

## Скользящий пояс с фторопластом сейсмостойкого здания

Профессор В. Д. Кузнецов;  
магистрант Чэнь Сятин\*;

ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Геологическая служба США (USGS) подсчитала, что с 1900 г. каждый год на земле происходит примерно 18 землетрясений магнитудой от 7 до 7,9 баллов и более чем 1 землетрясение магнитудой 8 баллов [1]. В 2011 г. Циркум-Тихоокеанский сейсмический пояс вступил в период сейсмической активности, и всего за четыре месяца возникло несколько крупных землетрясений [2] (табл. 1).

Таблица 1

№	Дата	Страна	Масштаб	Глубина очага
1	01.01.2011	Аргентина	7.0 баллов	576.8 км
2	02.01.2011	Чили	7.1 баллов	25.1 км
3	13.01.2011	Вануату острова	7.0 баллов	9 км
4	18.01.2011	Пакистан	7.2 баллов	68 км
5	22.02.2011	Новая Зеландия	6.5 баллов	4 км
6	09.03.2011	Япония	7.2 баллов	32 км
7	11.03.2011	Япония	9.0 баллов	24.4 км
8	24.03.2011	Мьянма	7.2 баллов	20 км
9	11.04.2011	Япония	7.1 баллов	10 км

Разрушение и обрушение зданий – одно из главных последствий землетрясения. Анализ предыдущих разрушительных землетрясений и их расследование на местах показало, что большинству зданий нанесен ущерб, что привело к разрушению несущих элементов. Поэтому здание теряет свою устойчивость и прочность, разрушается, что приводит к человеческим жертвам и большим материальным потерям.

Практика показала, что антисейсмический метод проектирования, хотя и эффективен, несет с собой некоторые проблемы [3].

- «Жестко-стойкость» как основной способ повышения жесткости конструкции, с увеличением размера разреза конструктивного элемента и расхода арматуры. Но с увеличением материалоемкости и жесткости конструкций вес здания будет тоже увеличиваться, в связи с чем воздействие на конструкции здания от землетрясения также увеличивается, т.е. образуется порочный круг.
- Многие важные несущие элементы конструкции не могут работать как неупругие элементы.
- Когда общая конструкция здания работает в неупругом состоянии, то в результате возникают большие деформации и трещины, что приводит здание к непригодности для дальнейшего использования.
- Традиционные методы сейсмостойкости сооружения строятся на основе оценки уровня сейсмичности данной местности. Но в некоторых зонах определение уровня сейсмичности имеет низкую точность, что приводит к неопределенности.

Исходя из этого, для обеспечения сейсмостойкости зданий в некоторых новых теориях ищутся более рациональные, экономически выгодные конструкции, учитывающие вопросы безопасности. В последние годы в экспериментальном строительстве находит применение новый способ повышения сейсмостойкости зданий, названный активным способом сейсмозащиты [4,5] в отличие от традиционного (пассивного) способа, требующего дополнительных затрат на антисейсмические усиления сооружений. Активный способ сейсмозащиты предусматривает снижение сейсмических нагрузок на сооружения за счет регулирования их динамических характеристик во время колебательного процесса при землетрясении. Регулирование динамических параметров осуществляется таким образом, чтобы избежать резонансного увеличения амплитуд колебаний сооружения или, по крайней мере, понизить резонансные эффекты. Это достигается соответствующим выбором динамической жесткости и, соответственно, частот (периодов) собственных колебаний сооружения.

Изменение динамической жесткости или частот (периодов) собственных колебаний при землетрясении может быть достигнуто использованием специальных конструктивных устройств. К сейсмоизолирующим относят и так называемые резинометаллические опоры (РМО)[6] в виде резиновых столбов с металлическими прокладками и свинцовым сердечником в центре. Бесспорно, РМО, применяемые в Китае, Японии и

Кузнецов В.Д., Чэнь С. Скользящий пояс с фторопластом сейсмостойкого здания

некоторых других странах, имеет большие преимущества в качестве метода сейсмозащиты зданий. К сожалению, дефицитный материал и заводское изготовление делает их слишком дорогими для массового использования, особенно в местах, удалённых от заводов-изготовителей. Всё это ограничивает объёмы использования РМО. В этом смысле у скользящих поясов [7,8], изготавливаемых из традиционного железобетона на любом полигоне, есть свои преимущества. Система сейсмоизоляции (ССИ) со скользящим поясом в фундаменте – это создание поверхности скольжения с меньшим коэффициентом трения материалов между верхней частью здания и фундаментом. При землетрясении надстройки здания имеют возможность осуществлять горизонтальное движение по отношению к базе с дальнейшим возвратом здания в исходное положение. Основным условием эффективной работы такой системы является удаленность частот ее собственных колебаний от преобладающих частот сейсмического движения грунта основания сооружения [9].

