

УДК 624.042.1:004.942

**К ВЫБОРУ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ
МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ НЕСУЩИХ СИСТЕМ
ДЛЯ РЕЖИМА ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ**

**FOR THE SELECTION OF CHARACTERISTICS OF LIMIT STATES
OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE SYSTEMS
FOR THE MODE OF PROGRESSIVE DROP**

О.В. КАБАНЦЕВ, Б. МИТРОВИЧ
O.V. KABANTSEV, B. MITROVICH

(Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет)
(National Research Moscow State University of Civil Engineering)
E-mail: ovk531@gmail.com, bozidarm@rambler.ru

В работе рассматривается вопрос обоснования выбора критериев предельных состояний монолитных железобетонных несущих систем для режима прогрессирующего обрушения. На основе результатов расчетно-тео-

ретических исследований установлены элементы конструкции и конструктивные узлы монолитных железобетонных зданий, разрушение которых наступает в первую очередь при отказе вертикальной несущей конструкции. Установлено, что разрушение таких узлов и элементов конструкции приводит к инициализации процесса прогрессирующего обрушения. Выполнен расчетно-теоретический анализ по определению предельных деформационных воздействий или величин нагрузок по критериям несущей способности ключевых узлов монолитных железобетонных систем с различными размерами пролетов. Установлено, что в качестве основного критерия в целях оценки НДС монолитных железобетонных конструкций для режима отказа вертикальной несущей конструкции может быть принята величина относительной деформации, соответствующая образованию зоны "разрушения" приопорного участка перекрытия при действии поперечных сил.

The paper considers the question of substantiating the choice of criteria for limiting states of monolithic reinforced concrete bearing systems for the regime of progressive collapse. Based on the results of computational and theoretical studies, structural elements and structural units of monolithic reinforced concrete buildings are determined, the destruction of which occurs first of all in the event of a failure of the vertical bearing structure. It is established that the destruction of such structural units and structural elements leads to the initialization of the process of progressive collapse. A computational and theoretical analysis has been performed to determine the ultimate deformation effects or load values according to the criteria for the bearing capacity of crucial units of monolithic reinforced concrete systems with different span sizes. It is established that as a basic criterion for estimating the stress-and-strain state of monolithic reinforced concrete structures for the mode of failure of a vertical bearing structure, the relative deformation amount corresponding to the formation of the "fracture" zone of the retaining section of the overlap under the action of transverse forces can be adopted.

Ключевые слова: несущие конструкции, предельные состояния, напряженно-деформированное состояние, расчетный прогноз, расчетная модель, прогрессирующее обрушение.

Keywords: load-carrying structures, stress-and-strain state, design prediction, calculation model, progressive collapse.

Оценка устойчивости несущей системы зданий, в том числе и текстильной промышленности, при отказе отдельных несущих конструкций или при образовании локального дефекта в конструктивной системе является одной из важнейших задач при оценке уровня надежности несущей системы здания в целом. Такая задача в отдельных случаях формулируется как оценка живучести сооружения [1...4], что представляется вполне обоснованным подходом. Существующий законодательный документ [5], Государственный стандарт [6], нормативный до-

кумент [7] устанавливают требования по обеспечению механической безопасности зданий и сооружений при аварийной расчетной ситуации.

Для обоснования принципов формирования критериев особых предельных состояний необходимо определить особенности работы конструкций несущей системы здания при отказе одного из опорных элементов. В одном из первых нормативно-методических документов, рассматривающих вопросы прогрессирующего обрушения, в работе [8] показано, что "...устойчивость зда-

ния против прогрессирующего обрушения будет обеспечена, если для любого элемента соблюдается условие:

$$F \leq S, \quad (1)$$

где F и S – соответственно усилие в элементе, найденное из упругого расчета, и его расчетная несущая способность, найденная с учетом указаний п. 3 [8]. В указанном п. 3 [8] допускается возможность работы конструкций в условиях развития пластических деформаций, но степень пластических деформаций определяется неявно.

Принцип работы конструкции в режиме неупругого (пластического) деформирования в особых условиях эксплуатационного периода достаточно широко используется в рамках отдельных видов воздействий: сейсмические воздействия [9], взрывные воздействия, условия подрабатываемых территорий. Так, в [8] предложен и обоснован метод учета неупругого деформирования конструкций зданий при расчетном сейсмическом воздействии с использованием параметра "состояния здания после землетрясения", который определяется как предельно допустимая величина "остаточных деформаций", что соответствует величине допускаемых повреждений конструкций [10].

