

УДК 624.042.1:539.3+693.157

*КАБАНЦЕВ ОЛЕГ ВАСИЛЬЕВИЧ, канд. техн. наук, профессор,
ovk531@gmail.com*

Национальный исследовательский

*Московский государственный строительный университет,
129337, г. Москва, Ярославское ш., 26,*

*УСЕИНОВ ЭМИЛЬ СЕЙРАНОВИЧ, мл. научный сотрудник,
useinov_em@mail.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2,*

*ШАРИПОВ ШАМСУДДИН, аспирант,
sharipov.shams@yandex.ru*

Национальный исследовательский

*Московский государственный строительный университет,
129337, г. Москва, Ярославское ш., 26*

О МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДОПУСКАЕМЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СЕЙСМОСТОЙКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Выполнен анализ известных методик определения коэффициента допускаемых повреждений сейсмостойких конструкций. Представлен и обоснован метод определения коэффициента, основанный на учете разных уровней жесткости упругих и упруго-пластических систем. Предложен метод определения предельно допустимого уровня пластического деформирования конструкций. Анализ предложенной методики определения коэффициента допускаемых повреждений подтверждает, что для массовых конструктивных материалов (каменная кладка) возможно получение величин коэффициента допускаемых повреждений, обеспечивающих корректное отражение физической картины пластического деформирования конструкций при сейсмических воздействиях.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние; пластическое деформирование; коэффициент допускаемых повреждений.

*OLEG V. KABANTSEV, PhD, Professor,
ovk531@gmail.com*

*National Research Moscow State University of Civil Engineering,
26, Yaroslavl'skoe Road, 129337, Moscow, Russia,*

*EMIL' S. USEINOV, Junior Scientist,
useinov_em@mail.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia,*

*SHAMSUDDIN SHARIPOV, Research Assistant,
sharipov.shams@yandex.ru*

*National Research Moscow State University of Civil Engineering,
26, Yaroslavl'skoe Road, 129337, Moscow, Russia*

DETERMINATION OF ALLOWABLE DAMAGE FACTOR OF ANTISEISMIC STRUCTURES

The paper presents the analysis of known calculation techniques related to the allowable damage factor. This technique is based on accounting for different stiffness of elastic and elasto-plastic systems. A method is suggested to detect the maximum permissible level of plastic deformation of a structure. The analysis of the proposed methodology of determining the allowable damage factor confirms that the popular construction materials (masonry) values can be obtained that ensure the correct reflection of the structural plastic deformation under seismic loads.

Keywords: strain-stress state; plastic deformation; allowable damage ratio.

Введение

Оценка сейсмостойкости зданий базируется на принципах допущения пластических деформаций конструкций при сейсмических воздействиях. Работа конструкций за пределами упругости (т. е. с реализацией пластической фазы деформирования) учитывается путем введения в методику определения сейсмической нагрузки специального коэффициента, который в отечественных нормах¹ имеет наименование «коэффициент допускаемых повреждений» конструкций зданий и сооружений (K_1), а его величина зависит от уровня допускаемых повреждений, реализуемых несущими конструкциями различного вида. Eurocode 8² содержит «коэффициент поведения» конструкции, имеющий аналогичный физический смысл. Величина «коэффициента допускаемых повреждений/поведения» изменяется от нуля до единицы. По существу, величина «коэффициента допускаемых повреждений/поведения» является характеристикой предельного состояния конструкции, а определение научно обоснованного значения указанного параметра является важнейшей задачей, успешное решение которой обеспечивает достоверность оценки сейсмостойкости зданий и сооружений.

1. Анализ известных методик определения коэффициента допускаемых повреждений

Одним из методов получения величины «коэффициента допускаемых повреждений/поведения» является анализ состояния несущих конструкций зданий, получивших повреждения при землетрясениях [1–4]. Основной целью таких исследований является определение некоторого «допустимого» уровня повреждений конструкций, при котором возможна дальнейшая эксплуатация здания после соответствующего ремонта.

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). В работах [5–13] предложены различные подходы к определению указанных параметров, например:

¹ СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. СНиП II-7-81*. М.: Минстрой России, 2014. 126 с.

² EN 1998-1. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules seismic actions and rules for buildings. Brussels: CEN, 2005. 102 p.

