

ский, В. Н. Вокин, В. А. Теняшников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГУ, 2006. – № 3. – С. 306–307.

10. Шпанский О. В. Моделирование рабочей зоны карьера при переменном направлении понижения горных пород / О. В. Шпанский, Д. Н. Лигоцкий, И. А. Ишкулова, К. С. Арзуманян // Горный журнал. – 2005. – № 2. – С. 11–15.

11. Дриженко А. Ю. Этапная разработка пород вскрыши железорудных карьеров крутонаклонными выемочными слоями / А. Ю. Дриженко // Горный журнал. – 2011. – № 2. – С. 25–28.

12. Ракишев Б. Р., Молдабаев С. К. а. с. Способ открытой разработки наклонных и крутых месторождений полезных ископаемых. Инновационный патент РК, № 26485, 2012.

13. Ракишев Б. Р., Молдабаев С. К. а. с. Способ открытой разработки крутопадающих месторождений полезных ископаемых с переходом на внутреннее отвалообразование. Инновационный патент РК, № 29038, 2014.

14. Moldabayev S. Solution of nonlinear programming problem by Bellman method while optimizing the two-level mining of benches in deep open pits. Proc. of the Bauman NMU «Theoretical and practical solutions of mineral resources mining» / S. Moldabayev, B. Rysbaiuly. – Dnipropetrovsk: A Balkema Book. – P. 49–53.

Поступила 29.02.2016



УДК 622.6

Производство

С. Н. Гребенюк /к. т. н./

Запорожский национальный университет

В. И. Дырда /д. т. н./

Институт геотехнической механики
имени Н.С. Полякова Национальной академии
наук Украины

А. В. Новикова

Институт геотехнической механики
имени Н.С. Полякова Национальной академии
наук Украины

Обоснование параметров резиновых и резинокордных вибросейсмоблоков для защиты горных машин и сооружений

Рассматриваются различные конструктивные решения для резинометаллических вибросейсмоизоляторов. В качестве амортизирующих элементов конструкции используются резиновые и резинокордные цилиндрические элементы. Для получения такой жесткостной характеристики, как осадка, использовались приближенные аналитические зависимости и численные методы. Для уточнения расчетов, связанных с особенностями закрепления резинового элемента на торцах, использовались скорректированные значения прикладываемых нагрузок. Проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными для образцов сейсмических опор. С помощью модификации метода конечных элементов – моментной схемы конечного элемента – для слабосжимаемых и композиционных материалов рассчитано напряженно-деформированное состояние резиновых и резинокордных виброизоляторов в условиях статического нагружения. Для резинокордных виброизоляторов проанализировано влияние количества армированных слоев, схемы армирования и объемного содержания волокна в резинокорде на жесткостные характеристики виброизолятора. (Ил. 1. Табл. 2. Библиогр.: 8 назв.)

Ключевые слова: виброизолятор, резинокорд, резина, осадка, метод конечных элементов, напряжения, деформации, сжатие, жесткость, статическая нагрузка.

Various constructional decisions for rubber-metal vibroseismoisolators are considered. As damping element of construction, rubber and rubber-cord cylindrical elements are used. To obtain such stiffness properties as sinking, both approximate analytical dependences, and numerical methods were used. For the specification of calculations connected with features of fixing of rubber element at end faces, corrected values of applied loadings were used. Comparison of results of calculation with experimental data for samples of seismic supports is carried out. By means of modification of a method of final elements – moment scheme of final element for weakly compressible and composite

materials, the intense deformed state of rubber and rubber-cord vibration isolators in the conditions of static loading is calculated. For rubber-cord vibration isolators the influence of quantity of the reinforced layers, schemes of reinforcing and volume content of fiber in rubber-cord on stiffness properties of vibration isolator is analyzed.

Key words: vibration isolator, rubber cord fabric, rubber, sinking, method of final elements, tension, deformations, compression, rigidity, static loading.

