



УДК: 624.078

DOI: 10.35803/1694-5298.2021.1.98-104

**БОЛОТБЕК Т., ТЕМИРКАНОВА Ж.Т., К.Б.БЕКБОСУНОВ К.Б., МУСАЕВ, А.С. ЖОЛДОШ УУЛУА**

<sup>1</sup> Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова (КГУСТА), Бишкек, Кыргызская Республика

**BOLOTBEK T., TEMIRKANOVA ZH.T., K.B.BEKBOSUNOV K.B., MUSAEV A.S., JOLDOSH UULU A.**

<sup>1</sup>Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture n.a. N.Isanov. Bishkek, Kyrgyz Republic  
temir.b.amir@gmail.com, jazi\_nja@mail.ru

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОИСТЫХ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ**

### **USE OF RUBBER-METAL LAYERED VIBRATION INSULATORS IN BUILDINGS AND STRUCTURES**

*Макалада термелүү изоляторлорунун динамикалык параметрлерин эсептөө жана имараттардын жана курулмалардын конструкцияларында катмардуу резина-металлдан жасалган вибрация изоляторлорун колдонуу ыкмасы талкууланат.*

**Өзөк сөздөр:** титирөө изолятору, резина, сейсмикалык каршылык.

*В статье рассматривается метод расчёта динамических параметров виброизоляторов и использование слоистых резинометаллических виброизоляторов в конструкциях зданий и сооружений.*

**Ключевые слова:** виброизолятор, резина, сейсмостойкость.

*The article discusses a method for calculating the dynamic parameters of vibration isolators and the use of laminated rubber-metal vibration isolators in the structures of buildings and structures.*

**Key words:** vibration isolator, rubber, seismic resistance.

Проблема резистентности зданий и сооружений к сейсмическим силам является наиболее актуальной, что подтверждается высокой сейсмической эмиссией в Кыргызской Республике. Гражданские здания имеют склонность к повышению своей абсолютной высоты ввиду высокой стоимости застраиваемой территории, что особенно актуально в мегаполисах, к чему стремиться г. Бишкек. В этой связи строительство сейсмостойких гражданских зданий следует вести с учётом сейсмостойкого строительства. Гистерезисное демпфирование сейсмических усилий или применение резинометаллических опорных устройств во многом решит эту задачу.

Ниже излагается расчёт сплошных цилиндрических виброизоляторов в которых плоские слои резины чередуются с плоскими слоями металла и резина привулканизирована к металлу по всей поверхности соприкосновения. Будем называть такие виброизоляторы слоистыми, включая в это понятие и простейший частный случай – виброизолятор с одним слоем свинцовой пластины. Виброизоляторы резинометаллические слоистые (ВРМС) с малым число слоёв давно и широко применяется в различных областях техники как в качестве собственно виброизоляторов, так и в качестве силовых деталей различных конструкций. Они просты в изготовлении, надёжны и долговечны в эксплуатации. В последнее время получает все большее распространение слоистые виброизоляторы большим числом слоёв. Такие элементы обладают специфическими анизотропными свойствами: жёсткости на сдвиг и на сжатие могут различаться на несколько порядков. Их



использования очень выгодно для виброизоляции некоторых тяжёлых машин, а также для защиты зданий и сооружений, находящихся в сейсмоопасных районах.

В результате расчёта слоистого резинометаллического виброизолятора должны быть найдены его геометрические размеры: диаметр резиновой слоя  $D$ , толщина резинового слоя  $h_p$ , толщина слоя металла  $h_m$ , количество слоёв резины 5.

При этом имеется ввиду что диаметр металлического слоя практически равен или превосходит  $D$ , а количество слоёв металла равно  $\eta + 1$ . Крайние, нижний и верхний слой металла обычно выполняются утолщёнными и имеют форму, удобное для крепления виброизолятора. При расчёте последнее обстоятельство, естественно, не будет учитываться.

Исходными данными для расчёта является грузонесущие, жесткостные и деформационные характеристики, которыми должен обладать рассчитываемый виброизолятор, а также упругие характеристики резины. В качестве исходных данных можно выбрать следующее шесть величин: грузонесущая способность  $Q$ , вертикальную деформацию под нагрузкой, вертикальную жёсткость или жёсткость на сжатия  $C_v$ , горизонтальную жёсткость или жёсткость на сдвиг  $C$ , Модули сдвига резины  $C_T$  и коэффициент Пуассона  $V$ . В ряде случаев место жёсткостей  $C_v$  удобно использовать условные собственные частоты вертикальных и горизонтальных колебаний и соответственно:

$$\omega_v = \sqrt{\frac{gC_v}{Q}}, \quad \omega = \sqrt{\frac{gC}{Q}},$$

где  $g=9.81$ ,  $Q$  – вертикальная сила (вес груза), действующая на виброизолятор.