В технологии скользящего пояса ключевым элементом является устройство скольжения, которое включает в себя компонент минимализации трения и компонент ограничения горизонтальных перемещений [3]. Для изоляционных элементов необходима не только вертикальная несущая способность для поддержки верхней структуры тяжести нагрузки, но и низкий коэффициент трения, обеспечивающий хороший эффект изоляции. Компонент минимализации трения состоит из верхней и нижней плиты и центральной поверхности скольжения. Для центральной поверхности скольжения обычно используется пленка PTFE (из фторопласта-4), эластичное покрытие графит, нержавеющая сталь, песок, тальк и т.д., в верхней и нижней плите можно использовать высокопрочный бетон или сталь. Устройство компонента ограничения горизонтальных перемещений не обеспечивает вертикальную нагрузку, а только стабилизирует конструкцию и ограничивает перемещения под горизонтальной нагрузкой. В качестве такого компонента могут использоваться резиновые прокладки, стальная пружина, U-образная сталь, гибкие стержни стали и т.д..

В зависимости от формы поверхностей скольжения сейсмоизолирующие устройства скользящего типа можно разделить на две группы [10]: невозвратные устройства и конструкции с гравитационной восстанавливающей силой. К первой группе относятся опорные устройства с горизонтальными площадками скольжения. Потенциальная энергия взаимного положения элементов конструкции в процессе их относительного перемещения остается постоянной, т. е. система всегда находится в положении устойчивого равновесия. Устройства второй группы, имеющие в общем случае негоризонтальные поверхности скольжения, обеспечивают возврат сместившегося в результате сейсмического толчка сооружения в начальное положение устойчивого равновесия за счет возникновения гравитационной восстанавливающей силы, постоянной по величине (наклонные поверхности) или позиционной, т.е. наклонные поверхности работают как компоненты ограничивающих перемещений.

Поставлена задача – разработать конструктивное решение механизма сейсмоизоляции и оценить эффективность его введения в конструкцию фундамента.

В качестве объекта для анализа работы скользящего пояса во время сейсмического колебания было взято здание бизнес-центра, моделирование которого производилось в комплексе Allplan (рис. 1).

Механизм сейсмоизоляции выполняется следующим образом (рис. 2). Фундаментная плита устраивается в форме по второй группе поверхностей скольжения с углом наклона  $\alpha=6^\circ$ . Стенки-ограничители смещения выполняются таким образом, чтобы образовался зазор (0.5м) между нижней плитой здания и стенками-ограничителями, что дает возможность зданию перемещаться во всех направлениях на величины, равные смещению основания.

Зазор заполняют песком, т.к. он работает как демпфер. На поверхности фундаментной плиты укладывается 2 слоя фторопластовой пленки ( $\delta=4-6\text{мм}$ ) [11]. На верхнем слое бетонируется нижняя железобетонная плита здания, а на ней возводится само здание. Во время землетрясения фундаментная плита с ограничителями смещения и нижним слоем фторопластовой пленки будет повторять колебания основания.



Рисунок 1. Модель в Allplan

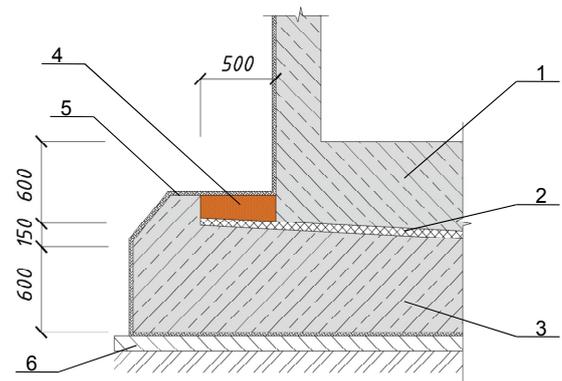


Рисунок 2. Схема сейсмоизолирующего скользящего пояса: 1 – нижняя часть здания в уровне фундамента; 2 – фторопластовые пластины; 3 – фундамент; 4 – песок крупный (демпфер); 5 – гидроизоляция; 6 – бетонная подготовка пола

