

И. Д. ЭСКИН

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФЕРОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ В ВИДЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПАКЕТОВ, С СУХИМ ТРЕНИЕМ НА КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Задача о поперечном изгибе циклической силой многослойных пакетов, сжатых равномерно распределенной нагрузкой, решена в работе [1]. Поперечный изгиб этих пакетов под действием циклической и постоянной сил рассмотрен в [2], где доказана независимость демпфирующих и жесткостных характеристик пакетов от действия постоянной силы.

В статье «Демпфирующие свойства...»\* проведено расчетное исследование демпфирующих свойств пакетов и показана целесообразность применения их в качестве демпфирующих устройств. Там же указаны области применения и положительные качества многослойных пакетов. В [3] получены простые приближенные соотношения, описывающие демпфирующие характеристики многослойных пакетов, и приближенные зависимости, необходимые для решения задачи о колебаниях систем с демпферами, выполненными в виде многослойных пакетов.

Для случая полного расслоения пакетов в процессе циклического деформирования получено [3]:

$$\Delta W = \frac{12T}{C_{1n} A_5} \cdot \left[ A_1 P - \frac{2}{3} T \frac{A_4}{A_5} (A_1 A_2 + A_3) \right]; \quad (1)$$

$$\psi = \frac{24 \left[ A_1 \eta - \frac{2}{3} (A_1 A_2 + A_3) \right]}{\eta (A_4 \eta - A_5)}; \quad (2)$$

$$C = C_{1n} + \frac{T}{V}. \quad (3)$$

\* И. Д. Эскин. Демпфирующие свойства многослойных пакетов. Наст. сб. стр. 55.

$$\phi = \frac{24T \left[ A_1 (VC_{1n} + T) - \frac{2}{3} T \frac{A_4}{A_5} (A_1 A_2 + A_3) \right]}{A_5 V \cdot C_{1n} (C_{1n} V + T)}, \quad (4)$$

где  $\Delta W$  — рассеянная циклическая энергия пакета,

$T$  — обобщенная сила трения,

$C_{1n}$  — жесткость полностью расслоенного пакета,

$P$  — амплитудное значение циклической силы  $\alpha P$  ( $-1 \leq \alpha \leq 1$ ),

$A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$  — коэффициенты, зависящие только от числа про-

кладок  $n$  и относительной толщины накладки  $k = 2 \frac{h_n^*}{h}$ ,

$h_n$  — толщина накладки,

$h$  — толщина прокладки,

$\phi$  — коэффициент поглощения многослойного пакета.

$\eta$  — относительная амплитуда силы, равная

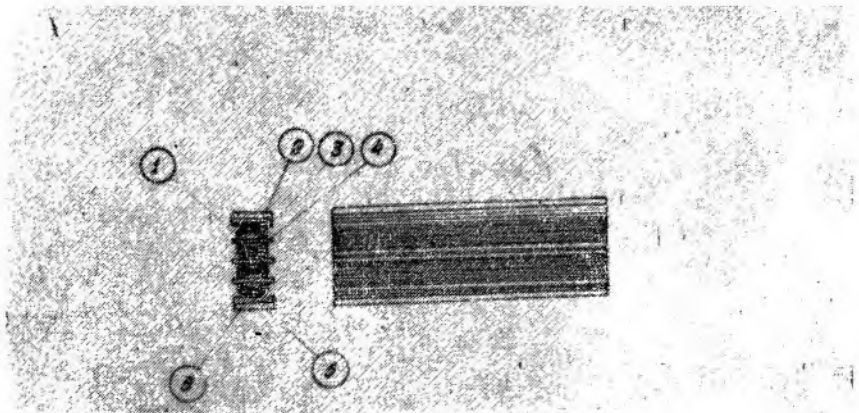
$$\eta = \frac{P}{T} \frac{A_5}{A_4} \quad (5)$$

$V$  — амплитудное значение прогиба,

$C = \frac{P}{V}$  — средняя жесткость за цикл.

Соотношения (1) — (5) справедливы при изгибе циклической силой либо циклической и постоянной силами многослойных пакетов, сжатых равномерно распределенной нагрузкой с граничными условиями, встречающимися в большинстве случаев (заделка, шарнирное опирание, упруго-подвижная заделка, упругая заделка с некоторой угловой податливостью  $\beta$ ).

В настоящей работе экспериментально исследована возможность использования приближенных соотношений (1) — (5) для оп-



Фиг. 1.

\* См. стр. 67–70 наст. сб.

Таблица 1

№ эксп.	$n$	$k$	$h$ [с.м.]	$h_H$ [с.м.]	$h_0$ [с.м.]	$b$ [с.м.]	$l$ [с.м.]	$l_n$ [с.м.]	$\bar{h}^*$ [с.м.]	$t$ [с.м.]	Материал ленты	Компо- новка	Состояние контактн. поверхностей	$v$ [с.м.]
1	25	12,5	0,04	0,25	1,5	1,9	3,5	10,4	0,09 (мелкие профили)	—	65Г термообр.	$\overline{4171}$ $\overline{4261}$ $\overline{4351}$ $\overline{2821}$	Не смазаны	0,015; 0,02; 0,03
2	25	12,5	0,04	0,25	1,5	1,9	3,5	10,4	0,13 (глубокие профили)	—	65Г термообр.	$\overline{2170}$ $\overline{12181}$ $\overline{13171}$ $\overline{14161}$ $\overline{33151}$	Не смазаны	0,015; 0,02; 0,03
3	25	5	0,04	0,1	1,2	1,9	3	10,4	0,13	—	65Г термообр.	$\overline{12181}$ $\overline{13171}$ $\overline{14161}$ $\overline{34141}$ $\overline{12131}$	Не смазаны	0,015; 0,02; 0,03
4	49	2	0,02	0,02	1,02	1,8	0,8	6,5	0,14	1,9	60С2А термообр.	$\overline{6191}$ $\overline{10151}$ $\overline{15101}$ $\overline{2051}$	Не смазаны	0,015; 0,02; 0,03

5	25	12,5	0,04	0,25	1,5	1,9	3,55	10,4	0,09	—	65Г термообр.	481 4171 4261 4351 3631 2821 11011	Не смазаны	0,01; 0,02
6	25	12,5	0,04	0,25	1,5	1,9	3,5	10,4	0,13	—	65Г термообр.	12181 13171 33151	Смазаны тех. вазелином	0,015; 0,02; 0,03
7	49	2	0,02	0,02	1,02	1,8	0,8	6,5	0,14	1,9	60С2А термообр.	6191 10151 15101	Смазаны тех. вазелином	0,015; 0,02; 0,03
8	69	2	0,02	0,02	1,42	1,8	0,8	6,5	0,14	1,9	60С2А термообр.	10241 15191	Смазаны тех. вазелином	0,015; 0,02; 0,03

ределения демпфирующих и жесткостных характеристик реальных демпферов [4], выполненных в виде многослойных пакетов, набранных из нечетного числа  $n$  одинаковых прокладок и двух одинаковых накладок. Демпфера сжаты нагрузкой, распределенной по длине и локальной нагрузкой в месте приложения силы и опор пакета.

Распределенная сдвливающая нагрузка создана за счет выпрямления в собранном демпфере групп лент 1 и 2 (фиг. 1), набранных из лент 3, поперечное сечение которых выгнуто по радиусу. Между этими группами проложены плоские ленты 4, исключающие возможность заклинивания лент при выпрямлении.

Величина сдвливающей нагрузки между слоями пакета определяется величиной упругих сил лент двух групп 1. Две группы 2 совместно с плоскими лентами 5 и накладками 6 обеспечивают полное выпрямление лент 3 в собранном пакете.

Ленты группы 2 обращены впадинами к впадинам лент группы 1. При выпрямлении лент в собранном демпфере упругие силы лент групп 2 направлены против упругих сил лент групп 1. Поэтому с помощью групп 2 можно достигнуть полного выпрямления лент в собранном пакете с более тонкими накладками 6 или вообще без накладок только лентами групп 2 и лентами групп 5.

Более тонкие накладки или их отсутствие обеспечивают пакету при тех же сдвливающих нагрузках, изгибающих силах и прогибах меньшие максимальные напряжения и более высокие коэффициенты рассеивания. Для создания сдвливающей нагрузки у более тонких лент с толщиной  $h=0,03$  см, а также у кривых пакетов применяются гофрированные ленты.

В этом случае (фиг. 2) распределенная сдвливающая нагрузка создана за счет выпрямления двух групп 1 гофрированных лент 2, между которыми положена плоская лента 3. Для удобства выпрямления вершины гофров одной группы 1 опираются на вершины другой. На группы 2 установлены плоские ленты 4, содействующие полному выпрямлению лент в собранном пакете.

