

## ДЕМПФИРОВАНИЕ СЕЙСМОИЗОЛИРОВАННОГО ЗДАНИЯ ДЕМПФЕРАМИ ПЕРЕМЕННОГО СУХОГО ТРЕНИЯ

Целью данной работы является описание поведения сейсмоизолированного здания (сейсмоизолирующий элемент катковая опора) оснащенного демпферами переменного сухого трения.

Поведение сейсмоизолированного здания описывается моделью рассмотренной в работе [1], где рассмотрены малые колебания системы "здание–опора–основание". Частота колебаний такой системы определяется геометрическими параметрами опор качения, принятых в качестве сейсмоизолирующих элементов. При внешнем (сейсмическом) воздействии с частотой совпадающей с частотой собственных колебаний, система входит в резонанс, что требует применения дополнительных технологических или конструктивных средств для его устранения. Применяемые в большинстве конструктивных решений «плоские»<sup>1</sup> демпферы сухого трения не эффективны, так как необходимы демпферы большой массы, а увеличение массы противоречит идее сейсмоизоляции зданий.

В статье предлагается конкретная инженерная конструкция демпфера переменного сухого трения, которая при сравнительно малой массе демпферов сохраняет свойства «плоского» тяжелого демпфера.

### 1. Демпфер с изменяющимся сухим трением

Демпфер с изменяющимся сухим трением представляет собой тело определенной массы  $m$ , лежащее на наклонной плоскости с заданным коэффициентом трения скольжения и заданным [2] (или переменным [3]) углом наклона  $\alpha$ , способное двигаться в верх по наклонной плоскости под действием некоторой горизонтально действующей силы  $P$  и скользить вниз под действием собственного веса (Рис. 1, 2).

Рассмотрим частный случай демпфера с изменяющимся сухим трением – клиновидный демпфер сухого трения. При воздействии внешней горизонтальной силы  $P$  на движущийся вверх клиновидный демпфер, сила трения скольжения становится величиной, зависящей от величины этой внешней силы:

$$F_{mp} = f \cdot N = f(m \cdot g \cdot \cos \alpha + P \cdot \sin \alpha).$$

При движении массы вниз сила трения имеет то же выражение, но направлена вверх. Имеем:

---

<sup>1</sup> Под "плоским" следует понимать демпфер действующий на горизонтальной плоскости с постоянной по модулю (согласно закону Кулона) силой трения скольжения

$$\vec{F}_{mp} = -f \cdot N \cdot \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|},$$

где  $\vec{V}$  – относительная скорость движущейся массы.

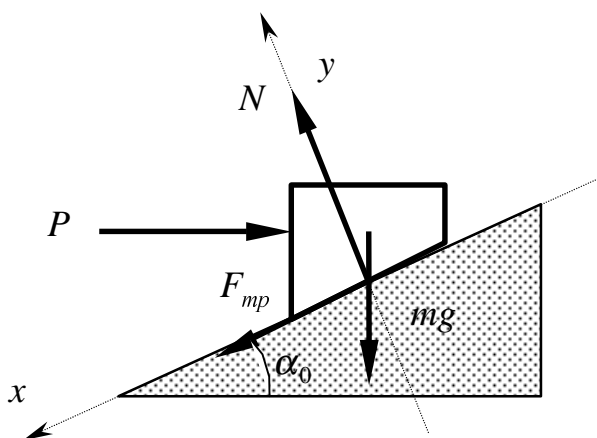


Рис. 1

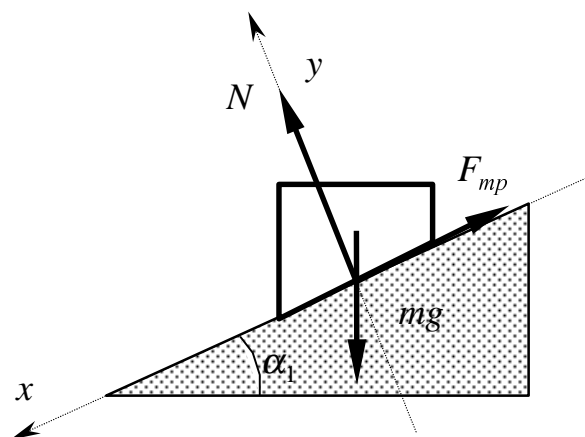


Рис. 2

В данном случае нормальная реакция поверхности скольжения величина, зависящая от внешней силы  $P$ .