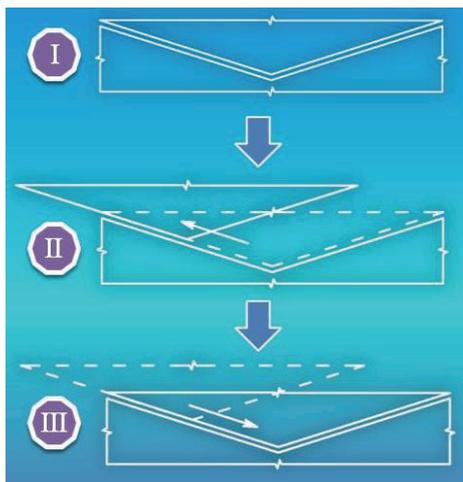


Рисунок 3. Схема принципа работы скользящего пояса

Верхний слой фторопластовой пленки взаимодействует с нижним. Вследствие малого коэффициента трения в контактах [12] фторопласт-фторопласт  $K_{тр}=0,1-0,2$ , а также вследствие силы инерции здания конструкция будет находиться в состоянии относительного покоя.

Принцип работы сейсмоизолирующей системы при воздействии сейсмической нагрузки разделяют на 3 состояния (рис. 3):

- состояние I – при малых землетрясениях покой трения препятствует скольжению верхнего строения, так что конструкция стабильна;
- состояние II – после превышения определенной пороговой величины сейсмической нагрузки сдвиг в горизонтальном направлении на изоляционный слой больше чем трение покоя, скользящая поверхность начинает скользить, чтобы играть роль сейсмоизоляции;
- состояние III – возврат верхней части здания в исходное положение.

Построим модель фундамента со скользящим поясом в ПК SCAD (рис. 4.). Моделируем скольжение фторопласта упругой связью в виде 55 элемента длиной 5 мм с жесткостными характеристиками [13] (рис. 5.): первая группа  $X = 100 \text{ Т/м}$ ,  $Y = 100 \text{ Т/м}$ ,  $Z = 1000 \text{ Т/м}$ ,  $UX = 100 \text{ Т}\cdot\text{м}^2$ ,  $UY = 100 \text{ Т}\cdot\text{м}^2$ ,  $UZ = 100 \text{ Т}\cdot\text{м}^2$ ; вторая группа  $X = 1000 \text{ Т/м}$ ,  $Y = 1000 \text{ Т/м}$ ,  $Z = 100 \text{ Т/м}$ ,  $UX = 100 \text{ Т}\cdot\text{м}^2$ ,  $UY = 100 \text{ Т}\cdot\text{м}^2$ ,  $UZ = 100 \text{ Т}\cdot\text{м}^2$ .

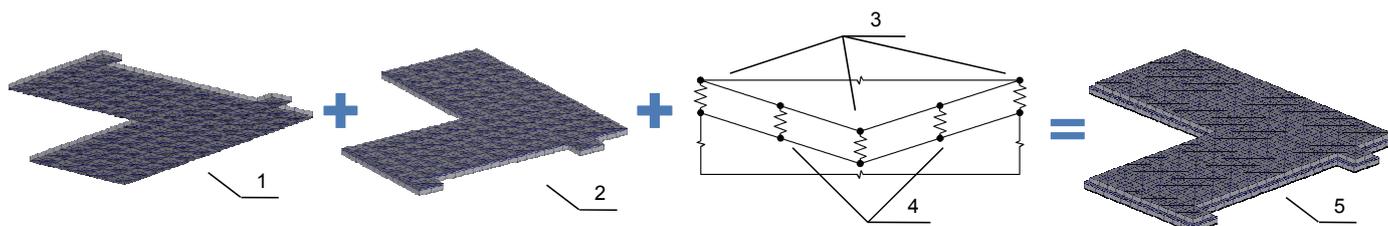


Рисунок 4. Схема моделирования фундамента со скользящим поясом: 1 – модель нижней плиты здания с элементом 3х3м; 2 – модель фундаментной плиты с элементом 3х3м с уширением на 0,5 м относительно нижней плиты здания; 3 – первая группа характеристики жесткости с упругой связью в виде 55; 4 – вторая группа характеристики жесткости с упругой связью в виде 55; 5 – модель скользящего пояса

На основании выбранной конструктивной схемы механизма сейсмоизоляции были созданы две конечноэлементные модели здания бизнес-центра в ПК SCAD: одна, включающая в себе механизм сейсмоизоляции по рис. 4., и другая аналогичная без него (рис. 5.). Граничные условия получены из спутелита Кросс ПК SCAD по грунтовым условиям г. Улан-Удэ.