Основные цели настоящего экспериментального исследования следующие:

Экспериментальная проверка справедливости приближенных соотношений (1) — (5) для вышеописанных демпферов.

Исследование влияния на демпфирующие и жесткостные свойства граничных условий демпфера и приложения постоянной силы.

Определение наибольших величин коэффициента рассеивания, которые можно получить у демпфирующих элементов со смазанными контактными поверхностями в рабочем диапазоне прогибов и изгибающих сил.

Определение возможного диапазона изменения демпфирующих и жесткостных свойств элементов без изменения числа пластин и габаритных размеров пакета.

Доказательство справедливости соотношения (1) — (5) позволит использовать соотношение работы [3] для расчета конструкций реальных демпферов и обеспечит расчет колебаний различных динамических систем с демпферами исследуемого типа, на основе данных, полученных в статическом эксперименте, — жесткости расслоенного пакета  $C_{1n}$  и обобщенной силы трения пакета  $T$

Следовательно, для реальных конструкций демпферов с конструкционным демпфированием снятие упруго-гистерезисной петли явилось бы основой всех дальнейших динамических исследований системы — расчетных и экспериментальных, т. к. величины  $C_{1n}$  и  $T$  почти во всех случаях могут быть определены только экспериментально.

Известно, что экспериментальное исследование демпфирующих свойств систем с конструкционным демпфированием отличается некоторыми специфическими трудностями, связанными с невозможностью определения коэффициента трения обычными прямыми методами. В системах с конструкционным демпфированием принято, что силы трения определяются законом Кулона — Амонтона

$$F = fN, \quad (a)$$

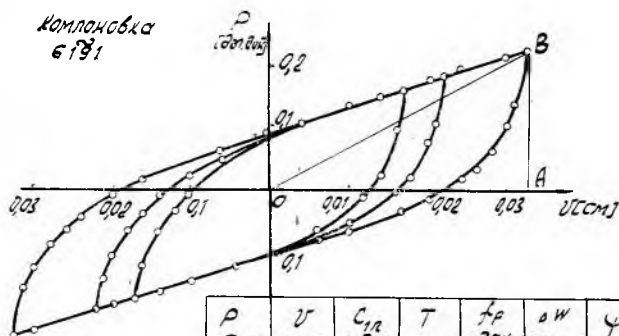
где  $F$  — сила трения,  $f$  — коэффициент трения скольжения,  $N$  — нормальная сила.

Но для этих систем коэффициент трения  $f$  в формуле (а) должен определяться как некоторая средняя величина между значениями коэффициента трения скольжения при движении и при покое, постоянная в течение цикла.

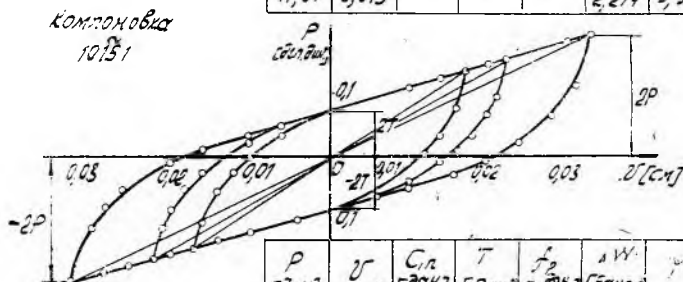
Следовательно, обычные методы экспериментального определения коэффициента трения скольжения при движении или при трогании здесь не подходят. Поэтому для системы с конструкционным демпфированием предложено экспериментально определять обобщенную силу трения системы [5].

Для исследуемых многослойных пакетов величина обобщенной силы трения  $T$  на графике упруго-гистерезисной петли пакета (фиг. 3) определяется отрезком, отсекаемым на оси ординат прямой процесса нагружения полностью расслоенного пакета.

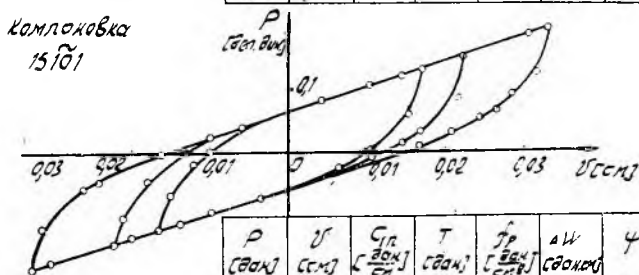
Другой особенностью реальных систем является то, что в них обычно применяются «короткие» многослойные демпфирующие элементы, на демпфирующие и жесткостные свойства которых сильно влияют граничные условия пакетов, заключающиеся в том, что в зонах у опор пакеты сжаты дополнительной сдвливающей на-



$p$ [гбар]	$U$ [см/с]	$C_{p, \alpha}$ [ $\frac{гбар}{см}$ ]	$T$ [гбар]	$f_p$ [ $\frac{гбар}{см}$ ]	$\Delta W$ [гбар/с]	$\psi$
98,98	0,03	1823	43,41	24,36	4,975	3,35
79,88	0,02				3,057	3,83
71,64	0,015				2,214	3,94



$p$ [гбар]	$U$ [см/с]	$C_{p, \alpha}$ [ $\frac{гбар}{см}$ ]	$T$ [гбар]	$f_p$ [ $\frac{гбар}{см}$ ]	$\Delta W$ [гбар/с]	$\psi$
87,92	0,03	1754	35,16	19,74	4,159	3,15
70,23	0,02				2,553	3,65
62,30	0,015				1,824	3,90

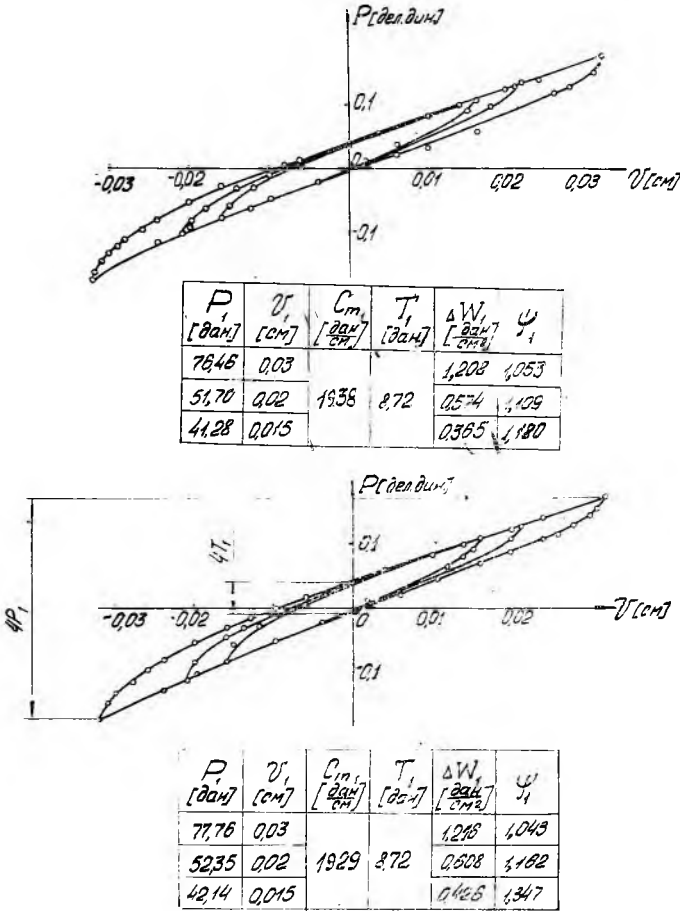


$p$ [гбар]	$U$ [см/с]	$C_{p, \alpha}$ [ $\frac{гбар}{см}$ ]	$T$ [гбар]	$f_p$ [ $\frac{гбар}{см}$ ]	$\Delta W$ [гбар/с]	$\psi$
83,78	0,03	1759	26,05	14,62	3,082	2,45
64,90	0,02				1,952	3,01
56,00	0,015				1,581	3,29

Фиг. 3. Эксперимент № 7  $n = 49$ ;  $k = 2$ .

грузкой, действительная величина и распределение которой в пролетах пакета не известны.

Для учета этого влияния наше исследование проводилось на «коротких» пакетах с соотношением  $0,563 \leq \frac{l}{h_0} \leq 2,333$  (здесь  $l$  — длина пролетов пакета,  $h_0$  — толщина пакета).



Фиг. 4. Эксперимент № 7  $n = 49$ ;  $k = 2$ . Пакет прямых пластин.

