

Маятниковые сейсмоизолирующие опоры. Конструкция, расчет, эксперимент

Д.т.н., профессор Ю.Л. Рутман,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет*

Ключевые слова: сейсмоизоляция; сейсмоопоры; демпфирование; сейсмоиспытания; динамический расчет

Введение

Одной из серьезнейших задач в вопросе защиты от ударно-вибрационных нагрузок является задача создания сейсмоизолирующих систем, состоящих из ряда сейсмоизолирующих опор и защищающих сооружение от воздействия землетрясений. Сейсмоизолирующие системы, идея и применение которых восходит к началу прошлого века, стали интенсивно применяться в строительстве с 1970-80 гг.

В данной статье рассмотрена новая сейсмоизолирующая система, одним из разработчиков которой является автор статьи. Основное внимание далее уделяется методам расчета и испытаний этих систем, т.к. только совместное применение этих средств анализа позволяет установить эффективность конструктивных решений. Следует отметить, что предлагаемые ниже методы расчетного анализа описывают ряд нелинейных свойств сейсмоизолирующих систем, которые не учитывались ранее.

Сейсмоизоляция осуществляется на базе следующих принципов:

а) собственная частота системы «защищаемый объект – сейсмоизоляция» должна быть существенно ниже основных энергосодержащих частот внешнего воздействия (что приводит к фильтрации высоких частот);

б) демпфирование в сейсмоизолирующих системах должно быть достаточно высоким, чтобы исключить резонансные явления (т.е. исключить значительное увеличение амплитуды колебаний, если произойдет совпадение частот воздействия и системы);

в) в сейсмоизолирующих системах могут быть применены элементы, ограничивающие уровень усилия, передаваемого на защищаемый объект (это пластически деформируемые или трениеэлементы).

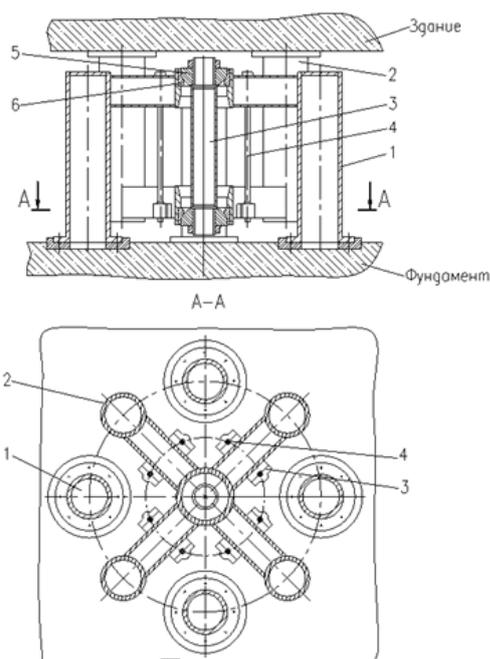
Обычно сейсмоизолирующая система состоит из различным образом скомпонованных сейсмоизолирующих опор. Проблемам создания различных видов сейсмоизолирующих опор и методам их расчета посвящено очень большое количество исследований и публикаций. Наибольший вклад в решение проблемы сейсмоизоляции внесли Д. Келли [1], У. Робинсон [2], Р. Скиннер [3], А. Мартелли [4], М. Хигашино, С.Окомото [5], А.Чопра [6]. Из отечественных ученых следует указать О.А. Савинова [7], Я.М. Айзенберга [8], С.В. Полякова [9], Т.А. Белаш, А.М. Уздина [10], Ю.Д. Черепинского [11], А.В. Курзанова, В.В. Назина.

Существует целый ряд зарубежных фирм, которые на основе вышеуказанных принципов разрабатывают и изготавливают сейсмоизолирующие системы очень разнообразной номенклатуры и высокого качества. В последнее время был разработан и ряд вариантов отечественных сейсмоизолирующих систем [12], [13].

Конструкции сейсмоизолирующих опор

Вышеуказанные сейсмоизолирующие системы [12], [13] состоят из сейсмоизолирующих опор опорного и опорно-маятникового типа. В выполненных разработках различным образом скомпонованы упругие и пластически деформируемые устройства.