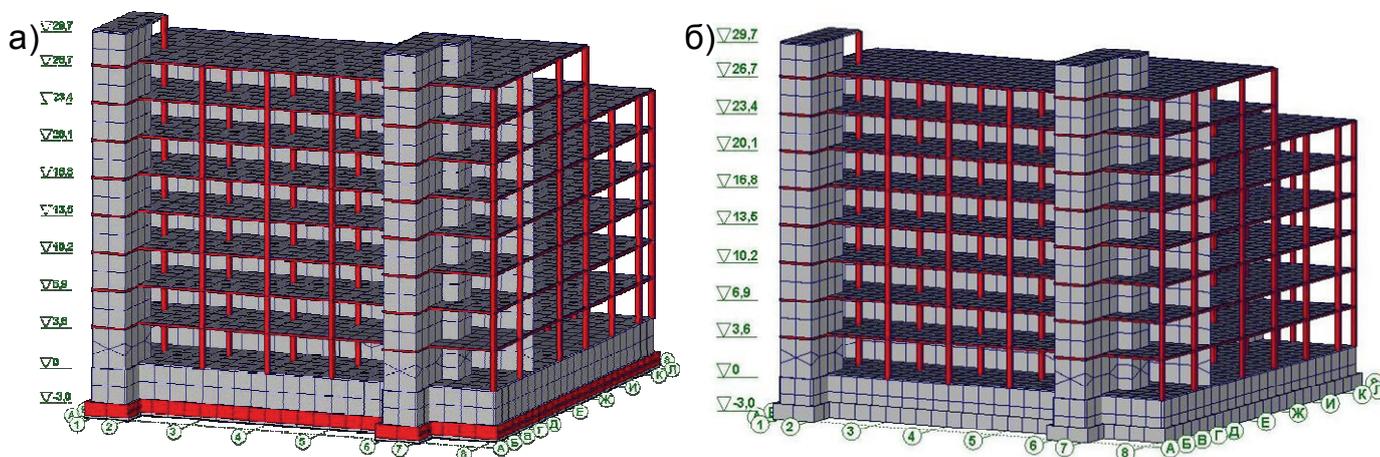


Рисунок 5. Расчетные модели: а) сейсмоизолированное здание; б) несейсмоизолированное здание

Анализ диссипативных свойств системы со скользящим поясом возможен при проведении сравнения периодов колебаний и частот с несейсмоизолированным зданием, поэтому следует рассмотреть зависимости периодов от полученных 15 форм колебаний (рис. 6).

При исследовании поведения сейсмоизоляционных систем во время динамического воздействия важно обращать внимание на изменение частот собственных колебаний. Известно, что сейсмоизоляционные свойства проявляются при уменьшении жесткости здания, то есть увеличивается период колебаний, снижается частота, и тем самым снижаются сейсмические нагрузки.

Анализ результатов показал, что увеличение периодов резонансных колебаний системы линейно связано с ростом поступательных перемещений в уровне скользящих устройств.

При отсутствии проскальзывания в сейсмоизолирующих опорах затухание в конструкции, определенное по форме резонансных кривых и относительному параметру колебаний (отношение ускорения сооружения к ускорению воздействия), при изменении возмущающей нагрузки остается величиной постоянной. Включение в работу элементов сухого трения, каковыми являются скользящие поясы, приводит к увеличению затухания в системе пропорционально изменению возмущающей нагрузки. Рост диссипации энергии в скользящих элементах обеспечивает стабилизацию реакции сооружения на вполне определенном уровне.

Перемещения конструкции (как правило, колебания системы с несколькими степенями свободы) моделируются эквивалентным колебанием системы с одной степенью свободы (рис. 7а), которая характеризуется эквивалентной массой ( $m_e$ ), сосредоточенной на эквивалентной высоте ( $h_e$ ). Для небольших зданий с изоляционной системой основной период в несколько раз больше, чем у конструкции с фиксированной базой. Следовательно, жесткости в уровне фундамента  $K_{\text{сси}}$  в несколько раз меньше, чем жесткости надстройки  $K_{\text{в.з.}}$  [14].

