

Б. И. ВОЛОСЕЦКИЙ, А. В. КЕНДЗЕРА, М. Н. КОНЕНКИНА

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ
СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
ДЛЯ РАСЧЕТОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ
КРУПНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

При проектировании крупных атомных и тепловых электростанций возникает необходимость прогнозирования динамических деформаций оснований и фундаментов, вызываемых техногенными и эндогенными факторами. Строительство целого ряда ТЭС и АЭС в сейсмоактивных районах страны приводит к необходимости предрасчета значений динамических воздействий на основания фундаментов при землетрясениях максимально возможной силы.

Значения воздействия сейсмического толчка на сооружение зависят от соотношения между динамическими параметрами этого импульса и спектральными характеристиками верхней толщи грунтов и сооружений. Наибольшие деформации возможны в тех случаях, когда преобладающие (резонансные) периоды колебаний верхних слоев основания строительной площадки близки к периодам собственных колебаний инженерных сооружений.

В связи с этим возникает задача определения амплитудно-частотных характеристик колебаний при максимальных предполагаемых (расчетных) для данной конкретной строительной площадки сейсмических воздействиях.

Наиболее полную характеристику сейсмических воздействий задают с помощью расчетных акселерограмм, имитирующих возможные воздействия со стороны наиболее опасных очаговых зон. Одной из методик построения расчетных акселерограмм является получение их путем пересчета из записей максимальных событий, зарегистрированных на ближайших к строительной площадке сейсмостанциях.

Спектр записи сейсмических колебаний, полученной вне зоны неупругих изменений, можно приближенно представить в линеаризованном виде

$$Y(\omega) = W(\omega) \Psi R \Theta(\omega) H(\omega) S(\omega),$$

где $W(\omega)$ — спектр колебаний, излучаемых из очага; Ψ — коэффициент, зависящий от диаграммы направленности излучения из очага на станцию; R — коэффициент, описывающий геометрическое расхождение лучевой трубки; $\Theta(\omega)$ — частотная характеристика, описывающая затухание и дисперсию колебаний в транзитной среде за счет ее неидеальной упругости; $H(\omega)$ — частотная характеристика верхней рыхлой части разреза земной коры, приближаемой в рассматриваемом случае горизонтально-слоистыми моделями вертикально-неоднородного полупространства с поглощением; $S(\omega)$ — частотная характеристика регистрирующего прибора.

Если такое представление возможно, то комплексный спектр ускорений, наблюдаемых на некоторой площадке $a(\omega)$, будет связан со спектром записи, полученной вне ее $Y(\omega)$ оператором, который легко построить, определив спектр излучения из очага через спектр записи и учитывая, что двойное дифференцирование смещений соответствует в частотной области умножению спектров на $-\omega^2$.

Следовательно, спектры акселерограмм, пересчитанные из записей сильнейших из зарегистрированных землетрясений, можно записать в виде

$$a(\omega) = \frac{-\omega^2 Y(\omega) \Psi_2 R_2 \Theta_2(\omega) H_2(\omega)}{S(\omega) \Psi_1 R_1 \Theta_1(\omega) H_1(\omega)}. \quad (1)$$

Индексами 1 и 2 обозначены величины, характеризующие пути распространения сейсмических волн к станции и к строительной площадке соответственно.

Предполагая, что Ψ_i и R_i не зависят от частоты, для конкретного сочетания очага, станции и площадки величина $(\Psi_2 R_2 / \Psi_1 R_1)$ будет представлять некоторый постоянный множитель. Обозначим его β .

Для сведения к минимуму влияния отличий в механизмах и энергиях очагов, эпицентральных расстояниях и других макроусловиях, согласно [6], акселерограммы рассчитываются в нормированном виде. Значения j -составляющей расчетной акселерограммы, моделирующей воздействия землетрясений, вызывающих на строительной площадке сотрясения интенсивностью I баллов, для k -й модели строения среды под площадкой определяем из выражения

$$a_{jk}(t) = \frac{A(I) \bar{a}_{jk}(t)}{\max \{ \bar{a}_{jk}(t) \}_{jk}} \quad (2)$$

Здесь $\bar{a}_{jk}(t)$ — составляющая пересчитанной акселерограммы; $\max \{ \bar{a}_{jk}(t) \}_{jk}$ — максимальное пиковое значение ускорения, определенное по всем составляющим акселерограмм, рассчитанных для всех моделей строения среды под строительной площадкой; $A(I)$ — максимальное пиковое значение ускорений, соответствующих сотрясениям интенсивностью I баллов. Эту величину обычно берут из СНИП [9], но для более точных оценок необходимо пользоваться региональными зависимостями между балльностью и максимальными ускорениями, полученными для конкретной очаговой зоны.