Теоретические исследования по определению "коэффициента допускаемых повреждений / поведения" базируются, как правило, на характеристике пластичности конструкции (коэффициент пластичности μ), либо на параметре повреждаемости конструкции ("индекс повреждаемости конструкции" D) – см. работы [11...15], в которых предложены различные подходы к определению указанных параметров на основе характеристик кривизны, угла пластического поворота, прогиба, объема накопленных повреждений, по снижению уровня жесткости и прочее.

В [16] для наиболее часто применяемых в настоящее время видов несущих конструкций предложен и обоснован метод оценки допускаемого уровня повреждений на основе коэффициента пластичности:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{\text{tot}}}{\varepsilon_{\text{el}}}, \quad (2)$$

где ε_{tot} и ε_{el} – полные и упругие относительные деформации конструкции соответственно.

При этом для величины полных относительных деформаций должны быть установлены обоснованные ограничения. Например, для основных анизотропных материалов, находящихся в условиях двухосного напряженного состояния, принято:

$$\varepsilon_{\text{max}} = 0,85\varepsilon_{\text{tot}}. \quad (3)$$

Таким образом, представляется вполне обоснованным, что ГОСТ [6] и СП [7] предлагают использовать деформационные характеристики работы конструкций в целях определения критериев предельных состояний для условий случаев особых расчетных ситуаций, включая случай отказа несущих конструкций.

Для наиболее распространенных видов несущих систем – многоэтажных и высотных зданий с несущими конструкциями из монолитного железобетона – предложен и обоснован метод защиты от прогрессирующего обрушения, основанный на устройстве этажей повышенной жесткости (аутригерные этажи), которые обеспечивают изменение схемы работы вертикальной несущей конструкции [17] при отказе нижерасположенного элемента – такая конструкция "подвешивается" к аутригерному этажу.

Очевидно, что величина уровня пластической фазы работы конструкций должна иметь обоснованные ограничения. Такие ограничения определяются не только схемой работы конструкций аутригерных этажей, но и состоянием всех иных элементов монолитной железобетонной несущей системы. При отказе одной несущей конструкции происходит переход вышерасположенных вертикальных несущих элементов здания из режима опирания в режим подвеса. В процессе такого перехода и связанных с переходом деформированием несущей системы в монолитных железобетонных перекрыти-

ях могут формироваться локальные зоны разрушения. По результатам анализа [18] установлено, что такие локальные участки разрушений формируются в первую очередь в приопорных зонах перекрытия. Величина таких зон локальных разрушений и их характеристики определяются в основном жесткостью конструкций аутригерного этажа.

Модели монолитных железобетонных конструкций для анализа процессов формирования разрушений в условиях отказа элемента несущей системы.

Для определения предельно допустимых деформаций конструкций аутригерных этажей необходимо выполнить анализ процессов разрушения основных элементов несущей системы (монолитных железобетонных перекрытий), а также механизмов, приводящих к образованию таких разрушений. В рамках настоящего исследования такой анализ выполнен численными методами на основе конечно-элементных моделей типовых этажей с различными размерами пролетов и шагов конструкций – от 3,0 до 7,2 м (общий вид модели типового этажа с пролетами 6,0 м; в центре крайнего ряда колонна удалена ("отказ" от конструкции) представлен на рис. 1).

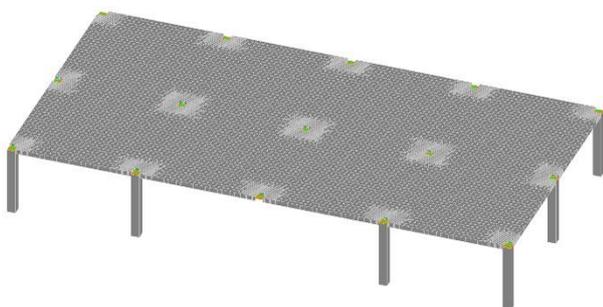


Рис. 1

Расчетный анализ выполнен с использованием вычислительного комплекса SCAD [19]. Анализ несущей способности элементов модели перекрытия выполнен в соответствии с положениями действующих норм [20]. В качестве воздействия принято перемещение опорной зоны перекрытия над "отказавшей" колонной. Величина перемещения варьировалась от 0 до "предельной" величины (с шагом 0,5 мм), соответствующей

моменту образования зоны разрушения (рис. 2 – схема расчетной модели и деформационного нагрузочного фактора для анализа процесса разрушения приопорных зон перекрытия; 1 – зоны анализа несущей способности, 2 – деформационное воздействие).

