

УДК 624.04; 69.07

DOI [10.37153/2618-9283-2023-2-8-23](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-2-8-23)

Теоретические и экспериментальные исследования

Амплитудно-частотные характеристики слоистой модели «сооружение–основание»

**Пшеничкина Валерия Александровна¹, Дроздов Вячеслав Вячеславович²,
Жиденко Артем Сергеевич³**

^{1, 2, 3} ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет.
Волгоград, Российская Федерация

Аннотация: Актуальной задачей теории сейсмостойкости является учет взаимодействия сооружения с грунтовым основанием при реализации землетрясения. Несмотря на большое количество исследований, на данный момент не существует удовлетворительного решения данной проблемы. Применяемая в инженерной практике «платформенная модель» может быть использована только для однородных оснований. Вместе с тем поверхностная толща грунта, как правило, имеет многослойную структуру, в которой каждый отдельный слой имеет свои физико-механические характеристики, определяющие резонансные свойства системы в целом. Нормативные расчетные методы не учитывают неоднородность и слоистость грунтового основания, используя усредненные характеристики жесткости, что не позволяет оценить особенности резонансных процессов при совместном колебании здания и основания. Кроме того, динамические характеристики грунтов обладают достаточно высокой статистической изменчивостью даже в пределах одного слоя, и это может существенно повлиять на характер распределения резонансных частот системы.

Целью настоящей работы является исследование динамической реакции системы «здание–многослойное основание» на основе аналитической модели горизонтальной слоистой среды.

Были решены следующие задачи:

- проведен расчет слоистой системы на действие комплексного синусоидального сигнала с учетом демпфирования;
- построены амплитудно-частотные характеристики как для отдельных слоев, так и для системы в целом;
- проведена оценка влияния статистической изменчивости скорости распространения поперечных сейсмических волн на резонансные частоты рассматриваемой слоистой системы.

Использованы аналитические методы решения волновой задачи сейсмологии.

@ V.A. Pshenichkina, V.V. Drozdov, A.S. Zhidenko, 2023

Ключевые слова: амплитудно-частотная характеристика, резонансные свойства грунтов, слоистая модель, сейсмическое воздействие, демпфирующие свойства

Для цитирования: Пшеничкина В.А., Дроздов В.В., Жиденко А.С. Амплитудно-частотные характеристики слоистой модели «сооружение – основание» // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 2. С. 8–23

DOI [10.37153/2618-9283-2023-2-8-23](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-2-8-23)

Theoretical and experimental studies

Amplitude-frequency characteristics of the "structure–pile foundation" layered model

Valeria A. Pshenichkina¹, Vyacheslav V. Drozdov², Artem S. Zhidenko³

^{1,2,3} FSFEI HE Volgograd State Technical University. Volgograd, Russian Federation

Abstract: Taking into account the interaction between a structure and the soil bed during an earthquake is a vital task of the seismic resistance theory. Despite a large amount of research, there is no satisfactory solution of this problem at the time being. The "platform model" applied in engineering practice can be used only for homogeneous soil beds. However, the surface stratum of soil, as a rule, has a multilayer structure, in which each individual layer has its own physical and mechanical characteristics determining the resonant properties of the entire system. The standard methods of analysis do not take into consideration the heterogeneity and layered nature of a soil bed using the averaged stiffness characteristics, which does not allow evaluating the specific features of resonance processes during the joint oscillation of a building and its soil bed. In addition, the dynamic characteristics of soils have a rather high statistical variability even within the same layer, and this can significantly affect the distribution pattern of the resonant frequencies of the system.

The present article is aimed at investigating the dynamic response of the “building – multilayer soil bed” system based on the analytical model of a horizontal layered medium.

The following tasks were solved:

- an analysis of a layered system under the action of a complex sinusoidal signal was carried out with regard to damping;
- the amplitude-frequency characteristics were constructed both for individual layers and for the system as a whole;
- the influence of the statistical variability of the velocity of transverse seismic waves propagation on the resonant frequencies of the layered system under consideration was assessed.

The analytical methods for the solution of the wave problem of seismology were used.

Keywords: amplitude–frequency characteristic, resonant properties of soils, layered model, seismic action, damping properties

For citation: V.A. Pshenichkina, V.V. Drozdov, A.S. Zhidenko Amplitude–frequency characteristics of the layered model "structure–pile foundation". *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 2, pp. 8–23. [In Russian] DOI [10.37153/2618-9283-2023-2-8-23](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-2-8-23)

Введение

Слоистая модель грунтового основания используется в инженерной сейсмологии для определения реакции грунта на сейсмические нагрузки, прогнозирования колебаний, возникающих при землетрясениях, построения расчетных акселерограмм для проектирования сейсмостойких сооружений. В общем случае воздействие сейсмической волны на сооружение определяется взаимосвязанными вертикальными и горизонтальными колебаниями [1, 2, 3, 4]. Соответственно спектр резонансных частот грунта должен включать в себя частоты поперечных и продольных волн. В большинстве практических задач учитываются только вертикально распространяющиеся сейсмические волны, которые создают наиболее опасное горизонтальное воздействие на сооружение [4, 5, 6]. Для решения задачи распространения сейсмических волн в многослойной среде применяются аналитические методы тонкослоистых сред [2, 5, 7, 8], а также численные методы, основанные на конечно-разностных и конечно-элементных моделях [9, 10, 11], и реализованные в программных комплексах ProSHAKE, NERA и др. Нелинейный характер реакции грунта учитывается приведением к эквивалентной линейной модели с эффективными параметрами модуля и демпфирования.

Многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями отечественных и зарубежных специалистов установлено, что сооружение и основание работают как единая система, и характер их взаимодействия определяется соотношением жесткостных параметров надфундаментной части, фундамента и грунтов основания. Наиболее полно проблема взаимодействия сооружений и оснований при сейсмических нагрузках рассмотрена в работах [12, 13, 14]. Отдельные вопросы работы системы «грунт–сооружение» исследованы в [9, 15–17, 18, 19, 20].

Возможность представления сооружения в качестве отдельного слоя многослойной системы обоснована в работах С.В. Медведевой [7], Э.Е. Хачияна [8]. Результаты сравнительного расчета динамических характеристик зданий нескольких типов с применением модели многослойной системы на жестком основании, консольного стержня и КЭ модели показали достаточно высокую степень их согласованности [21].

Воздействие сейсмического импульса на слоистую модель

Поведение сооружения под действием сейсмической нагрузки определяется характером его взаимодействия с грунтовым основанием. При этом наибольший эффект достигается при резонансных явлениях, когда периоды свободных колебаний сооружения совпадают или близки к периодам колебаний оснований. Для определения динамических свойств системы «сооружение–многослойное основание» используем слоистую модель, изображенную на рис.1. Рассматриваются поперечная волна, распространяющаяся под прямым углом из нижнего слоя.

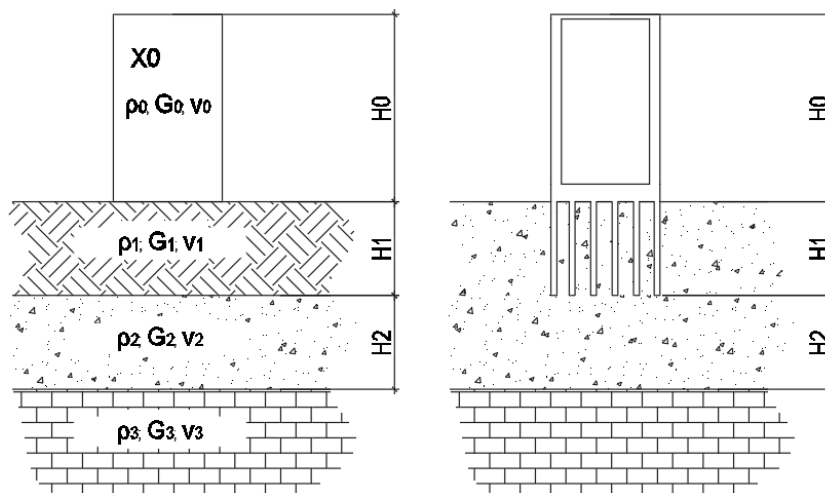


Рисунок 1 – Расчетная слоистая модель системы «сооружение-основание»: слой 0 – сооружение, слой 1 – свайное основание, слой 2 – подстилающий грунт, слой 3 – коренные породы

Figure 1 – The calculation layered model of the "structure-base" system: layer 0 – structure, layer 1 – pile foundation, layer 2 – underlying soil, layer 3 – bedrock

Коренные породы рассматриваем как однородное упругое полупространство, подстилающий слой – однородный изотропный. Каждый j -й слой толщиной H_j характеризуется скоростью распространения упругих волн V_j , модулем сдвига G_j и плотностью ρ_j , ($j=1,2, \dots, n$). Характеристики упругого полупространства: V_{n+1} , G_{n+1} , ρ_{n+1} . Сооружение представляется в виде слоя с эквивалентными параметрами. В общем случае и само сооружение может также рассматриваться в виде слоистой системы.

Для каждого j -го слоя вводится локальная система координат $0 \leq x_j \leq H_j$.

Для исследования динамических свойств рассматриваемой системы построим ее амплитудно-частотную характеристику. Для этого рассмотрим картину колебаний системы (рис.2).

Из нижнего слоя коренных пород в подстилающий грунт вертикально распространяется поперечная сейсмическая волна $f(t)$. Переходя в поверхностный слой, сейсмическая волна преобразуется в новую волну $U_n f(t)$, которая, переходя в слой $n-1$, приобретает вид $U_{n-1} f(t)$ и далее до $U_0 f(t)$. Доходя до границы слоев n и $n-1$, сейсмическая волна одновременно отражается от границы, образуя волну $D_n f(t)$. Таким образом, при колебаниях каждого слоя возникают два вида волн - $U_i f(t)$ и $D_i f(t)$, которые направлены в противоположные стороны.