Постановка проблемы и ее связь с важными научными и практическими задачами

При добыче полезных ископаемых и их переработке широко используют тяжелые горные машины (дробилки, грохоты и др.). В процессе работы они подвергаются существенным вибрационным воздействиям, которые приводят к разрушению как машин, так и фундаментов, на которых они установлены. Поэтому защита горных машин, механизмов, зданий, сооружений от вибраций является актуальной проблемой. Одним из наиболее перспективных направлений решения данной проблемы является применение резиновых и резинокордных виброизоляторов для вибро- и сейсмоизоляции машин, зданий, сооружений, инфраструктурных объектов.

При виброизоляции варьируют такими параметрами: количество виброизоляторов, их размеры, схема расположения, используемые материалы и др. Для получения рациональных конструктивных решений необходимо иметь сведения о параметрах напряжено-деформированного состояния виброизолятора (осадка, максимальные напряжения и другие) в условиях реальной эксплуатации. Определение этих параметров является достаточно сложной задачей ввиду того, что резина как конструкционный материал обладает достаточно специфическими свойствами (нелинейность, возможность испытывать большие деформации без разрушения, слабая сжимаемость и другие), при использовании резинокордного материала к этим свойствам добавляется неоднородность и существенная анизотропия свойств.

Анализ исследований и публикаций

Исследование амортизационных свойств виброизоляторов, работающих на сжатие, представлено в работах Э. Э. Лавендела [1], С. И. Дымникова [2], В. Л. Бидермана, Н. А. Суховой и др. Различные конструктивные решения для виброизоляторов, позволяющие снизить риск от разрушения при вибрационных и сейсмических воздействиях, представлены в работах [3-8]. Сложность процесса деформирования таких элементов конструкций приводит к необходимости применения численных методов, в частности метода конечных элементов для их проектирования.

Наиболее рациональным конструктивным решением является использование в качестве вибросейсмоизоляторов резинометаллических блоков. В этой связи возникает необходимость исследования рабочих элементов конструкций при действии длительных статических нагрузок.

Цель исследования

Проведение анализа различных конструктивных решений для цилиндрического резинового и резинокордного амортизатора в условиях статического нагружения (рис. 1).

Конструкция виброакустического изолятора, который используют при виброизоляции машин общего, горно-металлургического, агропромышленного комплекса и в специальной вибрационной технике, разработана в Институте геотехнической механики НАН Украины (г. Днепропетровск). Каждая секция этого виброизолятора состоит из двух металлических пластин и присоединенного к ним резинового элемента в виде цилиндра (рис. 1а).

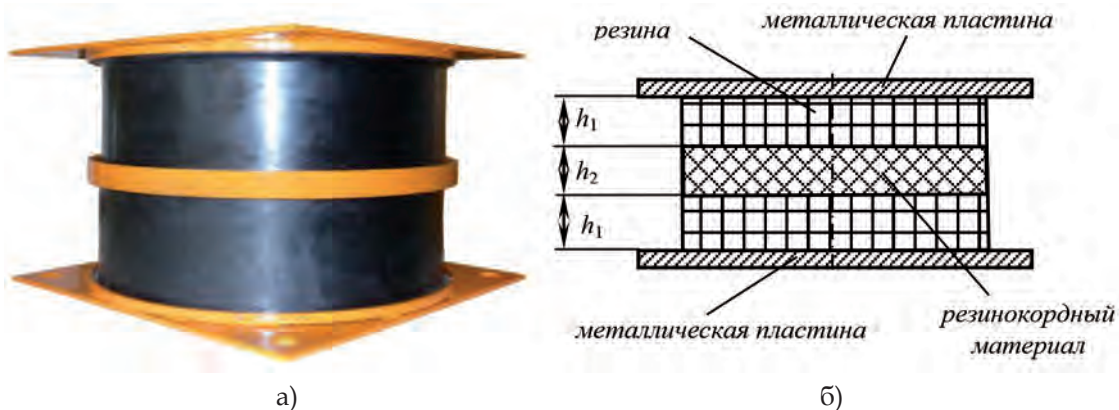


Рис. 1. Общий вид резинового (а) и расчетная схема резинокордного (б) виброизоляторов

Для улучшения виброизоляционных и прочностных характеристик приведенного изолятора была предложена его модификация, в которой предполагается наличие в резиновом массиве вставки из резинокордного материала.

