

## ПРОГНОЗ ВИБРАЦИИ ОТ ТРАНСПОРТА Костарев С.А., Матвеев А.С., Махортых С.А., Рыбак С.А.

Задачи прогнозирования виброакустической обстановки в городских условиях достаточно актуальны в силу многообразия действующих источников, среди которых не последнее место занимают линии метрополитена. В докладе предлагается подход оценки вибрации в грунте вблизи транспортных магистралей, основанный на анализе модовой структуры поля, возбуждаемого колебаниями упругой оболочки в вязко-упругой среде.

В зависимости от характера внешней силы в системе могут возбуждаться структурно различные колебания. Часто имеет место возбуждение нескольких типов колебаний (или, как их еще называют, мод). В силу сказанного, возникает вопрос: какие моды являются главными, а какими можно пренебречь и тем самым еще более упростить задачу: рассматривать лишь определенного вида воздействия на систему.

Рассматривается следующая задача. В безграничную идеальную жидкость помещена тонкая упругая оболочка толщиной  $h$  и радиусом  $R$ . К внутренней стороне оболочки приложено динамическое давление  $p_0(x, \varphi, t)$ . Требуется определить величину суммарного звукового поля во внешней среде и изучить его модовый состав. Полная постановка задачи включает уравнение колебаний оболочки с правой частью - приложенной силой и реакцией грунта, волновое уравнение для внешней среды и граничные условия на внешней поверхности оболочки.

Запишем выражение для реакции на сдвиг в виде:

$$S_1 = \mu\gamma \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} \right), \quad S_2 = \mu\gamma \left( R^{-1} \frac{\partial w}{\partial \varphi} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right),$$
$$S_3 = 2\mu\gamma \left( \frac{2}{3} \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{1}{3R} \frac{\partial v}{\partial \varphi} - \frac{1}{3} \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

Здесь  $R$  - радиус,  $x, \varphi, r$  - цилиндрические координаты,  $t$  - время,  $h$  - толщина оболочки,  $\gamma = (1 - \nu^2)/(Eh)$ ,  $E$  - модуль Юнга,  $\mu$  - второй коэффициент Ляме (модуль сдвига),  $\nu$  - коэффициент Пуассона,  $\rho$  - плотность окружающей среды. Величину  $\mu$  находим по известным соотношениям, зная величины модуля Юнга и коэффициента Пуассона.

Пусть на внутренней поверхности прикладывается давление  $p_0 = A\delta\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right)e^{i(k_x x - \omega t)}$ ,

представим функцию  $p_0$  в виде разложения в ряд Фурье  $p_0 = \frac{A}{\pi} \left( \frac{1}{2} - \sin \varphi - \cos 2\varphi + \dots \right) e^{i(k_x x - \omega t)}$ .

Не трудно показать, что поле давления во внешней среде, удовлетворяющее граничному условию должно записываться в виде

$$p = (p_1 H_0^{(1)}(kr) + p_2 H_1^{(1)}(kr) \sin \varphi + p_3 H_2^{(1)}(kr) \cos 2\varphi + \dots) e^{i(k_x x - \omega t)}$$

при этом  $k = \sqrt{\omega^2/c^2 - k_x^2}$ , ( $\omega^2/c^2 - k_x^2 \geq 0$ ),  $H_i^{(1)}(x)$  - функции Ганкеля. Если  $\omega^2/c^2 - k_x^2 < 0$ , то давление  $p$  выражается через модифицированные функции Ганкеля  $K_i(x)$  (давление убывает экспоненциально с расстоянием). Детальный численный анализ системы показывает, что структура акустического поля в фиксированной точке сильно зависит от выбора параметров задачи и прежде всего частоты и продольного волнового числа. Были проделаны расчеты с величинами, характерными для условий метрополитена (все величины далее в системе СИ). Параметры задачи меняются в пределах:  $0 < f < 200$ ,  $0.1 < k_x < 1$ ,  $R = 2.5$ ,  $h = 0.2$ , скорость звука продольных волн - от 600 до 2000,  $0 < \nu < 0.25$ .