Так как действительное распределение сдавливающей нагрузки, созданной за счет выпрямления лент, также не известно, в исследовании было принято, что вся сдавливающая пакет нагрузка распределена в пролетах равномерно, и в данном случае многослойный пакет сжат равномерно распределенной сдавливающей нагрузкой интенсивности  $p = p_1 + p_2$ , где  $p_1$  — интенсивность дополнительной сдавливающей нагрузки,  $p_2$  — интенсивность сдавливающей нагрузки, созданной упругими силами выпрямленных лент.



Исследуемые демпфирующие элементы могут рассматриваться как два одинаковых многослойных стержня с длиной пролета  $l$ , с одним заделанным концом и другим подвижным с некоторой угловой податливостью  $\beta$ , нагруженные каждый силой  $\alpha P$ , приложенной к подвижному концу.

Отметим, что к такой схеме можно привести абсолютное большинство реальных конструкций демпферов, т. к. жесткая заделка концов пакета почти не встречается на практике.

Доказательство справедливости соотношений (1)–(4) в данном случае одновременно покажет справедливость этих соотношений и в случае жесткой заделки и шарнирного опирания концов пакета, т. к. эти соотношения последние случаи описывают с большей точностью [1], [3].

Пластины пакетов изготовлены из термообработанной ленты сталей марок 65Г и 60С2А. Модуль упругости в расчетах принимался равным  $E=2,06 \cdot 10^6$  дан/см<sup>2</sup>. Чистота контактных поверхностей пакета была не ниже  $\nabla 7$ . Упруго-гистерезисная петля самой установки была незначительной и энергией, рассеиваемой установкой, пренебрегли. Податливость в направлении действия циклической силы опорной стойки, на которой закреплялся пакет, учитывалась при проведении эксперимента и обработке результатов. Так, указанные на фиг. 3 прогибы соответствуют собственным прогибам пакета, равным:  $V=0,015; 0,02; 0,03$  см. Экспериментальное значение рассеянной циклической энергии подсчитывалось по формуле

$$\Delta W_{\varepsilon} = \frac{1}{2} P_{\varepsilon} V_{\varepsilon} \phi_{\varepsilon}, \quad (6)$$

где экспериментальное значение коэффициента рассеивания

$$\phi_{\varepsilon} = \frac{S_n}{S_1} \quad (7)$$

и  $S_n$  — площадь упруго-гистерезисной петли,

$S_1$  — площадь  $\Delta$  АОВ (см. фиг. 3).

$V_{\varepsilon}$  — собственный прогиб пакета.

Были экспериментально исследованы многослойные пакеты без смазки и со смазкой контактных поверхностей техническим вазелином. При экспериментировании без смазки контактные поверхности пакета перед каждым экспериментом тщательно обезжиривались.

В каждом эксперименте снималась петля с различных компонентов демпфирующего элемента и петля такого же пакета, набранного из того же числа плоских лент и сжатого одной дополнительной нагрузкой в зоне опор пакета. Следовательно, в каждом эксперименте измерялись рассеянные циклические энергии демпфирующего элемента  $\Delta W_{\varepsilon}$  и пакета  $\Delta W_{1\varepsilon}$ , обобщенные силы трения  $T_{\varepsilon}$  и  $T_{1\varepsilon}$ , жесткости полностью расслоенного демпфирующего элемента и пакета  $C_{1п\varepsilon}$ ,  $C'_{1п\varepsilon}$ , амплитудные значения прогибов  $V_{\varepsilon} = V_{1\varepsilon}$  и циклических сил, действующих на испытуемый элемент и пакет  $P_{\varepsilon}$ ,  $P_{1\varepsilon}$ .

В таблице 1 приведены параметры и характеристики исследуемых демпфирующих элементов. Здесь  $b$  — ширина пакета,  $l_n$  — длина пакета,  $\bar{h}^*$  — стрела прогиба профиля или гофра,  $t$  — шаг гофра.

Маркировка компонок пакета, изображенного на фиг. 1, следующая: первое число — число плоских лент, второе — число лент в группе 2, дуга сверху цифры указывает, как расположены спинки лент относительно центра пакета, третье — число плоских лент, установленных между группами 2 и 1, пятое — число плоских лент, установленных в центре пакета. Маркируется только верхняя половина пакета, т. к. расположение лент в нем симметрично относительно центральной плоской ленты.

Маркировка компонок с гофрированными лентами следующая: первое число — число плоских лент 4, второе — число гофрированных лент в группе 1, третье — число плоских лент 3.

Экспериментальные коэффициенты рассеивания и циклическая энергия рассеивания определялись из соотношений (6) и (7). Относительная амплитуда силы подсчитывалась из соотношения (5), теоретическое значение  $\Delta W$  — из соотношений (1) при  $T=T_0$  и  $C_{1лз}=C_{1лв}$ . Теоретическое значение коэффициента рассеивания подсчитывалось из (2).

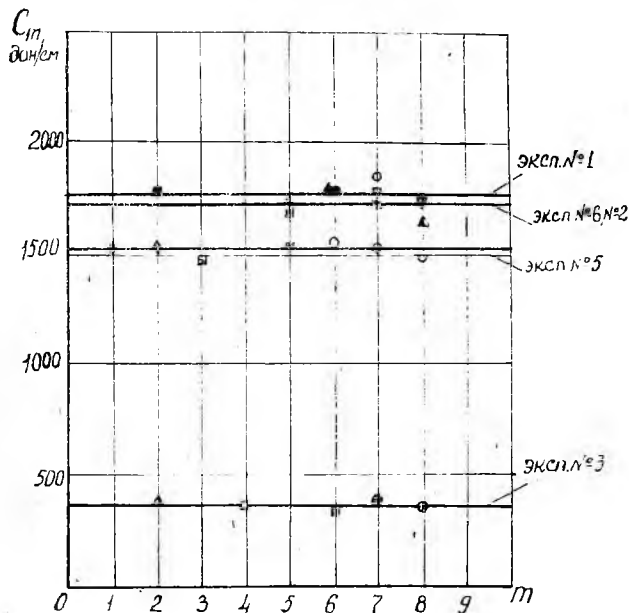
Справедливость основных допущений и теоретического решения задачи, полученного в [3] для исследуемых демпфирующих элементов, доказывается следующими экспериментальными фактами:

форма семейства петель, снятых с различных компонок демпфирующих элементов, всегда хорошо совпадает с теоретической (см. фиг. 3). У всех петель семейства процесс нагрузки (разгрузки) полностью расслоенного пакета совпадает с соответствующим участком этого процесса у петли, описывающей данное семейство петель, и имеется только один центр симметрии, общий для всех петель семейства;

жесткость полностью расслоенного пакета  $C_{1лз}$  можно считать постоянной для различных компонок демпфирующего элемента со смазанными и не смазанными контактными поверхностями и одинаковой с жесткостью полностью расслоенного пакета  $C_{1лв}$  набранного из такого же числа, таких же, но только плоских лент и имеющего с демпфирующим элементом одинаковые габаритные размеры, длины пролетов, граничные условия и те же накладки (фиг. 3, 4, 5, 6);

хорошее совпадение теоретических и экспериментальных значений величин  $\Delta W_0$  и  $\Delta W$ ,  $\psi_0$  и  $\psi$  (фиг. 7, 8, 9). Наибольшая ошибка получается при определении циклической рассеянной энергии и достигает 20%.

Бóльшие отклонения величины  $\psi$  наблюдаются в зоне больших значений коэффициента рассеивания. Это объясняется тем, что в зоне больших  $\psi$  доля деформации, соответствующая процессу постепенного расслоения пакета, относительно велика в общем прогибе пакета. А в процессе расслоения пакет является «корот-



Фиг. 5.

