

УДК 62–26

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ РЕЗИНОВОГО СЛОЯ ДЕМПФЕРА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ

Егоров А.В.

ГОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, e-mail: oid@vlsu.ru

Проведен анализ результатов экспериментальных исследований жесткостных характеристик резинового слоя демпфера крутильных колебаний. Экспериментальным путем определены коэффициенты динамической жесткости резинового слоя при различных параметрах демпфера. Получена эмпирическая зависимость значения модуля упругости второго рода резины от относительной угловой деформации. Получена эмпирическая зависимость, позволяющая определять значение коэффициента жесткости резинового слоя при различной температуре.

**Ключевые слова:** резина, коэффициент жесткости, модуль упругости, демпфер крутильных колебаний

## DETERMINATION OF DYNAMIC STIFFNESS OF RUBBER LAYER OF INTERNAL FRICTION DAMPER

Egorov A.V.

Vladimir state university, Vladimir, Владимир, e-mail: oid@vlsu.ru

Results of experimental research of stiffness characteristics of damper's rubber layer are analyzed. Dynamic stiffness coefficients for different parameters of damper are determined experimentally. Empirical dependence of shear modulus on relative angular deformation is obtained. Empirical dependence, that makes it possible to determine value of stiffness coefficient of rubber for different temperatures, is derived.

**Keywords:** rubber, stiffness coefficient, elastic modulus, torsional vibration damper

При расчете параметров демпферов крутильных колебаний на стадии проектирования необходимо выбрать такой момент инерции маховика демпфера  $I_d$  и коэффициент динамической жесткости  $C_d$  упругого (резинового) слоя, чтобы обеспечить минимальные значения амплитуд колебаний на носке вала и касательных напряжений в узловом сечении коленчатого вала [1].

Целью данной работы являлось экспериментальное определение коэффициента динамической жесткости  $C_d$  при различных параметрах демпфера: моменте инерции маховика  $I_d$  и толщине резинового слоя  $h = r_1 - r_2$  ( $r_1$  и  $r_2$  – наружный и внутренний радиусы резинового слоя (рис. 1)). В исследованиях принималось, что ширина демпфера – постоянна ( $l = \text{const}$ ).

Значение статического коэффициента жесткости демпфера  $C_{ст}$  можно найти по формуле [2, 3, 4]:

$$C_{ст} = \frac{4\pi G_{ст} l r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}, \quad (1)$$

где  $G_{ст}$  – модуль упругости второго рода резинового слоя;  $l$  – ширина демпфера (рис. 1).

Известно, что для резины зависимость деформации от приложенной нагрузки – нелинейная [5]. Чем выше угловая деформация, тем больше нелинейность зависимости модуля упругости второго рода  $G = f(\varphi)$ .

В данной работе принимается, что модуль упругости второго рода  $G$  зависит только от относительной угловой деформации  $\gamma$ :

$$G = f(\gamma). \quad (2)$$

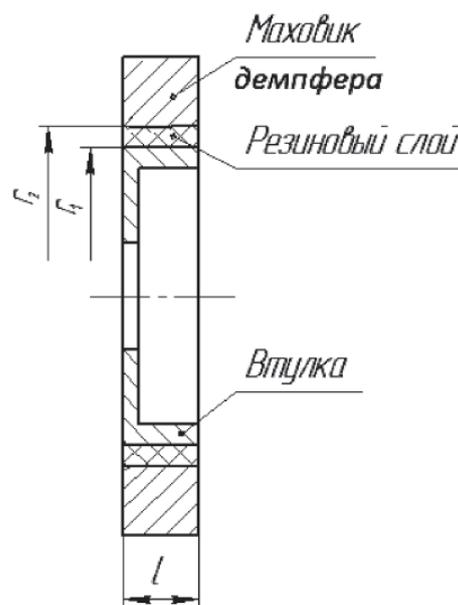


Рис. 1. Демпфер внутреннего трения

Для определения значения статического коэффициента жесткости  $C_{ст}$  демпфер нагружался только крутящим моментом  $M$  по двум направлениям – по и против часовой стрелки. При этом записывался угол закрутки  $\varphi$ . Результаты замеров приведены в табл. 1.