Получены кривые - зависимости составляющих поля во внешней среде, найдены области значений параметров, в которых та или иная мода преобладают. Полученные результаты обобщаются на случай произвольного распределения давления на внутренней стороне оболочки.

На основе предлагаемого метода разработана программа VibraCalc. Пакет реализован в интегрированной системе. Вызов соответствующих операций осуществляется путем выбора пунктов меню или подменю. Результат представляется в графическом и текстовом форматах на экране терминала или выводится на принтер. Исходные модули пакета написаны на языке C++. Пример расчета для тоннеля прямоугольного сечения приводятся на рис. 1.

Vibra  
Calc 1.2

РИС. ЗНАЧЕНИЯ УРОВНЯ ВИБРОУСКОРЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТА  
1 - X-компонента, 2 - Z-компонента (63.0Гц)

Предельно допустимая норма вибрации (ночь) 32 дБ  
Результат расчета:  
Уровень виброускорения превышает норму на расстоянии от 0 до 39 м от тоннеля

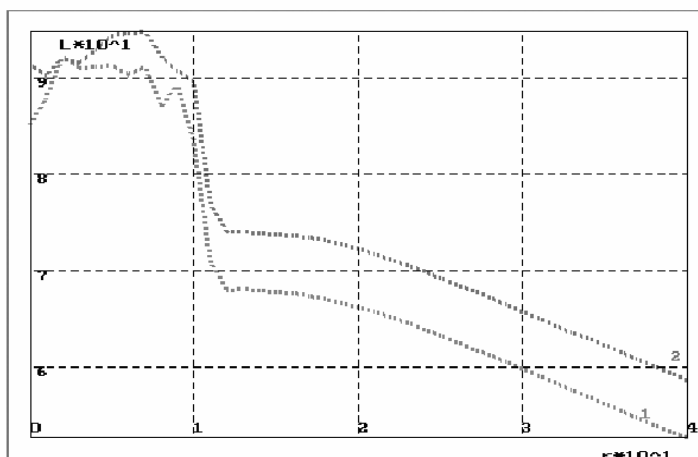


Рис. 1. Зависимость уровней вибрации от расстояния до тоннеля с использованием виброизолирующего экрана при  $r = 10$  м.

В дополнение к этому подходу развита экспериментальная методика определения скорости звука и диссипативных параметров грунта для реальных условий (в том числе городских). На рис. 2 приводится пример восстановления зависимости от глубины скорости продольных упругих волн (измерения вибрации проводились в Москве вблизи линии метрополитена). Полученная кривая свидетельствует о наличии волновода с осью на некоторой глубине. Эта методика в совокупности с разработанным методом расчета представляет собой новый самостоятельный подход, на основе которого создана предварительная версия компьютерной системы диагностики виброакустической обстановки, а также выбора путей улучшения экологической ситуации.

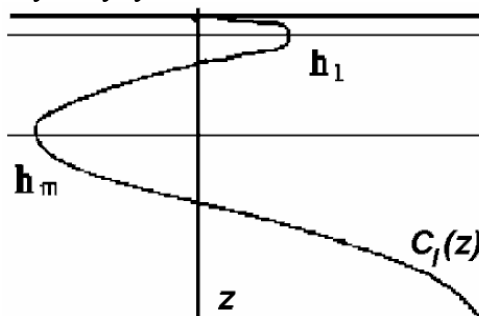


Рис. 2. Восстановление распределения скорости продольных упругих волн

Методика положена в основу реализованного Тоннельной ассоциацией России в виде официального государственного нормативно-технического документа СП (Свода правил) 23-105-2004 «Оценка вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена».

*Институт математических проблем биологии РАН, г.Пуццино, Россия*