Пакеты без смазки

Эксперимент № 1  
 $n=25; k=12,5$ .  
 Мелкие профили  
 Компоновки

4171 — ○  
 4251 — ●  
 4351 — □  
 2821 — ■

Эксперимент № 2  
 $n=25; k=12,5$ .  
 Глубокие профили  
 Компоновки

2101 — △  
 12181 — ▲  
 13171 — ▽  
 14161 — ▼  
 33151 — ×

Эксперимент № 3  
 $n=25; k=5$ .  
 Глубокие профили  
 Компоновки

12181 — ○  
 13171 — ●  
 14161 — □  
 34141 — ■  
 72121 — △

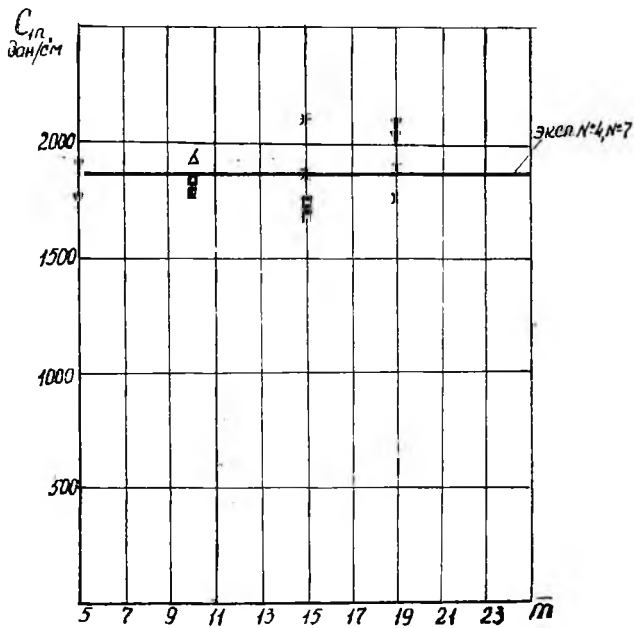
Эксперимент № 5  
 $n=25; k=12,5$ .  
 Мелкие профили  
 Компоновки

481 — ⊗  
 4171 — ⊕  
 4252 — ⊙  
 4351 — ⊠  
 3631 — ⊡  
 2821 — ◆  
 11011 — ◇

Эксперимент № 6  
 $n=25; k=12,5$ .  
 Глубокие профили  
 Компоновки

12181 — ▽  
 13171 — \*  
 33151 — △

Пакеты со смазкой  
 техническим вазелином



Фиг. 6.

Пакеты без смазки

Пакеты со смазкой  
техническим вазелином

Эксперимент  
№ 4  
Гофрированные  
профили  
Компоновки

Эксперимент № 7  
 $n=49$ ;  $\kappa=2$ .  
Гофрированные  
профили  
Компоновки

6191 — ▽

6191 — X

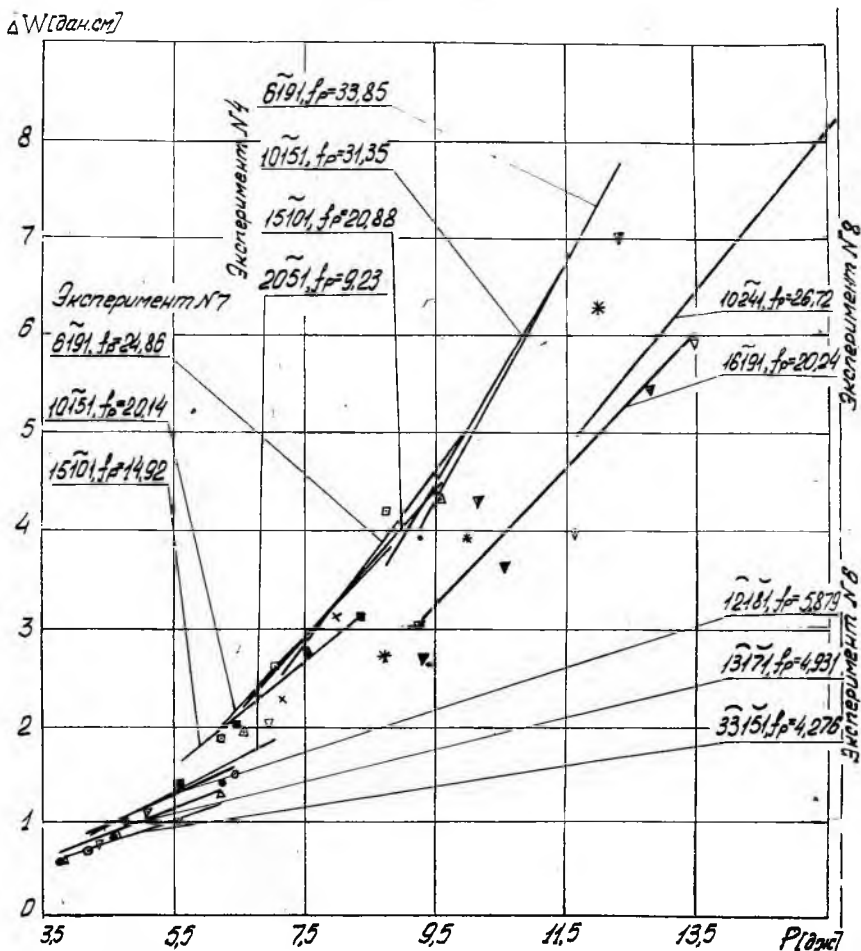
10151 — \*

10151 — □

15101 — △

15101 — ■

2051 — ▽



Фиг. 7.

Пакеты без смазки

Пакеты со смазкой  
техническим вазелином

Эксперимент № 4  
 $n=49$ ;  $\kappa=2$ .  
Гофрированные  
профили  
Компоновки

Эксперимент № 6  
 $n=25$ ;  $\kappa=12,5$   
Глубокие профили  
Компоновки

Эксперимент  
№ 7  
 $n=49$ ;  $\kappa=2$ .  
Гофрированные  
профили  
Компоновки

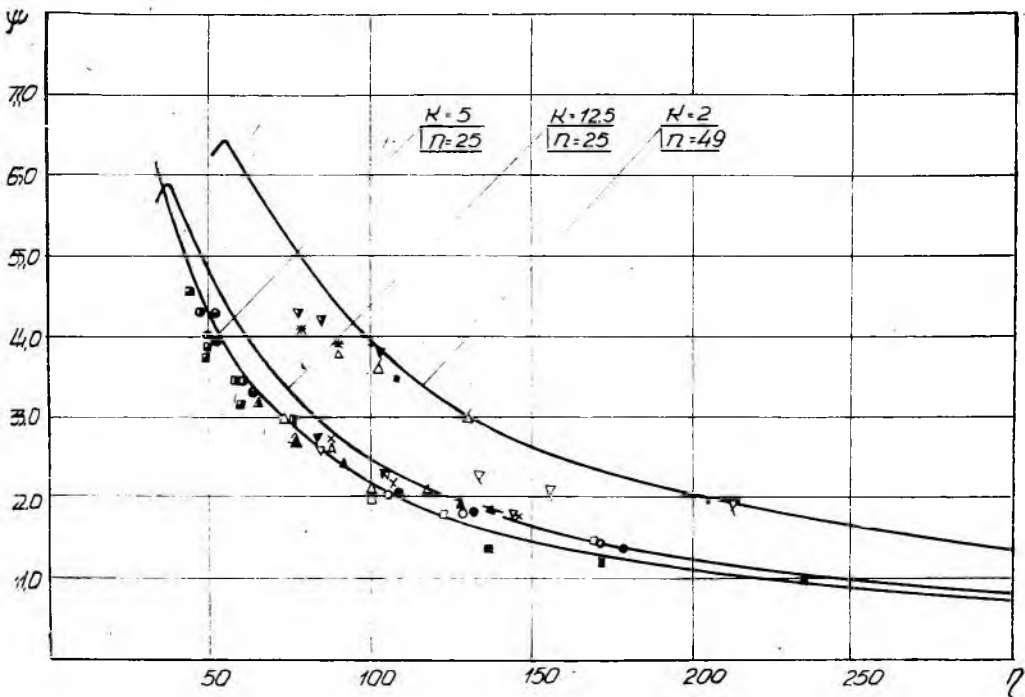
Эксперимент № 8  
 $n=69$ ;  $\kappa=2$ .  
Гофрированные  
профили  
Компоновки

6191 — ▽  
10151 — \*  
15101 — △  
2051 — ▽

12181 — ○  
13171 — ●  
33151 — △

6191 — ×  
10151 — □  
15101 — ■

10241 — ▽  
16191 — ▽



Фиг. 8.