Если пренебречь отличиями в расхождении лучевой трубки в различных моделях осадочной толщи под строительной площадкой, что вполне допустимо, то при нормировании в (2) множитель β сократится и, следовательно, нет необходимости определять входящие в него величины.

При построении частотных характеристик $\theta_i(\omega)$ используем следующие предпосылки. Решение уравнения распространения сейсмических волн с частотой ω для момента времени t на расстоянии s можно записать в виде [2]

$$u(t) = u_0 \exp[-i\omega t + ik(\omega)s].$$

Здесь $k(\omega) = \frac{\omega}{v(\omega)} + i\alpha(\omega)$; u_0 — амплитуда; $v(\omega)$ — фазовая скорость волны; $\alpha(\omega)$ — коэффициент поглощения; $t = s/v^*$, где v^* — фазовая скорость волны на максимальной наблюдаемой частоте, т. е. скорость, соответствующая первым вступлениям волн.

В реальной Земле $\alpha(\omega)$, $v(\omega)$ и v^* могут изменяться по величине вдоль пути распространения сейсмических волн. Ограничимся рассмотрением распространения волн в радиально-неоднородных моделях Земли. В этом случае частотные характеристики $\theta_i(\omega)$, описывающие затухание и дисперсию сейсмических волн в неидеально-упругой среде на пути очаговой зоны к станции или

к площадке, можно получить в форме, предложенной в работе [1]:

$$\Theta(\omega, \Delta) = \exp \left\{ - \int_s \alpha(\omega, r) ds + i \int_s \omega \left[\frac{1}{v(\omega, r)} - \frac{1}{v^*(r)} \right] ds \right\}. \quad (3)$$

Здесь $s=s(\Delta)$ — длина пути волны вдоль луча от источника до приемника, являющаяся функцией глубины очага h_0 и эпицентрального расстояния Δ ; $\alpha(\omega, r)$ и $v(\omega, r)$ — коэффициент поглощения и фазовая скорость, зависящие от частоты и глубины в радиально-неоднородной модели Земли; $r=R+D_m-h$, где r — значение радиуса от центра Земли до точки на глубине h . Глубина отсчитывается от уровня моря, которому соответствует радиус R ; D_m — высота свободной поверхности модели над уровнем моря.

Приращение длины луча ds через приращение радиуса dr для луча с параметром p можно записать в форме [4]

$$ds = \frac{r dr}{v^*(r) \sqrt{[r/v^*(r)]^2 - p^2}}. \quad (4)$$

Значения v^* взяты для частоты $\omega^* = \omega_{\max}$, что приводит к одинаковым временам первых вступлений в моделях неидеально и идеально упругой среды.

Параметр луча, скорость распространения волн и радиус максимального проникновения луча r_p связаны соотношением

$$p(h_0, \Delta) = r_p / v^*(r_p). \quad (5)$$

Причем $v^*(r_p)$ численно равно кажущейся скорости распространения волн от очага на эпицентрального расстояния Δ , которая определяется как обратная величина от производной годографа для соответствующего типа волны, глубины гипоцентра и эпицентрального расстояния.

Для построения расчетных акселерограмм примем распределение скорости сейсмических волн по глубине в виде модели строения Земли по Джеффрису [8], которая соответствует годографу Джеффриса-Буллена [13]. Для описания распределения с глубиной добротности $Q(r)$ воспользуемся моделями Д. Андерсена и Р. Харта [11] или региональными моделями [3].

Для каждой конкретной модели строения верхней части разреза земной коры под станцией или строительной площадкой обобщенные модели в верхней своей части заменяются соответствующей моделью строения осадочного чехла.