а) по кривизне (для железобетонных элементов)

$$\mu = \frac{k_{\max}}{k_y}, \quad (1)$$

где $k_{\max}$ – максимальная кривизна сечения, соответствующая разрушающей нагрузке; k_y – кривизна сечения, соответствующая началу текучести арматуры;

б) по углу пластического поворота (для железобетонных элементов)

$$\mu = \frac{\theta_{\max}}{\theta_y}, \quad (2)$$

где $\theta_{\max}$ – максимальный угол поворота, соответствующий разрушающей нагрузке; θ_y – угол поворота, соответствующий началу текучести арматуры;

с) по прогибу

$$\mu = \frac{y_{\max}}{y_y}, \quad (3)$$

где $y_{\max}$ – максимальный прогиб конструкции, соответствующий разрушающей нагрузке; y_y – прогиб, соответствующий началу текучести арматуры (для железобетонного сечения), для иных материалов – прогиб, соответствующий максимальному уровню упругих деформаций материала конструкции;

д) по накоплению повреждений (для железобетонных элементов)

$$D = \frac{\sum |\theta_{\max} - \theta_y|}{\theta_y}, \quad (4)$$

где $\theta_{\max}$ – максимальный угол поворота, соответствующий разрушающей нагрузке; θ_y – угол поворота, соответствующий началу текучести арматуры;

е) по снижению жесткости при нагружении железобетонных элементов (критериальный параметр – кривизна сечения)

$$D = \frac{K_0}{K_m}; \quad (5)$$

ф) на основе оценки усталости

$$D = \frac{\delta_{\max} - \delta_y}{\delta_u - \delta_y} \frac{1}{1 - \frac{E_h}{4(\delta_u - \delta_y)F_y}}, \quad (6)$$

где $\delta_{\max}$, δ_y , δ_u – величины прогиба: максимальный, соответствующий началу текучести арматуры, предельно допустимый соответственно; E_h – поглощаемая конструкцией энергия; F_y – предел текучести арматуры;

г) на основе поглощения энергии конструкцией

$$D = \sum \frac{F_i \delta_i}{F_y \delta_y}, \quad (7)$$

где F_i – усилие в сечении i -го элемента; F_y – предел текучести арматуры; δ_i , δ_y – величины деформации: i -го элемента полная и соответствующая началу текучести арматуры;

h) для железобетонных конструкций различного типа

$$D = \frac{\delta_{\max}}{\delta_u} + \beta_e \frac{\int dE}{Q_y \delta_u}, \quad (8)$$

где $\delta_{\max}$, δ_y , δ_u – величины прогиба: максимальный, соответствующий началу текучести арматуры, предельно допустимый соответственно; dE – необратимо поглощаемая конструкцией гистерезисная энергия; β_e – постоянное значение индекса повреждения; Q_y – силовой фактор, соответствующий пределу текучести арматуры.

На основе зависимости (8) для стержневых железобетонных элементов предложена формула оценки индекса повреждаемости с использованием критерия кривизны сечения:

$$D = \frac{k_{\max} - k_y}{k_u - k_y} + \beta_e \frac{\int dE}{M_y k_u}, \quad (9)$$

где $k_{\max}$, k_y , k_u – величины кривизны сечения: максимальная, соответствующая началу текучести арматуры, предельно допустимая соответственно; dE – необратимо поглощаемая конструкцией гистерезисная энергия; β_e – постоянное значение индекса повреждения; M_y – изгибающий момент в сечении, соответствующий пределу текучести арматуры.

Представленные результаты работ по оценке допускаемого уровня повреждаемости конструкций показывают: наибольший объем исследований выполнен для железобетонных конструкций, что определяется значимой зависимостью уровня пластичности железобетонных конструкций от параметров армирования.

Необходимо отметить, что в рамках оценки повреждаемости по изменению жесткости в ряде работ (например, в [5, 6]) предложено использовать не максимальное значение деформационного фактора, соответствующего разрушающей нагрузке, а некоторое меньшее значение, соответствующее нагрузке, вызывающей «допустимую» величину деформаций (повреждения) конструкции – K_m , δ_u , k_u и т. п. Таким образом, оценка повреждаемости конструкций требует знания дополнительных параметров, характеризующих способность конструкции реализовывать пластическую фазу деформирования в той степени, которая обеспечивает возможность эксплуатации поврежденной конструкции после сейсмического воздействия. Очевидно, что конструкции, выполненные из различных материалов (каменная кладка, бетон, железобетон), способны реализовать существенно различные величины пластической фазы деформирования, в пределах которой различны и значения допускаемых пластических деформаций.

В целом, нормы³ позволяют выделить общие принципы формирования сейсмических нагрузок на здания и сооружения, а также представляют возможность выполнить учет влияния упруго-пластического характера деформирования конструкций различного типа на основе допускаемого уровня пла-

³ СНиП II-7–81. Строительство в сейсмических районах. Нормы проектирования. М.: Госстрой СССР, 1981.

стической фазы деформирования. Таким образом, надежность оценки сейсмостойкости зданий определяется в значительной мере достоверностью и обоснованностью принятой в расчет меры реализации пластической фазы деформирования конструкций.