Пакеты без смазки

Эксперимент  
№ 1  
 $n=25$ ;  $\kappa=12,5$   
Мелкие профили  
Компоновки

4171 — ○  
4262 — ●  
3351 — □  
2821 — ■

Эксперимент  
№ 2  
 $n=25$ ;  $\kappa=12,5$   
Глубокие профили  
Компоновки

2101 — △  
12181 — ▲  
13171 — ▽  
14151 — ▼  
33151 — ×

Эксперимент  
№ 3  
 $n=25$ ;  $\kappa=5$   
Глубокие профили  
Компоновки

12181 — ●  
13171 — ●  
14151 — ▣  
34141 — ■  
72121 — ▲

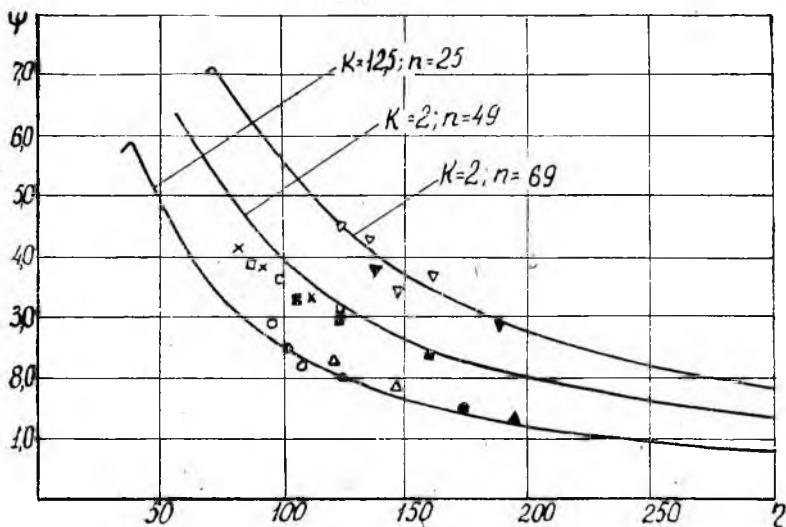
Эксперимент  
№ 4  
 $n=49$ ;  $\kappa=2$   
Гофрированные профили  
Компоновки

6191 — ▽  
10151 — \*  
15101 — △  
2051 — ▽

ким» стержнем и поэтому приближенное соотношение (2) в этой зоне дает большую ошибку.

Для проверки совпадения теоретических и экспериментальных значений прогиба и обобщенной силы трения полагалось, что  $\Delta W_9 = \Delta W$ . Из соотношения (1) определялась обобщенная сила трения  $T$  и сравнивалась с экспериментальным значением  $T_3$ ; затем из соотношения

$$V = \frac{1}{C_{\text{лнэ}}} (P_3 - T) \quad (8)$$



Фиг. 9.

Пакет со смазкой техническим вазелином

Эксперимент № 6  
 $n=25$ ;  $k=12,5$   
 Глубокие профили  
 Компоновки

Эксперимент № 7  
 $n=49$ ;  $k=2$   
 Гофрированные профили  
 Компоновки

Эксперимент № 8  
 $n=69$ ;  $k=2$   
 Гофрированные профили  
 Компоновки

12151 — ○

13171 — ●

33181 — △

6191 — ×

10151 — □

15101 — ■

10241 — ▽

15191 — ▾

определялся теоретический прогиб. Отклонение этих величин от экспериментальных лежало в пределах 3-:-20%.

Во всех экспериментах величина рассеянной циклической энергии  $\Delta W_{13}$  составляла 24÷37% рассеянной циклической энергии  $\Delta W_9^*$ .

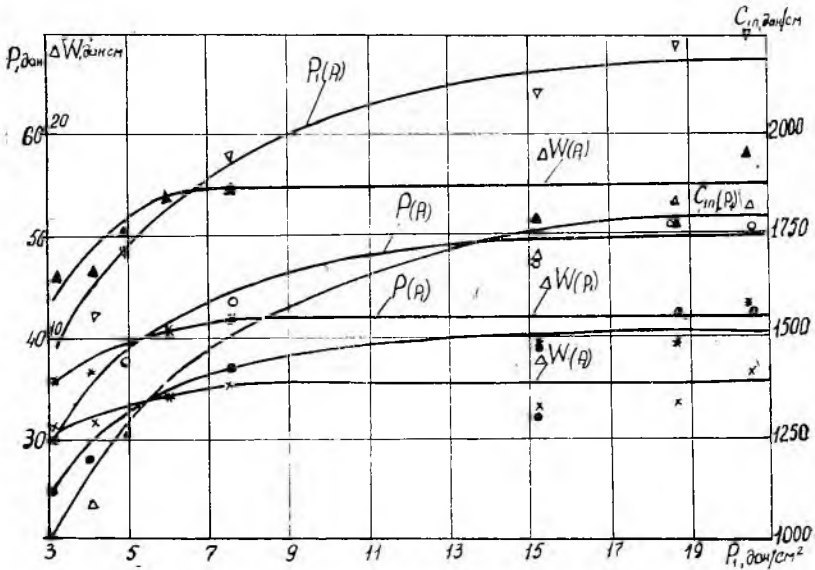
\* Здесь  $\Delta W_{13}$  — рассеянная энергия пакета при  $V = 0,03$  см.

$\Delta W_9$  — наибольшая рассеянная энергия демпфирующего элемента при  $V = 0,03$  см. Меньшая цифра 24% получена в экспериментах 4, 7 и 8.

Экспериментально была установлена линейность функций

$$\Delta W_{13}(V_3) \text{ и } P_{13}(V_3).$$

Влияние усилия затяжки  $F_3$  болтов опор демпфера на демпфирующие и жесткостные характеристики демпфирующих элементов и пакетов, набранных из плоских пластин, исследовались на компоновках: 12181 с глубокими профилями без смазки и 6191 без смазки и со смазкой техническим вазелином, а также на соответ-



Фиг. 10.

Пакет без смазки

$l=3,5 \text{ см}; b=1,9 \text{ см};$

Компоновка 12181

$h=0,04 \text{ см};$

$n=25; \kappa=12,5;$

$W(P)$   
 $\blacktriangle - U = 0,03$   
 $* - U = 0,02$   
 $\times - U = 0,015$

$P(P)$   
 $\nabla - U = 0,03$   
 $\circ - U = 0,02$   
 $\bullet - U = 0,015$

$C_{dyn}(P)$   
 $\Delta - \begin{cases} U = 0,03 \\ U = 0,02 \\ U = 0,015 \end{cases}$

ствующих пакетах плоских пластин без смазки при  $V = \text{const}$  ( $V=0,015; 0,02; 0,03 \text{ см}$ ).

Величина амплитуды действующей силы достигала  $P_3 = 122 \text{ дан.}$  (компоновка 6191 без смазки). Наибольшее напряжение в демпфирующем элементе, определенное из соотношения

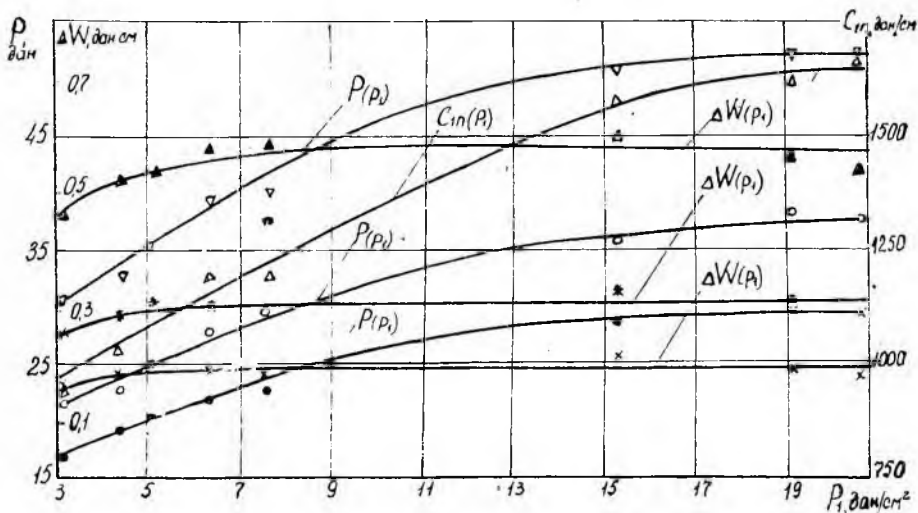
$$\sigma_{н} = \frac{4l}{bh^2} \frac{(C_{1пэ} + 2C_{1пк})}{C_{1пэ}} \left( A_6 P_3 - \frac{A_7 A_4}{A_5} T_3 \right), \quad (9)$$



где  $C_{1пк} = \frac{3EI(k^3 + 4n)}{4l^3}$  — жесткость многослойной консоли [4] при полном ее расслоении,

$I = \frac{bh^3}{12}$  — момент инерции поперечного сечения прокладки,

$A_4, A_5, A_6, A_7$  — коэффициенты, зависящие только от  $n$  и  $k$  (их значение см. номогр. №№ 4 ÷ 7\*), при этом достигало величины  $\sigma_H = 7914$  дан/см<sup>2</sup>.



Фиг. 11.