Изложение основного материала. Для представленного выше виброизолятора в ходе статических испытаний была определена жесткость на сжатие при различной величине нагрузки. В результате несложных пересчетов можно определить зависимость между осадкой виброизолятора и прикладываемой нагрузкой (весом строительной конструкции), используя формулу:

$$\Delta = \frac{P}{C_{ст.в}},$$

где Δ – осадка виброизолятора; P – сжимающая нагрузка; $C_{ст.в}$ – вертикальная жесткость виброизолятора.

В работе [3] для малых деформаций ($\varepsilon < 0,1$) методом Ритца получена аналитическая зависимость между осадкой цилиндрического резинового слоя со свободными торцами и прикладываемой нагрузкой:

$$\Delta = \frac{P_0 h}{3\pi R^2 G} \left[1 - \frac{R}{h\sqrt{6}} th \frac{h\sqrt{6}}{R} \right], \quad (1)$$

где P_0 – сжимающая нагрузка для резинового слоя со свободными торцами; h – высота резинового слоя; R – радиус резинового слоя; G – модуль сдвига резины.

При одноосном сжатии для малых деформаций ($\varepsilon < 0,1$) зависимость между осадкой резинового слоя и прикладываемой нагрузкой определяется формулой:

$$\Delta = \frac{P_0 h}{3\pi R^2 G} \beta. \quad (2)$$

При расчете виброизоляторов необходимо учитывать, что торцы резинового слоя привулканизированы к металлическим пластинам, тогда в формулы (1) и (2) вместо нагрузки P_0 необходимо подставить скорректированное значение реальной нагрузки P , которое учитывает увеличение жесткости за счет закрепления торцов:

$$P_0 = \frac{P}{\beta}, \quad (3)$$

где β – коэффициент увеличения жесткости за счет закрепления торцов; $\beta = 1 + 0,413\rho^2$ – по Пейну; $\beta = 0,92 + 0,5\rho^2$ – по Лавенделу.

В работе [5] предложено вычислять β по формуле:

$$\beta = 1 + 0,83\rho^2, \quad (4)$$

где $\rho = \frac{R}{h}$.

Для того чтобы определить распределение напряжений и деформаций во всем объеме конструкции, воспользуемся методом конечных элементов. При этом традиционный метод конечных элементов при расчете резиновых и резинокордных конструкций может давать значительные погрешности при расчетах, обусловленные как негативными свойствами самого метода, так и необходимостью учета специфических свойств резины, таких как слабая сжимаемость.

Поэтому при расчетах воспользуемся модификацией метода конечных элементов – моментной схемой конечного элемента (МСКЭ). Согласно данной схеме компоненты вектора перемещений аппроксимируются рядом Тейлора. Аналогичным образом аппроксимируются компоненты вектора деформаций, а для слабосжимаемых материалов – еще и функция изменения объема. При этом в разложении деформаций и функции изменения объема удерживается некоторое количество слагаемых, которые определенным образом согласуются с законом разложения для перемещений.

Для линейного параллелепипедного конечного элемента для компонентов вектора перемещений имеем:

$$u_{k'} = \omega_{k'}^{(000)} + \omega_{k'}^{(100)}\psi^{(100)} + \omega_{k'}^{(010)}\psi^{(010)} + \omega_{k'}^{(001)}\psi^{(001)} + \omega_{k'}^{(110)}\psi^{(110)} + \omega_{k'}^{(101)}\psi^{(101)} + \omega_{k'}^{(011)}\psi^{(011)} + \omega_{k'}^{(111)}\psi^{(111)}, \quad (5)$$

где $\omega_{k'}^{(pqr)}$ – коэффициенты разложения; $k' = 1, 2, 3$ – направления глобальной декартовой системы координат; $\psi^{(pqr)}$ – набор степенных координатных функций вида:

$$\psi^{(pqr)} = \frac{(x_1)^p (x_2)^q (x_3)^r}{p!q!r!}, \quad (6)$$

здесь $p = 0, \dots, M$; $q = 0, \dots, N$; $r = 0, \dots, L$ – степени аппроксимирующего полинома по соответствующим координатным направлениям, x_1, x_2, x_3 – координаты местной, связанной с конечным элементом системы координат.

