

мещался микрофон. Путем внедрения поглощающих прослоек между стенками трубы и микрофоном в волноводе создавался режим бегущей волны для поля опорной частоты. Вокруг трубы с шагом  $30^\circ$  на удалении 15 м от ее середины размещались точки установки динамической головки, предназначенной для озвучивания параметрического приемника низкочастотным сигналом (365 Гц) и снятия его диаграммы направленности. Более подробное описание условий и методики эксперимента изложено в работе [4].

Экспериментальные данные нанесены на графике (фиг. 2) в виде точек, помеченных кружочками и крестиками, через которые проведены интерполирующие кривые. Угловая зависимость, представленная кривой *a*, соответствует диаграмме параметрической антенны без трубы. Зависимость, изображенная кривой *b*, соответствует работе приемника с волноводом на частоте, несколько превышающей 6,5 кГц, находящейся на плавном участке ветви, отвечающей колебанию  $J_{11}$ . Из этой кривой видно, что положение максимума приходится на углы  $40^\circ \div 50^\circ$ . Оценка этого угла по формуле  $\arccos(c_1/v)$  с использованием значения  $v/c_1$  из соответствующего участка кривой *g* на фиг. 1 дает то же значение угла. Кривая *e* фиг. 2 отвечает случаю совпадения опорной частоты с частотой отсечки колебания  $J_{11}$ , когда реализуется максимальное отклонение главного лепестка диаграммы от оси трубы. В нашем случае оно достигает  $75^\circ \div 80^\circ$ .

В заключение отметим, что в результате аналогичного расчета для трубы, заполненной жидкостью, найдено, что спадающий участок дисперсионных характеристик волноводных мод имеет более плавный характер, чем при заполнении воздухом. При этом возможна точная перестройка диаграммы в интервале углов, большем, чем на нарастающем участке, что исключалось для воздушного варианта этого устройства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Зверев В. А., Калачев А. И.* Модуляция звука звуком при пересечении акустических волн. — Акуст. ж., 1970, т. 16, № 2, с. 245–251.
2. *Шрейбер И. Р.* Распространение возмущений в трубах, заполненных жидкостью. — В кн.: Численные методы механики сплошной среды. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1980, т. 11, № 1, с. 143–149.
3. *Лямшев Л. М.* Дифракция звука на безграничной тонкой упругой цилиндрической оболочке. — Акуст. ж., 1958, т. 4, № 2, с. 161–167.
4. *Гуцин В. В., Заславский Ю. М.* К вопросу об управлении диаграммой направленности параметрического звукоприемника. — В кн.: Тез. докл. II Дальневосточной акуст. конф. «Человек и Океан». Владивосток, 1978, ч. 2, с. 21–24.

Научно-исследовательский  
радиофизический институт

Поступила в редакцию  
5.VIII.1981

УДК 534.833.522.4

### О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ СТАЛЬНЫМИ ВИНТОВЫМИ ПРУЖИНАМИ

*Заборов В. И., Могилевский М. И.*

Частотная зависимость виброизоляции при установке машины на основание через упругую прокладку представляет собой кривую с провалами на резонансных частотах [1–3]. Поскольку измерения виброизоляции, как правило, производятся в полосах частот, то и вычисленные значения следует усреднять по частоте. Такое усреднение виброизоляции при условии, что материал прокладки имеет большие внутренние потери (например, резина), проведено в работе [4]. У виброизоляции стальными винтовыми пружинами существенно иной характер в области волновых процессов из-за малости коэффициента потерь стали.

Пусть к абсолютно жесткой машине массы  $M$ , установленной через стальные цилиндрические винтовые пружины на основание с входным импедансом  $Z_0$ , приложена единичная гармоническая сила частоты  $f$ . Колебания пружины могут быть описаны уравнением продольных колебаний эквивалентного стержня равной с пружиной высоты  $h$  [5] со скоростью продольных волн  $\bar{c} = c(1 + i\eta/2)$  при условии, что  $(f/f_c)^2 \ll 1$  (это условие можно вывести из результатов работы [6]), где  $f_c$  — частота, при которой длина продольной волны в эквивалентном стержне равна высоте витка пружины в деформированном состоянии. Силы, передаваемые на основание при жесткой установке машины и через стержень соответственно будут

$$P_{ж} = Z_0 / (Z_0 + iZ_M); \quad P_{в} = Z_0 / Z_M [ (Z_0 / \bar{Z}_c) \times \\ \times (\bar{Z}_c \cos \bar{k}h / Z_M - \sin \bar{k}h) + i(\bar{Z}_c \sin \bar{k}h / Z_M + \cos \bar{k}h) ], \quad (1)$$

