

пластов, а также для выделения подзон при приближении к сместителю крупных нарушений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Забигаило В.Е. Геологические условия выбросоопасности угольных пластов Донбасса / В.Е. Забигаило, А.З. Широков. – К.: Наукова думка, 1980. – 192 с.
2. Ходот В.В. Внезапные выбросы угля и газа / Ходот В.В. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 363 с.
3. Эттингер И.Л. Внезапные выбросы угля и газа и структура угля / Эттингер И.Л. – М.: Недра, 1969. – 160 с.
4. Малоамплитудная тектоника. Методы и результаты прогнозирования: материалы совещания [«Методы и результаты прогнозирования малоамплитудных нарушений в Донбассе, Днепровско-Донецкой впадине и других регионах»], (Славское, 26-30 сент. 1988 г.) / АН Украины. Ин-т геологии и геохимии горючих ископаемых. – К.: Наукова думка, 1991. – 148 с.
5. Ярошевский В. Тектоника разрывов и складок / Ярошевский В. – М.: Недра, 1981. – 245 с.
6. Алешин А.С. Тектонические разрывы на участках сейсмического микрорайонирования / [А.С. Алешин, И.И. Бархатов, С.А. Несмеянов и др.]. – М.: Наука, 1982. – 136 с.
7. Баранов В.А. Методика выделения нарушенных зон по микроструктурным параметрам углей / В.А. Баранов, О.А. Карамушка // Науковий вісник НГУ. – 2008. - № 12. – С.33-35.
8. Патент 40685 Україна, E21C39/00. Спосіб визначення підзон у порушеннях вугільних пластів / В.А. Баранов, О.О. Карамушка; заявники і патентоволодарі: Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – № 2008 12300; заявл. 20.10.2008; опубл. 27.04.09, Бюл. № 8.
9. Венецкий И.Г. Основы математической статистики / И.Г. Венецкий, Г.С. Кильдишев. – М.: Госстатиздат, 1963. – 308 с.
10. Ржевский В.В. Основы физики горных пород / В.В. Ржевский, Г.Я. Новик. – М.: Недра, 1978. – 390 с.

УДК 678:622.002.5

Н.Н. Лисица, ст. преподаватель (ДНУ)

### К РАСЧЕТУ РЕЗИНОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ ГОРНЫХ МАШИН

Розглядаються особливості та алгоритм розрахунку гумових елементів при гармонійному деформуванні

### TO CALCULATION OF RUBBER ELEMENTS FOR LOW-FREQUENCY VIBRATION INSULATION OF MINING MACHINES

Features and algorithm of calculation of rubber elements are observed at a harmonic straining

Создание новых типов машин, повышение их надежности и долговечности тесно связано с применением высокополимерных материалов, важное место среди которых занимает резина. Широкое внедрение резиновых элементов в различных отраслях машиностроения связано с интенсификацией производства и необходимостью создания высокопроизводительных, динамически совершенных машин и механизмов. Это обусловило разработку различных типов резиновых элементов разнообразной формы [1-3].

Замена металлических пружин на детали из резины позволяет сэкономить тонны металла и внести существенный вклад в решение проблемы экономии и рационального использования легированных сталей. Задача проектирования оптимальной виброзащитной системы на базе резиновых и резино-металлических виброизоляторов состоит в обеспечении необходимых упругих

и демпфирующих свойств резиновых элементов. При виброзащите для хорошей отстройки система должна иметь небольшую собственную частоту колебаний. Сплошные резиновые элементы не могут обеспечить требуемую малую жесткость из-за неустойчивой работы в продольном направлении при малых соотношениях размеров поперечного сечения и высоты.

В отделе механики эластомерных конструкций горных машин ИГТМ НАН Украины разработаны параметрические ряды элементов типа ВРМ, ВР и ВН, обеспечивающие собственные частоты виброизолированных объектов в диапазоне 0,5-2,8 Гц при массе объектов от 50 кг до 200 т. Новизна разработанных конструкций виброизоляторов заключается в выборе соответствующей формы и силовой характеристики с различной степенью нелинейности. Типоразмерный ряд виброизоляторов типа ВРМ имеет диаметры 200, 300 и 400 мм с толщиной резинового слоя 5, 10, 20, 40 и 70 мм. Конструкция виброизоляторов позволяет составлять их в стопки, что дает возможность перекрывать практически любой диапазон жесткостей и нагрузок.

Виброизоляторы типа ВР представляют собой полые цилиндрические виброизоляторы со сложной свободной поверхностью. Криволинейная форма внутренней и наружной поверхностей обеспечивает увеличенную площадь теплоотвода и позволяет создавать виброизоляторы меньшей высоты при той же величине коэффициента жесткости, что повышает устойчивость опор. Виброизоляторы имеют диаметр 100, 160, 200, 230 мм и высоту 80, 150, 180, 200 мм соответственно.