Эффективность разработанных вариантов сейсмоизолирующих опор была проанализирована на основе многочисленных расчетов, технологического и экономического анализа, а также характеристик надежности. В результате для изготовления экспериментального образца и проведения испытаний, как наиболее перспективная, была выбрана конструкция опорно-маятниковой сейсмоизолирующей опоры, представленная на рис. 1.



- 1 – опорная рама, соединенная с фундаментом;
 2 – опорная рама, соединенная со зданием;
 3 – маятниковая тяга;
 4 – демпфирующий стержень;
 5 – сферическая гайка;
 6 – сферическая шайба

Рисунок 1. Опора маятникового типа с шарнирным узлом в виде сферических гайки и шайбы

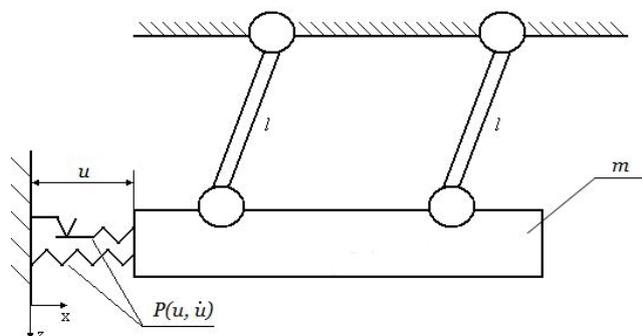


Рисунок 2. Динамическая модель маятниковой системы сейсмоизоляции с одной степенью свободы

Методики исследования динамики сейсмоизолированного сооружения

Ниже рассматриваются методики расчета динамики сейсмоизолированных сооружений. Эти методики позволяют провести анализ эффективности сейсмоизолирующих систем на основе иерархической системы математических моделей.

Первый уровень иерархии – нелинейная динамическая модель с одной степенью свободы [5]. Расчетная схема сооружения, расположенного на маятниковых сейсмоизолирующих опорах (рис. 1), приведена на рис. 2.

Уравнение, описывающее модель на рис. 2, имеет вид:

$$m \frac{l^2}{l^2 - u^2} \ddot{u} + ml^2 \frac{u \cdot \dot{u}^2}{(l^2 - u^2)^2} = m(g - \ddot{z}(t)) \frac{u}{\sqrt{l^2 - u^2}} - P(u, \dot{u}) - \alpha \dot{u} - m\ddot{x}(t), \quad (1)$$

где m – масса защищаемого объекта;
 l – длина маятника;
 g – ускорение свободного падения;
 x, z – координаты, описывающие движение фундамента;
 u – координаты, описывающие перемещение защищаемого объекта относительно фундамента;
 α – параметр внутреннего конструкционного демпфирования;
 $P(u, \dot{u})$ – билинейная силовая характеристика пластического демпфера (рис. 3). Уравнение (1) учитывает как горизонтальные, так и вертикальные кинематические возмущения.

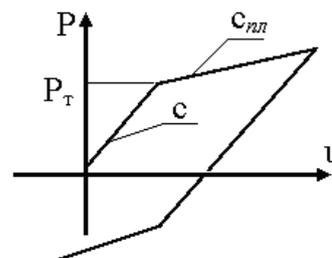


Рисунок 3. Билинейная силовая характеристика пластического демпфера

Если $u \ll l$, то уравнение (1) приобретает вид:

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega \cdot \dot{u} + \left(\omega^2 - \frac{\ddot{z}(t)}{l} \right) \cdot u + f(u, \dot{u}) = -\ddot{x}(t), \quad (2)$$

где $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$; $\zeta = \frac{\alpha}{2m\omega}$;

$f(u, \dot{u}) = \frac{P(u, \dot{u})}{m}$ – приведенное к единичной массе усилие сопротивления пластического демпфера.