Пакет прямых пластин без смазки

$n=25; \kappa=12,5;$

$l=3,5$  см;  $b=1,9$  см

$h=0,04$  см;

$\Delta W(\rho_1)$

$\Delta - V=0,03$

$* - V=0,02$

$x - V=0,015$

$P(\rho_1)$

$\nabla - V=0,03$

$\circ - V=0,02$

$\bullet - V=0,015$

$C_{1n}(\rho_1)$

$\Delta - \begin{cases} V=0,03 \\ V=0,02 \\ V=0,015 \end{cases}$

Асимптотический вид (фиг. 10, 11) зависимостей рассеянной циклической энергии  $\Delta W_3$  и  $\Delta W_{13}$ , действующей силы  $P_3$  и  $P_{13}$ , жесткости расслоенного пакета  $C_{1пк}$  при  $V = \text{const}$  от интенсивности дополнительной сдвигивающей нагрузки  $\rho_1$  говорит о том, что, начиная с некоторой величины  $\rho_1^*$  (усилия затяжки  $F_3^*$ ) при дальней-

\* См. стр. 67 ÷ 70 наст. сб.

шем возрастании интенсивности длины зон расслоения пакета, силы трения в зонах расслоения, а также граничные условия пакета (угловая податливость  $\beta$ ) практически остаются постоянными.

Поэтому для обеспечения в демпфере требуемых демпфирующих и жесткостных свойств достаточно в спорах демпфера создать усилия затяжки, превышающие величину усилия  $F_3^*$ . Так как величина  $F_3^*$  обычно незначительна, усилия затяжки, большие  $F_3^*$ , могут быть созданы самыми простейшими технологическими приемами, например, с помощью обычного гаечного ключа, без какого-либо измерения величины усилия затяжки.

Влияние действия постоянной силы на демпфирующие и жесткостные свойства демпфирующего элемента показано на фиг. 12. Для демпфирующего элемента с длиной пролета  $l = 3,5$  см (компоновка 12181 без смазки) величина постоянной силы  $G_3 = 53,5$  дан., составляла 69% наибольшего значения амплитуды действующей силы  $P_3 = 77,5$  дан. При этом величины  $\Delta W_3$ ,  $\phi_3$  отличались от тех же величин случая  $G_3 = 0$  не более 8%, величины  $P_3$ ,  $T_3$  — не более 5%,  $C_{1пэ}$  и  $C_3$  — не более 4%.

Для демпфирующего элемента с длиной пролета  $l = 0,8$  см (компоновка 6191 со смазкой) величина  $G_3 = 66,5$  дан. составляла 50% наибольшей действующей силы  $P_3 = 113$  дан. При этом величины  $\Delta W_3$ ,  $\phi_3$ ,  $C_{1пэ}$ ,  $C_3$  отличались от этих же величин случая  $G_3 = 0$  не более 12%, а величины  $P_3$  и  $T_3$  — не более 5%. Большие отклонения в случае демпфирующего элемента с очень «короткими» пролетами объясняются тем, что дополнительная сдвливающая нагрузка  $p_1$  распределена в зонах, где происходят значительные взаимные скольжения слоев пакета.

Кроме того, в этом случае наибольшие напряжения в демпфирующем элементе, определенные из соотношения:

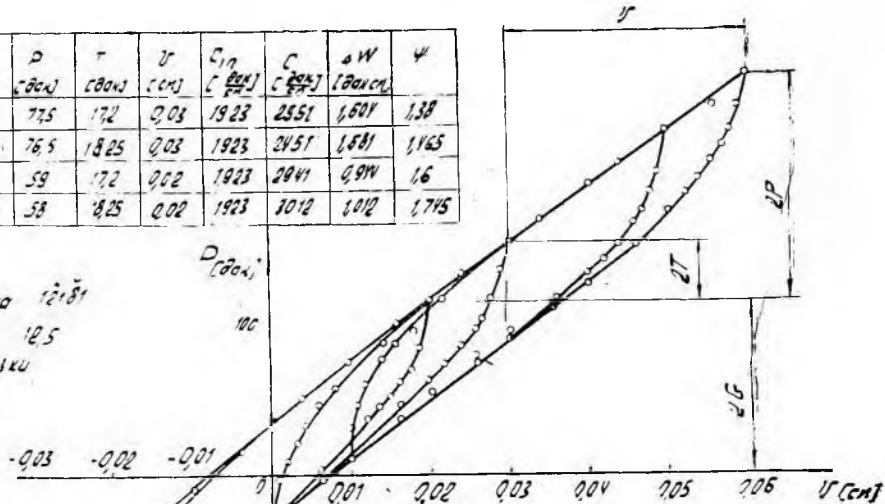
$$\sigma_n = \frac{4l}{bh^2} \cdot \frac{C_{1пэ} + 2C_{1пк}}{C_{1пэ}} \left[ A_6(P_3 + G_3) - \frac{A_7 A_4}{A_5} \cdot T_3 \right] \quad (10)$$

достигали очень высокой величины  $\sigma_n = 12844$  дан/см<sup>2</sup>. Следовательно демпфирующие и жесткостные характеристики ( $\phi$ ,  $\Delta W$ ,  $T$ ,  $C$ ,  $C_{1п}$ ) исследуемых демпфирующих элементов при  $F_3 > F_3^*$  в пределах прочности пакета можно считать не зависящими от действия на демпфирующий элемент постоянной силы  $G$ , приложенной к подвижной опоре пакета.

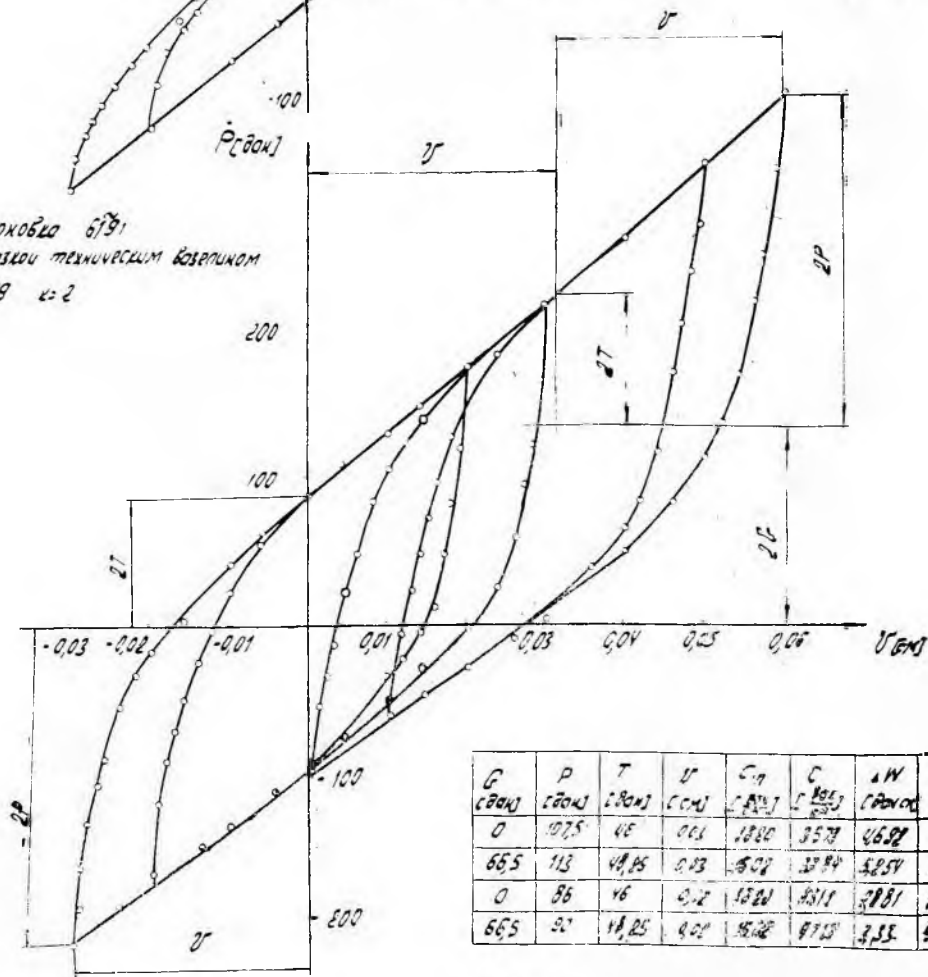
Этот результат объясняется тем, что граничные условия демпфирующего пакета, длины зон расслоения, силы трения в зонах остаются практически постоянными и демпфирующий элемент в этом случае можно рассматривать как пакет, сжатый равномерной сдвливающей нагрузкой и изгибаемый постоянной и циклической силами, а для такого пакета этот результат доказан теоретически [2].