Итак, клиновидный демпфер должен совершать движение вверх по наклонной поверхности скольжения под действием некоторой горизонтально действующей силы и скользить вниз по той же поверхности при отсутствии этой силы под действием собственного веса. Для выполнения этих условий необходимо подобрать определенный угол наклона поверхности скольжения, исходя из условия предельного равновесия клиновидного демпфера, находящегося на наклонной поверхности скольжения. Найдем предельный угол, превышение которого делает невозможным движение клиновидного демпфера вверх под действием любой горизонтально действующей силы.

Составив уравнения равновесия и выразив силу  $P$ , получим:

$$P = \frac{m \cdot g (f \cdot \cos \alpha + \sin \alpha)}{(\cos \alpha - f \cdot \sin \alpha)}.$$

В случае, когда знаменатель равен нулю, сила  $P$  становится бесконечно большой, т.е. клиновидный демпфер никогда не сдвинется с места при угле наклона

$$\alpha_0 \geq \text{arctg}(f).$$

Для различных поверхностей скольжения предельный угол будет изменяться (Таблица 1).

Для того, чтобы клиновидный демпфер возвращался в прежнее положение после прекращения действия внешней силы, необходимо определить угол, при котором клиновидный демпфер, лежащий на наклонной поверхности скольжения, будет скользить вниз под действием собственного веса.

Поскольку движение может происходить лишь по оси  $x$ , то условие движения клиновидного демпфера под действием собственного веса будет иметь вид:

$$m \cdot g \cdot \sin \alpha_1 > f \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha_1$$

и минимальный угол  $\alpha_1$  определяется выражением:

$$\alpha_1 > \arctg(f).$$

В Табл. 1 приведены предельные и минимальные углы скольжения для различных коэффициентов трения соответствующих наиболее часто используемым в строительстве материалам.

Таблица 1

Коэффициент трения $f$	Предельный угол (в градусах)	Минимальный угол скольжения (в градусах)
$\approx 0,1$ (фторопласт–металл)	84,3	5,71
$\approx 0,25$ (металл–металл)	75,9	14,0
$\approx 0,5$ (бетон–металл)	63,4	26,6
$\approx 0,7$ (бетон–бетон)	55,0	34,0

Таким образом, расчетный угол наклона поверхности скольжения должен находиться в пределах  $\alpha_1 < \alpha < \alpha_0$  для вышеописанного случая.

## 2. Кинематический фундамент с клиновидным демпфером сухого трения

Рассмотрим сейсмоизолирующий опорный узел сейсмостойкого здания, состоящий из опорного кинематического фундамента [1] и клиновидных демпферов сухого трения [2], рис. 3

Отметим особенности расчетной схемы [1]:

- 1) жесткость системы сейсмоизоляции определяется силой веса как в математическом маятнике;
- 2) здание рассматривается как абсолютно твердое тело;
- 3) жесткость опорных элементов соизмерима с жесткостью вышележащих конструкций;
- 4) диссипативной силой является сила трения Кулона.

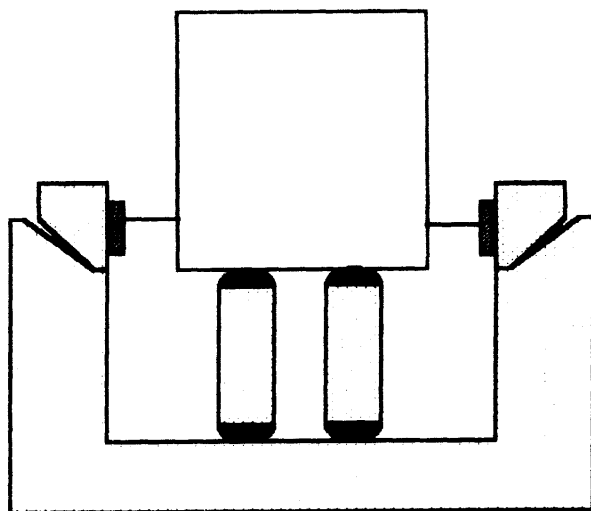


Рис. 3 Расчетная схема

Описание движения каждого конструктивного решения сейсмоизолированного здания требует конкретного составления уравнения движения т.к. конструктивное решение накладывает определенные условия на составление уравнения движения.