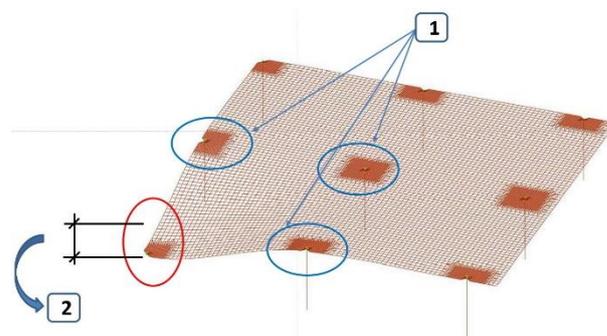


Рис. 2

В дополнение к деформационному воздействию были определены значения эквивалентных силовых нагрузок на перекрытие в зоне "отказавшей" колонны, вызывающих величину смещения опорной зоны, равную "предельной" величине. Расчет силового фактора выполнен с целью выявления корреляции между деформационным и силовым видами воздействия.

Результаты численных исследований предельных состояний элементов монолитных железобетонных несущих систем при отказе опорных конструкций.

В результате численного эксперимента установлено следующее.

Процесс формирования разрушения перекрытия в приопорной зоне носит выраженный последовательный характер – исчерпание несущей способности начинается с единичных КЭ, и при увеличении нагрузочного фактора (величины смещения) число "разрушенных" КЭ увеличивается с образованием участка "разрушенных" КЭ в пределах одной стороны опорного контура колонны, что соответствует "разрушению" приопорной зоны (рис. 3 – различные фазы формирования разрушения приопорной зоны перекрытия; слева – "разрушение" единичных КЭ, справа – формирование участка "разрушенных" КЭ в пределах одной стороны опорного контура колонны).

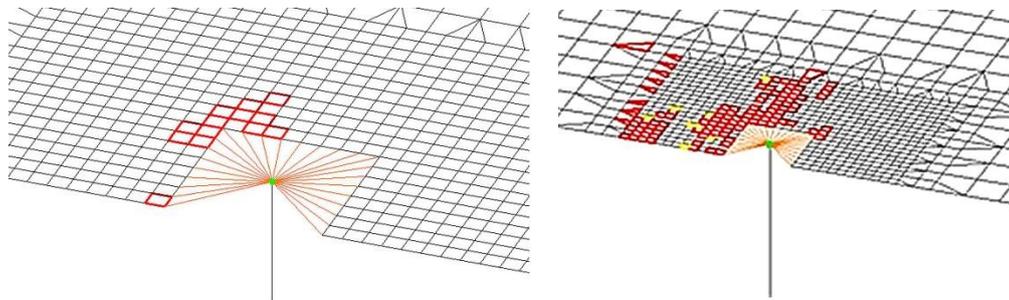


Рис. 3

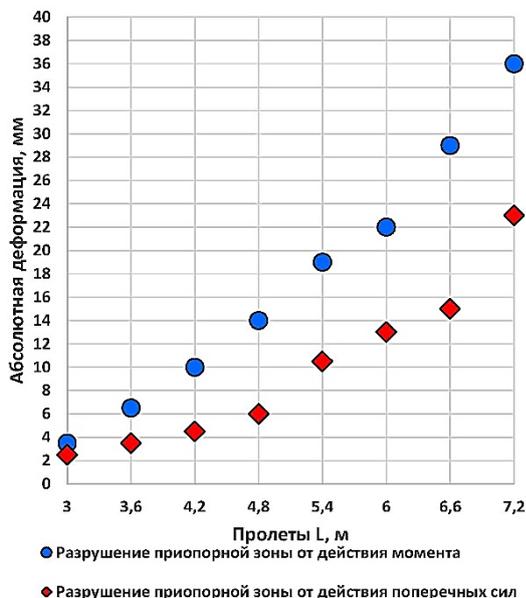


Рис. 4

Разрушение приопорной зоны перекрытия по разным критериям (поперечная сила и изгибающий момент) происходит при существенно разных величинах смещения участка над отказавшим опорным элементом (рис. 4 – величины "предельных" смещений для различных критериев формирования разрушения приопорной зоны перекрытия (средняя колонна)). Сравнительный анализ процессов разрушений по различным критериям истощения несущей способности позволяет заключить, что при недопущении формирования разрушения приопорной зоны по критерию поперечной силы разрушение по изгибающему моменту не будет реализовано. Таким образом, для оценки величины "предельного" смещения может быть принят фактор разрушения приопорной зоны от действия поперечных сил.