При определении величины «коэффициента допускаемых повреждений/поведения» для конструкций различного вида используют, как правило, гипотезу Н. Ньюмарка [14], в соответствии с которой: а) для систем с периодом собственных колебаний $t > 0,5$ с перемещения упругих и идеально упруго-пластических систем равны (графическое представление гипотезы – рис. 1, а); б) для систем с периодом собственных колебаний в диапазоне 0,1–0,5 с энергии упругой (S1) и упруго-пластической систем (S2) равны (графическое представление гипотезы – рис. 1, б).



Рис. 1. Графическое представление гипотезы Н. Ньюмарка [14] о соответствии характерных параметров упругой и упруго-пластической систем

В соответствии с гипотезой Н. Ньюмарка величина «коэффициента допускаемых повреждений» для зданий с периодом основного тона собственных колебаний, не превышающим 0,5 с, описывается следующими выражениями:

$$\text{при } 0,1 \geq t \geq 0,5 \text{ с} \quad K_1 = 1/\sqrt{(2\mu - 1)}, \quad (10)$$

$$\text{при } t < 0,1 \text{ с} \quad K_1 = 1, \quad (11)$$

где t – период основного тона собственных колебаний несущей системы здания; μ – коэффициент пластичности.

Графическая интерпретация (10) представлена на рис. 2.

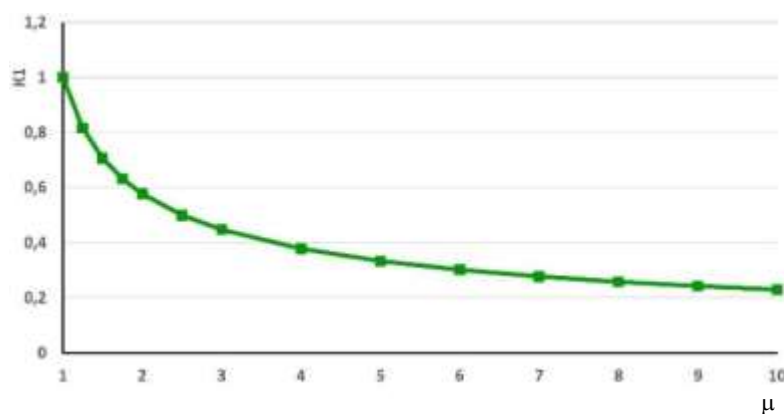


Рис. 2. Зависимость коэффициента K_1 от величины коэффициента пластичности μ (по [14])

Ряд современных исследований посвящен вопросам уточнения «коэффициента допускаемых повреждений». Так, в работах Ю.Л. Рутмана и Э. Симборта [15, 16] исследовано влияние характеристик движения грунта и величины периода основного тона собственных колебаний (T) несущей системы (при заданном уровне пластичности (μ)) на величину K_1 . Результаты исследований представлены на рис. 3.

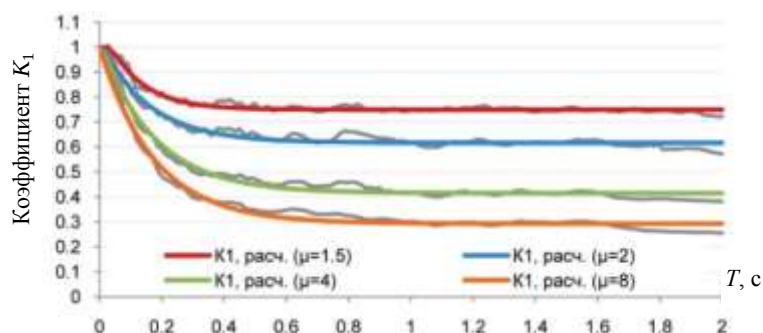


Рис. 3. Зависимость величины коэффициента K_1 от величины периода основного тона собственных колебаний (T) несущей системы при заданном уровне пластичности μ (по [16])

В работах О.В. Мкртычева и Г.А. Джинчвелашвили [17] исследовано поведение несущей системы, деформирующейся по схеме упруго-пластического деформирования, отличающейся от деформаций идеальной упруго-пластической системы (схема деформирования представлена на рис. 4, а). На основании гипотезы равенства энергий работ упругой и упруго-пластической систем получена зависимость, учитывающая особенность работы неидеальной упруго-пластической конструкции (графическая интерпретация представлена на рис. 4, б).