Коэффициент Пуассона  $V$  для резины близок к  $1/2$ , поэтому вместо него удобно применять так называемый модуль одностороннего сжатия  $B$

$$B = 2G \frac{1 - V}{1 - 2V}$$

Основные соотношения, определяющие жёсткость виброизолятора, имеют вид:

$$C_v = E_k \frac{D^2}{4\eta h_p}, \quad (1)$$

$$C = C_{TK} \frac{D^2}{4\eta h_p}, \quad (2)$$

где  $E_k$  и  $C_{TK}$  отличаются от истинных модулей растяжения и сдвига соответственно.

Величины  $E_k$  и  $C_{TK}$  отличаются от истинных модулей растяжения  $E$  и модуля сдвига  $C_T$  и являются функциями упругих характеристик резины и размеров резинового слоя

$$E_k = E_k(C_T, B, D, h_p), \quad C_{TK} = C_{TK}(C_T, B, D, h_p).$$

Значения этих функций позволяют на основании формул (1) и (2) произвести расчёт всех необходимых величин.

Примем деформацию сжатия и сдвига независимыми и достаточно малыми, чтобы выполнялся закон Гука. Пренебрежём также динамическими эффектами в резине, т.е. рассмотрим статистическую задачу. При этих условиях можно использовать фундаментальные методы теории упругости и вычислить  $E_k$  и  $C_{TK}$ .



Полученные решения в виде таблиц аппроксимируются следующим образом. Опишем сначала кажущиеся модули  $E_K$  и  $C_{TK}$  в предположении незначительной сжимаемости резины, т.е. в случае, когда можно положить  $B = \infty$ . При этом введём обозначения:

$$E_{K\infty} = E_K|_{B=\infty}, \quad C_{TK\infty} = C_{TK}|_{B=\infty},$$

Модули  $E_{K\infty}$  и  $C_{TK\infty}$  аппроксимируются следующим выражением:

$$E_{K\infty} = 3 \left( 1,05 + \frac{1}{8} \frac{D^2}{h_p^2} \right) C_T \quad (3)$$

$$C_{TK\infty} = \left( 1 - \frac{h_p}{4D} \right) C_T \quad (4)$$

Эти выражения справедливы с точностью не ниже 15% при  $D \geq h_p$ .

В общем случае, когда сжимаемость пренебречь нельзя, справедливы следующие аппроксимации:

$$\frac{1}{E_K} = \frac{1}{E_{K\infty}} + \frac{1}{B}, \quad (5)$$

$$C_{TK} = C_{TK\infty} \quad (6)$$

Полученные формулы (1-6) позволяют найти зависимость отношения жёсткостей  $C_B/C$  от соотношения размеров резинового слоя  $D/h_p$ .

Из формулы (5) можно получить условие, при котором вклад сдвиговой деформации резины сопоставим со вкладом деформации объёмного сжатия:  $E_{K\infty} \sim B$ . Из этого соотношения получаются следующие оценки: если  $D \ll 100 h_p$ , то объёмной сжимаемостью можно пренебречь и положить  $E_K = E_{K\infty}$ ; если  $D \gg 100 h_p$ , то можно пренебречь сдвиговой деформацией и считать  $E_K = B$ ; если же  $D \sim 100 h_p$ , то следует пользоваться формулой (5).

Деформация сжатия определяется выражением

$$s = \frac{Q}{C_{Byhp}}, \quad (7)$$

а условное давления  $P$  в резине – равенством

$$P = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (8)$$

На линейном участке зависимости сила сжатия, осадка и связи и  $P$  выражается законом Гука:

$$P = C_{TK} \left( \frac{\omega B}{\omega} \right)^2 s, \quad (9)$$

Формулы (1-9) позволяют по шести заданным величинам – нагрузке  $Q$ , частотам  $\omega_B$  и  $\omega$ , давления  $P$ , модулям  $C_T$  и  $B$  – определить четыре геометрических параметра виброизолятора: диаметр  $D$ , толщины  $h_p$  и  $h_m$ , число слоев  $\eta$ .

Перед расчётом необходимо убедиться в непротиворечивости шести исходных данных. Условие непротиворечивости вытекает из условия устойчивости виброизолятора:



$$H \leq \alpha D,$$

где  $H = \eta h_p + (\eta + 1)h_m$  – полная высота виброизолятора,  $\alpha$  – коэффициент устойчивости ( $\alpha \geq 1$ ).