Для описания зависимости между добротностью $Q(\omega)$, коэффициентом поглощения $\alpha(\omega)$, фазовой скоростью $v(\omega)$ и частотой ω воспользуемся соотношениями феноменологической модели В. Футерман [12]. Возможность применения этих соотношений при решении сейсмологических задач показана в [5].

Запишем соотношения В. Футерман в виде [12]

$$\alpha(\omega) = \frac{\omega}{4\pi Q_0 v_0}; \quad (6)$$

$$v(\omega) = v_0 \left(1 - \frac{1}{\pi Q_0} \ln \frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}; \quad (7)$$

$$Q(\omega) = Q_0 \left(1 - \frac{1}{\pi Q_0} \ln \frac{\omega}{\omega_0} \right). \quad (8)$$

Величину ω_0 принимаем равной $10^{-3} d\omega$, где $d\omega$ — шаг по частоте, используемый при расчете спектров. Предполагаем, что ниже частоты ω_0 дисперсия отсутствует. В дальнейшем используем также обозначения: ω' — частота, на которой заданы значения добротности в моделях; ω^* — максимальное значение частоты в диапазоне, на котором спектр сейсмограммы является эффективно ненулевым.

Если известно значение добротности неидеально-упругой среды $Q(\omega', r)$ на определенной частоте ω' , то из уравнения (8) следует:

$$Q_0(r) = Q(\omega', r) + \frac{1}{\pi} \ln \frac{\omega'}{\omega_0}. \quad (9)$$

Если теперь предположить, что частота ω^* соответствует скорости первых вступлений в неидеально-упругой среде, т. е. соответствует скорости волн в моделях Земли, полученных путем обращения годографов, в том числе и в моделях, используемых нами, то фазовую скорость на частоте ω_0 легко определить по формуле

$$v_0(r) = v^* \left(1 - \frac{1}{\pi Q_0} \ln \frac{\omega^*}{\omega_0} \right). \quad (10)$$

Подставляя значения $v_0(r)$, $Q_0(r)$, полученные для определенного типа волн по (10) и (9), в формулы (6)–(8), а те в свою очередь в (4), получаем с помощью (3) значения частотной характеристики $\theta(\omega, \Delta)$, описывающей затухание и дисперсию сейсмических волн в неидеально-упругой среде при их распространении от конкретного очага на эпицентрального расстояния Δ .

Частотные характеристики $H_i(\omega)$ для моделей верхней рыхлой части разреза земной коры под станцией ($i=1$) и площадкой ($i=2$) рассчитываем матричным методом Томсона-Хаскелла [7].

Методика пересчета для получения акселерограмм на строительной площадке $a(t)$ по записи, полученной на сейсмической станции $y(t)$, сводится к решению интегрального уравнения первого рода типа свертки

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(t-\tau) a(\tau) d\tau = y(t), \quad (11)$$

где ядро интеграла $K(t) = F^{-1}\{K(\omega)\}$. Здесь оператор F^{-1} обозначает обратное преобразование Фурье. Прямое преобразование в дальнейшем обозначим F .

Из соотношения (1) легко видеть, что

$$K(\omega) = - \frac{S(\omega) \Theta_1(\omega) H_1(\omega)}{\beta \omega^2 \Theta_2(\omega) H_2(\omega)}. \quad (12)$$

Решение (11) относится к некорректно поставленным задачам, поэтому будем искать его в регуляризованном виде. Если $y(t)$ является функцией, интегрируемой с квадратом, а $a(t)$ и $K(t)$ абсолютно интегрируемые функции, то, согласно [10], регуляризованное решение уравнения (11) можно получить следующим образом:

$$\bar{a}(t) = \text{Re} \left\{ F^{-1} \left\{ \frac{f(\omega, q) Y(\omega)}{K(\omega)} \right\} \right\}. \quad (13)$$