Виброизоляторы типа ВН представляют собой полую усеченную полусферу. При деформациях сжатия практически работает только верхняя выпуклая часть виброизоляторов, за счет чего достигается уменьшение вертикальной жесткости по сравнению с виброизоляторами в форме цилиндров со сложной формой свободной поверхности.

Величина жесткости может варьироваться путем изменения толщины стенки. Виброизоляторы имеют высоту 35, 60, 115 мм при диаметре 145, 145, 285 мм соответственно.

Постановка задачи. При математическом описании термомеханического поведения эластомерных конструкций и решений соответствующих краевых задач возникают трудности, связанные с необходимостью исследования нелинейных систем дифференциальных уравнений в частных производных. Этим объясняется отсутствие точных аналитических методов решения задач термовязкоупругости для тел сложной формы [4-6].

В определенной степени указанные трудности преодолеваются путем использования метода конечных элементов (МКЭ), уже нашего широкого применения при решении различных задач механики сплошной среды [7].

**Цель статьи** – разработка обобщенного алгоритма описания термомеханического поведения резиновых элементов.

**Основная часть.** Рассматривается осесимметричная динамическая задача термовязкоупругости для тела вращения произвольного меридионального сечения, находящегося в условиях конвективного теплообмена с окружающей сре-

дой. Предполагается, что на части поверхности тела  $\Sigma_\sigma$  приложена осесимметричная циклическая нагрузка  $\vec{t}(t_{rn}, t_{zn})$ , а на остальной части поверхности заданы циклические перемещения  $\vec{u}(u, w)$ . Для гармонического деформирования в случае пренебрежения быстрозатухающими переходными процессами рассматриваемая задача сводится к решению системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} + \omega^2 \rho u = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr}}{r} + \omega^2 \rho u = 0 \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\lambda}{a} \frac{\partial T}{\partial t} - D \end{cases} \quad (1)$$

при начальных и граничных условиях

$$\begin{aligned} T &= T_0(r, z), \quad (t = t_0) \\ t_{rn} &= \sigma_{rr} l_r + \sigma_{zr} l_z, \\ t_{zn} &= \sigma_{zr} l_r + \sigma_{zz} l_z \quad \text{на поверхности } \Sigma_\sigma \\ \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r} &= -\alpha(T - T_0) \quad \text{на поверхности } \Sigma \end{aligned}$$

где  $u, w$  – радиальная и осевая комплексные амплитуды вектора перемещений;  $\sigma_{rr}, \sigma_{zr}, \sigma_{zz}, \sigma_{\varphi\varphi}$  – комплексные компоненты тензора напряжений;  $\omega$  – круговая частота;  $\rho$  – плотность материала;  $T$  – осредненная за цикл температура;  $\lambda, a, \alpha$  – коэффициенты теплопроводности, температуропроводности и теплоотдачи;  $D$  – осредненная за цикл диссипативная функция;  $T_0$  – температура окружающей среды;  $l_r, l_z$  – направляющие косинуса внешней нормали  $\vec{n}$  к поверхности тела  $\Sigma_\sigma$ .

Диссипативная функция  $D$  определяется по формуле

$$D = \frac{\omega}{2} \left[ 2G'' (|\varepsilon_{rr}|^2 + |\varepsilon_{zz}|^2 + |\varepsilon_{\varphi\varphi}|^2 + 2|\varepsilon_{zr}|^2) + \frac{K'' - 2G''}{3} (|\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{zz} + \varepsilon_{\varphi\varphi}|)^2 \right], \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{rr}, \varepsilon_{zr}, \varepsilon_{zz}, \varepsilon_{\varphi\varphi}$  – комплексные амплитуды компонент тензора деформации;  $G'', K''$  – мнимые части комплексных модулей сдвига

$$G(\omega, T) = G'(\omega, T) + iG''(\omega, T),$$

и объемного расширения

$$K(\omega, T) = K'(\omega, T) + iK''(\omega, T).$$

Разрешающая система уравнений (1) представляет собой сложную нелинейную систему дифференциальных уравнений. Для решения ее используем МКЭ в сочетании с методом пошагового интегрирования по времени. Такой подход к решению задачи позволяет исследовать термомеханическое поведение конструкций сложной формы в рамках неупрощенной постановки задачи о циклическом нагружении.

Систему (1) с соответствующими граничными условиями можно заменить эквивалентными им вариационными условиями. В этом случае для решения полученной вариационной задачи область меридионального сечения рассматриваемого тела вращения делится на треугольные элементы. Делая ряд предположений и реализуя технику конечных элементов, получаем две системы линейных алгебраических уравнений для определения комплексных амплитуд компонент вектора перемещений и температуры в узловых точках.

