

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 699.841

*Абакаров А.Д., Омаров Х.М.*

### **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ С РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ОПОРАМИ КОМБИНИРОВАНИЕМ С ЭЛЕМЕНТАМИ СУХОГО ТРЕНИЯ**

*Abakarov A.D., Omarov Kh.M.*

### **IMPROVE THE EFFICIENCY OF SEISMIC WITH RUBBER MOUNTS ELEMENTS COMBINED WITH DRY FRICTION**

*Поставлена задача повышения эффективности систем сейсмоизоляции гибких зданий с резинометаллическими сейсмоизолирующими опорами (РМСО). С целью снижения максимальных перемещений РМСО, установленных в подвальном этаже каркасных зданий, в систему сейсмоизоляции введены элементы сухого трения. Интегрировав исходную систему дифференциальных уравнений движения рассматриваемых систем, определены параметры их сейсмической реакции в виде горизонтальных сдвигающих сейсмических сил, максимальных перемещений масс и максимальных перемещений РМСО в широком диапазоне преобладающего периода сейсмических колебаний грунтов. Путем сравнения графиков и таблиц величин сейсмической реакции показано преимущество комбинирования системы сейсмоизоляции с резинометаллическими опорами с элементами сухого трения.*

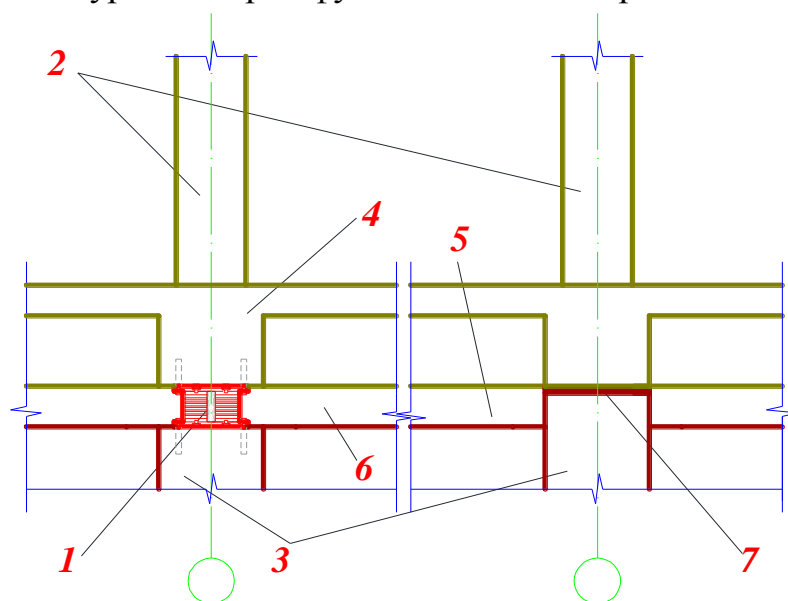
**Ключевые слова:** *сейсмические воздействия, каркасные здания, системы сейсмоизоляции, резинометаллические сейсмоизолирующие опоры, элементы сухого трения, горизонтальные сдвигающие сейсмические силы, максимальные перемещения масс, максимальные перемещения резинометаллических сейсмоизолирующих опор.*

*The goal is to increase effectiveness of seismic isolation of buildings with flexible rubber-seismic isolation bearings (RSIB). In order to reduce the maximum displacement RSIB installed in the basement of frame buildings in seismic isolation system introduced elements of dry friction. By integrating the original system of differential equations of motion of the systems under consideration, the parameters of the seismic response of horizontal seismic shear forces, the maximum movement of the masses and maximum displacements RMSO in a wide range of seismic predominant period of the ground motion. By comparing the graphs and tables show the values of seismic response of seismic isolation system combining an advantage with rubber mounts with the elements of dry friction.*

**Key words:** seismic effects, frame buildings, seismic isolation systems, seismic isolation rubber bearings, dry friction elements, horizontal seismic shear force, the maximum movement of the masses, the maximum displacement of rubber seismic isolation bearings.