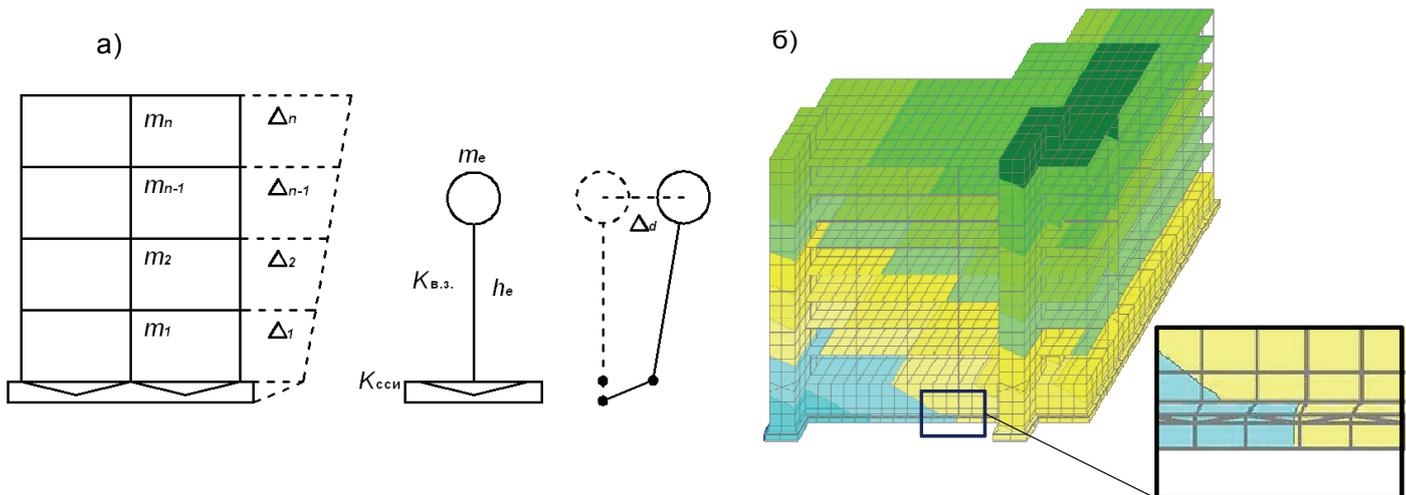


Рисунок 7. Схема перемещения конструкции с сейсмоизоляцией

Таким образом, разработано конструктивное решение, обеспечивающее возможность перемещения здания (рис. 7б) на величину смещения основания во время землетрясения, при сохранении пространственной жесткости сейсмоизолированной конструкции.

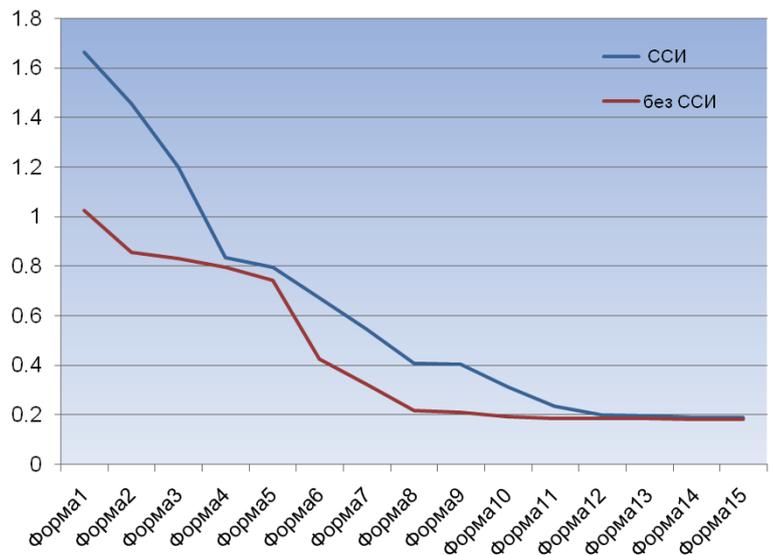


Рисунок 6. Период колебания  $T$  [с] всей конструкции здания с сейсмоизоляцией и без изоляции