Функция $f(u, \dot{u})$ характеризуется следующими тремя параметрами:

$$f_T = \frac{P_T}{m_0}, \quad \omega_1 = \sqrt{\frac{c}{m_0}}, \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{c_{nl}}{m_0}}. \quad (3)$$

С помощью указанного типа моделей устанавливаются наиболее неблагоприятные виды нагружения. Дальнейший расчет на наихудшие нагружения проводится по схемам, в которых сооружение, расположенное на сейсмоизолирующей системе, представлено балочной или объемной конечноэлементной моделью. Такой расчет может быть проведен по опции «нелинейный динамический анализ» ПК MicroFe. Эта опция позволяет учесть нелинейность силовых характеристик сейсмоизолирующих опор.

Алгоритм указанного нелинейного динамического расчета основан на обобщении метода нормальных координат на случай систем с локальными нелинейностями [14]. Это обобщение приводит к следующей системе обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} M\ddot{X} + CX &= -AR + \Phi, \\ X(0) &= X_0, \quad \dot{X}(0) = \dot{X}_0; \\ R &= G(Y, \dot{Y}, t), \quad Y = A^T X. \end{aligned} \quad (4)$$

где M , C – матрицы обобщенных масс и жесткостей, соответствующих нормальным координатам линеаризованной системы;

A – матрица приведения нелинейных составляющих опорных реакций к собственным формам линеаризованной системы;

R – матрица столбец нелинейных составляющих опорных реакций (разница между реальными и линеаризованными силовыми характеристиками опор);

Φ – приведенное к собственным формам внешнее кинематическое (сейсмическое) воздействие.

Из (4) получаем:

$$M\ddot{X} + CX = -AG \left[A^T X, (A^T X) \right] + \Phi. \quad (5)$$

Уравнения (5) являются разрешающими уравнениями динамической задачи, описывающей колебания сооружения, расположенного на сейсмоизолирующей системе.

Обычно сложной задачей является поиск силовой характеристики пластического демпфера. Такая характеристика может быть найдена с помощью универсальных программных комплексов, например, с помощью ПК ANSYS. Однако, проектный анализ диктует необходимость использования более оперативных методик расчета. При использовании в вышеуказанных моделях (1), (5) билинейной силовой характеристики пластического демпфера (рис. 3) нужно определить лишь 3 параметра этой характеристики: P_T , c , c_{nl} .

Это можно сделать достаточно простыми средствами. Упругая жесткость c определяется обычными методами упругого расчета. Жесткость c_{nl} , соответствующая упруго-пластической стадии расчета пластического демпфера, задается приблизительно в диапазоне $0.05 \div 0.02c$. При оценочном расчете такой разброс мало сказывается на результатах расчета. Усилие срабатывания пластического демпфера P_T можно найти, исходя из его жестко-пластической модели, как предельную нагрузку. Для этого можно использовать опцию «предельный анализ» в ПК MicroFE или аналитические решения [15]. Существуют аналитические зависимости для определения силовых характеристик пластического демпфера, применяемого в Рутман Ю.Л. Маятниковые сейсмоизолирующие опоры. Конструкция, расчет, эксперимент

сейсмоизолирующей опоре, показанной на рис. 1 [16]. Эти зависимости позволяют задавать силовые характеристики в безразмерной форме, что существенно облегчает поиск их оптимальных параметров.

По всем трем моделям (с одной степенью свободы, балочной и объемной) был выполнен ряд расчетов 9-этажного здания, расположенного на маятниковой сейсмоизолирующей системе. Расчеты проводились на действие трех различных возмущений разной частотности. Уровень этих возмущений соответствовал 9-ти бальному землетрясению. Было установлено, что результаты расчетов по балочной и объемной конечно-элементной схеме по уровню перемещений и ускорений отличаются примерно на 10 %. Разница между теми же параметрами в конечно-элементной модели и системе с одной степенью свободы составляет около 20% [17]. Хорошая точность системы с одной степенью свободы объясняется тем, что сейсмоизолированное здание при расчете на сейсмическое воздействие ведет себя как твердое тело, а нелинейность модели полностью сосредоточена в сейсмоизолирующем слое. Поэтому для дальнейшего анализа была выбрана система с одной степенью свободы как наиболее эффективная для выбора проектных решений и поиска рациональных параметров.