Выражения для компонент тензора деформаций запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= e_{11}^{(000)} + e_{11}^{(001)}\psi^{(001)} + e_{11}^{(010)}\psi^{(010)} + e_{11}^{(011)}\psi^{(011)}; \\ \varepsilon_{22} &= e_{22}^{(000)} + e_{22}^{(001)}\psi^{(001)} + e_{22}^{(100)}\psi^{(100)} + e_{22}^{(101)}\psi^{(101)}; \\ \varepsilon_{33} &= e_{33}^{(000)} + e_{33}^{(010)}\psi^{(010)} + e_{33}^{(100)}\psi^{(100)} + e_{33}^{(110)}\psi^{(110)}; \\ \varepsilon_{12} &= e_{12}^{(000)} + e_{12}^{(001)}\psi^{(001)}; \\ \varepsilon_{13} &= e_{13}^{(000)} + e_{13}^{(010)}\psi^{(010)}; \\ \varepsilon_{23} &= e_{23}^{(000)} + e_{23}^{(100)}\psi^{(100)}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $e_{ij}^{(pqr)}$ – коэффициенты разложения деформаций.

Для линейного закона аппроксимации приближенное значение функции изменения объема имеет вид:

$$\theta = \xi^{(000)}, \quad (8)$$

где $\xi^{(000)}$ – коэффициент разложения функции изменения объема.

Процедура формирования матрицы жесткости конечного элемента на основе предложенных разложений описана в работах [9–11].

В результате конечно-элементного подхода приходим к необходимости решения системы линейных алгебраических уравнений вида:

$$[K]\{u\} = \{P\}, \quad (9)$$

где $[K]$ – глобальная матрица жесткости конструкции, $\{u\}$ – вектор узловых перемещений, $\{P\}$ – вектор узловых нагрузок.

Описанная процедура построения матрицы жесткости и определения напряженно-деформированного состояния конструкции реализована в программном комплексе «МІРЕЛА+» [11], с помощью которого решена следующая задача.

Представленные выше аналитические зависимости и описанная модификация метода конечных элементов применены для расчета осадки виброизолятора (рис. 1). Размеры виброизолятора: диаметр $d = 400$ мм, высота $h = 240$ мм (для резинокордного элемента $h_2 = 60$ мм). Модуль сдвига резины $G = 6,3$ кгс/см², коэффициент Пуассона $\nu = 0,49$; модуль упругости корда $E = 12400$ кгс/см², коэффициент Пуассона $\nu = 0,4$. Нагрузка $P = 50$ кН [5].

В резинокордных элементах армирование проводилось в плоскостях, параллельных основанию виброизолятора. С учетом цилиндрической симметрии амортизатора угол армирования нижнего слоя принимался равным 0° , а углы армирования следующих слоев определялись относительно него в направлении поворо-

та по часовой стрелке. Армирующие волокна в каждом слое параллельны друг другу.

Результаты расчетов осадки виброизолятора для резиновых элементов представлены в табл. 1, а для резинокордных, полученные МСКЭ – в табл. 2.

Можно заметить, что в деформированном состоянии резиновые элементы конструкций имеют ярко выраженную бочкообразную форму. Наличие более жестких армирующих элементов увеличивает жесткость в радиальном направлении, в результате при деформировании имеем волнообразную боковую поверхность резинокордного элемента, близкую к цилиндрической. Неоднородная структура приводит к увеличению как нормальных, так и касательных напряжений в сравнении с однородной резиновой конструкцией.

Осадка виброизолятора при рабочих статических нагрузках уменьшается до 15 % при увеличении объемной доли волокна от 0 до 0,3. При малой частоте армирования, когда объемная доля волокна равна 0,1, осадка в сравнении с резиновой конструкцией практически не изменяется. Количество слоев резинокордного материала, как и структура армирования, на осадку влияют также незначительно (до 2 %).