Поскольку толщина металлического слоя  $h_m$  не влияет на жесткостные характеристики виброизолятора (пренебрегаем жёсткостью металлических слоёв), то ее нужно находить из этого условия. Для того, чтобы полученное значение  $h_m$  было больше нуля, необходимо выполнение следующих соотношении между исходными данными:

$$\omega > \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi g C_T D}{\alpha Q}} \quad \text{или} \quad C > \frac{C_T}{2\alpha} \sqrt{\frac{\pi Q}{P}}$$

Если эти условия не выполняются, то исходные данные противоречивы и должны быть изменены.

Если данные непротиворечивы, то расчёт значений  $D$ ,  $h_p$ ,  $\eta$  и  $h_m$  производится по формулам:

$$\begin{aligned} D &= 2 \sqrt{\frac{Q}{\pi P}}, \\ h_p &= \frac{D}{2} \sqrt{\frac{3}{2} \frac{\omega^2 - \frac{G}{B} - \omega_v^2}{\omega_b^2 - 3.15 \omega^2}}, \\ \eta &= \frac{g C_T}{P h_p \omega^2}, \\ h_m &= \frac{\alpha D - \eta h_p}{\eta + 1} \end{aligned} \quad (10)$$

При выводе равенства (10) выражение (4) для  $C_{\text{тк}\infty}$  было заменено на равенство

$C_{\text{тк}\infty} = C_T$ , поскольку при использовании (4) расчётные формулы оказывались весьма громоздкими. Такое упрощение приводит как видно из (4), к ошибке значения  $C_{\text{тк}\infty}$ , равной 25%  $h_p = D$ ; 12.5%- при  $h_p = D/2$ ; 8.5 % - при  $h_p = D/3$  и меньше 5% при  $h_p < D/5$ . Если при  $D \geq h_p \geq D/5$  требуются большая точность, то необходимо воспользоваться выражениями (1-4) для проверки и подбора более точных значений (учитывать сжимаемость резины в данном случае нет необходимости).

Упругие характеристики резин, используемые при расчете: модули  $C_T$  и  $B$  – определяются экспериментально с использованием специальных образцов. Наиболее простым образцом для определения  $C_T$  является сам слоистый резинометаллический виброизолятор. По его жесткости на сдвиг  $C$  расчет  $C_T$  производится с использованием выражений (2) и (4).

Определение модуля одностороннего сжатия  $B$  осуществляется в специальной устновке, в которой резиновый образец находится в условиях одностороннего сжатия. Давление  $P_z$ , создаваемое в резине, и деформация резинового образца  $s_z$  связаны на линейном участке соотношением:  $P_z = B s_z$  из которого вычесляется  $B$ .

Для наиболее распространённой амортизационной средне наполненной резины марки 2959 найденные таким образом значения модулей примерно равны:

$$C_T = 1.1 \text{ МПа}, B = 3 \text{ ГПа}$$

Для установления достоверности описанного метода расчёта необходимы экспериментальные данные о жёсткостях на сдвиг и сжатия ВРМС с различным



соотношением  $D$  и  $h_p$  для разных марок резин. В настоящее время такие экспериментальные данные отсутствуют, поэтому сравним изложенный метод с расчётом других авторов и приведём два практических примера.

Выполнены расчёты отношения кажущегося модуля  $E_{к\infty}$  к истинному модулю Юнга резины  $E$  различными методами. Полученные зависимости имеют вид:

$$\frac{E_{к\infty}}{E} = a + b(D/h_p)^2,$$

где  $a = 0.7 \dots 1$ ,  $b = 0.1 \dots 0.125$ .

Эта формула согласуется с (3) в предложении, что  $E=3C_T$ .

В качестве первого примера рассмотрим расчёт необходимых параметров виброизолирующей системы конусной инерционной дробилки. Для обеспечения требуемого колебательного режима с учётом переходных процессов собственные частоты должны иметь значения:  $\omega_b = 2.5 \dots 3$  Гц,  $\omega = 0.7$  Гц. Будем считать, что виброизолирующая система состоит из восьми ВРМС. Тогда  $Q \approx 194$  кН. Давление  $P$  примем равным 1.5 Мпа. Используя (10), получим следующие параметры виброизолятора из резины 2959:  $D=406$  мм,  $h_p = 64 \dots 80$  мм,  $\eta = 5 \dots 6$ . Реально были изготовлены и установлены виброизоляторы с параметрами  $D=400$  мм,  $h_p = 70$  мм,  $\eta = 6$ . Испытания подтвердили расчетные характеристики силы осадки при сжатии до  $=0.2$ . Эксплуатация этих виброизоляторов в течение длительного времени в экспериментальных условиях дала хорошие результаты.