Для построения амплитудно-частотной характеристики находим реакцию системы на гармоническое колебание вида $f(t)=e^{i\omega t}$ с частотой ω и единичной амплитудой, распространяющееся из слоя скальных пород бесконечной мощности. Проникая в каждый из верхних слоев, волна преобразуется в новые волны с аналогичной частотой ω , но с различными амплитудами $U_n, U_{n-1}, \dots, \dots, U_k, \dots, U_0$:

$$U_k e^{i\omega(t + \frac{x_{k+1}}{v_k})} \quad (1)$$

Каждая из вновь образованных волн отражается от поверхности слоев и преобразуется в обратную волну в виде:

$$D_k e^{i\omega(t - \frac{x_k}{v_k})} \quad (2)$$

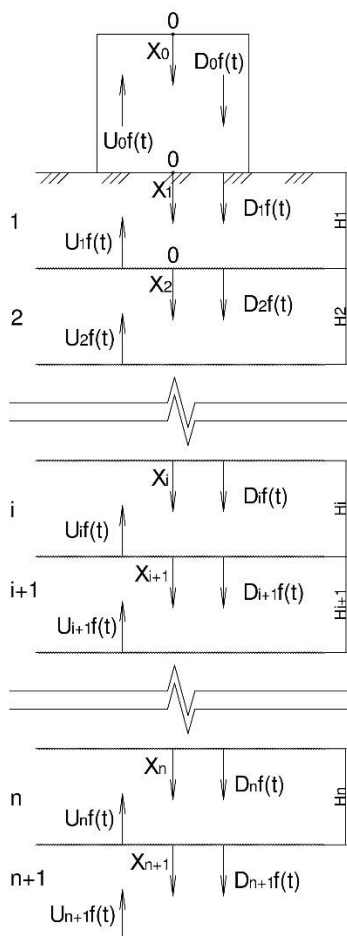


Рисунок 2 – Схема распространения сейсмических волн в системе

Figure 2 – The scheme of propagation of seismic waves in the system

Затухание колебаний j -го слоя по мере распространения волны учитываем введением комплексного волнового числа

$$c_j(\omega) = \bar{a}_j(\omega) - i\bar{b}_j(\omega), \quad (3)$$

действительную и мнимую части которого находим из системы уравнений (1)

$$\left. \begin{aligned} [\bar{a}_j(\omega)]^2 - [\bar{b}_j(\omega)]^2 &= \frac{\omega^2}{v_j^2 [1 + (\psi_j/2\pi)^2]}, \\ 2\bar{a}_j(\omega)\bar{b}_j(\omega) &= \frac{\omega^2(\psi_j/2\pi)}{v_j^2 [1 + (\psi_j/2\pi)^2]} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где ψ_j – коэффициент поглощения j -го слоя, связанный с декрементом колебаний δ_j зависимостью $\delta_j = 2 \psi_j$. Логарифмический декремент колебаний принимаем постоянным для каждого слоя.

С учетом затухания уравнения волн в слоях имеют вид

$$\left\{ \begin{aligned} F_0(x_0, t) &= U_0(\omega) e^{i\omega(t + \frac{x_1}{v_0})} e^{-ix_0 c_0(\omega)} + D_0(\omega) e^{i\omega(t - \frac{x_0}{v_0})} e^{-ix_0 c_0(\omega)}, \text{ где } x_1 = x_0 - H_0 \\ F_1(x_1, t) &= U_1(\omega) e^{i\omega(t + \frac{x_2}{v_1})} e^{-ix_1 c_1(\omega)} + D_1(\omega) e^{i\omega(t - \frac{x_1}{v_1})} e^{-ix_1 c_1(\omega)}, \quad x_2 = x_1 - H_1 \\ &\dots \dots \dots \\ F_n(x_n, t) &= U_n(\omega) e^{i\omega(t + \frac{x_{n+1}}{v_n})} e^{-ix_n c_n(\omega)} + D_n(\omega) e^{i\omega(t - \frac{x_n}{v_n})} e^{-ix_n c_n(\omega)}, \quad x_{n+1} = x_n - H_n \\ F_{n+1}(x_{n+1}, t) &= 1 \cdot e^{i\omega(t + \frac{x_{n+1}}{v_{n+1}})} e^{-ix_{n+1} c_{n+1}(\omega)} + D_{n+1}(\omega) e^{i\omega(t - \frac{x_{n+1}}{v_{n+1}})} e^{-ix_{n+1} c_{n+1}(\omega)} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Неизвестные амплитуды $U_0(\omega), U_1(\omega), \dots, U_n(\omega), D_0(\omega), D_1(\omega), \dots, D_n(\omega), D_{n+1}(\omega)$ находим из следующих граничных условий:

– равенство нулю напряжений на уровне верха сооружения

$$G_0 \frac{\partial F_0(x_0, t)}{\partial x_0} = 0 \text{ при } x_0 = 0 \quad (6)$$