Величины "предельных" смещений (в абсолютных значениях) имеют хорошую корреляцию при "отказах" однотипных опорных

конструкций (средняя колонна, крайняя колонна, угловая колонна) при возрастании пролета перекрытия (рис. 5 – величины "предельных" смещений для различных пролетов/шагов однотипных опорных конструкций перекрытия).

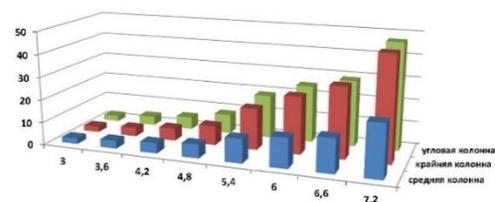


Рис. 5

В целях обобщенного анализа "предельных" величин деформационного нагрузочного фактора целесообразно их привести к относительным величинам деформаций:

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{L}, \quad (4)$$

где Δ – абсолютная величина "предельного" смещения; L – абсолютная величина пролета / шага опорных конструкций.

Результаты расчета "предельного" смещения в относительных величинах для отдельных видов расчетных моделей приведены на рис. 6 (величины "предельных" смещений в относительных величинах для различных пролетов/шагов опорных конструкций перекрытия).

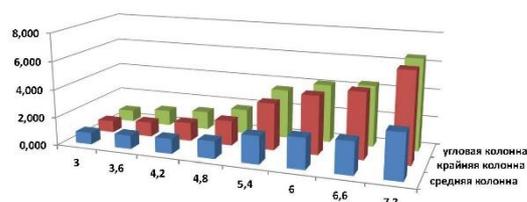


Рис. 6

Результаты определения силовых нагрузок, эквивалентных величинам "предельных" смещений в сопоставлении с деформационными воздействиями показывают, что корреляция между силовыми и деформационными воздействиями отсутствует (рис. 7 – сопоставление нагрузочных факторов – деформационного и силового – для условий

формирования "разрушения" приопорной зоны перекрытия; слева – отказ крайней колонны, справа – отказ средней колонны; по вертикальной оси – абсолютные величины перемещений (мм) и величины предельного силового фактора (тонны); А – деформационный фактор; В – силовой фактор).

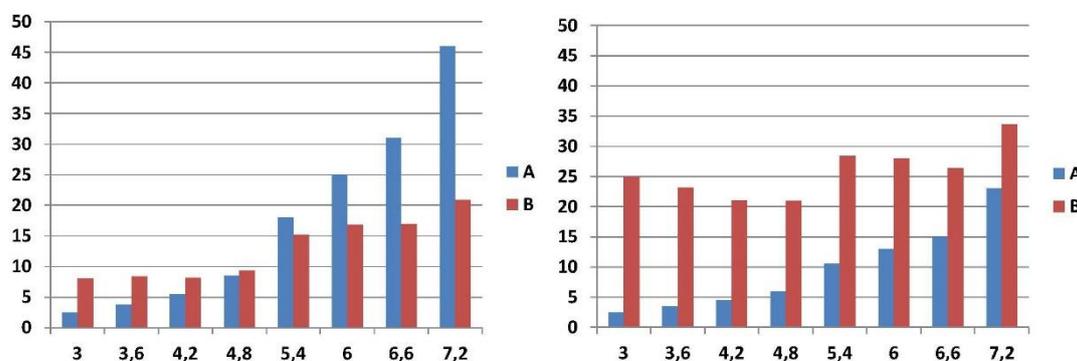


Рис. 7

Следовательно, для оценки НДС монолитного железобетонного перекрытия в условиях отказа вертикально несущей конструкции использование силовых факторов не обеспечивает получение корректной оценки и не может быть принято в качестве критериального параметра.