Выбор конструктивных параметров сейсмоизолирующих опор по результатам расчетов

С использованием модели с одной степенью свободы (рис. 2) была проведена серия расчетов с варьированием параметров этой модели. Расчеты проводились на действие 100 различных воздействий. В результате анализа этих расчетов были выбраны конструктивные параметры сейсмоизолирующих опор. Выбранные конструктивные параметры создают собственную частоту маятниковой системы $f = 0.4$ Гц и усилия в пластических демпферах, равные 0.1 веса защищаемого объекта. При этих конструктивных параметрах и указанном уровне внешних воздействий перемещения защищаемого объекта относительно фундамента не превысят 0.3 м, а абсолютные ускорения – $2 м/с^2$. Таким образом, уровень воздействий на защищаемый объект снижается в 2 и более раза. За счет изменения частотного состава трансформированного воздействия системы сейсмоизоляции снижение внутренних усилий в защищаемом объекте оказывается еще более существенным.

Испытания сейсмоизолирующих опор

Существующие средства и методики проведения сейсмоиспытаний описаны в [18], [5]. Сейсмические испытания макета здания с системой сейсмоизоляции на основе рассмотренных выше маятниковых опор проводились на сейсмоплатформе ВСС-300. Сейсмоплатформа в состоянии воспроизводить пространственные сейсмонагрузки с уровнем превосходящим 10-ти бальное землетрясение. Для проведения испытаний были изготовлены экспериментальные образцы маятниковых сейсмоизолирующих опор и макет здания. Установка макета здания на опоры показана на рис. 4.



Рисунок 4. Вид сейсмоплатформы с макетом сейсмоизолированного здания и установленной вибромашиной

Схема расстановки датчиков и их нумерации показана на рис. 5. На схеме обозначены А162, А165, А166, А184, А187, А189, А192, А193 – датчики ускорения, Р1÷Р12 – датчики перемещений, стрелками указано направление измерений.

Рутман Ю.Л. Маятниковые сейсмоизолирующие опоры. Конструкция, расчет, эксперимент

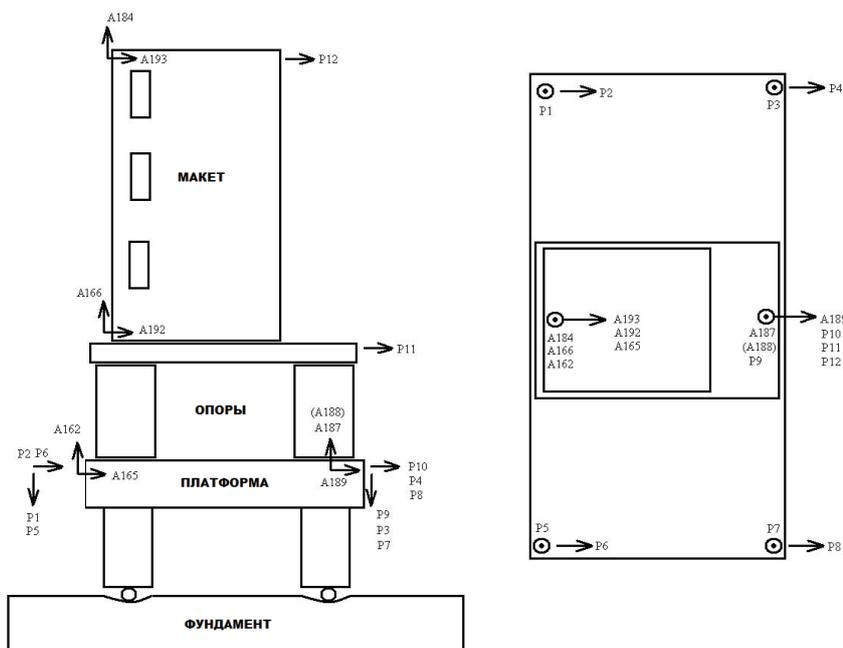


Рисунок 5. Схема нумерации датчиков при проведении опытов с макетом сейсмоизолированного здания на сеймоплатформе ВСС-300

Основные результаты этих экспериментов указаны ниже: максимальные ускорения приведены в таблице 1, а графики перемещений стенда и макета показаны на рис. 6.