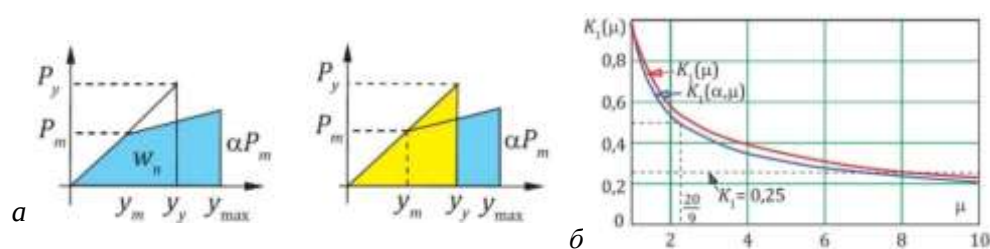


Рис. 4. Зависимость коэффициента K_1 от величины коэффициента пластичности μ для неидеальных упруго-пластических систем (по [17]): а — схема деформирования и определения энергии; б — график коэффициента K_1

Анализ вариантов определения «коэффициента допускаемых повреждений», разработанных различными авторами, показывает, что ни одно из предложений не позволяет получить величину $K_1 = 0,125$, что соответствует уровню не разрушенной, но существенно поврежденной конструкции, которая

не подлежит ремонту и восстановлению. Действующие отечественные нормы (СП 14.13330.2014) и ряд зарубежных норм содержат указания о допустимости применения такой величины характеристики предельного состояния для конструкций малоответственных зданий и сооружений.

2. Методика определения коэффициента допускаемых напряжений с учетом уровней жесткостей упругих и упруго-пластических систем

В качестве обоснования разработки зависимости $K_1 = f(\mu)$ необходимо подчеркнуть, что целью проектирования сейсмостойких зданий является обеспечение неразрушения несущих конструкций при сейсмических воздействиях. При этом допускается такой объем пластических деформаций, который (для большинства зданий) обеспечивает их восстановление после землетрясения путем ремонта и усиления.

Очевидно, что проектирование зданий, конструкции которых при сейсмических воздействиях будут работать по линейной схеме (т. е. в таких конструкциях не возникнут повреждения, соответствующие пластическим деформациям), могут рассматриваться как более предпочтительный вариант сейсмостойкого домостроения. Однако конструкции таких «линейно-упругих» зданий по ряду основных параметров, включая размеры сечений и несущую способность (а следовательно, и уровень жесткости конструкций), будут существенно превосходить конструкции зданий, работающих в упруго-пластическом режиме. Такой подход (с учетом малой вероятности возникновения землетрясений) не может быть принят с позиций экономической эффективности.

Различный уровень жесткостей линейно-упругих и упруго-пластических несущих систем определяет различную зависимость «нагрузка-деформации» на упругом участке работы конструкций. Для рассмотрения работы линейно-упругих и идеально упруго-пластических несущих систем примем следующую гипотезу: энергия, поглощаемая конструкцией, не зависит от величины деформаций и является постоянной величиной для линейно-упругих и упруго-пластических конструкций (графическая интерпретация – рис. 5).

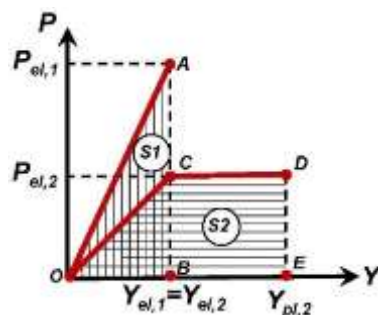


Рис. 5. Графическое представление о равенстве энергий деформирования упругой и идеально упруго-пластической систем

При равенстве энергий, поглощаемых линейно-упругими и идеально упруго-пластическими несущими системами, должно соблюдаться равенство площадей:

$$S1_{(OAB)} = S2_{(OCDE)}. \quad (12)$$

Из (12) после преобразований следует, что

$$K_1 = \frac{1}{2\mu - 1}. \quad (13)$$

Графическая интерпретация (13) представлена на рис. 6.

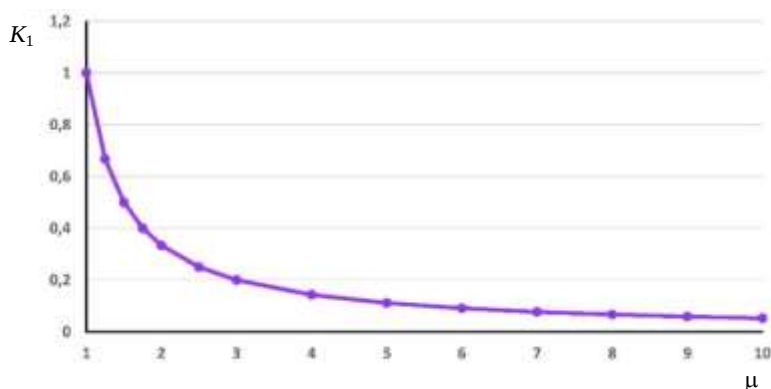


Рис. 6. Зависимость коэффициента K_1 от величины коэффициента пластичности μ в соответствии с (13)

Анализ предложенной зависимости коэффициента допускаемых повреждений от коэффициента пластичности конструкции показывает, что зависимость (13) позволяет получить величину $K_1 = 0,125$, которая установлена нормами для существенно поврежденной конструкции, не подлежащей ремонту и восстановлению. Таким образом, предложенная зависимость соответствует физически реализующейся упруго-пластической работе конструкции.