где  $Z_M = \omega M$ ,  $Z_c$  — волновое сопротивление эквивалентного стержня;  $\bar{k} = \omega / \bar{c}$ ;  $\omega = 2\pi f$ . Остановимся на виброизоляции при частотах  $f \geq f_{в} = c/6h$ . В этом случае вибро-



изоляция определяется волновыми явлениями в пружинах. На практике для обеспечения эффективной виброизоляции

$$|Z_c/Z_0| \ll 1, \quad |Z_c/Z_m| \ll 1, \quad (2)$$

и поэтому частоты волновых резонансов пружины  $f_m \approx mc/2h = 3mf_b$ ,  $m=1, 2, \dots$ . Разобьем диапазон частот  $f \geq f_b$  на два:  $f_b \leq f \leq 2^{-1/2}f_1$  и  $f > 2^{-1/2}f_1$ . В первом из них на основании формул (1) при условиях (2) получим виброизоляцию

$$ВИ = 20 \lg |Z_m \sin kh / Z_c (1 + iZ_m/Z_0)|, \quad (3)$$

где  $k = \text{Re } \bar{k}$ ,  $Z_c = \text{Re } \bar{Z}_c$ . Для того чтобы получить усредненные значения виброизоляции при  $f > 2^{-1/2}f_1$ , положим  $2\Delta f = f_1 = f_m - f_{m-1}$ ,  $m=2, 3, \dots$  и далее

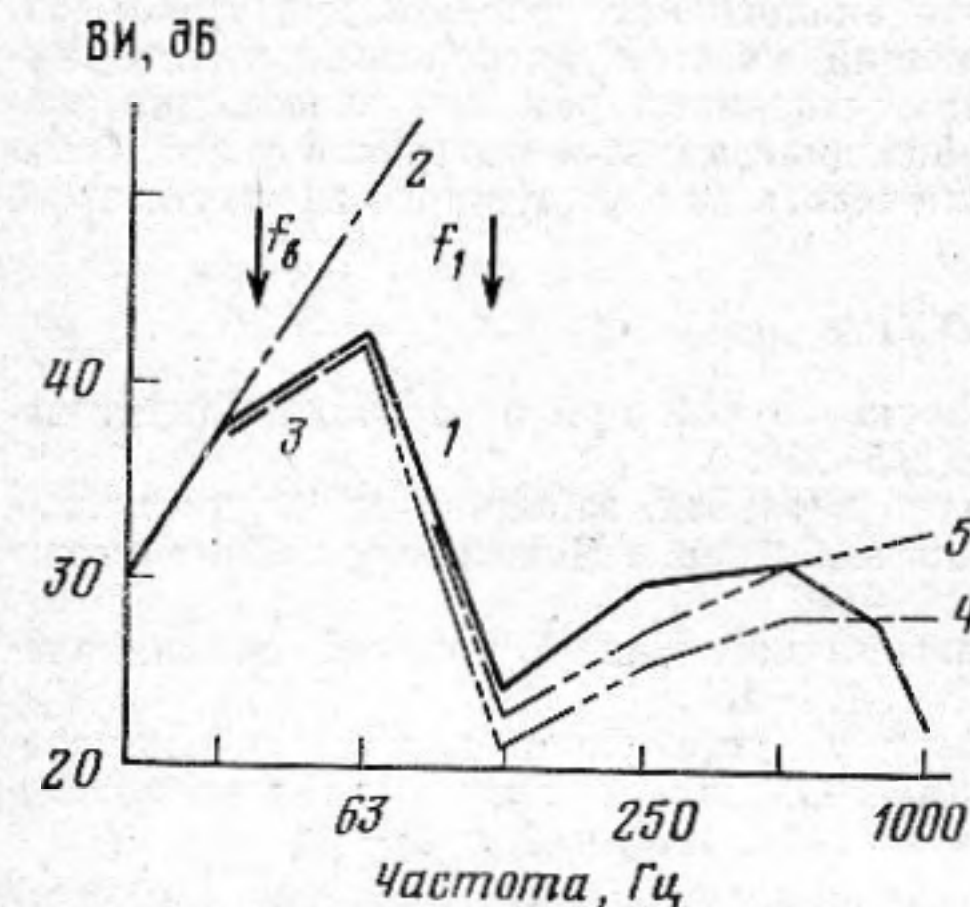
$$ВИ = 10 \lg \left( \frac{\int_{f_m-\Delta f}^{f_m+\Delta f} |P_{ж}^2| df}{\int_{f_m-\Delta f}^{f_m+\Delta f} |P_{в}^2| df} \right). \quad (4)$$