Для предложенной расчетной схемы уравнение движения имеет вид:

$$M \ddot{x} + \left( Mg \left( 1 + \frac{W_Z}{g} \right) - \operatorname{sgn} \dot{Z} \Phi_{mp} \right) \frac{h}{H^2} x + P_X = -W_X M, \quad (1)$$

где

$$\Phi_{mp} = f_{30} P_X$$

$$P_X = \frac{\ddot{x} m (1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot C \operatorname{sgn} x) + mg \left( 1 + \frac{W_Z}{g} \right) C + W_X m}{1 - f_{30} C \operatorname{sgn} \dot{x} \operatorname{sgn} x}, \quad (2)$$

$$C = \frac{f_{кл} \operatorname{sgn} \dot{x} + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{sgn} x}{1 - f_{кл} \operatorname{tg} \alpha \operatorname{sgn} \dot{x} \operatorname{sgn} x}$$

- $M$  – масса сейсмоизолированного здания;  
 $x$  – относительное перемещение здания;  
 $g$  – ускорение свободного падения;  
 $W_X; W_Z$  – соответственно горизонтальная и вертикальная составляющие ускорения основания;  
 $f_{zd}$  – коэффициент трения скольжения по вертикальной поверхности клиновидного демпфера;  
 $f_{кл}$  – коэффициент трения скольжения клиновидного демпфера по наклонной поверхности;  
 $\dot{Z}$  – скорость вертикального движения клиновидного демпфера по скошенным направляющим относительно поднятия сейсмоизолированного здания;  
 $P_X$  – сила, действующая на здание со стороны клиновидных демпферов, находящихся в работе;  
 $h; H$  – параметры зависящие от вида системы сейсмоизоляции (в данном случае катковых опор,  $h$  – величина выброшенного слоя,  $H$  – высота стойки).

Для данного конструктивного решения  $\dot{Z} = \dot{x} \operatorname{tg} \alpha \operatorname{sgn} x$ , следовательно  $f_{zd} \operatorname{sgn} \dot{Z} = f_{zd} \operatorname{sgn} \dot{x} \operatorname{sgn} x$ , для других конструктивных решений параметры  $P_X$  и  $\dot{Z}$  могут быть другими.

В отличие от уравнения движения сейсмоизолированного здания, оснащенного "плоским" демпфером сухого трения [1]:

- уравнение (1) имеет вместо члена выражающего сухое трение, силу  $P_X$ ;
- в отсутствие внешнего воздействия диссипативная сила  $P_X$  является постоянной по модулю и свободные колебания данной системы не будут отличаться от свободных колебаний при использовании "плоских" демпферов сухого трения, с той лишь разницей, что при одной и той же массе демпфирующих элементов и одинаковых коэффициентах трения скольжения затухание колебаний происходит значительно быстрее (за счет угла наклона поверхности скольжения, изменение величины которого аналогично увеличению массы демпферов в традиционном случае);
- при наличии внешнего воздействия диссипативная сила  $P_X$  перестает быть постоянной по модулю и изменяется в зависимости от ускорений внешнего (сейсмического) воздействия  $W_X; W_Z$  (2).

Приведем предельный и минимальный углы наклона поверхности скольжения для конструктивного решения [2] (Рис. 4) описываемого уравнением колебаний (1). Из рисунка видно, что взаимодействие клиновидного демпфера сухого трения со зданием приводит к появлению ещё одной – вертикальной поверхности скольжения с коэффициентом трения  $f_{з\partial}$ . Поэтому параметры угла наклона поверхности скольжения в этом случае, в отличие от рассмотренного выше изолированного клиновидного демпфера приводит к выражению.

$$\arctg(f_{кл}) < \alpha < \arctg\left(\frac{1 - f_{з\partial} f_{кл}}{f_{з\partial} + f_{кл}}\right).$$