Относительная угловая деформация  $\gamma$ , касательное напряжение  $\tau$  и модуль упругости второго рода связаны отношением:

$$\tau = \gamma G. \quad (3)$$

**Таблица 1**

Результаты измерения жесткостных характеристик резинового слоя демпферов внутреннего трения при приложении статической нагрузки и температуре  $t = 24\text{ }^\circ\text{C}$

Толщина резинового слоя $h$ , мм	Среднее значение угла закрутки $\phi$ по результатам пятнадцати замеров, рад						
	при крутящем моменте $M$ , Н·м						
	0	50	100	150	200	250	300
6	0	0,00086	0,00162	0,00228	0,00297	0,00368	0,00438
8	0	0,00113	0,00225	0,00333	0,00421	0,00520	0,00624
10	0	0,00194	0,00300	0,00426	0,00550	0,00672	0,00796
12	0	0,00196	0,00355	0,00498	0,00656	0,00792	0,00943

Касательное напряжение  $\tau$  можно найти по формуле [2]:

$$\tau_{\max} = \frac{M}{2\pi l} \cdot \frac{1}{r_1^2} \quad (4)$$

При этом угол закрутки  $\phi$  определяется по формуле [2]:

$$\phi = \frac{M}{4\pi G l} \cdot \frac{r_2^2 - r_1^2}{r_1^2 r_2^2} \quad (5)$$

Подставляя значение из формулы (4) в (5) и решая относительно  $\tau$ , получим:

$$\tau_{\max} = G \cdot \frac{2\phi \cdot r_2^2}{(r_2^2 - r_1^2)} \quad (6)$$

Из равенств (3) и (6), значение относительной угловой деформации равно:

$$\gamma = \frac{2\phi \cdot r_2^2}{(r_2^2 - r_1^2)} \quad (7)$$

На рис. 2 показана зависимость среднего значения модуля упругости второго рода резинового слоя демпфера от относительной угловой деформации  $\gamma$ .

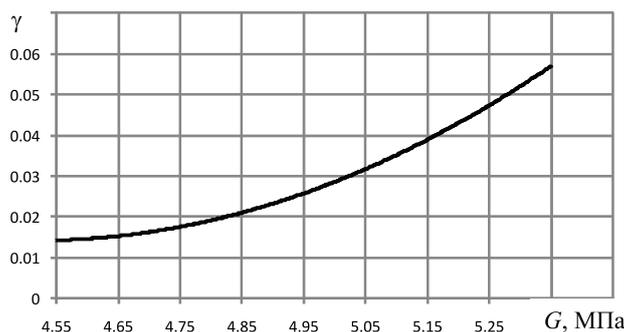


Рис. 2 Зависимость среднего значения модуля упругости второго рода резинового слоя демпфера от относительной угловой деформации  $\gamma$

После обработки данных экспериментальных исследований с помощью метода наименьших квадратов, была получена эмпирическая зависимость, позволяющая определить действительное значение модуля упругости  $G$  второго рода при различных значениях относительной угловой деформации  $\gamma$ :

$$G = 4,31 + 30,45\gamma - 225\gamma^2, \text{ МПа.} \quad (8)$$

В табл. 2 приведены результаты обработки данных статических испытаний.

Исходя из приведенных данных (см. табл. 2), погрешность расчета при использовании значения модуля упругости второго рода  $G$ , не зависящего от значения относительной угловой деформации  $\gamma$ , не превышает 5% только при  $\gamma < 0,03$ . Поэтому при значениях относительной угловой деформации выше 0,03 необходимо использовать зависимость (2).

При расчете демпфера крутильных колебаний внутреннего трения необходимо использовать динамический коэффициент жесткости  $C_d$ , который определяется по формуле [5]:

$$C_d = k \cdot C_{ст}, \quad (9)$$

согласно которой динамическая жесткость  $C_d$  равна произведению статической жесткости  $C_{ст}$  и параметра  $k$ , учитывающего влияние скорости деформации на модуль упругости.

Параметр  $k$  в общем случае должен представлять собой сложную зависимость, учитывающую режим деформации, вид каучука и ингредиентов резиновой смеси, режим вулканизации и другие факторы, трудно поддающиеся теоретическому анализу. Поэтому наиболее прямым и достоверным путем его установления является эксперимент.