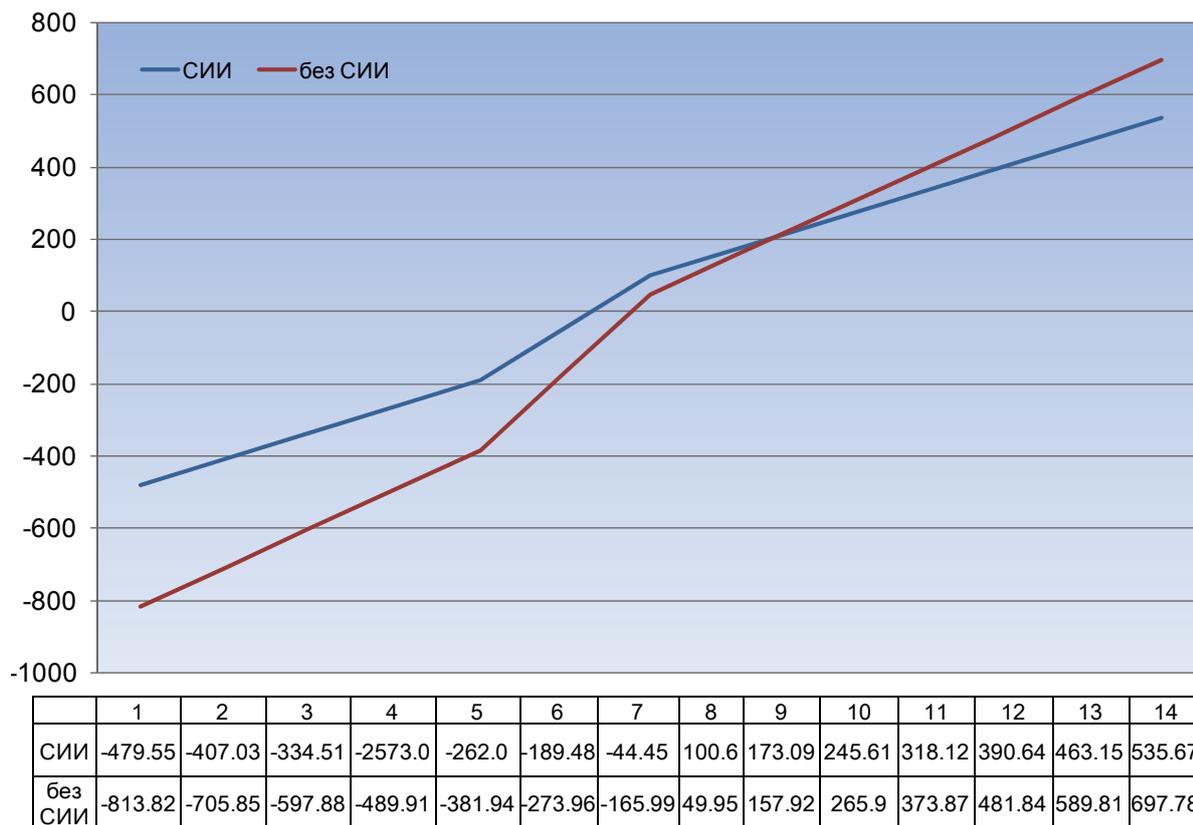
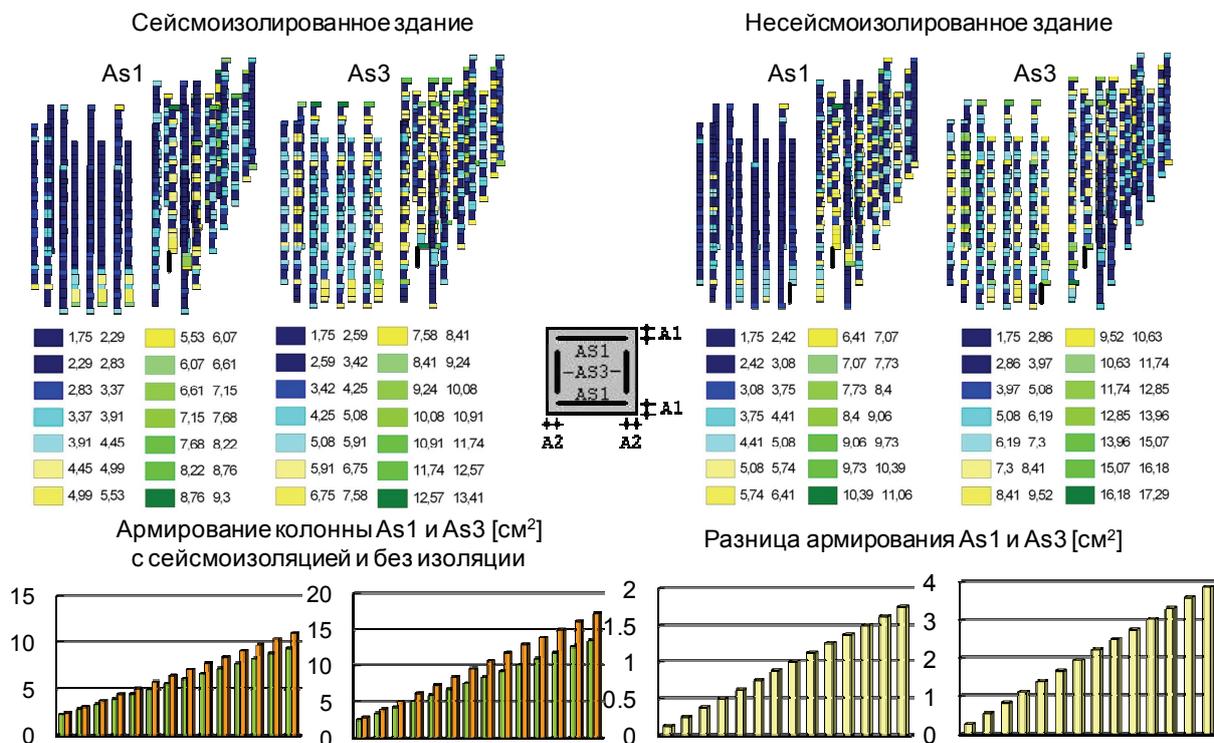