В качестве второго примера рассмотрим задачу защиты зданий и сооружений от землетрясений. Эта проблема становится все более актуальной и по ней у авторов имеются некоторое число работ, в частности [1, 2]. В работе [3] приводится теоретическое обоснование применения сейсмоизоляции малоэтажных зданий.

Хотя колебания грунтов основания при землетрясении носят случайный характер, из опубликованных данных, следует, что основной диапазон частот колебаний простирается от 0 до 25 Гц, а частоты наиболее опасных колебаний лежат в пределах 1.6.....6.0 Гц.

Рассчитаем параметрический ряд сейсмоизоляторов, которые должны устанавливаться под зданиями и сооружениями и обеспечивать защиту от опасных сдвиговых (горизонтальных) колебаний. Для этого необходимо, во-первых, потребовать, чтобы  $\omega = 1.6$  Гц:  $3 \approx 0.55$  Гц. Во-вторых, для предотвращения резонансных явлений при вертикальных колебаниях зданий необходимо положить  $\omega_b = 6$  Гц \* 3 = 18 Гц. При давлении  $P=5$  Мпа для резины марки 2959 получаем геометрические характеристики, приведённые в таблице. Толщина металла  $h_m = 1 \dots 5$  мм.

Геометрические характеристики параметрического ряда слоистых резинометаллических сейсмоизоляторов приведены в таблице 1. Предложенное конструктивное решение сейсмоизолятора показаны на рис. 1, 2.

Таблица 1 - Геометрические характеристики параметрического ряда слоистых резинометаллических сейсмоизоляторов

| Q, кН | D, мм | h <sub>p</sub> , мм | η  |
|-------|-------|---------------------|----|
| 250   | 252   | 3,68                | 49 |
| 500   | 357   | 5,21                | 35 |
| 750   | 437   | 6,38                | 28 |
| 1000  | 505   | 7,37                | 25 |
| 2000  | 714   | 10,40               | 17 |
| 3000  | 874   | 12,80               | 14 |

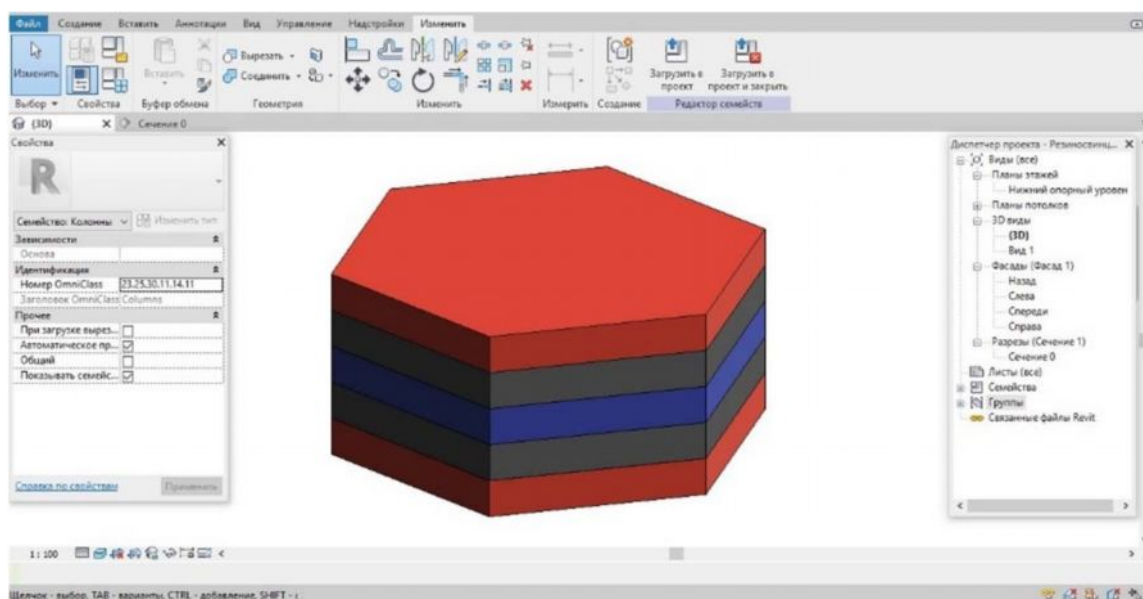


Рис. 1. Конструкция резинометаллического изолятора со свинцовой пластиной, 3D вид