**Введение.** Система сейсмоизоляции с резинометаллическими опорами обладает высокой эффективностью в зданиях жесткой конструктивной схемы при высокочастотных сейсмических воздействиях [1]. В случае малоэтажных рамных и рамно-связевых систем, подвергнутых длиннопериодным сейсмическим воздействиям, их эффективность резко снижается. Прежде всего из-за того, что перемещения верха самих резинометаллических опор превышают предельно допустимое, установленное заводом-изготовителем. Кроме этого, резинометаллические опоры, будучи гибкими и работающими по линейной зависимости «сила-перемещение», обладают низкой энергопоглощаемостью. С целью повышения энергопогложительных свойств они разработаны со свинцовым сердечником [2], что значительно повышает их стоимость. В настоящей статье предлагается альтернативный вариант увеличения энергопоглощения системы сейсмоизоляции с резинометаллическими опорами с включением в их работу элементов сухого трения.

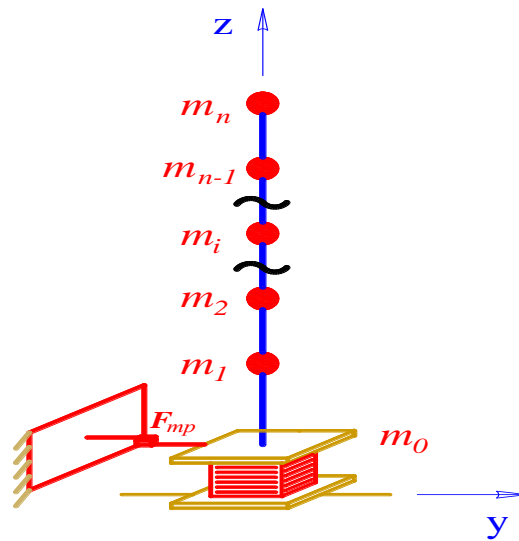
На рисунке 1 показана схема комбинированной системы сейсмоизоляции, установленной в уровне верха фундаментных опор в подвале здания.



**Рисунок 1** - Схема комбинированной системы сейсмоизоляции:

1 – сейсмоизолирующая резинометаллическая опора; 2 – колонны надфундаментной части здания; 3 – фундаментные опоры здания; 4 – надфундаментный ж/б пояс; 5 – диафрагма жесткости между опорами; 6 – зазор между фундаментной и надфундаментной частями зданий; 7 – элементы сухого трения

Расчетная динамическая модель комбинированной системы сейсмоизоляции показана на рисунке 2.



**Рисунок 2** - Расчетная динамическая модель здания с комбинированной системой сейсмоизоляции

Система дифференциальных уравнений движения указанной динамической модели подвергнутой сейсмическому воздействию записывается в виде

$$\begin{aligned} m_0 \ddot{y}_0 + c_0 \dot{y}_0 + c_1 (\dot{y}_0 - \dot{y}_1) + k_0 y_0 + F_{тр} \text{sign} \dot{y}_0 + k_1 (y_0 - y_1) &= -m_0 \ddot{y}_{гр} \\ m_1 \ddot{y}_1 + c_1 (\dot{y}_1 - \dot{y}_0) + c_2 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + k_1 (y_1 - y_0) + k_2 (y_1 - y_2) &= \\ -m_1 (\ddot{y}_{гр} + \ddot{y}_0) & \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_i \ddot{y}_i + c_i (\dot{y}_i - \dot{y}_{i-1}) + c_{i+1} (\dot{y}_i - \dot{y}_{i+1}) + k_i (y_i - y_{i-1}) + k_{i+1} (y_i - y_{i+1}) \\ = -m_i (\ddot{y}_{гр} + \ddot{y}_0) \end{aligned}$$

$$m_n \ddot{y}_n + c_n (\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1}) + k_n (y_n - y_{n-1}) = -m_n (\ddot{y}_{гр} + \ddot{y}_0)$$

Здесь:  $m_0$  – масса сосредоточенная в уровне верха резинометаллических опор;  $k_0$  – жесткость резинометаллических опор на сдвиг;  $y_0$  – перемещение верха резинометаллических опор;  $m_i$   $c_i$   $k_i$   $y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) – масса, коэффициент затухания, жесткость и перемещение  $i$ -го этажа здания;  $\ddot{y}_{гр}$  – входное воздействие.