Полученные величины "предельных" смещений, соответствующих формированию "разрушения" приопорной зоны перекрытия в условиях отказа опорной конструкции, позволяют перейти к расчетам предельно допустимых величин коэффициентов пластичности (в соответствии с (2)).

ВЫВОДЫ

1. Выполненные исследования обосновывают возможность использования деформационных критериев для оценки напряженно-деформированного состояния монолитных железобетонных конструкций, включая пластическую фазу деформирования, в условиях отказа вертикального элемента несущей системы. Установленные характеристики предельной пластичности и соответствующие им характеристики уровня допустимых повреждений представляют собой характеристики предельных состояний

монолитных железобетонных конструкций для режима прогрессирующего обрушения.

2. Исследованиями установлено, что в качестве основного критерия в целях оценки НДС монолитных железобетонных конструкций для режима отказа вертикальной несущей конструкции может быть принята величина относительной деформации, соответствующая образованию зоны "разрушения" приопорного участка перекрытия при действии поперечных сил.

3. На основании результатов исследований установлено, что силовые факторы, моделирующие воздействие в режиме отказа несущей конструкции, не имеют приемлемой корреляционной зависимости с явлениями исчерпания несущей способности приопорных зон перекрытий, что не позволяет их использовать для исследования процессов, происходящих в монолитных железобетонных несущих системах в условиях прогрессирующего обрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колчунов В.И., Ключева Н.И., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. – М.: АСВ, 2014.
2. Ключева Н.В., Кореньков П.А. Методика экспериментального определения параметров живучести

железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем // Промышленное и гражданское строительство. – 2016, №2. С. 44...48.

3. *Бондаренко В.М., Колчунов В.И.* Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. – 2013, №2. С. 28...31.

4. *Tamrazyan A., Avetisyan L.* Comparative analysis of analytical and experimental results of the strength of compressed reinforced concrete columns under special combinations of loads // MATEC Web of Conferences 5. Ser. "5th International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education", IPICSE 2016". – 2016, №01029.

5. Федеральный закон №384. "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений".

6. Государственный стандарт ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.

7. Свод правил СП 296.1325800.2017. Здания и сооружения. Особые воздействия. – М.: Минстрой России, 2017.

8. Пособие по проектированию жилых зданий // ЦНИИЭП жилища Госкомархитектуры. Вып. 3. Конструкции жилых зданий (к СНиП 2.08.01-85). – М.: СИ, 1989.

9. *Ойзерман В.И.* Расчет конструкций на сейсмические воздействия по методу предельных состояний // Реферативная информация ЦИНИС, серия XIV, вып. 9. – 1978. С 4...7.

10. *Симпорт Э.* Методика выбора коэффициента редукции сейсмических нагрузок K1 при заданном уровне коэффициента пластичности μ // Инженерно-строительный журнал. – 2012, № 1. С. 44...52.

11. *Рутман Ю.Л., Симпорт Э.* Выбор коэффициента редукции сейсмических нагрузок на основе анализа пластического ресурса конструкции // Вестник гражданских инженеров. – 2011, № (2)27. С.78...81.

12. *Мкртычев О.В., Джинчелашвили Г.А.* Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения). – М.: МГСУ, 2012.

13. *Fajfar P., Vidic T., Fischinger M.* A measure of earthquake motion capacity to damage medium-period structures // Soil Dynamic and Earthquake Engineering. – №9, 1990. P. 236...242.

14. *Nadim F., Moghtaderi Zadeh M.* The Bam Earthquake of 26 December 2003 // Bulletin of Earthquake Engineering 2. – 2004. P. 119...153. Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands.

15. *Rahai A., Nemati S.* Concrete Structures, Evaluation of Behavior and Strengthening Method. – 2003.

16. *Понов Н.Н., Распоргуев Б.С., Забегаев А.В.* Расчет конструкций на динамические и специальные нагрузки. – М.: Высшая школа, 1992.

17. *Kabantsev O.V., Tamrazian A.G.* Allowing for changes in the calculated scheme during the analysis of structural behavior // Magazine of Civil Engineering. – 49 (5), 2014. P.15...26.

18. *Домарова Е.В.* Оценка устойчивости к прогрессирующему разрушению монолитных железобетонных каркасных зданий с отдельными усиленными этажами // Вестник МГСУ. – 2014, № 2. С.22...29.

19. *Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Микитаренко М.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А.* SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD++. – М.: Изд-во "СКАД СОФТ", 2015.