Таблица 1. Экстремальные значения в записях датчиков ускорения и время их достижения в первом зачетном опыте

№ датчика	Максимальное значение, m/s^2	Время максимум, с	Минимальное значение, m/s^2	Время минимум, с
A165	8.34	16.07	-9.25	16.27
A189	8.05	16.07	-10.62	16.27
A192	5.0	16.11	-4.86	16.27
A193	3.96	16.52	-5.57	16.25

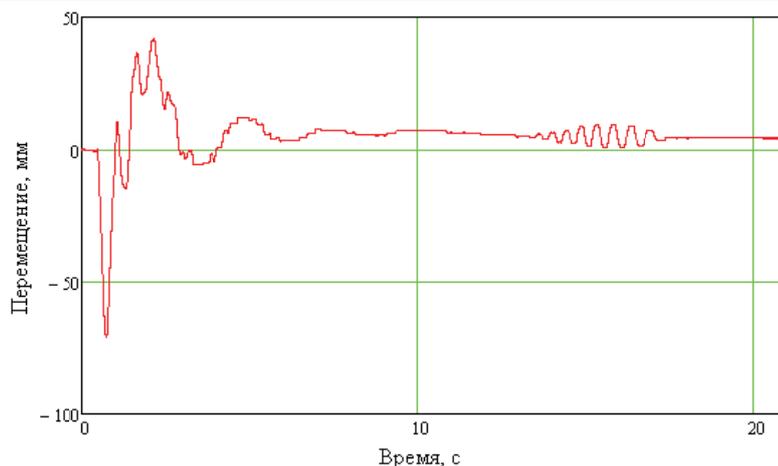


Рисунок 6. Относительные горизонтальные смещения основания макета здания

Из рис. 6 следует, что этот процесс имеет вид быстро затухающих под влиянием упруго-пластических демпферов колебаний, синхронно происходящих по всей высоте макета здания.

Максимальные горизонтальные ускорения сеймоплатформы составили $9.56 m/s^2$, вертикальные ускорения сеймоплатформы – $4.6 m/s^2$, горизонтальной скорости и смещения – $0.69 m/s$ и $0.11 m$ соответственно. Эти параметры могут рассматриваться как экстремальные для территории РФ.

Величины горизонтальных ускорений и скорости на верхнем строении по сравнению с аналогичными параметрами движения сеймоплатформы уменьшились примерно в 2 раза.

Рутман Ю.Л. Маятниковые сейсмоизолирующие опоры. Конструкция, расчет, эксперимент

Заклучение

1. Выполненный расчетно-экспериментальный анализ показывает работоспособность и эффективность сейсмоизолирующей системы, состоящей из представленных на рисунке 1 маятниковых сейсмоизолирующих опор.

2. Предложенные сейсмоизолирующие системы могут быть применены для защиты от землетрясений:

- гражданских зданий и промышленных объектов;
- нефтедобывающих платформ, ведущих добычу на шельфе;
- культурных и спортивных центров и т.п.