– равенство перемещений и касательных напряжений на границах слоев

$$F_j(x_j, t) = F_{j+1}(x_{j+1}, t), \quad G_j \frac{\partial F_j(x_j, t)}{\partial x_j} = G_{j+1} \frac{\partial F_{j+1}(x_{j+1}, t)}{\partial x_{j+1}} \text{ при } x_j = H_j, x_{j+1} = 0; \quad (7)$$

На уровне коренных пород перемещение слоя n определяется падающей волной и отраженной от границы нижнего слоя

$$F_n(x_n, t) = e^{i\omega t} e^{-ix_n c_n(\omega)} - D_{n+1}(\omega) e^{i\omega t} e^{-ix_n c_n(\omega)} \text{ при } x_n = H_n. \quad (8)$$

Из условий (6) – (8) получаем $2n+1$ линейных алгебраических уравнений

$$\mathbf{A}(\omega)\mathbf{X}(\omega) = \mathbf{B}(\omega). \quad (9)$$

Элементы матрицы \mathbf{A} находим по формулам:

$$\begin{aligned}
 A_{0,0} &= e^{-i\omega t_0} [b_0(\omega) + i(a_0(\omega) - 1)], \\
 A_{0,n} &= b_0(\omega) + i(a_0(\omega) + 1), \\
 &\text{при } j=1, \dots, n: \\
 A_{j,j-1} &= e^{-i\omega t_{j-1} a_{j-1}(\omega)} e^{-\omega t_{j-1} b_{j-1}(\omega)}, \\
 A_{j,j+n-1} &= e^{-i\omega t_{j-1} [1+a_{j-1}(\omega)]} e^{-\omega t_{j-1} b_{j-1}(\omega)}, \\
 A_{j,j+n} &= -1, \\
 A_{n+j,j-1} &= k_{j-1} e^{-i\omega t_{j-1} b_{j-1}(\omega)} e^{-i\omega t_{j-1} a_{j-1}(\omega)} [b_{j-1}(\omega) + i(a_{j-1}(\omega) - 1)], \\
 A_{n+j,n+j-1} &= k_{j-1} e^{-i\omega t_{j-1} b_{j-1}(\omega)} e^{-i\omega t_{j-1} [1+a_{j-1}(\omega)]} [b_{j-1}(\omega) + i(a_{j-1}(\omega) + 1)], \\
 A_{n+j,n+j} &= -b_j(\omega) - i[a_j(\omega) + 1],
 \end{aligned} \tag{10}$$

при $j=1, \dots, n-1$:

$$\begin{aligned}
 A_{j,j} &= -e^{-i\omega t_j}, \\
 A_{n+j,j} &= -e^{-i\omega t_j} [b_j(\omega) + i(a_j(\omega) - 1)].
 \end{aligned}$$

Вектор неизвестных амплитуд

$$\mathbf{X}(\omega) = [U_0(\omega), U_1(\omega), \dots, U_{n-1}(\omega), D_0(\omega), D_1(\omega), \dots, D_n(\omega)]^T \tag{11}$$

Вектор правых частей

$$B_n = 1; B_{2n} = b_n(\omega) + i[a_n(\omega) - 1]. \tag{12}$$

Остальные элементы матрицы **A** и вектора **B** равны нулю.

В формулах (10) – (12) приняты следующие параметры:

$$k_j = \frac{G_j V_{j+1}}{G_{j+1} V_j} = \frac{\rho_j V_j}{G \rho_{j+1} V_{j+1}} - \text{отношение сейсмических жесткостей слоев } j \text{ и } j+1,$$

$$a_j(\omega) = \bar{a}_j(\omega) \frac{V_j}{\omega}, \quad b_j(\omega) = \bar{b}_j(\omega) \frac{V_j}{\omega},$$

$$t_j = H_j / V_j - \text{время прохождения волны через слой } j.$$

Амплитудно-частотные характеристики слоистой системы с учетом демпфирующих свойств материалов слоев

Амплитудно-частотная характеристика слоистой системы позволяет определить резонансные частоты системы, равномерность их распределения на определенном диапазоне частот, степень фильтрации системы на различных частотах, а также оценить влияние характеристик грунтовой толщи на сейсмические колебания сооружения.

Рассмотрим задачу построения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) системы на примере трехслойной модели, изображенной на рис. 1. Слой №0 («сооружение») представляет собой железобетонную этажерку. Слой № 1 «свайно-грунтовой массив». Слой № 2 («грунтовой массив») – суглинки азрированные. Слой № 3 («скальное основание») принят безграничным. В рамках исследования было принято условное сооружение в виде этажерки. Характеристики

конструкций модели: плита покрытия $h=200$ мм; колонны 400×400 мм (4 шт.); плита ростверка $h=300$ мм; сваи 300×300 мм (36 шт.); модуль упругости железобетона $E=3 \cdot 10^6$, т/м²; плотность грунта $\rho=1,75$ т/м³; общая высота $H=18,5$ м.