3. Предельно допустимые уровни коэффициента пластичности конструкций сейсмостойких зданий (на примере каменной кладки)

Для использования величины коэффициента допускаемых повреждений в качестве характеристики предельного состояния конструкции необходимо (в соответствии с [5, 6, 18, 19]) определить предельно допустимую величину коэффициента пластичности μ , соответствующую такому уровню повреждений, после формирования которого конструкция может быть восстановлена. Необходимость установления таких граничных величин очевидна – коэффициент пластичности μ определяется, как правило, на основе максимальных величин деформационного фактора (перемещение, кривизна и т. п.), соответствующего моменту разрушения исследуемой конструкции. Но уровень деформаций, соответствующий разрушению, не может быть принят в качестве допустимой характеристики – это противоречит принципам сейсмостойкого строительства.

Для железобетонных конструкций в работах [18, 19] предложены и обоснованы предельно допустимые уровни пластичности. Для каменных конструкций, как наиболее массовых конструкций зданий существующего фонда, исследований по определению уровня коэффициента пластичности μ , соответствующего допустимому уровню повреждения, не выполнялось. Од-

нако для обширного круга анизотропных материалов проведены исследования по определению характерных особенностей пластической фазы деформирования таких материалов при двухосном напряженном состоянии. Так, в работах В.Н. Никифоровского [20], В.Е. Панина [22], В.Н. Николаевского [21], Т. Фудзи [23] и других авторов обоснован предел пластического деформирования анизотропных материалов $\mu_{lim} = 0,85 \mu_{max}$, после превышения которого развиваются во времени процессы полного разрушения материала.

Анализ выполненных с участием одного из авторов физических экспериментов [24–27] показывает, что предельная величина относительных полных перемещений, после которых наступает необратимое разрушение, равна $\varepsilon_{lim} = 0,75–0,85\varepsilon_{max}$. Необходимо подчеркнуть, что объем экспериментальных исследований на образцах из каменной кладки незначителен, и для определения статистически обоснованного среднего значения предельных деформаций физические эксперименты необходимо продолжить. С учетом указанных обстоятельств целесообразно для дальнейших работ принять предельное значение перемещений $\varepsilon_{lim} = 0,75\varepsilon_{max}$.

На основании предложений Н.Н. Попова и Б.С. Расторгуева [28] для анизотропных материалов (бетон, камень и т. п.), к которым следует отнести и каменную кладку, коэффициент пластичности может быть выражен через отношение величин относительных деформаций, соответствующих полным упруго-пластическим деформациям (ε_{tot}), к упругим деформациям (ε_{el}):

$$\mu = \varepsilon_{tot} / \varepsilon_{el} . \quad (14)$$

С учетом принятия ограничений на предельную величину относительных деформаций, обеспечивающих сохранность поврежденного материала (конструкции), предельная величина коэффициента пластичности (μ_{lim}) для каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния равна

$$\mu_{lim} = \frac{0,75 \cdot \varepsilon_{tot}}{\varepsilon_{el}} = 0,75\mu_{max} . \quad (15)$$

Из (15) следует:

$$K_1 = \frac{1}{2\mu_{lim} - 1} . \quad (16)$$

Графическая интерпретация (16) представлена на рис. 7.

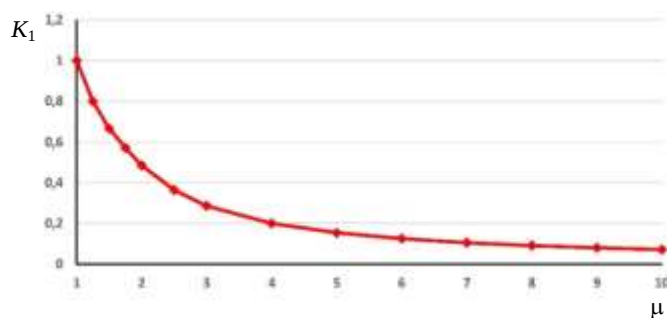


Рис. 7. Зависимость коэффициента K_1 от допустимой величины коэффициента пластичности μ_{lim} в соответствии с (16)

Анализ предложенной методики определения коэффициента допускаемых повреждений (K_1) подтверждает, что для массовых конструкционных материалов (каменная кладка) возможно получение величин K_1 , обеспечивающих корректное отражение физической картины пластического деформирования конструкций при сейсмических воздействиях.

Заключение

Анализ известных методик определения коэффициента допускаемых повреждений (K_1) показывает, что необходимо их совершенствование в целях обеспечения корректного отражения физических процессов пластического деформирования несущих конструкций зданий при сейсмических воздействиях.