Литература

1. Kelly J. M. Earthquake resistant design with rubber. London: Springer-Verl., 1997. 243 p.
2. Skinner R. I. An introduction to seismic isolation. New Zeland: John Wiley & Sons, 1993. 353 p.
3. Skinner R. I., Robinson W. H., McVerry G. H. An introduction to seismic isolation. New York: Wiley, 2003. 398 p.
4. Martelli A., Forny M. Seismic isolation: present application and perspectives // International Workshop On Base Isolated High-rise Buildings. Yerevan, Armenia: 2006. Pp.1-26.
5. Masahiko Higashino, Shin Okamoto. Response Control and Seismic Isolation of Buildings. New York: Taylor & Francis, 2006. 484 p.
6. Chopra A. K. Dynamic of structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering. New Jersey: Prentice-Hall, 2006. 794 p.
7. Савинов О. А. Сейсмоизоляция сооружений // Избранные статьи и доклады. Динамические проблемы строительной механики. СПб., 1993. С. 155-178.
8. Айзенберг Я. М. Сейсмоизоляция высоких зданий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. Вып 1. 2004. С. 28-32.
9. Поляков С. В., Килимник Л. Ш., Солдатова Л. А. Опыт возведения зданий с сейсмоизолирующим скользящим поясом в фундаменте. М.: Стройиздат, 1984. 31с.
10. Уздин А. М., Долгая А. А. Расчет элементов и оптимизация параметров сейсмоизолирующих фундаментов. М.: ВНИИТПИ, 1997. 76 с.
11. Черепинский Ю. Д., Жунусов Т. Ж., Горвиц И. Г. Активная защита зданий и сооружений. Алма-Ата: Каз. НИИТИ, 1985. 34с.
12. Беляев В. С., Гуськов В. Д., Долбенков В. Г., Рутман Ю. Л. Устройства для сейсмоизоляции зданий, промышленных объектов и их оборудования // Вестник ИНЖЭКОНА. 2007. № 6(19). С. 114-121.
13. Гуськов В. Д., Рутман Ю. Л., Ходасевич К. Б. Новые виды маятниковых и опорных систем сейсмоизоляции зданий, промышленных объектов и их оборудования // Вестник ИНЖЭКОНА. 2008. № 8 (27). С. 61-63.
14. Рутман Ю. Л. Обобщение метода главных координат // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения. Труды пятой международной конференции. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. С. 457-465.
15. Рутман Ю. Л., Солнцева Я. С. Определение усилий пластического срабатывания стержневых пластических демпферов // Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов. Труды Двадцать третьей международной конференции. СПб.: НИЦ МОРИНТЕХ, 2009. С. 388-393.
16. Ковалева Н. В., Скворцов В. Р., Рутман Ю. Л. Определение параметров силовой диаграммы пластически деформируемых элементов конструкции // Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов. Труды Двадцать второй международной конференции. СПб.: НИЦ МОРИНТЕХ, 2007. С. 220-225.
17. Чылбак А. А. Расчет и рациональное проектирование сейсмозащиты для существующих и вновь строящихся зданий. Диссертация на соискание учений степени кандидата технических наук. СПб.: СПбГАСУ, 2009.
18. Смирнов В. И. Испытания зданий с системами сейсмоизоляции динамическими нагрузками и реальными землетрясениями // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2009. №4. С. 23-28.

**Юрий Лазаревич Рутман, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)954-84-79; эл. почта: rutman@mail.line1.ru*

doi: 10.5862/MCE.27.4

Pendulum seismic isolation bearings. Design, analysis, experiment

Yu.L. Rutman

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russia
+7(921)954-84-79; e-mail: rutman@mail.line1.ru

Key words

Seismic isolation; seismic isolation bearing; seismic devices; damping; seismic tests; dynamic analysis

Abstract

In the present research a pendular type of seismoisolation system for protection construction from earthquake is considered. Seismic isolation is carried out on the basis of the following principles:

- the natural frequency of the "protected object - seismic isolation" should be significantly lower than the main energy contained frequency (which leads to high frequencies filtering);
- damping in seismic isolation systems should be high enough to avoid resonance effects;
- in seismic isolation systems can be applied elements that limit the level of force that is passed to the protected object (a plastically deformable or friction elements).

A design of devices (component of seismoisolation systems) is shown in the article. The methods of seismoisolation systems analysis are described and the results are presented. The main results of dynamic tests of those devices are shown.