Расчетные характеристики слоистой модели представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные характеристики модели

Table 1 – Design characteristics of the model

№ слоя	H , м	ρ , т·с ² /м ⁴	v , м/с	δ	ψ
0	10,5	0,01841	1164,0	0,3	0,15
1	8,0	0,185	200,0	0,57	0,29
2	30,0	0,175	213,2	0,6	0,3
3	-	3,0	1500	0,02	0,01

Уравнения движения слоев в стационарном режиме имеют вид:

$$F_0(\omega, x_0) = U_0(\omega) e^{i\frac{\omega}{V_0}(x_0 - H_0 - a_0(\omega)x_0)} e^{-\frac{\omega}{V_0}b_0(\omega)x_0} + D_0(\omega) e^{-i\frac{\omega}{V_0}(x_0 + a_0(\omega)x_0)} e^{-\frac{\omega}{V_0}b_0(\omega)x_0} \quad (13)$$

$$F_1(\omega, x_1) = U_1(\omega) e^{i\frac{\omega}{V_1}(x_1 - H_1 - a_1(\omega)x_1)} e^{-\frac{\omega}{V_1}b_1(\omega)x_1} + D_1(\omega) e^{-i\frac{\omega}{V_1}(x_1 + a_1(\omega)x_1)} e^{-\frac{\omega}{V_1}b_1(\omega)x_1} \quad (14)$$

$$F_2(\omega, x_2) = U_2(\omega) e^{i\frac{\omega}{V_2}(x_2 - H_2 - a_2(\omega)x_2)} e^{-\frac{\omega}{V_2}b_2(\omega)x_2} + D_2(\omega) e^{-i\frac{\omega}{V_2}(x_2 + a_2(\omega)x_2)} e^{-\frac{\omega}{V_2}b_2(\omega)x_2} \quad (15)$$

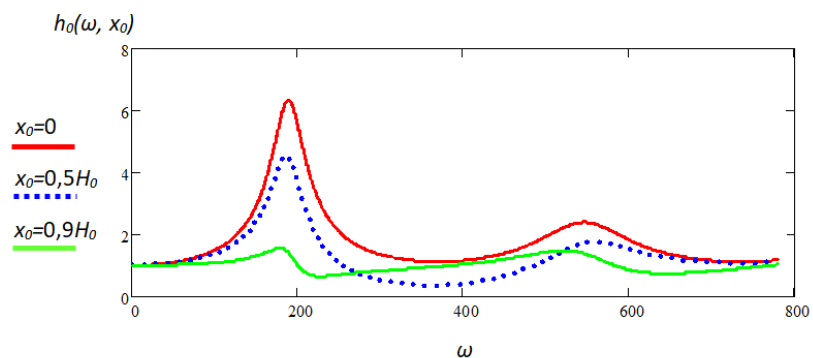
$$F_3(\omega, x_3) = e^{i\frac{\omega}{V_3}(x_3 - a_3(\omega)x_3)} e^{-\frac{\omega}{V_3}b_3(\omega)x_3} + D_3(\omega) e^{-i\frac{\omega}{V_3}(x_3 + a_3(\omega)x_3)} e^{-\frac{\omega}{V_3}b_3(\omega)x_3} \quad (16)$$

Функции (13–16) позволяют найти амплитудно-частотные характеристики как для отдельных слоев, так и для всей системы в целом.

Амплитудно-частотные характеристики для j -го слоя вычисляем как отношение амплитуды $F_i(\omega, x_j)$ к амплитуде входящей из $(j+1)$ -го слоя волны $F_{j+1}(\omega, 0)$

$$h_j(\omega, x_j) = \frac{F_i(\omega, x_j)}{F_{j+1}(\omega, 0)} \quad (17)$$

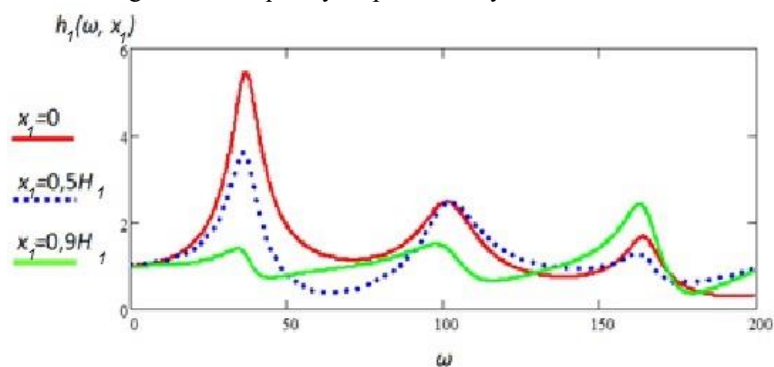
Графики АЧХ для 0, 1 и 2 слоев изображены на рисунках 3 – 5. В таблицах под графиками приведены значения несущих частот слоя, работающего как элемент в системе, в правой колонке – соответствующие частоты колебаний однородного слоя с аналогичными характеристиками (18).