При условиях (2) и  $Y_1/Y_2 \gg \eta/2$ ;  $Z_m/Y_1 \gg \eta/2$ , выполняющихся для реальных конструкций, имеем

$$ВИ = 10 \lg [Y_1 Z_m^2 (1 + \gamma) / Z_c |Z_0 + iZ_m|^2], \quad (5)$$

где  $Z_0 = Y_1 + iY_2$ ;  $\gamma = |Z_0|^2 kh \eta / 2Y_1 Z_c$  — отношение энергий, рассеиваемых в пружине и основании соответственно. Отметим, что интеграл в знаменателе выражения (4) формируется в окрестности частоты  $f = f_m$ , т. е. виброизоляция носит резонансный характер, чем она и отличается от виброизоляции резиновыми прокладками. Из выражения (5) следует, что основание при расчете виброизоляции можно считать абсолютно жестким ( $Z_0 = \infty$ ), если  $\gamma \gg 1$  и  $|Z_0/Z_m|^2 \gg 1$ . При этом  $ВИ = 20 \lg Z_m/Z_c + 10 \lg kh \eta / 2$ , откуда следует, что при  $\eta \approx \text{const}$  виброизоляция возрастает на 9 дБ при удвоении частоты. Потери в пружинах можно пренебречь, если  $\gamma \ll 1$ . Заметим, что при  $\gamma \ll 1$  и  $|Z_0| \gg Z_m$  с ростом  $|Z_0|$  виброизоляция убывает, тогда как при условиях (2) виброизоляция резиновыми прокладками растет [4]. Это снижение виброизоляции объясняется тем, что при указанных условиях с ростом  $|Z_0|$  резонансные колебания пружин становятся более интенсивными.

На фигуре приведены измеренные и вычисленные значения виброизоляции



Виброизоляция в октавных полосах частот. 1 — измеренная; 2 — вычисленная без учета волновых явлений в пружинах; 3 — вычисленная по формуле (3); 4, 5 — вычисленная по формуле (5) при  $\eta = 10^{-4}$  и  $2 \cdot 10^{-4}$  соответственно

при установке бетонного блока на плиту перекрытия через шесть пружин. Колебания блока возбуждались с помощью стандартной ударной машины. Масса блока с машиной  $M = 125$  кг,  $Z_0 = 2 \cdot 10^5$  Нс/м,  $f_b = 38$  Гц,  $f_1 = 114$ ,  $f_c = 1470$  Гц. Применение теории резиновых виброизоляторов [4] к расчету пружин приводит в данном примере при вычислении виброизоляции к ошибке в 20 дБ и более.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беляковский Н. Г. Конструктивная амортизация механизмов, приборов и аппаратуры на судах. Л.: Судостроение, 1965.
2. Клячкин И. И. Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах. Л.: Судостроение, 1971.
3. Гартаковский Б. Д. Матричный метод расчета вибропроводимости одномерной структуры. — В кн.: IX Всес. акуст. конф. М.: 1977, секция «К», 1931.
4. Ващук Д. Б., Заборов В. И. Оценка эффективности амортизаторов, установленных между машиной и перекрытием. — В кн.: Охрана труда и техника безопасности в черной металлургии. М.: Металлургия, 1975, № 4, с. 103–110.
5. Хвингия М. В. Колебания пружин. — В кн.: Вибрации в технике. Т. 3 / Под ред. Диментберга Ф. М., Колесникова К. С. М.: Машиностроение, 1980, с. 40.
6. Stokes V. K. On the dynamic radial expansion of helical springs due to longitudinal impact. — J. Sound Vib., 1974, v. 35, № 1, p. 77–99.

Институт строительства  
и архитектуры  
Госстроя БССР

Поступила в редакцию  
12.VIII.1981