Результаты обработки экспериментальных данных

γ по результатам расчета по формуле (7)	Касательное напряжение $\tau_{\max}$ , кПа			Погрешность, %
	по результатам расчета по формуле:		по результатам расчета по формуле (3) при $G$ , рассчитанном по формуле (8)	
	(3) при $G = \text{const}$	(4) при $G = \text{const}$		
0	0	0	0	0
0,012	57	55	58	1
0,024	113	110	115	2
0,034	170	172	187	10
0,044	226	227	253	12
0,053	283	285	326	15
0,062	339	342	397	17

Вместе с тем до настоящего времени практически отсутствуют данные о параметре  $k$ , позволяющие с достаточной для практики точностью определять динамический коэффициент жесткости  $C_d$ .

Для определения динамического коэффициента жесткости  $C_d$  проводился эксперимент, в ходе которого маховик демпфера предварительно закручивался под действием нагрузки. Затем нагрузка резко сбрасывалась.

После этого маховик демпфера начинал совершать свободные затухающие колебания на резиновом слое с жесткостью  $C_d$ .

Логарифмический декремент затухания  $\delta$  также определяется по записи колебаний по формуле [2]:

$$\delta = \ln \frac{\phi_{n+1}}{\phi_n} = \frac{\pi \xi_d}{I_d \omega}, \quad (10)$$

где  $\phi_n$  и  $\phi_{n+1}$  – амплитуды двух последующих колебаний соответственно,  $n$  – порядковый номер колебаний (рис. 3).

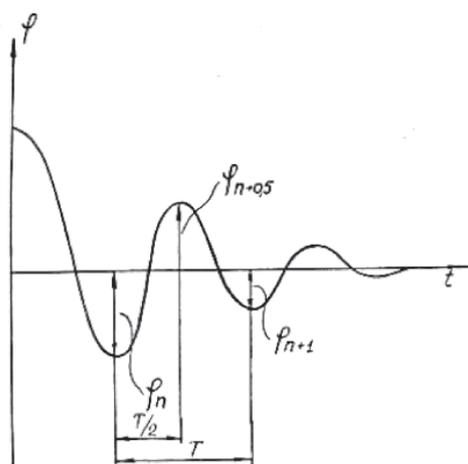


Рис. 3. Зависимость угла закрутки  $\phi$  маховика демпфера от времени при динамическом приложении нагрузки

При обработке данных динамических испытаний находилось среднее значение

логарифмического декремента затухания  $\delta$  по формуле:

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{\ln \frac{\phi_2}{\phi_1} + \ln \frac{\phi_3}{\phi_2} + \dots + \ln \frac{\phi_{n+1}}{\phi_n}}{n}. \quad (11)$$

Динамический коэффициент жесткости  $C_d$  определяется по формуле [2]:

$$C_d = I_d \omega_d^2 \left[ 1 + \left( \frac{\delta}{2\pi} \right)^2 \right]. \quad (12)$$

Частота  $\omega_d$  затухающих колебаний маховика демпфера  $\omega_d = 2\pi/T$ , где  $T$  – период одного колебания, который вычисляется по записи колебаний на осциллограмме (рис. 3).

В табл. 3 приведены результаты обработки данных статических и динамических испытаний.

По результатам обработки экспериментальных данных (см. табл. 3), среднее значение коэффициента  $k$ , учитывающего влияние скорости деформации на модуль упругости, равно 2,3.

При работе двигателя демпфер нагревается до температуры  $t = 50 \dots 60$  °С [3]. При этом коэффициент жесткости резинового демпфирующего элемента меняется. Поэтому для определения статического коэффициента жесткости при изменении температуры  $C_{\text{ст}(t)}$  предлагается зависимость:

$$C_{\text{ст}(t)} = \alpha \cdot C_{\text{ст}}, \quad (13)$$

где  $C_{\text{ст}}$  – коэффициент статической жесткости, полученный по зависимости (2);  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий изменения коэффициента жесткости в зависимости от температуры  $t$ .

Для определения зависимости коэффициента жесткости демпфирующего элемента от температуры демпфера проводились испытания на безмоторном стенде при температурах демпфера – 10...60 °С. На рис. 4 приведены графики изменения статического коэффициента жесткости  $C_{\text{ст}}$  от температуры  $t$ .