Рисунок 8. Распределение напряжений [Т/м<sup>2</sup>] в конструкциях здания с сейсмоизоляцией и без изоляции

Сравнение результатов расчета сейсмоизолированного здания и здания без СИИ подтверждает эффективность сейсмоизоляции здания, т.к. при установке под фундаментом здания СИИ нормальные напряжения в вертикальных элементах конструкции снижаются на 30% (рис. 8).



Армирование колонны As [см<sup>2</sup>]: а) сейсмоизолированное здание; б) несейсмоизолированное здание

По результатам приведенного в статье исследования можно отметить следующее. Введение в конструкцию фундамента механизма сейсмоизоляции позволяет снижать частоты колебания и напряжения в конструкции и, как следствие, уменьшает вероятность обрушения конструкции, что обеспечивает сохранность человеческих жизней и ценного оборудования, а также сокращает расход арматуры (рис. 9), что делает конструкцию здания более экономичной.

### Литература

1. Magnitude 8 and Greater Earthquakes Since 1900. USGS. URL: [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/year/mag8/magnitude8\\_1900\\_date.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/year/mag8/magnitude8_1900_date.php).
2. Earthquake quick report. CENC. URL: [http://www.csndmc.ac.cn/newweb/recent\\_eq.htm](http://www.csndmc.ac.cn/newweb/recent_eq.htm).
3. Чэнь Уао. Изучение проблемы сейсмоизоляции зданий и сооружений. SILICON VALLEY 2010, (8). P. 26-28.
4. Уздин А. М. и др. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. СПб: Изд-во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1993. 176 с.
5. Поляков С. В. Последствия сильных землетрясений. М. : Стройиздат, 1978. 311 с.
6. Ормонбеков Т. О. и др. Применение тонкослойных резинометаллических опор для сейсмозащиты зданий. Бишкек : Чукур, 2005. 215 с.
7. Поляков С. В., Килимник Л.Ш., Солдатова Л.А. Опыт возведения зданий с сейсмоизолирующим скользящим поясом в фундаменте. М. : Стройиздат, 1984. 32 с.
8. Солдатова Л. Л. Исследование работы двухмассовой модели здания с сейсмоизоляционным скользящим поясом. В кн.: Сейсмостойкое строительство. Серия XIV, вып. 5, 1979.
9. Чылбак А. А. Оценка сейсмической опасности Республики Тыва // Научные труды Тывинского государственного университета. Вып. V Том. I. Кызыл : Изд-во ТывГУ, 2008. С. 31-33.
10. Жунусов Т. Ж. Основы сейсмостойкости сооружений. Алма-Ата : Рауан, 1990. 270 с.
11. Айзенберг Я. М. Адаптивные системы сейсмической защиты сооружений. М. : Наука, 1978. 246 с.
12. ГОСТ 10007-80 ФТОРОПЛАСТ-4. Технические условия. Изд-во стандартов. М. государственный стандарт СССР.
13. Лядский В. А. Сейсмоизоляция общественных зданий с элементами фторопласта в конструкции фундамента. Диис. маги. техники и технологии строительства. СПб, 2009.
14. Gabriele Attanasi. Feasibility assessment of innovative isolation bearing system with shape memory alloys. Dissertation submitted in partial fulfilment of the requirements for the master degree in earthquake engineering. Istituto Univeritario di Studi Superiori Universita degli Studi di Pavia. 2008.