Изложенный алгоритм расчета собственно и используется при исследованиях полей напряжений и температур диссипативного разогрева виброизоляторов типа ВР различных типоразмеров при приложении гармонической нагрузки. Анализ напряженно-деформированного состояния позволил определить величину используемого при расчетах жесткостных параметров коэффициента жесткости  $\beta$ , расчетные значения которого при малых деформациях сжатия (до 10 %) являются постоянными.

$$\beta = \frac{2 \int_{r_0}^{R_0} r \sigma_z(r, H) dr}{|E^*| (R_0^2 - r_0^2) (w_0 / H)},$$

где  $R_0$  и  $r_0$  – наружный и внутренний радиусы сечения, принятого за отсчетное,  $R_0 = D/2$ ,  $r_0 = d/2$ ;  $w_0$  – заданное смещение торца виброизолятора;  $H$  – высота виброизолятора;  $r, z$  – радиальная и осевая координаты;  $\sigma_z$  – нормальное напряжение.

Расчетные значения параметра  $\beta$  при малых деформациях сжатия (до 10 %) являются постоянными величинами. В таблице 1 приведены отнесенные к площади среднего сечения значения коэффициента жесткости  $\beta$  и значения жесткости  $c_i$  для каждого из исследуемых элементов, определенные по формуле [2]

$$c_i = \beta \frac{|E^*| F}{H}, \quad i = 1, 2, \quad (3)$$

где  $|E^*|$  – абсолютное значение комплексного модуля Юнга;  $F$  – площадь среднего сечения,  $F = \pi (R_0^2 - r_0^2)$ .

Значения  $c_1$  соответствуют слабонаполненной резине на основе синтетического каучука СКИ-3 типа 51-1562 ( $|E^*| = 1,5$  МПа);  $c_2$  – средненаполненной резине на основе натурального каучука типа 2959 ( $|E^*| = 3,6$  МПа).

Таблица 1 – Значения жесткостных параметров

Тип ВР	$R_0$ , м	$r_0$ , м	$H$ , м	$\beta$	$c_1$ , кН/м	$c_2$ , кН/м
ВР-201	0,050	0,038	0,080	0,47	29,2	79,1
ВР-203	0,100	0,065	0,180	0,91	137,5	330,0
ВР-204	0,115	0,076	0,200	0,86	150,9	362,1
ВР-205	0,080	0,055	0,150	0,83	88,0	211,0

Расчетные значения жесткости виброизоляторов по формуле (3) показывают хорошую сходимость с экспериментальными данными.

Применение виброизоляторов ВР и ВРМ на дробилках типа КИД-2200 позволило довести собственные частоты до 0,7 Гц в горизонтальной плоскости и 2,5 Гц в вертикальной при массе подвижных частей 150 т. Использование виброизоляторов типа ВР и ВН при виброизоляции мелких дробилок, вентиляторов, грохотов, намоточных установок фирмы «КАМЕ» позволило получить вертикальные собственные частоты машин от 1,8 до 2,7 Гц в зависимости от типа машины.

#### Выводы

1. Разработан обобщенный алгоритм описания термомеханического поведения резиновых элементов при гармоническом возбуждении.
2. Расчетные значения жесткости виброизоляторов показывают хорошую сходимость с экспериментальными данными.
3. Применение разработанных типов виброизоляторов позволило осуществить низкочастотную виброизоляцию машин различного технологического назначения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисица Н.И., Моисеев Е.П., Лисица Н.Н., Голованов Д.В. Разработка и экспериментальные исследования новых типов резиновых виброизоляторов // Труды II Международного симпозиума по механике эластомеров, 23-26 июня 1997 г., Днепропетровск. – Днепропетровск: Полиграфист, 1997. – Т. 1. – С. 182-194.
2. Лисица Н.И., Голуб Г.Н., Заболотная Е.Ю., Лисица Н.Н., Моисеев Е.П. Применение эластомерных конструкций для низкочастотной виброизоляции // Труды II Международного симпозиума по механике эластомеров, 23-26 июня 1997 г., Днепропетровск. – Днепропетровск: Полиграфист, 1997. – Т. 1. – С. 194-203.
3. Лавендел Э.Э. Расчет резинотехнических изделий. – М.: Машиностроение, 1976. – 232 с.
4. Исследование термомеханического поведения эластомерных конструкций, имеющих форму тел вращения / Дырда В.И., Козлов В.И., Мазнецова А.В., Спивак И.Л.; АН УССР. Ин-т геотехнической механики. – Днепропетровск, 1987. – 9 с. – Библиогр. 7 назв. – Деп. ВИНТИ 3.08.87, № 5548-В.87.
5. Дырда В.И. Прочность и разрушение эластомерных конструкций в экстремальных условиях. – К.: Наук. думка, 1988. – 232 с.
6. Термомеханика эластомерных элементов конструкций при циклическом нагружении // В.Н. Потураев, В.И. Дырда, В.Г. Карнаухов и др. – Киев: Наук. думка, 1987. – 288 с.
7. Киричевский В.В. Численное исследование процессов деформирования резинового виброизолятора / Киричевский В.В., Толоч В.А., Лисица Н.Н., Гребенюк С.Н. // Геотехническая механика. – Днепропетровск: Полиграфист, 2001. – Вып. 24. – С. 162-165.