

УДК 534.232

А.Ю. Бауков**О ФИЗИКЕ ПРОЦЕССОВ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЛАСТИН ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ РАЗЛИЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ***Приведены результаты практической реализации виброакустического метода контроля многослойных объектов**Ключевые слова: колебания многослойных конструкций, виброакустический метод, амплитудная спектральная плотность.***Семинар № 2****A.Y. Baukov****THE PHYSICS OF DIAMETRICAL MODES DURING THE IMPACT ACTION OF DIFFERENT DURATION.***The results of the study on vibroacoustic method of controlling the multi-layered objects are given.**Key words: vibrations of multi-layered constructions, vibroacoustic method, amplitude spectral density.*

В предыдущих работах [1, 2] были проведены расчеты спектров откликов тонких пластин на ударное воздействие различной длительности. Данные расчеты были выполнены по широко известной методике [3], при использовании которой задается комплексная частотная характеристика объекта (в данном случае основной изгибной моды пластины) $K(\omega)$ и спектр ударного импульса $S_\tau(\omega)$. В этом случае искомым спектром отклика основной моды на ударное воздействие определяется

$$S(\omega) = K(\omega) \cdot S_\tau(\omega). \quad (1)$$

В результате таких расчетов, выполненных при различной длительности τ ударного импульса, задаваемого в виде одного полупериода косину-

соиды, получено, что форма спектра результирующего сигнала весьма сильно зависит от длительности ударного импульса τ . Так при относительно малой длительности спектр виброакустического импульса своей формой очень похож на форму частотной характеристики пластины на ее отдельной изгибной моде и представляет собой ярко выраженную одногорбую кривую, максимум которой приблизительно соответствует собственной частоте изгибных колебаний пластины на этой моде. В случае увеличения длительности τ в спектре отклика начинают появляться дополнительные максимумы, причем при некоторых значениях τ амплитуда этих максимумов бывает сравнимой с основным максимумом, соответствующим собственной частоте колебаний пластины.

При практической реализации виброакустического метода контроля многослойных объектов указанное явление не только приводит к созданию значительных помех при интерпретации результатов контроля, но и зачастую может инициировать ложные выводы о наличии дефектов в исследуемых конструкциях

Для исключения таких ошибок необходимо выбирать соответствующие значения длительности ударного им-

пульса τ , что возможно в случае правильного объяснения природы изгибных колебаний пластин при ударном воздействии на них.

Известно, что каждую из собственных изгибных мод тонкой пластины (включая и основную моду с собственной частотой ω_0) можно заменить эквивалентной колебательной системой с одной степенью свободы с соответствующими эквивалентными параметрами M^* , R^* , C^* [5]. В работе [6] показано, что при действии на колебательную систему с одной степенью свободы короткого прямоугольного импульса с амплитудой F_0 и длительностью τ , спектральная плотность которого соответствует непрерывному спектру с постоянной амплитудой I

$$S_\tau(\omega) = \int_0^\tau F_0 e^{-j\omega t} dt = F_0 \tau \equiv I, \quad (2)$$

отклик такой системы в виде зависимости ее смещения от времени t имеет вид:

$$\xi = \frac{I \sqrt{1 + \delta^2 / \omega_0^{*2}}}{M} e^{-\delta t} \cos(\omega_0^* t + \varphi), \quad (3)$$

где $\varphi = \arctg \frac{\delta}{\omega_0^*}$; $\omega_0^* = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$;

δ - временной коэффициент затухания.

С другой стороны, Фурье-составляющие спектра импульса, содержащиеся в узком элементарном диапазоне частот $d\omega$, возбуждают каждую форму собственных колебаний системы так, как если бы на нее действовала внешняя сила $F_0 e^{-j\omega t} d\omega$ [6]. В связи с этим воздействие на осциллятор коротким ударным импульсом равноценно равномерному гар-

моническому возбуждению его в пределах всего частотного диапазона, соответствующего спектру короткого импульса. А так как отклик осциллятора имеет резонансный характер, на систему эффективно будут действовать лишь те спектральные составляющие, частоты которых расположены вблизи резонансной частоты системы ω_0^* , а остальная часть спектра будет подавлена [5]. Таким образом в спектре виброакустического отклика на основной гармонике пластины будет четко проявляться резонансный максимум.

