. *Stroitel'stvo v seismicheskikh rayonakh. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-7-81\** [SP 14.13330.2014. Construction in seismic countries. Revised edition of SNiP II-7-81\*]. Moscow, Ministry of Regional Development of the RF, 2016, 84 p.

2. Fardis M., et al. *Rukovodstvo dlya proektirovshchikov k Evrokodu 8. Proektirovaniye seysmostoykikh konstruktsiy. Rukovodstvo dlya proektirovshchikov k EN 1998-1 i EN 1998-5. Evrokod 8. Obshchie normy proektirovaniya seysmostoykikh konstruktsiy, seismicheskie vozdeystviya, pravila proektirovaniya zdaniy i podpornykh sooruzheniy.* [Guidance for designers to Eurocode 8. Design of aseismic structures. Guidance for designers to EN 1998-1 and EN 1998-5. Eurocode 8. General norms of design of aseismic structures, seismic influences, rules of design of buildings and supporting constructions]. Transl. from English. Ed. by Gul'vanesyan Kh., Dzhinchvelashvili G. A. Moscow, MGSU Publ., 2013, 484 p.

3. Sosnin A. V. *Ob utochnenii koeffitsienta dopuskaemykh povrezhdeniy K1 i ego soglasovannosti s kontseptsiey reduktsii seismicheskikh sil v postanovke spektral'nogo metoda (v poryadke obsuzhdeniya)* [About reinforcement of

the seismic-force reduction factor (K1) and its coherence with the concept of seismic response modification in formulation of the spectral method (in order of discussion)]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 1 (60), pp. 92–114.

4. Dzhinchvelashvili G. A., Sosnin A. V. *Analiz nekotorykh osobennostey ucheta nelineynoy raboty konstruktsiy v normativnykh dokumentakh po seysmostoykomu stroitel'stu* [Analysis of some features of accounting of nonlinear work of designs in normative documents on aseismic construction]. *Trudy 71-y nauch.-metodich. i nauch.-issled. konf. (s mezhunarodnym molodezhnym uchastiem). Podsektiya «Stroitel'naya mekhanika I teoriya nadezhnosti konstruktsiy» 29 yanvarya – 7 fevralya 2013 g.* [Proc. of the 71-st sci.-method. and sci.-res. conf. (with international participation of young scientists), subsection "Construction Mechanics and the Theory of Reliability of Designs", January 29 – February 7, 2013]. Moscow, MADI Publ., 2013, pp. 67–69.

5. Mkrtychev O. V., Dzhinchvelashvili G. A. *Problemy ucheta nelineynostey v teorii seysmostoykosti (gipotezy i zabluzhdeniya)* [Problems of accounting non-linearity in the theory of seismic stability (hypotheses and delusions)]. Moscow, MGSU Publ., 2012, 192 p.

6. Simbort Eh. Kh. S., Rutman Yu. L. *Vybor koeffitsienta reduktsii seismicheskikh nagruzok na osnove analiza plasticheskogo resursa konstruktsii* [The choice of the seismic-load reduction coefficient based on the analysis of plastic resource of structure]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2011, no. 2 (27), pp. 78–81.

7. Simbort Eh. Kh. S. *Metodika vybora koeffitsienta reduktsii seismicheskikh nagruzok K1 pri zadannom urovne koeffitsienta plastichnosti* [Technique of choosing the coefficient of seismic loading reduction K1 at the set level of plasticity coefficient]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Engineering-Construction Journal*, 2012, no. 1, pp. 44–52.

8. Nazarov Yu. P., Oyberman V. I. *Metod trekh modeley v raschetakh sooruzheniy na seismicheskie vozdeystviya* [A method of three models in calculations of constructions on seismic influences]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy – Construction mechanics and calculation of constructions*, 2007, no. 6, pp. 6–8.

9. N'yumark N., Rozenblyut Eh. *Osnov seysmostoykogo stroitel'stva* [Basics of seismic resistant construction]. Transl. from English by Podol'skiy G. Sh.; ed. by Ayzenberg Ya. M. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980, 344 p.

10. Sosnin A. V. *Ob osobennostyakh metodologii nelineynogo staticheskogo analiza i ego soglasovannosti s bazovoy normativnoy metodikoy rascheta zdaniy i sooruzheniy na deystvie seismicheskikh sil* [About the methodology features of the nonlinear statics analysis and its coherence with the basic standard method of calcula-

tion of buildings and structures on the action of seismic forces]. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Stroitel'stvo i arkhitektura»* – YuUrSU Bulletin, Construction and Architecture series, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 12–19.

11. Benin A. V. *Deformirovanie i razrushenie zhelezobetona. Analiticheskie, chislennye i eksperimental'nye issledovaniya* [Deformation and destruction of reinforced concrete. Analytical, numerical and pilot studies]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 2006, 127 p.

12. Belov N. N., Kabantsev O. V., Kopanitsa D. G., Yugov N. T. *Raschetno-eksperimental'nyy metod analiza dinamicheskoy prochnosti elementov zhelezobetonnykh konstruktsiy* [Calculation and experimental analysis method of dynamic durability of reinforced concrete design members]. Tomsk, STT Publ., 2008, 292 p.

13. Sosnin A.V. *Primenenie metoda nelineynogo staticheskogo analiza v otsenke vliyaniya sдвиговой несущей способности диафрагм жесткости на сейсмостойкость многоэтажного железобетонного рамно-связевого каркаса (в среде SAP2000)* [Application of the nonlinear

statics analysis method in assessment of the impact of the shift bearing ability of diaphragms of rigidity on the seismic stability of multi-storey reinforced concrete braced frame (in the SAP 2000 environment)]. *Ezhegodn. mezhdunarodn. akadem. Chteniya Rossiyskoy akademii arkhitektury i stroitel'nykh nauk «Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya»* [Proc. of the Annual Workshops at RAACS "Safety of Construction Fund of Russia. Problems and Solutions"]. Kursk, KSU, 2015, pp. 204–219.

14. Mamaeva G. V. *Dinamicheskie kharakteristiki karkasnykh zdaniy* [Dynamic characteristics of framed buildings]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy – Construction mechanics and calculation of structures*, 1988, no. 5, pp. 46–51.

15. SP 63.13330.2012 «Betonnye i zhelezobetonnye konstruktsii. Osnovnye polozheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 52-01-2003» [SP 63.13330.2012 "Concrete and reinforced concrete designs. Revised edition of SNiP 52-01-2003"]. Moscow, Minregion RF Publ., 147 p.