Сила трения:

$$F_{тр} = f_{тр} \nu \sum_{i=1}^n m_i g, \quad (2)$$

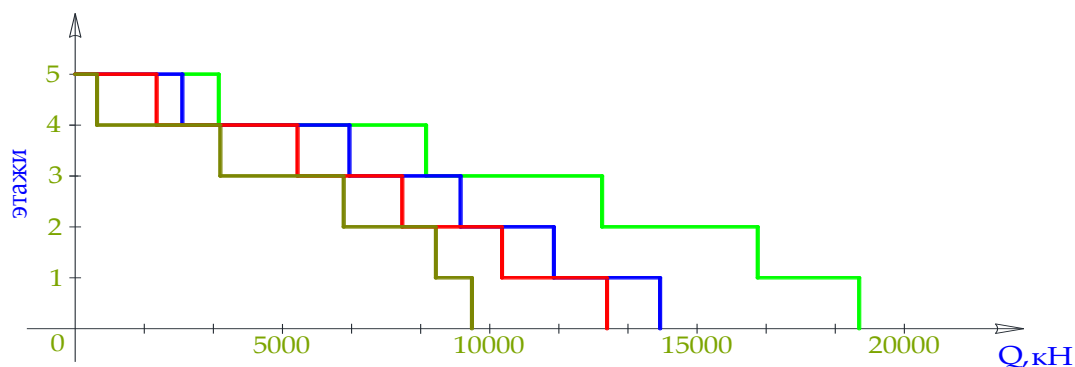
где  $f_{тр}$  – коэффициент трения,  $\nu$  – коэффициент выражающий часть веса здания, передаваемой на опоры с сухим трением.

Единичная функция:

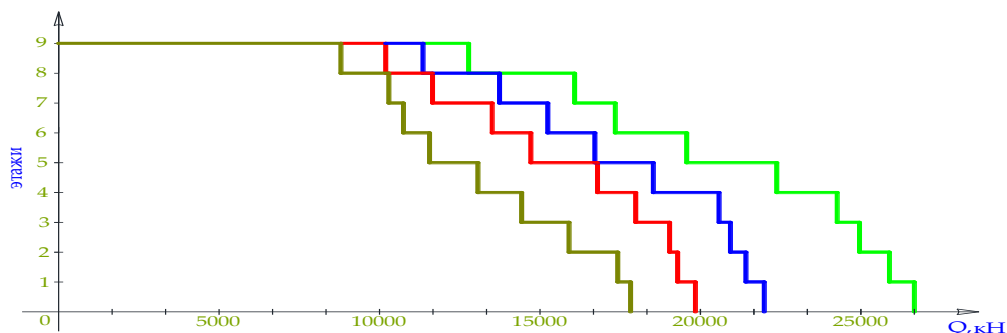
$$\text{sign} \dot{y}_0 = \begin{cases} -1, & \text{когда } \dot{y} > 0 \\ 1, & \text{когда } \dot{y} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

В качестве элементов сухого трения были выбраны следующие комбинации стали и бетона: сталь по смазанной стали - ( $f_{тр} = 0,2$ ), сталь по стали насухо ( $f_{тр} = 0,25$ ), сталь по неопалубленной поверхности бетона ( $f_{тр} = 0,4$ ). Система (1) интегрирована на ЭВМ методом Рунге-Кутта IV порядка, представив сейсмическое воздействие в виде нестационарного случайного процесса, моделирующего землетрясение. На рисунке 3 показаны эпюры горизонтальных сейсмических сдвигающих сил  $Q_i = \sum_{i=1}^n |m_i \ddot{y}_i|_{max}$  в 5-ти, 9-ти и 12-этажных каркасных зданиях в момент времени, соответствующем максимуму сдвигающих сил в уровне нижнего этажа  $Q_0$ .

