

УДК 539.3

© 1993 г. С. С. ПРАСНИКОВА

О СИНТЕЗЕ ПОЛОГО РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО  
 АМОРТИЗАТОРА ВРАЩЕНИЯ

В [1, 2] разработан и успешно опробован эффективный метод расчета симметрично деформируемого полого резинометаллического амортизатора сжатия. Было выяснено влияние его параметров на вид жесткостной характеристики и выявлена ее неустойчивость при смене типа (мягкой характеристики на жесткую). Для ее стабилизации (контролируемости) в этом случае необходимы дополнительные конструктивные решения, некоторые из которых рассматриваются в публикуемой работе.

1. Рассматривается полый резиновый амортизатор сжатия, имеющий вид усеченного конуса с привулканизированными по торцам жесткими металлическими пластинами (фиг. 1). Конический амортизатор сжатия характеризуется тремя безразмерными геометрическими параметрами:  $R^{\circ}/H^{\circ}$ ,  $h^{\circ}/H^{\circ}$ ,  $\varphi^{\circ}$  и значениями постоянных  $E$  и  $n$  в двухконстантном упругом потенциале

$$\Phi = 2/3 E (\lambda_s^n + \lambda_0^n + \lambda_3^n - 3)/n^2 \quad (1.1)$$

где  $\lambda_s, \lambda_0, \lambda_3$  — главные кратности удлинений, соответственно, в меридиональном, окружном и поперечном направлениях.

Рассматриваемая проблема, с учетом несжимаемости материала, сводится к следующей нелинейной системе уравнений ( $s_1^{\circ} \leq s^{\circ} \leq s_2^{\circ}$ ):

$$\lambda_0' = \frac{\cos \varphi}{r^{\circ}} \lambda_s - \frac{\cos \varphi^{\circ}}{r^{\circ}} \lambda_0, \quad x_3' = \lambda_s \sin \varphi$$

$$\varphi' = \lambda_s^2 \lambda_0 x_s, \quad T_s' = \frac{\cos \varphi}{r^{\circ}} T_0 - \frac{\cos \varphi^{\circ}}{r^{\circ}} T_s - \varphi' T_{sn} \quad (1.2)$$

$$T_{sn}' = \frac{\sin \varphi}{r^{\circ}} T_0 - \frac{\cos \varphi^{\circ}}{r^{\circ}} T_{sn} + \varphi' T_s - \lambda_s \lambda_0 p$$

$$M_s' = \frac{\cos \varphi}{r^{\circ}} M_0 - \frac{\cos \varphi^{\circ}}{r^{\circ}} M_s + \lambda_s T_{sn}$$

$$T_s = 2/3 E h^{\circ} (\lambda_s^{n-1} - \lambda_s^{-n} \lambda_0^{-(n+1)})/n \quad (1.3)$$

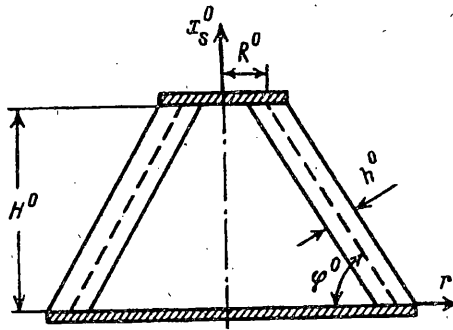
$$T_0 = 2/3 E h^{\circ} (\lambda_0^{n-1} - \lambda_s^{-n} \lambda_0^{-(n+1)})/n$$

$$M_s = 1/9 E h^{\circ} \lambda_s^{-(n+2)} \lambda_0^{-(n+1)} (x_s + 0,5 x_0)$$

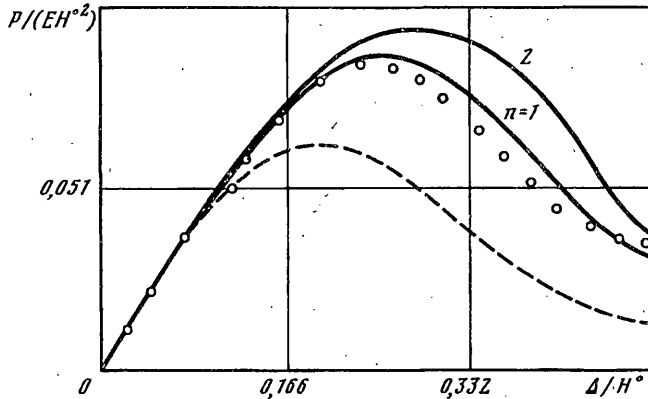
$$M_0 = 1/9 E h^{\circ} \lambda_s^{-(n+1)} \lambda_0^{-(n+2)} (x_0 + 0,5 x_s)$$

$$\lambda_0 = \frac{r}{r^{\circ}}, \quad x_0 = \frac{\lambda_s^{-1} \lambda_0^{-2} \sin \varphi - \sin \varphi^{\circ}}{r^{\circ}}$$