G [сВак]	P [сВак]	T [сВак]	v [см]	C <sub>10</sub> [ $\frac{см^2}{сек}$ ]	C [ $\frac{см^2}{сек}$ ]	$\Delta W$ [сВак]	$\psi$
0	77,5	172	0,03	1923	2551	1,601	1,38
53,5	76,5	1825	0,03	1923	2151	1,681	1,165
0	59	172	0,02	1923	2041	0,914	1,6
53,5	58	1825	0,02	1923	2012	1,012	1,715

Компоновка 12181  
 n=25  
 без смазки



Компоновка 6791  
 составной механическим взрывником  
 n=49 k=2



G [сВак]	P [сВак]	T [сВак]	v [см]	C <sub>10</sub> [ $\frac{см^2}{сек}$ ]	C [ $\frac{см^2}{сек}$ ]	$\Delta W$ [сВак]	$\psi$
0	107,5	45	0,01	1820	3577	4,622	712
66,5	113	48,15	0,03	1820	3784	5,254	257
0	86	46	0,02	1820	3317	3,781	662
53,5	91	18,25	0,02	1820	3757	3,35	491

Отметим, что этот результат справедлив и для пакета, набранного из плоских пластин с такими же граничными условиями.

Так как величина произведения  $\Gamma p_2$  может быть вычислена из соотношения:

$$f p_2 = \frac{T_{23}}{bh} \frac{A_4}{A_5}, \quad (11)$$

где  $T_{23} = T_3 - T_{13}^*$ , была разработана методика экспериментального определения интенсивности сдвливающей нагрузки  $p_2$  и, следовательно, определения из (11) коэффициента трения на контактных поверхностях пакета  $f$ .

Сила  $P_{сз}$ , выпрямляющая профили демпфирующего элемента, определялась в момент полного исчезновения просвета между лентами пакета.

Эксперимент повторялся несколько раз и по среднему значению силы  $P_{сз}$  определялась интенсивность сдвливающей нагрузки

$$p_2 = \frac{P_{сз}}{l_n b} \text{ и коэффициент трения скольжения } f.$$

Эти опыты были выполнены при проведении первого и шестого экспериментов для всех исследуемых компоновок демпфирующего элемента.

Для компоновок демпфирующего элемента без смазки значения коэффициента трения лежали в пределах  $0,097 \leq f \leq 0,11$  и среднее значение коэффициента трения  $f_{ср} = 0,1033$  (первый эксперимент). Для компоновок со смазкой техническим вазелином  $0,068 \leq f \leq 0,0755$  и  $f_{ср} = 0,0721$  (шестой эксперимент).

Полученные значения коэффициента трения скольжения хорошо согласуются со справочными данными.

Для компоновок 2, 6, 4-го экспериментов снимались процессы нагружения демпфирующего элемента при выпрямлении профилированных лент.

Вследствие нелинейности этих процессов в некоторых случаях небольшое уменьшение упругого перемещения  $\bar{h}$  может вызвать значительное уменьшение сдвливающей нагрузки. В исследованных случаях (второй и шестой эксперименты) уменьшение упругого перемещения  $\bar{h}$  на 0,03 см, вызвало уменьшение сдвливающей нагрузки до 33%, хотя сдвливающая нагрузка создавалась за счет большого упругого перемещения выпрямляемых лент

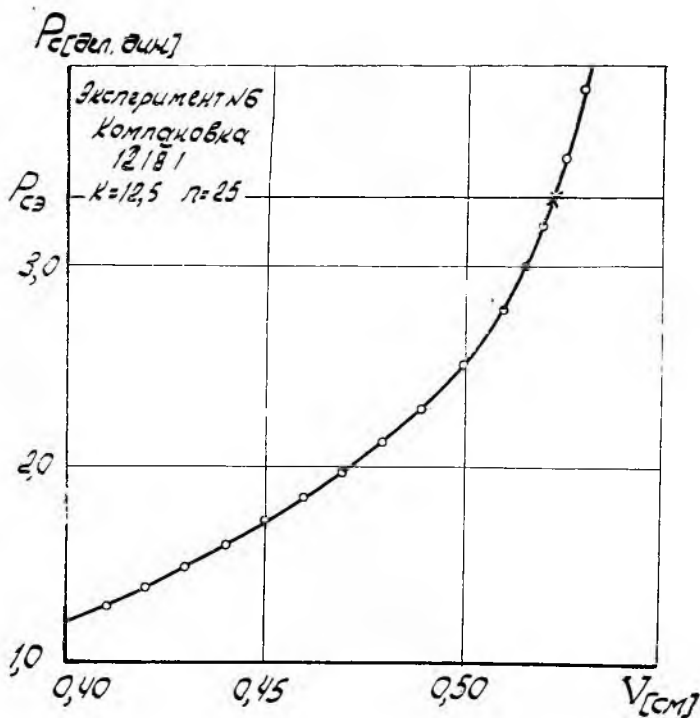
\* В данном случае принято, что обобщенные силы трения  $T_{23}$  и  $T_{13}$  линейно независимы. Справедливость этого допущения подтверждается тем фактом, что рассеянная циклическая энергия  $\Delta W_2 = \frac{12T_{23}}{C_{1пз}A_5} [A_1 P_{23} - \frac{2}{3} T_{23} \frac{A_4}{A_5} (A_1 A_2 + A_3)]$ ,

коэффициент поглощения  $\psi = \frac{24 [A_1 \eta_2 \frac{2}{3} (A_1 A_2 + A_3)]}{\eta_2 (A_4 \eta_1 - A_5)}$  и прогиб  $V = \frac{1}{C_{1пз}} (P_{23} - T_{23})$ ,

где  $P_{23} = P_3 - P_{13}$ ;  $\eta_2 = \frac{P_{23}}{T_{23}} \frac{A_5}{A_4}$  хорошо совпадают с экспериментальным значением этих величин. Во всех экспериментах, для всех исследованных компоновок ошибка не превышала 15%.

$h=4h^* = 0,52$  см (фиг. 13). Процессы нагружения выпрямляемых лент компоновок четвертого эксперимента оказались менее нелинейными в рабочей зоне и в данном случае значительному уменьшению сдвливающей нагрузки должно соответствовать значительное уменьшение упругого перемещения  $\bar{h}$ .

Как известно\* [6], зависимости  $\psi_{\max}(n, \kappa)$ ,  $\Theta(n, \kappa)$  ( $\Theta$  — ширина рабочего диапазона) являются асимптотическими и, начиная с  $n = 21$ , эти величины мало меняются с ростом  $n$ . Следовательно, теоретически можно ограничиться 21÷25 пластинами в пакете, но практически во многих случаях целесообразно



Фиг. 13.

набирать демпфирующие элементы из значительно большего числа пластин  $n = 41 \div 61$ . В этом случае для обеспечения примерно такой же величины коэффициента рассеивания (например,  $\psi_{\max}$ ) при тех же действующей силе  $P$ , наибольшем прогибе  $V$ , наибольшем напряжении в пакете  $\sigma_n$  требуется примерно такая же сдвливающая нагрузка  $p$ , которая может быть создана за счет большого числа менее жестких профилей. Поэтому при выпрямлении в них возникнут меньшие напряжения при таком же упругом перемещении  $\bar{h}$  и процесс нагружения будет менее нелинеен (компоновки четвертого эксперимента).

\* См. стр. 59 наст. сб.

Кроме того, высокие величины коэффициентов рассеивания ( $\psi > 4$ ) у пакетов со смазанными поверхностями во многих случаях значительно легче обеспечить у пакетов с большим числом пластин  $n = 41 \div 69$  и более. Здесь нужно отметить, что закон изменения демпфирующих и жесткостных свойств пакета в течение его ресурса работы определяется законом изменения произведения  $f\rho$ . Поэтому трудно сказать заранее, какой закон изменения сдвигающей нагрузки  $\rho$  выгоднее с точки зрения обеспечения более медленного изменения демпфирующих и жесткостных характеристик демпфера в течение ресурса его работы. На этот вопрос исчерпывающий ответ могут дать только ресурсные испытания демпфирующих элементов.