Выводы

1. Проведен анализ различных конструктивных решений для резинового и резинокордного виброизоляторов горных машин.
2. С помощью модифицированного метода конечных элементов проведена процедура выбора параметров и расчета напряженно-деформированного состояния конкретных виброизоляторов горных машин и сооружений.

Библиографический список

1. Лавендел Э. Э. Расчет резинотехнических изделий / Э. Э. Лавендел. – М.: Машиностроение, 1976. – 232 с.

Таблица 1

Осадка резинового виброизолятора

Показатель	Метод расчета			
	Эксперимент	Формулы (2), (4)	Формулы (3), (4)	МСКЭ
Осадка виброизолятора, м	0,0127	0,0084	0,0128	0,0122

Таблица 2

Осадка резинокордного виброизолятора

Схема армирования	Объемное содержание волокна		
	$f = 0,1$	$f = 0,2$	$f = 0,3$
Двуслойная ($0^\circ, 90^\circ$)	0,0122	0,0114	0,0108
Четырехслойная ($0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ$)	0,0121	0,0114	0,0106
Четырехслойная ($0^\circ, 45^\circ, 135^\circ, 90^\circ$)	0,0123	0,0115	0,0108

2. Дымников С. И. Расчет резино-технических деталей при средних деформациях / С. И. Дымников // *Механика полимеров*. – 1968. – № 2. – С. 271–275.
3. Лисица Н. И. Обоснование параметров виброизоляторов дробилок КИД-1500, КИД-1750 / Н. И. Лисица, В. И. Дырда, Е. Ю. Заболотная, Н. Н. Лисица, В. А. Черкасский // *Геотехническая механика*. – 2003. – Вып. 46. – С. 148–155.
4. Дырда В. И. Конусные инерционные дробилки. Выбор параметров и расчет виброизолирующих систем / В. И. Дырда, Н. И. Лисица, Е. Ю. Заболотная, Н. Н. Лисица, В. А. Черкасский // *Геотехническая механика*. – 2005. – Вып. 60. – С. 98–109.
5. Дырда В. И. Решение задачи о сжатии вязкоупругого цилиндра методом Ритца / В. И. Дырда, А. В. Гончаренко, Л. А. Жарко // *Геотехническая механика*. – 2010. – Вып. 86. – С. 113–124.
6. Булат А. Ф. Вибросейсмозащита машин и сооружений с помощью резиновых блоков / А. Ф. Булат, В. И. Дырда, Ю. И. Немчинов, Н. И. Лисица, Н. Н. Лисица, Н. В. Тымко // *Геотехническая механика*. – 2010. – Вып. 85. – С. 128–132.
7. Прикладная механика упруго-наследственных сред. Т. 1. Механика деформирования и разрушения эластомеров / А. Ф. Булат, В. И. Дырда, Е. Л. Звягильский, А. С. Кобец. – К.: Наукова думка, 2011. – 568 с.
8. Прикладная механика упругонаследственных сред: в 4 т. Т. 2. Методы расчета эластомерных деталей / А. Ф. Булат, В. И. Дырда, Е. Л. Звягильский, А. С. Кобец. – К.: Наукова думка, 2012. – 616 с.
9. Дырда В. И. Аналитические и численные методы расчета резиновых деталей / В. И. Дырда, С. Н. Гребенюк, С. И. Гоменюк. – Днепропетровск-Запорожье: Запорожский национальный университет, 2012. – 370 с.
10. Киричевский В. В. Метод конечных элементов в механике эластомеров / В. В. Киричевский. – К.: Наукова думка, 2002. – 655 с.
11. Киричевский В. В. Метод конечных элементов в вычислительном комплексе «МРЕЛА+» / В. В. Киричевский, Б. М. Дохняк, Ю. Г. Козуб, С. И. Гоменюк, Р. В. Киричевский, С. Н. Гребенюк. – К.: Наукова думка, 2005. – 416 с.

Поступила 23.03.2016