Здесь величины со значком градус относятся к отсчетной (недеформированной) конфигурации, а без него — к текущей (деформированной);  $h^{\circ}, h$  — толщины



Фиг. 1



Фиг. 2

амортизатора;  $\varphi^0, \varphi$  — углы поворота меридиана;  $T_s, T_\theta$  — меридиональное и окружное усилия;  $T_{sn}$  — перерезывающее усилие,  $M_s, M_\theta$  — изгибные моменты;  $\kappa_s, \kappa_\theta$  — изменения кривизн; штрихом обозначены производные по  $s^0$ .

За основные неизвестные функции принимаются  $\lambda_\theta, \varphi, \kappa_s, T_s, T_{sn}, M_s$ . Выражая из (1.3) через них остальные и подставляя эти величины в (1.1), приходим к разрешающей системе обыкновенных дифференциальных уравнений.

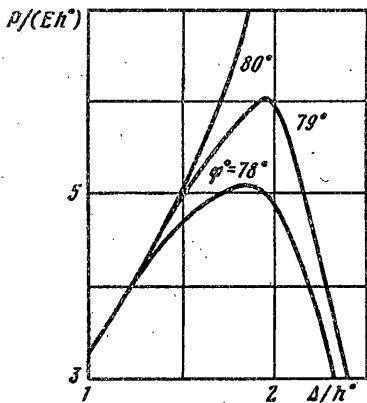
Рассматривается случай, когда коническая оболочка находится под действием сжимающей осевой силы  $P$  и внутреннего давления  $p$ . При этом предполагается, что нижнее основание ( $s^0 = s_2^0$ ) заделано, а на верхнем ( $s^0 = s_1^0$ ) скользящий шарнир, т. е.

$$\lambda_\theta(s_1^0) = 1, \quad x_3(s_1^0) = x_3^0(s_1^0) - \Delta, \quad M_s(s_1^0) = 0 \quad (1.4)$$

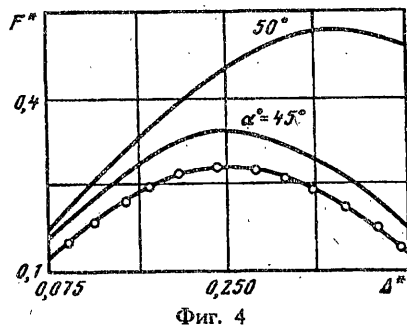
$$\lambda_\theta(s_2^0) = 1, \quad x_3(s_2^0) = x_3^0(s_2^0), \quad \varphi(s_2^0) = \varphi^0(s_2^0)$$

Численное решение полученной нелинейной краевой задачи свелось к рассмотрению последовательности задач Коши для той же системы уравнений. При этом в качестве ведущего параметра была выбрана монотонно изменяющаяся величина — осадка верхнего основания  $\Delta$ .

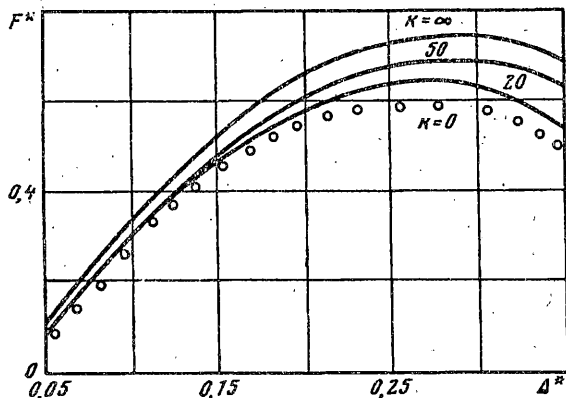
Для апробации метода был использован амортизатор с параметрами  $R^0/H^0 = 0,3, h^0/H^0 = 0,22, \varphi^0 = 0,38$ . Для него на фиг. 2 экспериментальные данные (светлые точки) сопоставлены с результатом расчета для различных значений  $n$  в упругом потенциале (1.1). В рассматриваемом случае достаточно близкие значения к эксперименту дало значение  $n = 1$  (закон Бартеньева — Хазановича). Этот закон и был использован в дальнейшем. Расчет по уравнениям Рейсснера Э.