References

1. Kelly J. M. *Earthquake resistant design with rubber*. London: Springer-Verl., 1997. 243 p.
2. Skinner R. I. *An introduction to seismic isolation*. New Zeland: John Wiley & Sons, 1993. 353 p.
3. Skinner R. I., Robinson W. H., McVerry G. H. *An introduction to seismic isolation*. New York: Wiley, 2003. 398 p.
4. Martelli A., Forny M. Seismic isolation: present application and perspectives. *International Workshop On Base Isolated High-rise Buildings*. Yerevan, Armenia: 2006. Pp.1-26.
5. Masahiko Higashino, Shin Okamoto. *Response Control and Seismic Isolation of Buildings*. New York: Taylor & Francis, 2006. 484 p.
6. Chopra A. K. *Dynamic of structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice-Hall, 2006. 794 p.
7. Savinov O. A. *Izbrannyye stati i doklady "Dinamicheskiye problemy stroitelnoy mekhaniki"* [Dynamic problems in structural mechanics. Selected articles and reports]. Saint-Petersburg: 1993. Pp. 155-178. (rus)
8. Ayzenberg Ya. M. *Seysmostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy* [Earthquake engineering. Security of constructions]. Volume 1. 2004. Pp. 28-32. (rus)
9. Polyakov S. V., Kilimnik L. Sh., Soldatova L. A. *Opyt vozvedeniya zdaniy s seysmoizoliruyushchim skolzyashchim poyasom v fundamente* [Experience in the construction of buildings with seismic isolation sliding zone in the basement]. Moscow: Stroyizdat, 1984. 31 p. (rus)
10. Uzdin A. M., Dolgaya A. A. *Raschet elementov i optimizatsiya parametrov seysmoizoliruyushchikh fundamentov* [Calculation of the elements and optimization of seismic isolation foundation parameters]. Moscow: VNIINTPI, 1997. 76 p. (rus)
11. Cherepinskiy Yu. D., Zhunusov T. Zh., Gorvits I. G. *Aktivnaya zashchita zdaniy i sooruzheniy* [Active protection of buildings and structures]. Alma-Ata: Kaz. NIINTI, 1985. 34 p. (rus)
12. Belyayev V. S., Guskov V. D., Dolbenkov V. G., Rutman Yu. L. *Vestnik INZhEKONA* [Bulletin of INZhEKON]. 2007. No. 6(19). Pp. 114-121. (rus)
13. Guskov V. D., Rutman Yu. L., Khodasevich K. B. *Vestnik INZhEKONA* [Bulletin of INZhEKON]. 2008. No. 8 (27). Pp. 61-63. (rus)

14. Rutman Yu. L. *Sbornik "Trudy pyatoy mezhdunarodnoy konferentsii"*. Nauchno-tekhnicheskiye problemy prognozirovaniya nadezhnosti i dolgovechnosti konstruksiy i metody ikh resheniya [Proceedings of fifth international conference. Scientific and technical problems of forecasting the reliability and durability of structures and methods for their solution]. Saint-Petersburg: SPbGPU, 2003. Pp. 457-465. (rus)
15. Rutman Yu. L., Solntseva Ya. S. *Sbornik "Trudy Dvadtsat tretyey mezhdunarodnoy konferentsii"*. Matematicheskoye modelirovaniye v mekhanike sploshnykh sred. Metody granichnykh i konechnykh elementov [Proceedings of twenty third international conference. Mathematical modeling in continuum mechanics. Methods of boundary and finite elements]. Saint-Petersburg: NITs MORINTEKh, 2009. Pp. 388-393. (rus)
16. Kovaleva N. V., Skvortsov V. R., Rutman Yu. L. *Sbornik "Trudy Dvadtsat vtoroy mezhdunarodnoy konferentsii"*. Matematicheskoye modelirovaniye v mekhanike sploshnykh sred. Metody granichnykh i konechnykh elementov [Proceedings of twenty second international conference. Mathematical modeling in continuum mechanics. Methods of boundary and finite elements]. Saint-Petersburg: NITs MORINTEKh, 2007. Pp. 220-225. (rus)
17. Chylbak A. A. *Raschet i ratsionalnoye proyektirovaniye seysmozashchity dlya sushchestvuyushchikh i vnov stroyashchikhsya zdaniy*. Dissertatsiya na soiskaniye ucheniy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Calculation of seismic design for existing and newly constructed buildings. Thesis for the degree of candidate of technical sciences]. Saint-Petersburg: SPbGASU, 2009. (rus)
18. Smirnov V. I. *Seysmostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy* [Earthquake engineering. Security constructions]. 2009. No. 4. Pp. 23-28. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 31-36