№ формы	Частота ω , 1/с	Частота однородного слоя, ω_0 , 1/с
1	189,5	182,8
2	548,4	548,5

Рисунок 3 – АЧХ слоя № 0 «Сооружение»

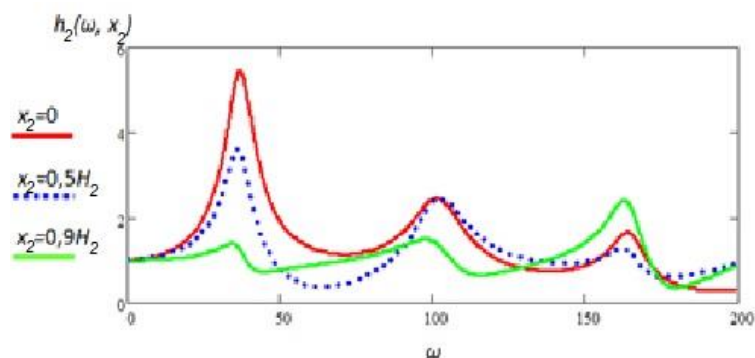
Figure 3 – Frequency response of layer No. 0 "Construction"



№ формы	Частота ω , 1/с	Частота однородного слоя, ω_0 , 1/с
1	37,2	39,3
2	102,2	117,8
3	164,0	196,4

Рисунок 4 – АЧХ слоя №1 «Свайно-грунтовый массив» $h_1(\omega, x_1)$

Figure 4 – Frequency response of layer No. 1 "Pile-ground array" $h_1(\omega, x_1)$



№ формы	Частота ω , 1/с	Частота однородного слоя, ω_0 , 1/с
1	37,2	39,3
2	102,2	117,8
3	164,0	196,4

Рисунок 5 – АЧХ слоя №2 «Массив подстилающих грунтов» $h_2(\omega, x_2)$

Figure 5 – Frequency response of layer No. 2 "Array of underlying soils" $h_2(\omega, x_2)$

Частоты свободных колебаний однородного основания вычисляются по формуле [9]

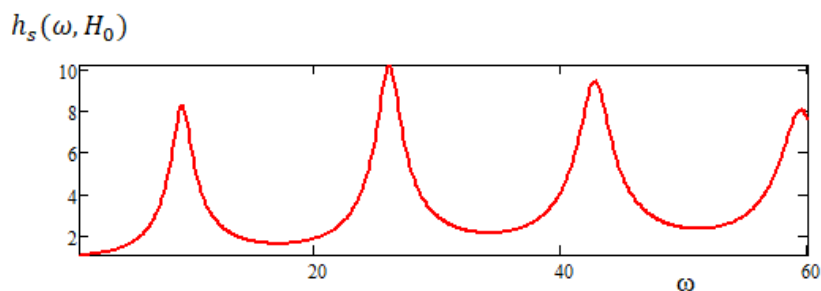
$$\omega_n = (2n - 1) \frac{\pi V}{2H}, n=1,2, \dots \quad (18)$$

Амплитудно-частотная характеристика системы «сооружение-основание»

$$h_s(\omega, x) = \frac{F(\omega, x)}{F_{n+1}(\omega, 0)}, \quad x=0, \dots, H_0 + H_1 + H_2, \quad (19)$$

где $F(\omega, x)$ – амплитуда колебаний всего пакета слоев, $F_{n+1}(\omega, 0)$ – амплитуда волны, входящей из слоя коренных пород.

График АЧХ $h_s(\omega, x)$ на уровне дневной поверхности грунта ($x=H_0$) приведен на рис.6. Интервал частот $\omega \in [0, 60]$ с⁻¹ соответствует интервалу основных несущих частот спектра сейсмического ускорения грунтового основания



№ формы	Частота ω , 1/с	Приближенные частоты для осредненной скорости, ω_0 , 1/с
1	9,4	8,69
2	26,1	26,08
3	42,9	43,46
4	59,5	60,85

Рисунок 6 – АЧХ системы «сооружение-основание»

Figure 6 – Frequency response of the "construction-base" system

Для сравнения вычислим несущие частоты колебаний грунтовой толщи по приближенным формулам способом осредненной скорости [9], объединив слои 1 и 2.

Средняя скорость по слоям составляет $\bar{V} = 210,28$ м/с, средняя плотность $\bar{\rho} = 06177$ тс²/м⁴, $\bar{H} = 38$ м. Значения полученных частот приведены в таблице рис.6.

Вероятностная оценка динамических свойств слоистой системы

График АЧХ системы (рис.6) получен при средних значениях расчетных параметров слоев (табл.1). Вместе с тем физико-механические параметры грунтовых оснований характеризуются достаточно высокой статистической изменчивостью. Согласно данным натурных исследований динамических характеристик грунтов, рекомендуемых [23] для расчетов сейсмостойкости системы «сооружение–основание», коэффициент вариации плотности грунтов составляет 0,03-0,05, коэффициент вариации скорости поперечных сейсмических волн колебаний грунта – 0,28-0,33.

Проведена оценка влияния статистической изменчивости скорости распространения поперечных сейсмических волн на резонансные частоты рассматриваемой слоистой системы. Для вероятностного расчета использовался метод Монте-Карло. Коэффициент вариации принят равным $f_v=0,3$. Рассмотрена изменчивость скорости только для слоя № 2.