На фиг. 14 построены зависимости произведения  $f\rho$ , пропорционального интенсивности сдвигающей нагрузки, от числа профилированных лент в группе 1 пакета (фиг. 1)  $f\rho(m)$  или от числа гофрированных лент в группе 1 пакета (фиг. 2)  $f\rho(\bar{m})$ . В диапазонах  $m = 2 \div 10$  для исследованных профилей и в диапазоне  $\bar{m} = 5 \div 24$  для гофров зависимости  $f\rho(m)$  и  $f\rho(\bar{m})$  в первом приближении можно считать линейными. Отметим, что у соответствующих компоновок без смазки и со смазкой отношение  $\frac{f\rho}{(f\rho)_c} > \frac{f}{f_c}$ ,

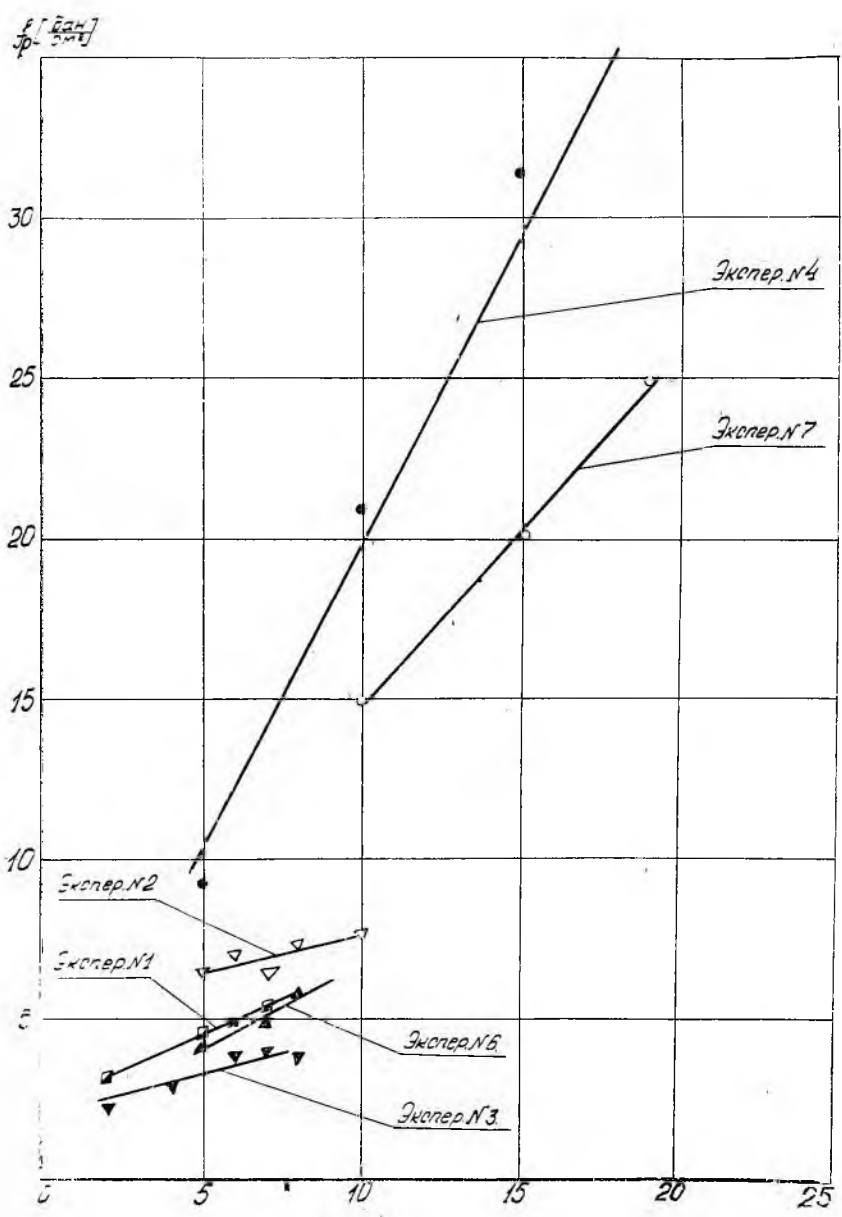
т. к. в данном случае отношение  $\frac{P}{P_c} > 1$ .

Как показали наши эксперименты, при достаточном числе пластин в пакете ( $n = 25 \div 69$ ), пользуясь только деформированными лентами одного профиля (гофра) можно в очень широком диапазоне изменять демпфирующие и жесткостные свойства демпфера ( $\Delta W$ ,  $\psi$  и  $C$ ), набирая группу I из различного числа деформированных лент. Например, в седьмом эксперименте, при  $V = 0,03$  см рассеянная циклическая энергия изменялась приблизительно в четыре раза  $\Delta W = 1,208 \div 4,975$  дан/см; коэффициент рассеивания — более чем в три раза  $\psi = 1,053 \div 3,35$  и средняя жесткость цикла — приблизительно в 1,3 раза  $C = 2549 \div 3300$  дан/см.

При практически важных значениях прогиба  $0,015 \leq V \leq 0,03$  см, значительных силах  $71,5 \leq P \leq 100$  дан, наибольших напряжениях  $4446 \leq \sigma_n \leq 6537$  дан/см<sup>2</sup>, при конструктивном числе пластин  $n = 25 \div 69$  в пакетах со смазанными контактными поверхностями получены очень высокие коэффициенты рассеивания  $3,35 \leq \psi \leq 4,12$ .

Отметим, что теоретически у демпфирующих элементов, набранных из  $n = 25 \div 69$  пластин, коэффициент рассеивания может достигать величины  $\psi \approx 7^*$ .

В заключение укажем, что все эксперименты проводились только в зоне полностью расслоенного пакета, т. к. при известных значениях  $C_{in}$  и  $T$  справедливость соотношений, описывающих



Фиг. 14.

демпфирующие и жесткостные свойства демпфирующего элемента [3] для зоны неполностью расслоенного пакета наиболее просто можно проверить в динамическом эксперименте.

## ВЫВОДЫ

Демпфирующие и жесткостные характеристики ( $\Delta W$ ,  $\psi$ ,  $C$ ,  $C_{\text{ин}}$ ,  $T$ ) исследуемого демпфирующего элемента практически можно считать независимыми от величины интенсивности сдвливающей нагрузки  $p_1$ , начиная с некоторого значения интенсивности  $p_1^*$ , величина которого обычно невелика.

Соотношения (1) — (4) справедливы для исследуемого демпфирующего элемента и, следовательно, его можно рассматривать как многослойный пакет, сжатый равномерно распределенной сдвливающей нагрузкой.

Экспериментально показано, что соотношения (1) — (4) остаются достаточно справедливыми и в случае очень «коротких» демпфирующих элементов с соотношением  $\frac{l}{h_0} \geq 0,57$  даже в зоне больших значений коэффициента рассеивания ( $\psi \approx 4,5$ ).

Жесткость расслоенного пакета  $C_{\text{ин}}$  и обобщенная сила трения  $T$  могут быть достаточно точно определены экспериментально. Поэтому соотношения (3), (4), описывающие демпфирующие и жесткостные характеристики, необходимые для решения задачи о колебаниях системы с данными демпферами, записаны в удобной форме.

Действие постоянной силы практически не изменяет формы упруго-гистерезисной петли, демпфирующих и жесткостных свойств пакета ( $\psi$ ,  $\Delta W$ ,  $C$ ,  $C_{\text{ин}}$ ,  $T$ ). Поэтому демпфирующие пакеты удобно применять в качестве несущих элементов конструкции.

Демпфирующие и жесткостные свойства демпфирующих элементов легко поддаются управлению и могут быть изменены в широких пределах без изменения габаритных размеров и числа пластин демпфера.

В исследованных демпфирующих элементах со смазанными контактными поверхностями при числе пластин  $n = 51 \div 69$  были получены очень высокие коэффициенты рассеивания ( $3,35 \leq \psi \leq 4,4$ ) при весьма значительных деформациях ( $0,015 \leq V \leq 0,03$  см) и значительных силах ( $71,5 \leq P \leq 138$  дан).

Даже при недостаточно полном выпрямлении профилей экспериментальные значения величин  $\psi$ ,  $\Delta W$  хорошо совпадали с теоретическими (третий эксперимент).

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Сойфер, И. Д. Эскин. Поперечный изгиб многослойной консоли. «Вибрационная прочность и надежность авиационных двигателей». Труды КуАИ. Выпуск XIX, 1965.



2. И. Д. Эскин. Поперечный изгиб многослойного пакета циклической и постоянной силами. ИзВУЗ. «Авиационная техника» № 4, 1967.

3. И. Д. Эскин. Поперечный изгиб многослойного пакета с сухим трением на контактных поверхностях циклической силой. «Вибрационная прочность и надежность авиационных двигателей». Труды КуАИ. Выпуск XXX, 1967.

4. А. М. Соيفер, И. Д. Эскин. Демпфер. Авторское свидетельство № 204844, Кл. 47а. 16/10.

5. В. П. Филекин. Конструкционный гистерезис во фланцевых и шовных соединениях. ИзВУЗ. «Авиационная техника» № 4, 1960.

6. И. Д. Эскин. Вынужденные колебания системы с одной степенью свободы с многослойными демпфирующими элементами. «Вибрационная прочность и надежность авиационных двигателей». Труды КуАИ. Выпуск XXX, 1967.

---