УДК 534.121.1

Э. В. Ретлинг**ОБ ИЗЛУЧЕНИИ ЗВУКА ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНОЙ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ЕЕ КОЛЕБАНИЙ В ТОЧКЕ**

Рассматривается акустическая мощность, излучаемая пластиной при возбуждении ее колебаний в точке, коэффициент излучения и импеданс. Полученные выражения сравниваются с результатами измерений.

К л ю ч е в ы е с л о в а: частота, излучение, импеданс, мощность, пластина.

The article is devoted to acoustic power radiation of a rectangular plate under point excitation of its vibrations, radiation coefficient and impedance. The received theoretical expressions are compared to measurement results.

К e y w o r d s: frequency, radiation, impedance, power, plate.

Мы будем рассматривать коэффициент излучения прямоугольной пластины, излучаемую ею акустическую мощность и импеданс на частотах ниже частоты волнового совпадения. При условии $c_b < c_0$ излучаемую пластиной акустическую мощность можно определить по формуле [1]

$$P = P_1 + P_2;$$

$$\text{где } P_1 = \frac{\rho_0 c_0 k_0^2 F_0^2}{2\pi\omega^2 m^2},$$

$$P_2 = P_1 \frac{U}{2Sk_b\eta}.$$

Здесь P_1 — мощность, излучаемая точкой возбуждения колебаний пластины; P_2 — мощность, излучаемая краями пластины; U — периметр пластины; S — площадь пластины; F_0 — сила, действующая на пластину; m — поверхностная плотность пластины; η — коэффициент потерь материала пластины; ρ_0 и c_0 — плотность и скорость звука в воздухе; c_b — скорость изгибных волн в пластине; $k_0 = \frac{\omega}{c_0}$, $k_b = \frac{\omega}{c_b}$.

Выражение для излучаемой прямоугольной пластиной акустической мощности можно преобразовать к виду:

$$P = \frac{6,2 \cdot 10^{-4} F_0^2}{m^2} \left(1 + \frac{Uc_b}{12,6Sf\eta} \right).$$

Коэффициент излучения пластины получается делением излучаемой ею акустической мощности на мощность, излучаемую то же пластиной при чисто поршневых колебаниях. Эта мощность определяется по формуле [1]

$$P_0 = 0,5\rho_0 c_0 S \bar{v}_0^2.$$

Коэффициент излучения в точке возбуждения колебаний

$$\sigma_1 = \frac{P_1}{P_0} = \frac{16c_0^2}{\pi^3 f_g^2 S} = \frac{5,62 \cdot 10^4}{f_g^2 S}.$$

Это вдвое больше, чем в статье М. Хекля [2].

Для мощности, излучаемой краями пластины, получим коэффициент излучения

$$\sigma_2 = \frac{P_2}{P_0} = \frac{16c_0^2}{\pi^3 f_g^2 S} \frac{c_0 U}{4\pi S \eta \sqrt{ff_g}}.$$

Суммарный коэффициент излучения прямоугольной пластины при возбуждении ее колебаний в точке составит

$$\sigma_t = \sigma_1 + \sigma_2 = \frac{16c_0^2}{\pi^3 f_g^2} \left(1 + \frac{c_0 U}{4\pi S \eta \sqrt{ff_g}} \right),$$

или

$$\sigma_t = \frac{5,62 \cdot 10^4}{f_g^2 S} \left(1 + \frac{26,2U}{S \eta \sqrt{ff_g}} \right).$$

При экспериментальных исследованиях колебания пластины в точке осуществлялись генератором механических колебаний ГМК-1. Он по конструкции был аналогичен электродинамическому громкоговорителю с постоянным магнитом, к звуковой катушке которого вместо диффузора прикреплялся штифт. С помощью штифта генератор присоединялся к исследуемой пластине. Возбуждение колебаний пластины производилось белым шумом в 1/3 октавных полосах частот. Мощность, излучаемая пластиной, измерялась в реверберационной акустической камере с использованием формулы

$$L_p = \bar{L} + 10 \lg \frac{A}{A_0} - 6, \text{ дБ}$$

где $\bar{L}$ — средний измеренный уровень шума; A — общее звукопоглощение в реверберационной камере, м^2 ; $A_0 = 1 \text{ м}^2$.

Измерение коэффициента потерь материала пластины производилось методом реверберации вибрации с использованием формулы

$$\eta = \frac{2,2}{fT},$$

где T — время, за которое сигнал уменьшается на 60 дБ.

При расчетах акустической мощности, излучаемой пластиной, а также ее коэффициента излучения необходимо знать величину силы, приложенной к пластине. При возбуждении колебаний пластины в точке сила, развиваемая возбудителем колебаний, расходуется на преодоление импеданса пластины

и импеданса возбудителя колебаний. Поэтому на пластину действует лишь часть силы, возникающей в возбудителе колебаний.

Импедансы пластины и возбудителя колебаний соединены последовательно. Суммарный импеданс составляет

$$Z = Z_1 + Z_2,$$

где $Z_1 = 8\sqrt{m_1 D}$ — импеданс пластины; $Z_2 = 2\pi f m$ — импеданс возбудителя колебаний пластины; m_1 — поверхностная плотность пластины; D — цилиндрическая жесткость пластины.

Сила, приложенная к пластине, составляет

$$F_1 = \frac{Z_1}{Z} F,$$

где F — сила, развиваемая возбудителем колебаний.

Для проведения экспериментальных исследований использовалась стальная прямоугольная пластина толщиной 1 мм, длиной 3,35 и шириной 0,97 м. Она была установлена в проеме между реверберационной камерой объемом 112 м³ и помещением намного большего объема. Возбудитель колебаний располагался со стороны помещения большого объема. До проведения акустических измерений производилась тарировка возбудителя колебаний. В табл. 1 представлены результаты измерения суммарного импеданса в точке возбуждения колебаний пластины.