Предложенный метод расчета коэффициента допускаемых повреждений, основанный на учете разных уровней жесткости упругих и упруго-пластических систем, соответствует концепции действующих норм сейсмостойкого строительства и обеспечивает реализацию их требований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Айзенберг, Я.М. Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 года. Некоторые уроки и выводы / Я.М. Айзенберг // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 1999. – № 1. – С. 6–9.
2. Андреев, О.О. Уроки землетрясения. Общие выводы / О.О. Андреев, В.И. Ойзерман // Карпатское землетрясение 1986 г. / под ред. А.В. Друмя, Н.В. Шебалина, Н.Н. Складнева, С.С. Графова, В.И. Ойзермана. – Кишинев, 1990. – С. 323–325.
3. Газлийское землетрясение 1984 г.: анализ поведения зданий и инженерных сооружений / отв. ред. А.И. Мартемьянов, Д.А. Алексеенков, Л.Ш. Килимник. – М.: Наука, 1988. – 118 с.
4. Кабанцев, О.В. Макросейсмический эффект землетрясения 4 октября 1994 г. на островах Итуруп, Кунашир, Шикотан / О.В. Кабанцев // Экспресс-информация ВНИИИС Госстроя СССР. Серия 14. Строительство в особых условиях. Сейсмостойкое строительство. – Вып. 4. – М., 1995. – С. 7–11.
5. Banon, H. Seismic Safety of Reinforced Concrete Members and Structures / H. Banon, D. Veneziano // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. – 1982. – V. 10. – P. 179–193.
6. Banon, H. Biggs Seismic Damage in Reinforced Concrete frame / H. Banon, M. John // Journal of Structural Deviation. – 1981. – V. 107. – № ST9, September. – P. 1713–1729.
7. Cosenza, E. An Evaluation of Damage Functionals in Earthquake Resistant / E. Cosenza, G. Manfredi, R. Ramasco // Eur. Conf. Earthquake Engineering, Moscow. – 1990. – V. 9. – P. 303–312.
8. Cosenza, E. The use of Damage Function in Earthquake Engineering: a Comparison between Different Methods / E. Cosenza, G. Manfredi, R. Ramasco // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. – 1993. – V. 22. – P. 855–869.
9. Darwin, D. Energy dissipation in RC beams under cyclic load / D. Darwin, C. K. Nmai // J. struct. eng. ASCE 112. – 1986. – P. 1829–1846.
10. Fajfar, P. A measure of earthquake motion capacity to damage medium-period structures / P. Fajfar, T. Vidic, M. Fischinger // Soil Dynamic and Earthquake Engineering. – 1990. – № 9. – P. 236–242.
11. Kunnath, S.K. Analytical modeling of inelastic seismic response of R/C structures / S.K. Kunnath, A.M. Reinhorn, Y.J. Park // Journal of Structural Engineering, ASCE 116. – 1990. – P. 996–1017.
12. Nadim, F. The Bam Earthquake of 26 December 2003 / F. Nadim, M. Moghtaderi Zadeh // Bulletin of Earthquake Engineering 2. – Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands, 2004. – P. 119–153.