Амплитудная спектральная плотность, например прямоугольного импульса с амплитудой F_0 и длительностью τ записывается следующим образом [3]:

$$\bar{S}(\omega) = I \frac{\sin \omega \frac{\tau}{2}}{\omega \frac{\tau}{2}}, \quad I = F_0 \tau. \quad (4)$$

Амплитудная спектральная плотность прямоугольного импульса постоянна на низких частотах и с увеличением частоты уменьшается при увеличении длительности импульса τ , когда она приближается к половине периода спектральной составляющей T или превышает его:

$$\frac{\omega \tau}{2} > \frac{\pi}{2} \quad \text{или} \quad \tau > \frac{\pi}{\omega} = \frac{T}{2}. \quad (5)$$

Качественно аналогичный вывод можно сделать и для импульсов другой формы, ограниченных временем τ , в частности для отрезка косинусоиды (рис. 1):

$$\bar{S}(\omega) = I \frac{\cos \omega \frac{\tau}{2}}{1 - \left(\frac{2}{\pi} \omega \frac{\tau}{2} \right)^2}. \quad (6)$$

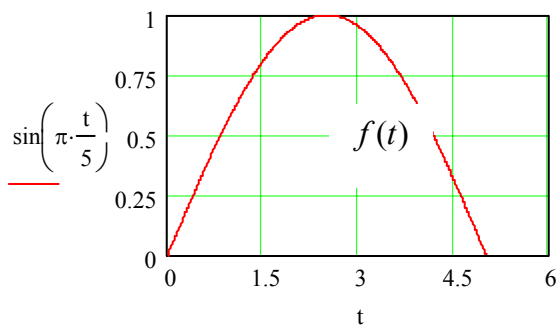
τ	f_1	f_{\max}	δ_1	f_2	f_0^*	δ_2	T_0^*	δ_τ	№ рис.
0.1	7.2	10	0.028	336	348	0.034	0.0029	0.97	-
0.01	74	100	0.26	310	350	0.113	0.0028	0.72	-
0.005	169	200	0.0153	360	348	0.035	0.0029	0.42	2
0.00288	-	347.2	-	334.4	347.7	0.038	0.00288	0	3
0.001	-	1000	-	344	346	0.0058	0.00289	-	4
0.0001	-	10000	-	347.4	347.7	0.00086	0.0029	-28	5

При увеличении длительности импульса τ основной лепесток его спектра, в котором заключено до 90% энергии импульса, начинает сужаться, что равнозначно перемещению первого нуля спектральной плотности импульса вдоль оси частот влево. Вследствие этого при относительно большой величине τ , частота первого нуля

спектра импульса становится значительно меньше собственной частоты изгибной моды пластины ω_0^* , в результате чего в пределах диапазона резонансных частот эквивалентного осциллятора (в пределах максимума частотной характеристики $K(f)$) доля общей энергии импульса является незначительной и при определенных реальных величинах эквивалентных потерь на данной моде δ , спектральные составляющие отклика могут иметь значительно меньшую амплитуду, чем в случае короткого импульса. Кроме того локальный спектральный максимум может перемещаться по оси частот и совпадать с частотой ближайшего локального максимума спектра импульса.

В то же время в низкочастотном диапазоне основной лепесток спектральной плотности ударного импульса, спектральная амплитуда внутри которого во много раз превышает амплитуду высокочастотной области спектра,

а)



б)

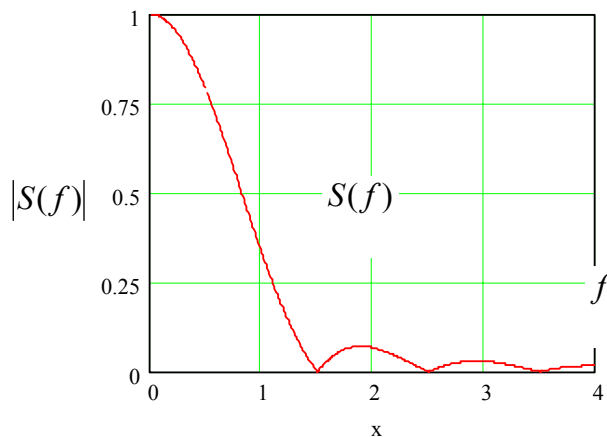


Рис. 1. Единичный синусоидальный импульс (а) и модуль его спектра (б)

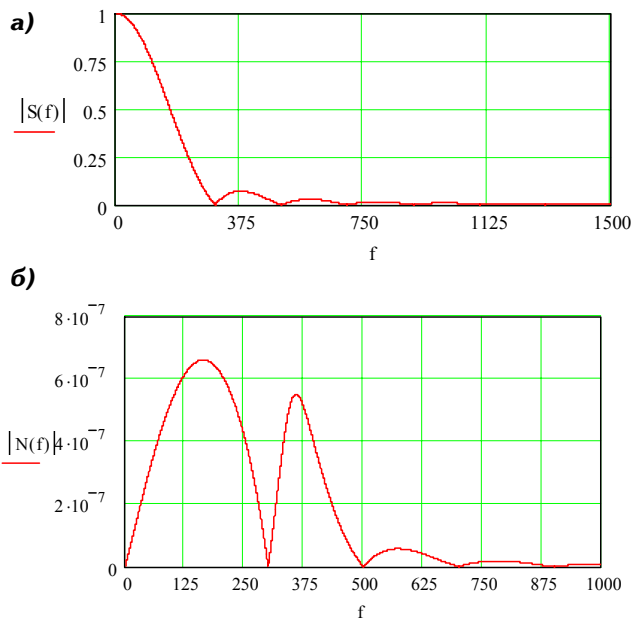


Рис. 2. Модули спектральной плотности ударного импульса при $\tau = 0.005$ с (а) и виброакустического отклика пластины (б)