*\* Сятин Чэнь, Санкт-Петербург, Россия*

*Тел. моб.: +7(911)717-93-45; эл. почта: chen\_xiating@mail.ru*

# Sliding girt with fluoroplastic for earthquake-proof building

V. D. Kuznetsov, S. Chen,

Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia  
+7(911)717-93-45; e-mail: chen\_xiating@mail.ru

## Key words

seismic insulation; active method of seismic protection; sliding girt; fluoroplastic; calculation model of seismic insulation

## Abstract

Destruction of buildings is one of the principal consequences of earthquakes. Traditional antiseismic design methods based on the structure reinforcing are not always effective.

The aim of the work was creating the structure solution of active seismic insulation and evaluation the effectiveness of its use in a foundation. The active method of earthquake proof stipulates decrease seismic loads on erections due to the regulation their dynamic characteristics in time of oscillation process under earthquake.

Simulation methods of sliding girt made from fluoroplastic and building relocations under earthquake were elaborated in system SCAD.

The research showed that this method decreases the probability of building crush and reduce the amount of armature.

## References

1. Magnitude 8 and Greater Earthquakes Since 1900. USGS. URL: [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/year/mag8/magnitude8\\_1900\\_date.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/year/mag8/magnitude8_1900_date.php).
2. Earthquake quick report. CENC. URL: [http://www.csndmc.ac.cn/newweb/recent\\_eq.htm](http://www.csndmc.ac.cn/newweb/recent_eq.htm).
3. CHen Uao. *SILICON VALLEY*. 2010, (8). P. 26-28.
4. Uzdin A. M. i dr. *Osnovy teorii seysmostoykosti i seysmostoykogo stroitelstva zdaniy i sooruzheniy* [Fundamental theory of seismic stability and antiseismic construction of buildings and erections]. SPb: Izd-vo VNIIG im. B. E. Vedeneeva, 1993. 176 p. (rus)
5. Polyakov S. V. *Posledstviya silnykh zemletryaseniy* [Consequences of large earthquakes]. Moscow : Stroyizdat, 1978. 311 p. (rus)
6. Ormonbekov T. O. and others. *Primenenie tonkosloynnykh rezinometallicheskih opor dlya seysmozashchity zdaniy* [Use of thin-layer metal-rubber mountings for seismic protection of buildings]. Bishkek : CHukun, 2005. 215 p. (rus)
7. Polyakov S. V., Kilimnik L.SH., Soldatova JI.A. *Opyt vozvedeniya zdaniy s seysmoizoliruyushchim skolzyashchim poyasom v fundamente* [Experience in the erection of buildings with foundation including seismic insulating sliding girt]. Moscow : Stroyizdat, 1984. 32 p. (rus)
8. Soldatova L. L. *Seysmostoykoe stroitelstvo*. Vol. XIV, No. 5, 1979. (rus)
9. CHylbak A. A. *Nauchnye trudy Tyvinskogo gosudarstvennogo universiteta*. No. V, Vol. I. Kyzyl : Izd-vo TyvGU, 2008. p. 31-33. (rus)
10. ZHunusov T. ZH. *Osnovy seysmostoikosti sooruzheniy* [Fundamental theory of seismic stability of erections]. Alma-Ata : Rauan, 1990. 270 p. (rus)
11. Ayzenberg YA. M. *Adaptivnye sistemy seysmicheskoy zashchity sooruzheniy* [Adaptive systems for seismic protection of erections]. Moscow : Nauka, 1978. 246 p. (rus)
12. *GOST 10007-80 FTOROPLAST-4. Tekhnicheskie usloviya* [Technical requirements]. M. : Izd-vo standartov. (rus)
13. Lyadskiy V. A. *Seysmoizolyatsiya obshchestvennykh zdaniy s elementami ftoroplasta v konstruktsii fundamenta* [Seismic insulation for public buildings with using fluoroplastic elements in the foundation construction]. Theses. Spb, 2009. (rus)
14. Gabriele Attanasi. *Feasibility assessment of innovative isolation bearing system with shape memory alloys*. Dissertation submitted in partial fulfilment of the requirements for the master degree in earthquake engineering. Istituto Univeritario di Studi Superiori Universita degli Studi di Pavia. 2008.

Full text of this article in Russian: pp. 53-58