Таблица 3

Результаты обработки экспериментальных данных

Номер образца	Момент инерции маховика $I_D$ , кг·м <sup>2</sup>	Толщина резинового слоя $h$ , м	Коэффициент жесткости по результатам испытаний $C \cdot 10^{-4}$ , Н/м при температуре 24 °С		$\delta$	$\omega_d$ , с <sup>-1</sup>	$k$
			статических $C_{ст}$	динамических $C_d$			
1	0,125	0,006	5,2	10,0	0,92	698	1,9
2	0,132	0,006	5,2	10,5	0,70	679	2,0
3	0,145	0,006	5,2	11,5	0,62	648	2,2
4	0,125	0,008	3,7	7,4	0,85	591	2,0
5	0,132	0,008	3,7	7,7	0,67	575	2,1
6	0,145	0,008	3,7	8,5	0,61	549	2,3
7	0,125	0,010	2,8	7,4	0,85	516	2,6
8	0,132	0,010	2,8	7,7	0,65	502	2,8
9	0,145	0,010	2,8	6,4	0,56	479	2,3
10	0,125	0,012	2,2	5,6	0,82	460	2,5
11	0,132	0,012	2,2	5,9	0,64	448	2,7
12	0,145	0,012	2,2	5,1	0,55	427	2,3

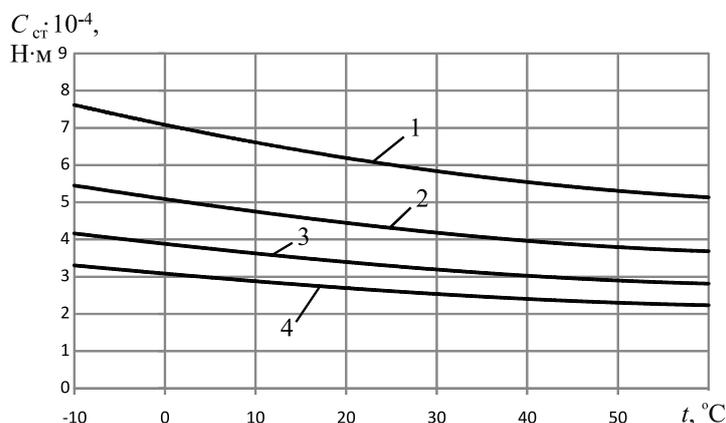


Рис. 4. Зависимость коэффициента жесткости резинового демпфирующего элемента  $C_{ст}$  от температуры  $t$  при толщинах резинового слоя:  $1 - h = 6$  мм;  $2 - h = 8$  мм;  $3 - h = 10$  мм;  $4 - h = 12$  мм

После обработки данных экспериментальных исследований с помощью метода наименьших квадратов, была получена эмпирическая зависимость, позволяющая определить действительное значение коэффициента  $\alpha$  при изменении температуры:

$$\alpha = 1,16 - 0,01 \cdot t + 4,70 \cdot t^2. \quad (14)$$

**Список литературы**

1. Егоров А.В. Выбор параметров демпферов крутильных колебаний внутреннего трения // *Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей*: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф.; под ред. А.Н. Гоца. Владим. гос. ун-т. – Владимир, 2010. – С. 154–157.  
 2. Гоц А.Н. Крутильные колебания коленчатых валов автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. – 200 с.  
 3. Гоц А.Н., Дрозденко В.Ф. Расчет параметров демпферов внутреннего трения // *Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей*: материалы VII Междунар. науч.-практ. семинара; под ред. В.В. Эфроса, А.Н. Гоца, А.А. Гаврилова. – Владимир, 2005. – С. 49–50. – ISBN 5-86953-146-2.

4. Гоц А.Н. Методика расчета демпфера крутильных колебаний внутреннего трения // *Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС*: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф.; под ред. В.В. Эфроса, А.Н. Гоца. – Владимир, 2001. – С. 116–120.  
 5. Истомин П.А. Крутильные колебания в судовых ДВС // *Судостроение*. – Ленинград, 1968.

**Рецензенты:**

Кульчицкий А.Р., д.т.н., профессор, зам. главного конструктора по испытаниям ООО «Владимирский моторно-тракторный завод» г. Владимир;

Гоц А.Н., д.т.н., профессор кафедры тепловых двигателей и энергетических установок Владимирского государственного университета им. А. Г. и Н. Г. Столетовых Министерства образования и науки, г. Владимир.

Работа поступила в редакцию 30.06.2011.