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

[3], учитывающим большие углы поворота, при малых удлинениях и сдвигах, дал существенно заниженные значения жесткости (штриховая линия на фиг. 2) и оказался непригоден для рассматриваемых амортизаторов вращения.

2. При решении проблем ударо- и виброзащиты конструкций требуется создать амортизатор с определенной жесткостной характеристикой. В частности таковой может быть кусочно-линейная жесткостная характеристика. Проведенные расчеты [2] показали, что смена мягкой характеристики на жесткую происходит в пределах изменения угла  $\varphi^\circ$  на один градус при постоянстве других параметров (фиг. 3,  $H^\circ/h^\circ = 4,5$ ,  $R^\circ/h^\circ = 1,6$ ).

Так как в предельном случае характеристика является неконтролируемой, для получения устойчивой предельной характеристики необходимы специальные конструктивные решения. Ниже рассматриваются следующие возможные решения проблемы: армирование нерастяжимыми и малорастяжимыми волокнами, применение пружины с нелинейной жесткостью, комбинирование двух конических амортизаторов.

Первой возможностью изменения жесткостной характеристики является армирование амортизатора семейством нерастяжимых, либо малорастяжимых волокон (нитей) [4, 5].

В случае армирования срединной поверхности амортизатора двумя семействами нерастяжимых волокон, равнонаклоненных к меридиану под углом  $\alpha^\circ$ , соотношения (1.2) и (1.3) сохраняют свой вид за исключением выражений для усилий  $T_s, T_0$ . В этом случае они принимают вид

$$T_s = 2/3 E h^\circ (\lambda_s^{n-1} - \lambda_s^{-(n+1)} \lambda_0^{-n}) / n + h^\circ \cos^2 \alpha^\circ (q_1 + q_2) \lambda_s \quad (2.1)$$

$$T_0 = 2/3 E h^\circ (\lambda_0^{n-1} - \lambda_s^{-n} \lambda_0^{-(n+1)}) / n + h^\circ \sin^2 \alpha^\circ (q_1 + q_2) \lambda_0$$

Для определения функции  $(q_1 + q_2)$  используется дополнительное уравнение

$$\lambda_s^2 \cos^2 \alpha^\circ + \lambda_0^2 \sin^2 \alpha^\circ = 1 \quad (2.2)$$

На фиг. 4 показана зависимость безразмерной вертикальной силы  $F^* = F / (E h^\circ H^\circ)$  от безразмерной осадки верхнего основания  $\Delta^* = \Delta / H^\circ$  для амортизатора с параметрами  $R^\circ / H^\circ = 0,875$ ,  $h^\circ / H^\circ = 0,216$ ,  $\varphi^\circ = 60^\circ$ , подверженного также внутреннему давлению  $p^* = p / E = 0,01$ . Сплошные линии отвечают амортизаторам с различным значением угла армирования  $\alpha^\circ$ , линия со светлыми точками — неармированному амортизатору. Отметим, что из-за наличия внутреннего давления вертикальная сила  $F$  не совпадает со сжимающей  $P$ .

При армировании малораствжимыми волокнами вводится коэффициент армирования  $k = 3 E_B S / (d^\circ h^\circ E)$ , характеризующий степень армирования оболочки. Здесь  $E$ ,  $E_B$  — модули Юнга материалов амортизатора и волокна,  $S$  — площадь поперечного сечения волокна и  $d^\circ$  — расстояние между волокнами.

В этом случае уравнения (1.2) и (1.3) сохраняют вид за исключением выражений для усилий  $T_s$ ,  $T_0$ , которые принимают вид:

$$T_s = 2/3 E h^\circ (\lambda_s^{n-1} - \lambda_s^{-(n+1)} \lambda_0^{-n}) / n + 1/3 k h^\circ \lambda_0^{-1} \cos^2 \alpha^\circ (\lambda_s^2 \cos^2 \alpha^\circ + \lambda_0^2 \sin^2 \alpha^\circ - 1)$$

$$T_0 = 2/3 E h^\circ (\lambda_0^{n-1} - \lambda_s^{-n} \lambda_0^{-(n+1)}) / n + 1/3 k h^\circ \lambda_s^{-1} \sin^2 \alpha^\circ (\lambda_s^2 \cos^2 \alpha^\circ + \lambda_0^2 \sin^2 \alpha^\circ - 1)$$

На фиг. 5 показано влияние величины коэффициента армирования на жесткостную характеристику для конического амортизатора с параметрами  $R^\circ / H^\circ = 0,875$ ,  $h^\circ / H^\circ = 0,216$ ,  $\varphi^\circ = 70^\circ$ ,  $\alpha^\circ = 45^\circ$ . Значение  $k = \infty$  отвечает нерастяжимым волокнам, а  $k = 0$  — их отсутствию.