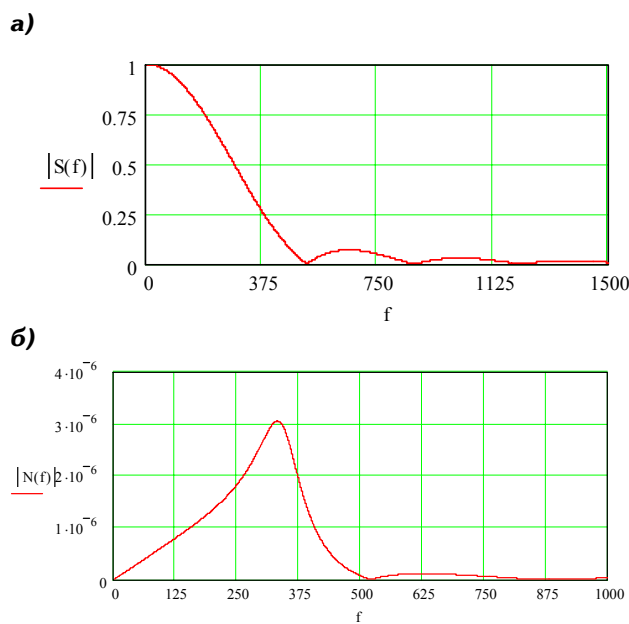


Рис. 3. Модули спектральной плотности ударного импульса при $\tau = 0.00288$ с (а) и виброакустического отклика пластины (б)

будет на левой ветви области амплитудно-частотной характеристики основной моды пластины (ее частотной характеристики) проявляться в виде одного (или нескольких) амплитудного максимума, спектра результирующего сигнала, частота которого ниже собственной частоты основной моды пластины. Причем при очень большой относительной длительности ударного импульса возможны эффекты сложной интерференции спектров $S_{\Sigma}(\omega)$ и частотной характеристики пластины.

При этом можно предположить, что частота низкочастотного дополнительного максимума спектральной плотности отклика пластины на ударное воздействие с относительно большой длительностью τ будет располагаться в районе частот наибольшего спада спектральных амплитуд импульса возбуждения (частоты среза) $f_{\max} \approx \frac{1}{\tau}$.

Минимальным значением длительности ударного импульса τ_{\min} , при котором на спектрограмме будет наблюдаться преобладающий спектральный выброс, соответствующий собственной частоте f_0 основной моды пластины, можно считать $\tau_{\min} = T_0 = \frac{1}{f_0}$.

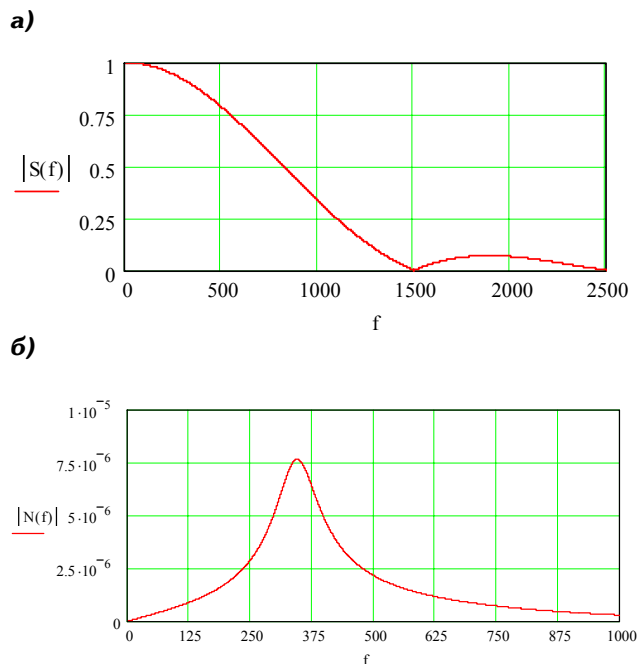


Рис. 4. Модули спектральной плотности ударного импульса при $\tau = 0.001$ с (а) и виброакустического отклика пластины (б)

Для проверки данных положений были проведены расчеты модуля спектральной плотности виброакустического отклика прямоугольной плиты толщиной $h = 0.2$ м с размерами сторон $a = 1.5$ м; $b = 1$ м при действии на нее ударной силы с единичной амплитудой и длительностью ударного импульса $\tau_i = 0.1; 0.01; 0.005; 0.00288; 0.001; 0.0001$ с.