Оператор Re обозначает выделение действительной части комплексного выражения в фигурных скобках: $Y(\omega) = F\{y(t)\}$. Функция $f(\omega, q)$ — стабилизирующий множитель. В общем случае ее подбирают, исходя из условий, представленных в [10]. Эффективно применение стабилизирующего множителя в виде

$$f(\omega, q) = \frac{L(\omega)}{L(\omega) + qM(\omega)},$$

где $L(\omega) = |K(\omega)|^2$. Функцию $M(\omega)$ удобно выбрать в виде $\omega^{2\eta}$, где η — произвольное положительное число. Тогда параметр q можно определить по заданной невязке путем минимизации функционала

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} |K(\omega) \bar{a}(\omega) - Y(\omega)|^2 d\omega \leq \delta^2, \quad (14)$$

где δ^2 — интегральная квадратичная погрешность задания функции $y(t)$ на рассматриваемом участке.

Существующие алгоритмы расчета частотных характеристик моделей среды позволяют определить их только для случая падения волн одного определенного типа. В то же время на небольших эпицентральных расстояниях цуги колебаний, вызываемые отдельными типами волн, разделяются плохо. Эту трудность не удается преодолеть достаточно простыми и эффективными способами. Поэтому вместо строгого решения задачи, когда по трехкомпонентной записи определяется трехкомпонентная акселерограмма колебаний на площадке, мы предлагаем рассчитывать набор из пяти компонент эффективной акселерограммы, которые с избытком описывают все возможные эффекты резонансного усиления сейсмических колебаний на строительной площадке. Составляющие эффективной акселерограммы рассчитываются в предположении, что запись соответствует колебаниям, вызываемым волной одного типа: P , SV или SH . Ошибка такого предположения уменьшается тем, что для расчета компонент, соответствующих продольной волне, в качестве исходного материала используется начальная часть вертикальной составляющей записи от первых вступлений P -волны до момента прихода S -волны. Времена вступления волн различных типов определяются по годографам. Для расчета компонент, соответствующих SV -волне, используется горизонтальная радиальная, а для SH -волны — горизонтальная тангенциальная составляющая записи, начиная с времени вступления S -волны.

Благодаря разделению полного вектора сейсмических воздействий на компоненты, соответствующие определенному типу волн, знанию их величины и ориентации в пространстве, появляется возможность при расчете сооружений на прочность снизить стоимость проекта, выбирая наиболее безопасную ориентацию сооружений и их отдельных конструкций.

Описанный алгоритм реализован в вычислительных программах на ЭВМ ЕС-1020. Полученные с его помощью расчетные акселерограммы используются как исходный материал для расчета напряжений, вызываемых в различных сечениях сооружений, отдельных узлах и блоках.

1. Берзон И. С., Пасечник И. П. Строение Земли по динамическим характеристикам сейсмических волн. М., 1976.
2. Гуревич Г. И. Деформируемость сред и распространение сейсмических волн. М., 1974.
3. Капитанова С. А., Яновская Т. Е. Поглощение поверхностных волн и добротность коры и верхней мантии в районе Карпат // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1985. № 10. С. 78—82.
4. Коган С. Я. Сейсмическая энергия и методы ее определения. М., 1975.
5. Лоссовский Е. К. К вопросу о дисперсии фазовой скорости объемных сейсмических волн в поглощающей среде // Геофиз. журн. 1981. Т. 3. № 3. С. 33—39.
6. Напетваридзе Ш. Г. Требования, предъявляемые к методике сейсмического микрорайонирования новой редакцией норм сейсмического строительства // Сейсмическое микрорайонирование. Кишинев, 1979. С. 142—147.
7. Ратникова Л. И. Методы расчета сейсмических волн в тонкослоистых средах. М., 1973.
8. Справочник физических констант горных пород / Под ред. С. Кларка. М., 1969.
9. Строительные нормы и правила. Строительство в сейсмических районах. — II—7—81. М., 1982.
10. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М., 1979.
11. Anderson D. L., Hart R. S. Q of the Earth // J. of Geophys. Res. 1978. V. 83. № B 12. P. 5869—5882.
12. Futterman W. I. Dispersive body waves // J. Geophys. Res. 1962. V. 67. N 13. P. 5279—5291.
13. Jeffreys H., Bullen K. E. Seismological Tables // Brit. Assoc. Adv. Sci. 1940. N 48. P. 468.