13. Rahai, A. Concrete Structures, Evaluation of Behavior and Strengthening Method / A. Rahai, S. Nemati. – 2003. – 362 p.
14. Ньюмарк, Н. Основы сейсмостойкого строительства / Н. Ньюмарк, Э. Розенблюет ; под ред. Я.М. Айзенберга. – М., 1980. – 344 с.
15. Рутман, Ю.Л. Выбор коэффициента редукции сейсмических нагрузок на основе анализа пластического ресурса конструкции / Ю.Л. Рутман, Э. Симборт // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – № 2 (27). – С. 78–81.
16. Симборт, Э. Методика выбора коэффициента редукции сейсмических нагрузок K_1 при заданном уровне коэффициента пластичности μ / Э. Симборт // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 1. – С. 44–52.
17. Мкртычев, О.В. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения) / О.В. Мкртычев, Г.А. Джинчвелашвили. – М. : МГСУ, 2012. – 192 с.
18. Жарницкий, В.И. Оценка сейсмостойкости зданий и повреждений его конструкций на основе динамического расчета с учетом пластических деформаций материалов / В.И. Жарницкий, Ю.Л. Голда, С.О. Авдеева // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 1999. – № 4. – С. 7–8.
19. Жарницкий, В.И. Развитие теории сейсмостойкости железобетонных конструкций / В.И. Жарницкий, А.В. Забегаев // Бетон на рубеже третьего тысячелетия : сб. докладов 1-й Всероссийской конференции по проблемам бетона и железобетона. Т. 2. – М., 2001. – С. 655–658.
20. Никифоровский, В.Н. Динамическое разрушение твердых тел / В.Н. Никифоровский, Е.И. Шемякин. – Новосибирск : Наука, 1979. – 271 с.
21. Николаевский, В.Н. Динамическая прочность и скорость разрушения / В.Н. Николаевский // Механика. Удар, взрыв и разрушение. – 1981. – № 26. – С. 166–203.
22. Панин, В.Е. Структурные уровни деформации твердых тел / В.Е. Панин, В.А. Лихачев, Ю.В. Гриняев ; отв. ред. Н.Н. Яненко / АН СССР. Сиб. отд. Ин-т оптики атмосферы. – Новосибирск : Наука, 1985. – 163 с.
23. Фудзи, Т. Механика разрушения композиционных материалов / Т. Фудзи, М. Дзако ; пер. с яп. С.Л. Масленникова ; под ред. В.И. Бурлаева. – М. : Мир, 1982. – 232 с.
24. Экспериментальные исследования несущей способности каменной кладки с трещинами при их инъецировании цементным раствором по разрядно-импульсной технологии / О.В. Кабанцев, Г.П. Тонких, В.В. Кошаев, В.Я. Еремин, М.В. Тихонов // Научно-технический вестник МГСУ. – 2011. – № 2 (Т. 1). – С. 127–135.
25. Копаница, Д.Г. Экспериментальные исследования фрагментов кирпичной кладки на действие статической и динамической нагрузки / Д.Г. Копаница, О.В. Кабанцев, Э.С. Усеинов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 4. – С. 157–178.
26. Тонких, Г.П. Экспериментальные исследования несущей способности комбинированной каменной кладки при главных нагрузках / Г.П. Тонких, В.В. Кошаев, О.В. Кабанцев // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2007. – № 6. – С. 26–31.
27. Экспериментальные исследования сейсмоусиления каменной кладки наружными бетонными аппликациями / Г.П. Тонких, О.В. Кабанцев, О.А. Симаков, А.Б. Симаков, С.М. Баев, П.С. Панфилов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2011. – № 2. – С. 35–41.
28. Попов, Н.Н. Расчет конструкций на динамические и специальные нагрузки / Н.Н. Попов, Б.С. Расторгуев, А.В. Забегаев. – М. : Высшая школа, 1992. – 319 с.

REFERENCES

1. Aizenberg Ya.M. Spitakskoe zemletryasenie 7 dekabrya 1988 goda. Nekotorye uroki i vyvody [Spitak earthquake on December 7, 1988. Some lessons and conclusions]. *Seismostoiroe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 1999. No. 1. Pp. 6–9. (rus)
2. Andreev O.O., Oizerman V.I. Uroki zemletryaseniya. Obshchie vyvody [Lessons of earthquake. General conclusions]. *Karpatskoe zemletryasenie 1986 g.* Kishinev, 1990. Pp. 323–325. (rus)