Указанные расчеты выполнялись для импульса в виде отрезка косинусоиды на основании выражений (1) и (6). В каждом случае измерялись частоты ярко выраженных спектральных выбросов и их значения сравнивались с частотой наибольшего спада спектральных амплитуд импульса f_{\max} и с собственной частотой пластины

f_0 , которая соответствовала $f_0 = 339$ Гц. Результаты таких расчетов представлены в таблице, а примеры наиболее типичных спектров с разными значениями τ_i - на рис. 2 - рис. 5.

Из таблицы и рисунков видно, что при длительности ударного импульса τ , при которой в спектрограмме отклика возникают дополнительные максимумы с частотой f_1 , относительная

$$\delta_1 = \frac{f_{\max} - f_1}{f_{\max}}$$

с частотой наибольшего спада спектральных амплитуд составляет не более 30%. Кроме того, практическое отсутствие в спектре виброакустического отклика

дополнительных максимумов наблюдается при длительности ударного импульса τ , равной или превышающей период собственных колебаний основной изгибной моды пластины

$$T_0^* = \frac{1}{f_0^*}.$$

При этом, чем сильнее данное неравенство $\tau > T_0^*$, тем меньшая относительная разность частоты максимума спектра отклика f_2 и собственной частоты основной моды пластины f_0^* .

Аналогичные расчеты были выполнены для основных мод изгибных колебаний пластин с более высокими значениями собственных колебаний f_0 (для более тонких пластин с меньшими поперечными размерами a и b),

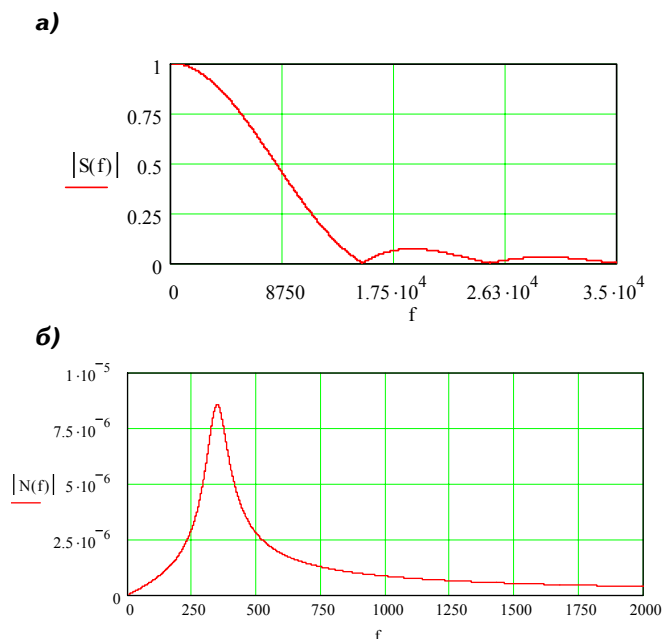


Рис. 5. Модули спектральной плотности ударного импульса при $\tau = 0.0001$ с (а) и виброакустического отклика пластины (б)

а также для более высоких изгибных мод $f_{12} = 651$ Гц и $f_{21} = 1048$ Гц для рассмотренной выше пластины. Результаты таких расчетов показали, что и в этих случаях имеют место отмеченные выше закономерности. При этом чем выше собственная частота колебаний пластины, тем меньше должна быть длительность ударного импульса, при которой регистрируемая сейсмограмма виброакустического отклика пластины имеет оптимальные характеристики с точки зрения повышения надежности виброакустической диагностики многослойных строительных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бауков А.Ю., Павлов С.В., Гуляева Н.А. Оптимизация ударной системы при виброакустическом контроле многослойных конструкций подземных сооружений городского строительства. Доклад на научном симпозиуме «Неделя горняка - 2006» // Программа научного симпозиума. – М.: МГГУ, 2006.
2. Бауков А.Ю., Павлов С.В. Компьютерное моделирование процессов изгибных колебаний упругих пластин применительно к оптимизации виброакустического метода контроля // Горный информационно-аналитический бюллетень – МГГУ, 2005, №6.
3. Бауков Ю.Н., Бауков А.Ю. Виброакустический метод контроля в горном деле и строительстве. Учебное пособие. – М.: МГГУ, 2006.
4. Харкевич А.А. Спектры и анализ. – М: ГИТТЛ, 1957.
5. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. – М.: Мир, 1971.
6. Скучик Е. Основы акустики. Т.1. – М.: «Мир», 1976. **ГИАБ**

Коротко об авторе

Бауков Ю.Н. – доцент кафедры ФТКП факультета ФТ, Московский государственный горный университет, Moscow state mining university, Russia, ud@msmu.ru