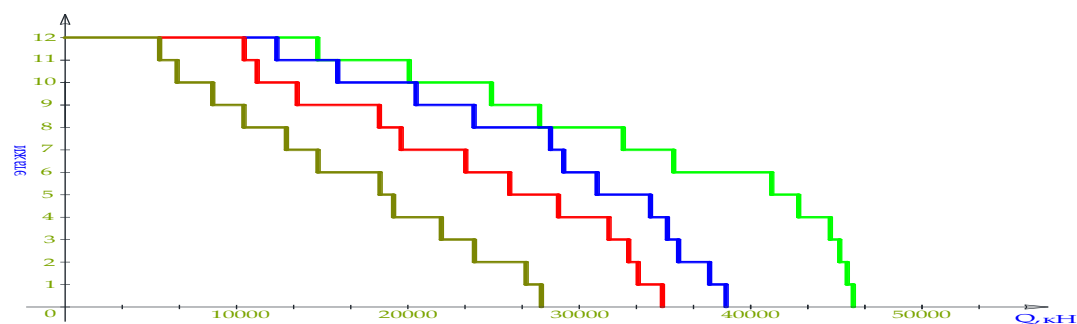
а)



б)



в)



- Здание без сейсмоизоляции
- Здание с комбинированной сейсмоизоляцией ( $f_{тр}=0,2$ )
- Здание с комбинированной сейсмоизоляцией ( $f_{тр}=0,25$ )
- Здание с комбинированной сейсмоизоляцией ( $f_{тр}=0,4$ )

**Рисунок 3** - Графики распределения по этажам каркасных зданий горизонтальных сдвигающих сил в момент времени, соответствующему максимуму  $Q_0$ : а – для 5-этажного здания; б – для 9-этажного здания; в – для 12-этажного здания

Графики построены как для зданий с комбинированной системой сейсмоизоляции, так и для зданий без систем сейсмоизоляции при сейсмическом воздействии, соответствующему девятибалльному землетрясению.

Из рисунка 3 следует, что увеличение коэффициента трения между скользящими поверхностями от 0,2 до 0,4 в каркасных зданиях приводит к увеличению сейсмических сил в 1,46 раз. А при сравнении со зданием без сейсмоизоляции снижение сейсмических сил наблюдается в пределах от 1,37 до 1,96 раз.

В таблице 1 приведены максимальные значения перемещений масс рассматриваемых зданий в диапазоне изменения преобладающего периода сейсмического воздействия  $T_0$  от 0,1 с до 1,0 с.

**Таблица 1** - Значения максимальных перемещений масс в диапазоне изменения преобладающего периода сейсмического воздействия  $T_0$  от 0,1 с до 1,0 с в см.

Этажность здания	Конструктивная схема здания	Элементы сухого трения с коэффициентом трения	Сейсмоизоляция в виде резинометаллических опор и элементов сухого трения			Без сейсмоизоляции
			Типы опор			
			гибкие	полужесткие	жесткие	
			Максимальные перемещения			
5	каркасная	0,2	2,3	2,2	1,9	38
		0,25	1,8	1,6	1,6	
		0,4	1,75	1,56	1,53	
9	каркасная	0,2	4,1	5,6	5,9	45
		0,25	6	6,3	6,4	
		0,4	8	6	5	
	каркасная с ядрами жесткости	0,2	0,4	0,34	0,32	4
		0,25	1,1	0,9	0,92	
		0,4	0,95	0,9	0,85	
12	каркасная	0,2	8,7	9,3	9,1	73
		0,25	10,3	10,8	10,3	
		0,4	11,6	11,3	10,9	
	каркасная с ядрами жесткости	0,2	0,5	0,47	0,4	5,5
		0,25	1,1	1,2	1,1	
		0,4	1,5	1,56	1,61	

При этом рассмотрены гибкие, полужесткие и жесткие РМСО.

К гибким относятся опоры, эффективная жесткость которых находится в пределах от 0,54 до 7,61 кН/мм.

К полужестким - от 8,48 до 14,4 кН/мм.

К жестким - от 15,71 до 19,79 кН/мм.