20. Свод правил СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: ФАУ "ФЦС".

REFERENCES

1. Kolchunov V.I., Klyueva N.I., Androsova N.B., Bukhtiyarova A.S. Zhivuchest' zdaniy i sooruzheniy pri zaproektnykh vozdeystviyakh. – М.: ASV, 2014.

2. Klyueva N.V., Koren'kov P.A. Metodika eksperimental'nogo opredeleniya parametrov zhivuchesti zhelezobetonnykh ramno-sterzhnevyykh konstruktivnykh sistem // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2016, №2. S. 44...48.

3. *Bondarenko V.M., Kolchunov V.I.* Kontseptsiya i napravleniya razvitiya teorii konstruktivnoy bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy pri silovykh i sredovykh vozdeystviyakh // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2013, №2. S. 28...31.

4. *Tamrazyan A., Avetisyan L.* Somparative analysis of analytical and experimental results of the strength of compressed reinforced concrete columns under special combinations of loads // MATEC Web of Conferences 5. Ser. "5th International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education", IPICSE 2016". – 2016, №01029.

5. Federal'nyy zakon №384. "Tekhnicheskiiy reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy".

6. Gosudarstvennyy standart GOST 27751–2014. Nadezhnost' stroitel'nykh konstruksiy i osnovaniy. Osnovnyye polozheniya.

7. Svod pravil SP 296.1325800.2017. Zdaniya i sooruzheniya. Osobyey vozdeystviya. – М.: Minstroy Rossii, 2017.

8. Posobie po proektirovaniyu zhilykh zdaniy // TsNIIEP zhilishcha Goskomarkhitektury. Vyp. 3. Konstruksii zhilykh zdaniy (k SNiP 2.08.01-85). – М.: SI, 1989.

9. *Oyzerman V.I.* Raschet konstruksiy na seysmicheskie vozdeystviya po metodu predel'nykh sostoyaniy // Referativnaya informatsiya TsINIS, seriya XIV, vyp. 9. – 1978. S 4...7.

10. *Simport E.* Metodika vybora koeffitsienta reduktsii seysmicheskikh nagruzok K1 pri zadannom urovne koeffitsienta plastichnosti μ // Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal. – 2012, № 1. S. 44...52.

11. *Rutman Yu.L., Simport E.* Vybory koeffitsienta reduktsii seysmicheskikh nagruzok na osnove analiza plasticheskogo resursa konstruksii // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. – 2011, № (2)27. S.78...81.

12. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A. Problemy ucheta nelineynostey v teorii seysmostoykosti (gipotezy i zabluzhdeniya). – M.: MGSU, 2012.
13. Fajfar P., Vidic T., Fischinger M. A measure of earthquake motion capacity to damage medium-period structures // Soil Dynamic and Earthquake Engineering. – №9, 1990. P. 236...242.
14. Nadim F., Moghtaderi Zadeh M. The Bam Earthquake of 26 December 2003 // Bulletin of Earthquake Engineering 2. – 2004. P. 119...153. Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands.
15. Rahai A., Nemati S. Concrete Structures, Evaluation of Behavior and Strengthening Method. – 2003.
16. Popov N.N., Rastorguev B.S., Zabegaev A.V. Raschet konstruktsiy na dinamicheskie i spetsial'nye nagruzki. – M.: Vysshaya shkola, 1992.
17. Kabantsev O.V., Tamrazian A.G. Allowing for changes in the calculated scheme during the analysis of structural behavior // Magazine of Civil Engineering. – 49 (5), 2014. P.15...26.
18. Domarova E.V. Otsenka ustoychivosti k progressiruyushchemu razrusheniyu monolitnykh zhelezobetonnykh karkasnykh zdaniy s otdel'nymi usilennymi etazhami // Vestnik MGSU. – 2014, № 2. S.22..29.
19. Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Mikitarenko M.A., Perel'muter A.V., Perel'muter M.A. SCAD Office. Versiya 21. Vychislitel'nyy kompleks SCAD++. – M.: Izd-vo "SKAD SOFT", 2015.
20. Svod pravil SP 63.13330.2012. Betonnye i zhelezobetonnye konstruktsii. Osnovnye polozheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP 52-01-2003. – M.: FAU "FTsS".

Рекомендована кафедрой железобетонных и каменных конструкций. Поступила 16.04.18.