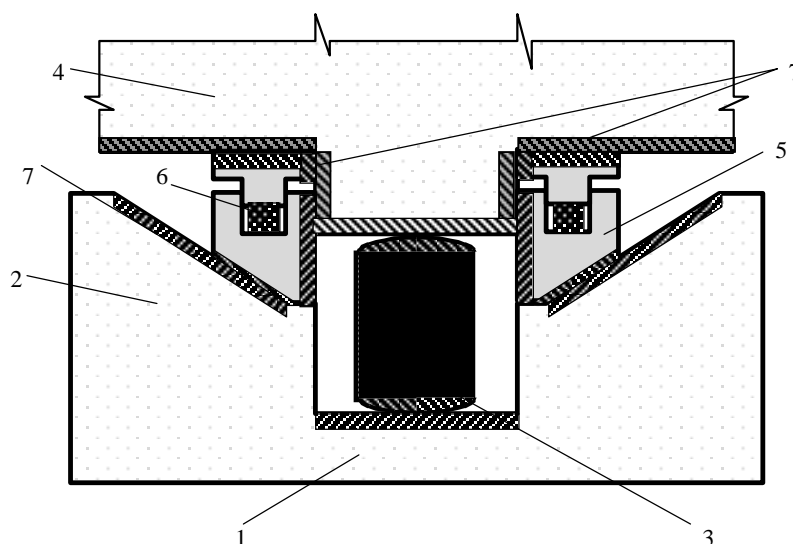


Рис. 4 Сейсмоизолирующий опорный узел здания сооружения  
 1 – нижний опорный блок, 2 – стакан, 3 – сейсмоизолирующая стойка со сферическими торцами, 4 – нижний опорный блок, 5 – клиновидный демпфер, 6 – упругий элемент, 7 – закладные детали.

### 3. Расчет свободных колебаний здания на катковых опорах с клиновидными демпферами сухого трения.

Были рассчитаны свободные колебания сейсмоизолированного здания с клиновидными демпферами сухого трения со следующими параметрами:  $H = 0,5$  м,  $h = 0,1$  м при отношении массы демпферов к массе здания  $m/M = 0,001$ , коэффициенте трения скольжения  $f = 0,1$ , начальной скорости  $V_0 = 0,1$  м/с и углах наклона поверхности сколь-

жения  $\alpha = 50^\circ$  и  $\alpha = 70^\circ$ . Этому случаю соответствует уравнение (1) с нулевой правой частью, которое решалось методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности. Также проводился расчет свободных колебаний сооружения с «плоским» демпфером сухого трения с такими же параметрами.