3. Martem'yanov A.I., Alekseenkov D.A., Kilimnik L.Sh. Gazliiskoe zemletryasenie 1984 g.: Analiz povedeniya zdaniy i inzhenernykh sooruzheniy [Gazli earthquake 1984: Analysis of structural behavior]. Moscow : Nauka Publ., 1988. 118 p. (rus)
4. Kabantsev O.V. Makroseismicheskii effekt zemletryaseniya 4 oktyabrya 1994 g. na ostrovakh Iturup, Kunashir, Shikotan [Microseismic effect of earthquake 4 October 1994 on the Iturup, Kunashir, Shikotan islands]. Moscow : Gosstroy Publ., 1995. No. 4. Pp. 7–11. (rus)
5. Banon H., Veneziano D. Seismic safety of reinforced concrete members and structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1982. V. 10. Pp. 179–193.
6. Banon H., John H. Biggs seismic damage in reinforced concrete frame. *Journal of Structural Deviation*. 1981. V. 107. No. 9. Pp. 1713–1729.
7. Cosenza E., Manfredi G., Ramasco R. An evaluation of damage functional in earthquake resistant. *Eur. Conf. Earthquake Engineering*. Moscow, 1990. V. 9. Pp. 303–312.
8. Cosenza E., Manfredi G., Ramasco R. The use of damage function in earthquake engineering: a comparison between different methods. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1993. V. 22. Pp. 855–869.
9. Darwin D., Nmai C.K. Energy dissipation in RC beams under cyclic load. *J. Struct. Eng. ASCE* 112. 1986. Pp. 1829–1846.
10. Fajfar P., Vidic T., Fischinger M. A measure of earthquake motion capacity to damage medium-period structures. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*. 1990. No. 9. Pp. 236–242.
11. Kunnath S.K., Reinhorn A. M., Park Y. J. Analytical modeling of inelastic seismic response of R/C structure. *Journal of Structural Engineering, ASCE* 116. 1990. Pp. 996–1017.
12. Nadim F., Moghtaderi Zadeh M. The Bam earthquake of 26 December 2003. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2. 2004. Pp. 119–153. Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands.
13. Rahai A., Nemati S. Concrete structures, evaluation of behavior and strengthening method. 2003. 362 p.
14. Newmark N., Rozenblyuet E., Aizenberg M. Osnovy seismostoikogo stroitel'stva [Basics of earthquake engineering]. Moscow, 1980. 344 p. (rus)
15. Rutman Yu L., Simbort E. Vybora koefitsienta reduktsii seismicheskikh nagruzok na osnove analiza plasticheskogo resursa konstruktssii [Selection of reduction coefficient based on seismic loads analysis of plastic resource]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2011. No. 27. Pp. 78–81. (rus)
16. Simbort E. Metodika vybora koefitsienta reduktsii seismicheskikh nagruzok pri zadannom urovne koefitsienta plastichnosti [Selection of seismic load reduction coefficient for a given level of plasticity coefficient]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2012. No. 1. Pp. 44–52. (rus)
17. Mkrtichev O.V., Dzinchvelashvili G.A. Problemy ucheta nelineinosti v teorii seismostoikosti (gipotezy i zabluzhdeniya) [Problems of non-linearities in earthquake resistance theory (hypothesis and misconceptions)]. Moscow : MGSU Publ., 2012. 192 p. (rus)
18. Zharnitskii V.I., Golda Yu.L., Avdeeva S.O. Otsenka seismostoikosti zdaniy i povrezhdenii ego konstruktssii na osnove dinamicheskogo rascheta s ucheto plasticheskikh deformatsii materialov [Estimation of seismic stability of buildings and damages based on dynamic analysis and plastic deformation]. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 1999. No. 4. Pp. 7–8. (rus)
19. Zharnitskii V.I., Zabegaev A.V. Razvitie teorii seismostoikosti zhelezobetonnykh konstruktssii [Theory development of seismic resistance of reinforced concrete structures]. *Proc. 1st All-Rus. Sci. Conf. 'Concrete at the turn of the third century'*. Moscow, 2001. V. 2. Pp. 655–658. (rus)
20. Nikiforovskii V.N., Shemyakin E.I. Dinamicheskoe razrushenie tverdykh tel [Dynamic fracture of solids]. Novosibirsk : Nauka Publ., 1979. 271 p. (rus)
21. Nikolaevskii V.N. Dinamicheskaya prochnost' i skorost' razrusheniya [Dynamic strength and rate of destruction]. *Mekhanika. Udar, vzryv i razrushenie*. 1981. No. 26. Pp. 166–203. (rus)
22. Panin V. E., Likhachev V.A., Grinyaev Yu.V. Strukturnye urovni deformatsii tverdykh tel [Structural levels of deformation of solids]. Novosibirsk : Nauka Publ., 1985. 163 p. (rus)
23. Fudzuki T., Dzako M. Fracture mechanics of composite materials. Moscow : Mir Publ., 1982. 232 p. (transl. from Jap.)
24. Kabantsev O.V., Tonkikh G.P., Koshaev V.V., Eremin V.Ya., Tikhonov M.V. Eksperimental'nye issledovaniya nesushchei sposobnosti kamennoi kladki s treshchinami pri ikh in'tsirovanii tsementnym rastvorom po razryadno-impul'snoi tekhnologii [Experimental study of bearing

- capacity of masonry cracked when injected with cement mortar by discharge-pulse technology]. *Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture*. 2011. No. 2. Pp. 127–135. (rus)
25. *Kopanitsa D.G., Kabantsev O.V., Useinov E.S.* Eksperimental'nye issledovaniya fragmentov kirpichnoi kladki na deistvie staticheskoi i dinamicheskoi nagruzki [Experimental studies of masonry fragments under static and dynamic loads]. *Vestnik TSUAB*. 2012. No. 4. Pp. 157–178. (rus)
26. *Tonkikh G.P., Koshaev V.V., Kabantsev O.V.* Eksperimental'nye issledovaniya nesushchei sposobnosti kombinirovannoi kamennoi kladki pri glavnykh nagruzkakh [Experimental study of masonry bearing capacity combined with main loads]. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 2007. No. 6. Pp. 26–31. (rus)
27. *Tonkikh G.P., Kabantsev O.V., Simako, O.A., Simakov A.B., Baev S.M., Panfilov P.S.* Eksperimental'nye issledovaniia seismousileniia kamennoi kladki naruzhnymi betonnymi applikatsiiami [Experimental research of seismic reinforcement of masonry by exterior concrete applications]. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 2011. No. 2. Pp. 35–42. (rus)
28. *Popov N.N., Rastorguev B.S., Zabegaev A.V.* Raschet konstruktsii na dinamicheskie i spetsial'nye nagruzki [Structural analysis of dynamic and specific loads]. Moscow : Vysshaya Shkola Publ., 1992. 319 p. (rus)