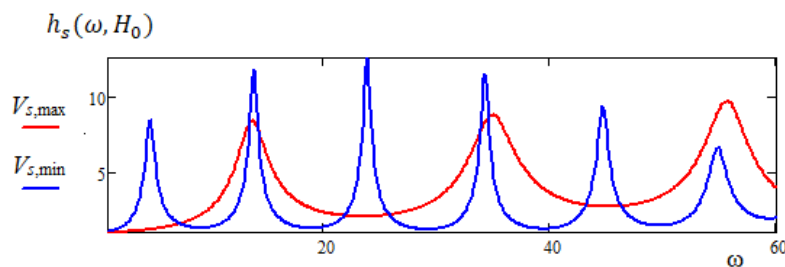
По результатам расчета коэффициент вариации для всех несущих частот практически одинаков и равен $k_{\omega_i} = 0,28$.

На рис. 7 показаны графики АЧХ системы для минимальных и максимальных значений скорости V_2 в интервале $\bar{V}_2 \pm 1,64\sigma_{V_2}$, что соответствует обеспеченности 0,95:

$$V_{2,min} = \bar{V}_2 - 1,64\sigma_{V_2}, V_{2,max} = \bar{V}_2 + 1,64\sigma_{V_2}, \quad (20)$$

где \bar{V}_2 – средняя скорость, σ_{V_2} – стандарт.

Как видно из графика, при минимальных в пределах статистической изменчивости значениях скорости поперечных сейсмических волн спектр собственных частот системы сгущается и смещается в сторону более низких значений. При $V_{2,min}$ в интервал $[0,60]$ с⁻¹ входят 6 резонансных частот, при $V_{2,max}$ – 3



№ формы	Резонансные частоты ω , с ⁻¹ при $V_{2,max}$	Резонансные частоты ω , с ⁻¹ при $V_{2,min}$
1	13,9	4,8
2	35,0	13,9
3	55,8	23,9
4	-	34,4
5	-	44,7
6	-	54,9

Рисунок 7 – АЧХ системы для минимальных и максимальных значений скорости V_2

Figure 7 – Frequency response of the system for minimum and maximum speed values

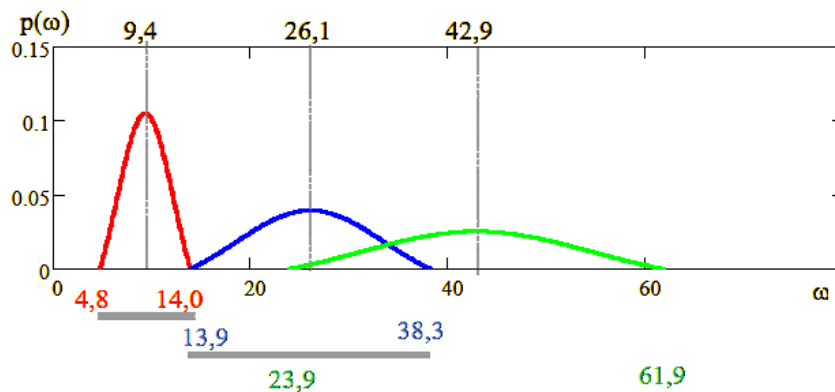


Рисунок 8 – Интервалы возможных значений частот свободных колебаний слоистой системы с обеспеченностью 1,64 стандарта σ_{ω_i}

Figure 8 – Intervals of possible values of free oscillation frequencies of a layered system with a security of 1.64 σ_{ω_i} standard

Несущие частоты свободных колебаний системы являются случайными величинами, и их фактические значения находятся в определенных интервалах, которые могут частично перекрываться. Так, на рис.8 интервал частот ($23,9-38,3 \text{ с}^{-1}$) соответствует и 2-й и 3-й формам свободных колебаний.

Выводы

Представленный алгоритм расчета системы «сооружение–слоистое основание» является базовым детерминированным алгоритмом, реализованным в форме, удобной для его дальнейшего развития на вероятностном уровне и решения задач оценки надежности системы при сейсмических воздействиях.

Решена задача исследования динамических характеристик слоистой системы «сооружение–свайное основание–грунт», получены амплитудно-частотные характеристики для отдельных слоев и для системы в целом. Сравнение полученных несущих частот с приближенными частотами для осредненной скорости показало достаточно близкие результаты: погрешность составила от 0,1% до 7,5%.

Установлена высокая степень влияния статистической изменчивости скорости распространения поперечных сейсмических волн на характер распределения резонансных частот системы. При заданном коэффициенте вариации скорости поперечных сейсмических волн колебаний грунта $f_v=0,3$ коэффициент вариации для всех частот практически одинаков и равен $k_{от}=0,28$.

С уменьшением скорости распространения поперечных волн V_s в грунте спектр резонансных частот слоистой системы сгущается и смещается в сторону более низких значений. При этом собственные частоты характеризуются достаточно высокой статистической изменчивостью, и интервалы их возможных значений могут частично перекрываться.