Таблица 1

Суммарный импеданс стальной пластины при возбуждении ее колебаний в точке

Частота, Гц	Суммарный импеданс, $Z \cdot 10^5$, г/с	
	Измеренный	Расчетный
125	1,05	1,33
160	1,29	1,42
200	1,08	1,53
250	1,33	1,66
315	1,43	1,83
400	1,67	2,06
500	1,82	2,32
630	2,22	2,66
800	2,50	3,11
1000	3,51	3,64
1250	4,26	4,30
1600	5,88	5,22
2000	7,14	6,28
2500	8,34	7,60
3150	9,53	9,32
4000	14,30	12,56

Возбуждение колебаний пластины считается точечным, если радиус места возбуждения меньше 0,1 длины изгибной волны в ней. При несоблюдении

этого условия можно считать, что излучение происходит от круговой области с радиусом [2]

$$a = r + 0,25\lambda_b,$$

где r — радиус возбудителя колебаний; λ_b — длина изгибной волны в пластине.

Экспериментально установлено, что при уменьшении возбуждающей силы вдвое уровень излучаемой пластиной акустической мощности уменьшается на данной частоте на 6 дБ. Мощность, излучаемую мембраной, можно определить по формуле [2]

$$P_k = 0,25\rho_0 c_0 v_0^2 k_0^2 a^4.$$

При этом радиус мембраны a должен быть меньше длины звуковой волны в воздухе [2].

В табл. 2 представлены результаты измерения мощности, излучаемой пластиной при возбуждении ее колебаний в точке. Там же приведена мощность, излучаемая полом и стенами реверберационной камеры, которая мешает проведению измерений. Назовем ее «паразитной» мощностью. При проведении экспериментальных исследований сила, развиваемая возбудителем механических колебаний, составляла 2 Н.

Таблица 2

Мощность, излучаемая стальной пластиной при возбуждении ее колебаний в точке

Частота, Гц	Излучаемая мощность P , дБ		
	Измеренная	Расчетная	«Паразитная»
125	77,5	80,1	60,8
160	75,4	79,4	63,2
200	74,0	78,5	61,1
250	76,6	76,8	64,9
315	75,9	76,3	66,5
400	72,9	74,7	58,8
500	72,6	73,0	63,0
630	72,4	71,4	60,4
800	71,6	70,0	61,5
1000	70,6	69,7	52,0
1250	68,3	68,9	47,3
1600	66,0	67,6	36,0
2000	65,1	65,9	51,8
2500	63,2	64,6	35,6
3150	61,5	63,2	32,0
4000	58,3	61,8	27,8

Измеренные величины коэффициента потерь пластины составили в диапазоне от 125 Гц до 1000 Гц в среднем 0,0128, а выше 1000 Гц менее 0,01.

Из теории М. Хекля [2] следует, что любая неоднородность на пластине (шов, дополнительные массы и пр.) является причиной повышения величины излучаемой ею мощности. Поэтому был произведен опыт: на расстоянии

505 мм с обеих сторон от точки возбуждения колебаний к пластине были приклеены стальные стержни с поперечным сечением 2×2 см. Они были приклеены параллельно короткой стороне пластины. Их длина была равна ширине пластины. Сила, развиваемая возбудителем механических колебаний, составляла, как и в предыдущих случаях, 2 Н. В табл. 3 сравнивается акустическая мощность, излучаемая пластиной со стержнями, с мощностью, излучаемой пластиной без этих стержней. Пластина со стержнями излучает большую мощность, чем эта же пластина без стержней. Таким образом, экспериментально подтверждается соответствующее положение теории М. Хекля [2].

Импеданс возбудителя механических колебаний с пластиной при установке стержней практически не изменился. Следовательно, сила, передаваемая пластине, осталась прежней. Поэтому увеличение излучаемой акустической мощности происходит только за счет неоднородностей, создаваемых стальными стержнями. К тому же известно, что стержни и струны по ряду причин плохо излучают звук.

Таблица 3

Мощность, излучаемая стальной пластиной при возбуждении ее колебаний в точке, и мощность, излучаемая той же пластиной с приклеенными к ней стальными стержнями

Частота, Гц	Излучаемая мощность P , дБ	
	Без стержней	Со стержнями
125	77,5	84,3
160	75,4	74,8
200	74,0	74,2
250	76,6	77,4
315	75,9	77,9
400	72,9	77,5
500	72,6	75,0
630	72,4	75,6
800	71,6	76,4
1000	70,6	72,4
1250	68,3	70,9
1600	66,0	68,4
2000	65,1	68,3
2500	63,2	66,2
3150	61,5	64,7
4000	58,3	64,5

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Cremer L., Heckl M. Körperschall*. Berlin : Springer verlag. 1967. 498 p.
2. *Heckl M. Schallabstrahlung von Platten bei punktförmigen Anregung // Acustica*. 1959. Vol. 9. No. 5. P. 371—380.

1. *Cremer L., Heckl M. Körperschall*. Berlin : Springer verlag. 1967. 498 p.
2. *Heckl M. Schallabstrahlung von Platten bei punktförmigen Anregung // Acustica*. 1959. Vol. 9. No. 5. P. 371—380.

*Поступила в редакцию
в октябре 2014 г.*

Ссылка для цитирования:

Ретлинг Э. В. Об излучении звука прямоугольной пластиной при возбуждении ее колебаний в точке // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2014. Вып. 3(34). Ст. 8. Режим доступа: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>

For citation:

*Retling E. V. [Acoustic radiation of rectangular plate under point vibration excitation]. *Internet-Vestnik VolgGASU*, 2014, no. 3(34), paper 8. (In Russ.). Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>*