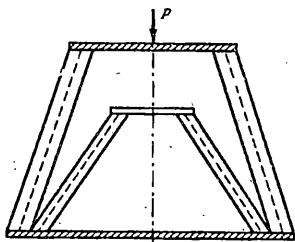
Из приведенных графиков видно, что армирование амортизатора позволяет управлять его жесткостными характеристиками. Отметим, что оно также позволяет обезопасить амортизатор от действия аварийных повышений внутреннего давления.

Изменение жесткостной характеристики амортизатора можно получить путем постановки пружины с нелинейной характеристикой, которая включается в работу в момент достижения максимальной точки диаграммы жесткости. Несложные расчеты показали, что для пружин с жесткостями, изменяющимися по закону  $c = a_0 \Delta^3 + a_1 \Delta^2 + a_2 \Delta + a_3$ , где  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  — числовые коэффициенты, а  $\Delta$  — осадка верхнего основания, можно получить характеристику с горизонтальным участком. Неустойчивый характер зависимости жесткости пружины от угла  $\varphi^\circ$  делает описанный путь практически неприемлемым.

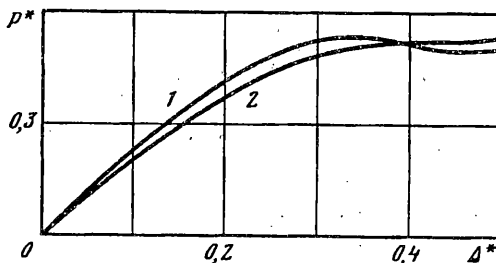
Наконец, можно предложить амортизатор, состоящий из двух конических оболочек (фиг. 6). Высота внутреннего конуса подбирается так, чтобы при сжатии осевой силой  $P$  он включался в работу в момент, когда сжимающая сила достигает своего максимального значения для внешнего конуса. При этом конструкция ужесточается, что дает возможность получить жесткостную характеристику, близкую к горизонтальной.

На фиг. 7 (кривая 1) показана жесткостная характеристика амортизатора со следующими параметрами: внешний конус —  $R^\circ / H^\circ = 0,2$ ;  $h^\circ / H^\circ = 0,12$ ;  $\varphi^\circ = 84^\circ$ ; для внутреннего конуса соответственно —  $0,3$ ;  $0,2$ ;  $74^\circ$ .

В этой конструкции можно также армировать один или оба конуса. Так на фиг. 7 (кривая 2) показана жесткостная характеристика для амортизатора с армированным нерастяжимыми волокнами внутренним конусом, при этом  $\alpha^\circ = 45^\circ$ ; для внешнего конуса —  $R^\circ / H^\circ = 0,2$ ;  $h^\circ / H^\circ = 0,14$ ;  $\varphi^\circ = 82^\circ$ , для внутреннего конуса соответственно —  $0,4$ ;  $0,2$ ;  $74^\circ$ .



Фиг. 6



Фиг. 7

Третий из рассматриваемых способов управления жесткостью характеристикой представляется наиболее эффективным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прасникова С. С. Статический расчет амортизатора вращения // Механика эластомеров. Краснодар: КПИ, 1980. С. 24—29.
2. Прасникова С. С. Смена типа жесткой характеристики тонкостенного конического резинового амортизатора сжатия // Теория и методы расчета нелинейных пластин и оболочек. Саратов: Изд-во СГУ, 1981. С. 49—50.
3. Reissner E. A. A note on two-dimensional finite — deformation theories of shells // Intern. J. Non-Linear Mech. 1982. V. 17. № 3. P. 217—221.
4. Черных К. Ф. Введение в анизотропную упругость. М.: Наука, 1988. 190 с.
5. Прасникова С. С. Осесимметричная деформация армированной оболочки // Численные методы в задачах математического моделирования. Л.: ЛИСИ, 1987. С. 73—77.

Санкт-Петербург

Поступила в редакцию  
16.II.1990