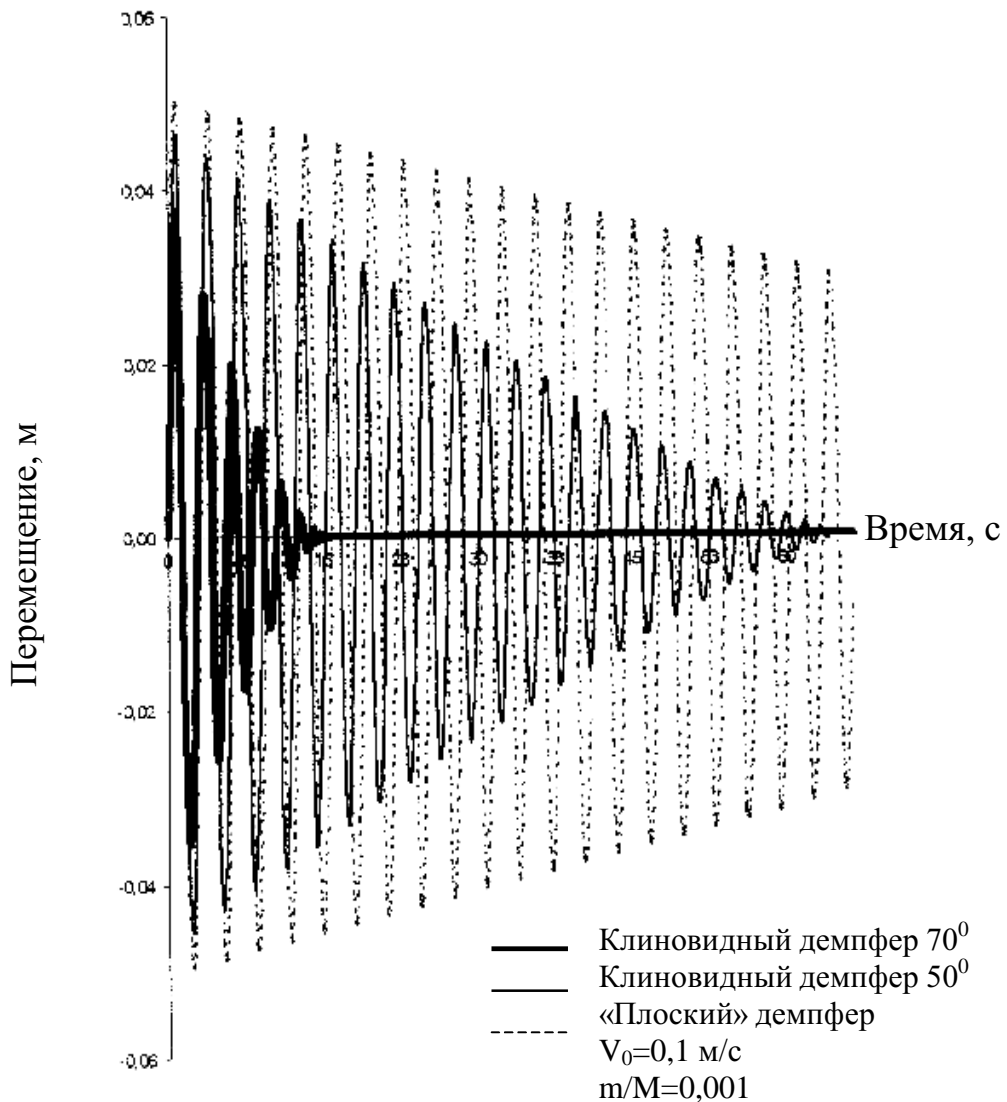


Рис. 5

На рис. 5 сплошными линиями приведены результаты расчетов затухающих колебаний сейсмоизолированного здания с клиновидными демпферами для углов скольжения  $\alpha = 50^\circ$  и  $\alpha = 70^\circ$  и для сравнения штриховой линией – затухающие колебания для такого же сооружения с традиционным «плоским» демпфером.

Из рисунка видно, что наличие клиновидных демпферов значительно увеличивает скорость затухания колебаний. Так для  $\alpha = 70^0$  колебания затухают за 15 с, а для «плоского» демпфера за этот же промежуток времени амплитуда колебаний изменилась незначительно. Видно также, что скорость затухания колебаний зависит от угла скольжения клиновидного демпфера: при  $\alpha = 50^0$  колебания затухают почти в 7 раз дольше, чем при  $\alpha = 70^0$ .

Расчеты показывают важное преимущество клиновидного демпфера по сравнению с традиционным «плоским» демпфером, которое состоит в значительном снижении массы демпфера. Отметим, чтобы добиться затухания колебаний сейсмоизолированного здания с клиновидным демпфером ( $\alpha = 70^0$ ) посредством «плоского» демпфера, необходимо увеличить массу последнего в 100 раз по сравнению с клиновидным.

В связи с этим приведем простую оценку. Если считать, что масса 9-этажного здания составляет приблизительно 3000 тонн и отношение массы «плоского» демпфера к массе здания составляет 0,1, а клиновидного – 0,001, то масса плоского и клиновидного демпферов соответственно равны – 300 и 3 тонны. Экономия строительного материала очевидна.

Анализ результатов для собственных колебаний подтверждает идею применения клиновидного демпфера, согласно которой: увеличение гашения колебаний можно достичь изменением угла наклона поверхности скольжения при малой собственной массе демпферов сухого трения.

### Список использованной литературы

1. Раков Б. В., Яременко В. Г., Тищенко В. Н. Исследование сейсмической реакции систем на кинематических опорах // Сейсмоизоляция и адаптивные системы сейсмозащиты. М.: Стройиздат. 1983. С. 100–121.
2. Патент № 17413 А Украина. Сейсмоизолирующий опорный узел здания, сооружения / Дудченко С.В., Дудченко И. С., Городулин И. В., Леонтьев В. Н., 1993.
3. Патент № 17414 А Украина. Сейсмоизолирующий опорный узел здания, сооружения / Дудченко С.В., Дудченко И. С., 1993.

Поступила в редколлегию 12.03.99



*Демпфирование сейсмоизолированного здания*