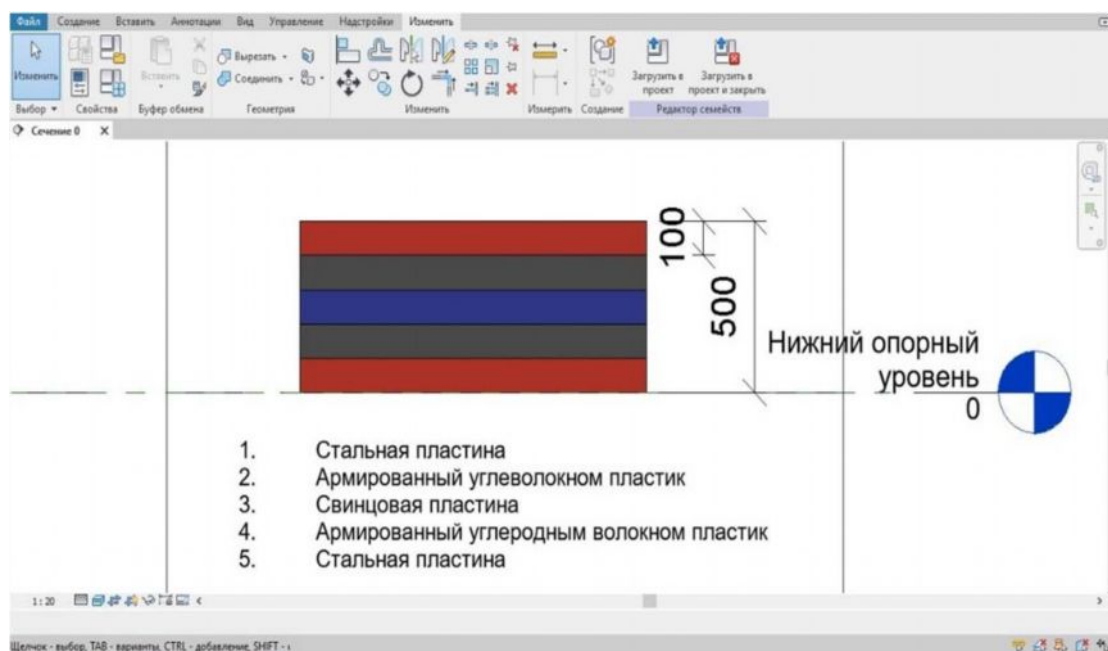
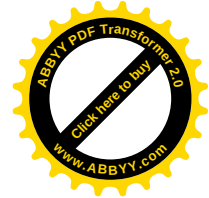


Рис. 2. Конструкция резинометаллического изолятора со свинцовой пластиной, сечение

Полученные результаты имеют практически важное значение при создании виброизолирующих систем тяжёлых технологических машин и самоизоляции зданий и сооружений. Разработано новое техническое решение гистерезисного демпфера – резинометаллического изолятора со свинцовой пластиной толщиной 100 мм. Структурный анализ информационной модели здания в среде программного обеспечения Autodesk Robot Structural Analysis показал, что деформации и напряжения от базовых 8 нагрузок в пределах нормальных показателей. Опасные напряжения и деформации в структуре здания не развиваются. Внедрённый в информационную модель здания резинометаллический изолятор со свинцовыми пластинами показал, что резистентность здания к сейсмическим силам вырос в сравнении с классическими конструктивными схемами зданий на 18 %, что соответствует диапазону от 1 до 2 баллов.



## Список литературы

1. Т.Болотбек. Инерционное демпфирование сейсмических сил зданий и сооружений со скользящим поясом [Текст] / Т.Болотбек, К.У.Насырынбекова и др. / Вестник КГУСТА. – Бишкек: 2019. - №1(63). - С. 127-131.

2. Болотбек Т., Темирканова Ж.Т. и соавторы. Применение результатов метода сосредоточенных деформаций к результатам численных экспериментов на основе метода конечных элементов [Текст] / Болотбек Т., Ж.Т.Темирканова и др. / Вестник КГУСТА. - Бишкек: 2020. - № 1 (67). – С. 140-146.

3. Апсеметов М.Ч. Колебания модели малоэтажных зданий с сейсмоизолирующим поясом при сейсмических воздействиях [Текст] / М.Ч.Апсеметов, А.Ж.Андашев и др. / Вестник международного института управления. – Архангельск: МИУ. – 2018. - Вып. 1(146). – С.68-73.