Из таблицы 1 следует, что максимальные перемещения масс в зданиях с комбинированной системой сейсмоизоляции на порядок меньше, чем в этих же зданиях без сейсмоизоляции.

Резинометаллические опоры, выпускаемые промышленным способом, имеют разные габаритные размеры, например, с длиной сторон в плане от

0,35 м до 1,25 м и высотой от 0,158 м до 0,376 м. При этом ограничивается предельно допустимое горизонтальное перемещение верха опор.

Например, максимально допустимое перемещение резинометаллической опоры **SI-H 300/100** составляет 40 см.

Габариты этих опор выбираются в зависимости от величины вертикальной нагрузки, передаваемой на одну опору. При этом максимальное перемещение верха опоры при сейсмическом воздействии не должно быть больше предельно допустимого.

В таблице 2 приведены максимальные значения перемещений верха РМСО при комбинированной системе сейсмоизоляции.

**Таблица 2** - Значения максимальных перемещений РМСО в диапазоне изменения преобладающего периода сейсмического воздействия  $T_0$  от 0,1 с до 1,0 с в см.

Этажность здания	Конструктивная схема здания	Элементы сухого трения с коэффициентом трения	Сейсмоизоляция в виде резинометаллических опор и элементов сухого трения		
			Типы опор		
			гибкие	полужесткие	жесткие
			Максимальные перемещения		
5	каркасная	0,2	31,8	30,2	28,3
		0,25	30,3	29,7	29,3
		0,4	34,3	32,3	31,3
9	каркасная	0,2	38,4	30,1	26,5
		0,25	32,2	27,3	24,4
		0,4	22,3	20,4	18,3
	каркасная с ядрами жесткости	0,2	18,2	17,3	17,2
		0,25	16,3	16,1	16,1
		0,4	12,1	12,2	12
12	каркасная	0,2	28,1	27,3	26,5
		0,25	26,4	25,3	25,1
		0,4	22,3	22,6	22,8
	каркасная с ядрами жесткости	0,2	18,1	17,5	17,2
		0,25	16,3	16,1	15,7
		0,4	12,2	12,3	12

Данные перемещения меньше предельно допустимого для РМСО таких зданий (40 см). Наибольшее влияние на снижение максимальных перемещений РМСО оказывают элементы сухого трения с коэффициентом трения 0,4.

Для сравнения в таблице 3 приведены значения максимальных перемещений РМСО зданий без элементов сухого трения.

Из таблицы 3 следует, что резинометаллические сейсмоизолирующие опоры в каркасных зданиях получают недопустимо большие перемещения,

которые достигают таких больших значений, что использование опор в зданиях становится невозможным.

**Таблица 3** - Значения максимальных перемещений РМСО в диапазоне преобладающих периодов сейсмических воздействий  $T_0$  от 0,1 с до 1,0 с, в см.

Этаж-ность здания	Конструктивная схема здания	Сейсмоизоляция в виде резинометаллических опор		
		Типы опор		
		гибкие	полужесткие	жесткие
		Максимальные перемещения		
5	каркасная	188,6	239,2	263,37
	стенная	23,3	11,07	18,8
9	каркасная	190,4	329,18	361,27
	стенная	9,6	17,7	9,8
12	каркасная	229	299,3	284
	стенная	17,8	9,1	11,04

Сравнение таблиц 2 и 3 показывает, что включение в систему с РМСО элементов сухого трения позволяет снизить максимальные перемещения РМСО в каркасных зданиях в среднем 10 раз. При этом более эффективно введение элементов сухого трения в РМСО жесткого типа.

**Вывод.** Анализ влияния коэффициента трения на горизонтальные сейсмические сдвигающие силы и перемещения масс показал, что наиболее рациональным для элементов сухого трения является коэффициент трения 0,2.

#### **Библиографический список:**

1. Поляков В.С., Килимник Л.Ш., Черкашин А.В. Современные методы сейсмозащиты зданий. - М.: Стройиздат, 1989. - 320 с.
2. Catalogue on lead rubber bearings series LRB. «FIP Industriale S.P.A».