Список литературы

1. Саваренский Е.Ф. Сейсмические волны. Москва: Недра. 1972. 294 с.
2. Ратникова Л.И. Методы расчета сейсмических волн в тонкослоистых средах. Москва: Мир. 1973. 124 с.
3. Messiou S., Badreddine S., Dias D. The seismic response of foundations subjected to oblique plane waves. Symposium of the international association for boundary element methods . Breshcia, Italy 5–8 September, 2011.
4. Messiou S., Badreddine S., Dias D. Harmonic seismic waves response of a 3D rigid surface on heterogeneous soil layer. 15WCEE, Lisbon. 2012.
5. Chiang-Liang V. (1974). Dynamic response of structures in layered soils, MIT Res. Rep. R74-10, Soils Pub., no. 335, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
6. Семёнова Ю.В. Расчетные методы определения резонансных свойств грунтов при сейсмическом микрорайонировании // *Международный научно-исследовательский журнал*. Выпуск: № 10 (41), 2015. DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2015.41.202>.
7. Волновые процессы в конструкциях зданий при сейсмических воздействиях. Москва: Наука. 1987.160 с.
8. Хачиян Э.Е. Сейсмические воздействия и прогноз поведения сооружений. Ереван: Гитутюн. НАН РА. 2015. 555 с.
9. Seed H.B., Lysmer J., Hwang R. Soil-Structure Interaction Analyses for Evaluating Seismic Response *Journal of the Geotechnical Engineering Div., ASCE*. 1975, vol. 101, no. GT5, pp. 439–457.

10. Bardet J.P., Tobita T., Nera A. Computer Program for Nonlinear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits. 2001. 44 p.
11. Schnabel P.B., Lysmer J., Seed H.B. (1972). SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites. Report No. UCB/EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December, 102 p.
12. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб.: Наука. 1998. 255 с.
13. Тяпин А.Г. Учет взаимодействия сооружений с основанием при расчетах на сейсмические воздействия: Научное издание. Издательство АСВ. 2014. 136 с.
14. Тяпин А.Г. Расчет сооружений на сейсмические воздействия с учетом взаимодействия с грунтовым основанием. Научное издание. Москва: Издательство АСВ. 2013. 392 с.
15. Khalil L., Sadek M., Shahrour I. (2007). Influence of the soil-structure interaction on the fundamental period of buildings. *Journal of Earthquake Engineering*. Dyn. 2007, 36: 2445–2453.
16. Mylonakis G., Gazetas G. (2000). Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental. *Journal of Earthquake Engineering*. Vol. 4, no. 3(2000), pp. 277–301, Imperial College Press.
17. Stewart J.P., Fenves G.L., Seed R.B. (1999). Seismic soil-structure interaction in buildings. I: Analytical Methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 125, no. 1, January, 1999. ASCE, 1090-0241/99/0001-0026 0037.
18. Pshenichkina V.A., Zhidenko A.S., Sukhina K.N., Sukhin K.A Modeling a "pile-soil array" system under the seismic load action taking into account shock-absorbing properties of the soil. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 913 (2020) 022011.
19. Pshenichkina V.A., Zhidenko A.S., Sukhina K.N., Drozdov V.V. Investigation of the dynamic characteristics of the “building-pile foundation” system with the random parameters of foundation soils. *E3S Web of Conferences* 281, 01029 (2021).
20. Dangla P. (1988). A plane strain soilstructure interaction model. *Earthquake engineering & structural dynamics*. Vol. 16(8), 1115–1128.
21. Пшеничкина В.А., Рекунов С.С., Иванов С.Ю., Махмеддин Ч., Хамиси С., Жиденко А.С. Применение слоистой модели к расчетам динамических характеристик зданий при сейсмических воздействиях // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно–строительного университета. Серия: строительство и архитектура*. 2022. №1 (86). С. 43–57.
22. СП 358.1325800.2017 Сооружения гидротехнические. Правила проектирования и строительства в сейсмических районах. Москва: Росстандарт; 2017.

References

1. Savarenskij E.F. Sejsmicheskie volny. Moscow: Nedra, 1972, 294 p. [In Russian]
2. Ratnikova L.I. Metody rascheta sejsmicheskikh voln v tonkosloistykh sredakh. Moscow: Mir, 1973, 124 p. [In Russian]
3. Messioud S., Badreddine S., Dias D. The seismic response of foundations subjected to oblique plane waves. Symposium of the international association for boundary element methods. Breshcia, Italy, 5–8 September, 2011.
4. Messioud S., Badreddine S., Dias D. Harmonic seismic waves response of a 3D rigid surface on heterogeneous soil layer. 15WCEE, Lisbon. 2012.
5. Chiang-Liang V. (1974). Dynamic response of structures in layered soils. MIT Res. Rep. R74-10, Soils Pub., no. 335, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.

6. Semyonova Yu.V. Raschetnye metody opredeleniya rezonansnykh svojstv gruntov pri sejsmicheskom mikrorajonirovanii. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. Vypusk no.10 (41), 2015. DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2015.41.202>. [In Russian]
7. Volnovye processy v konstrukciyakh zdaniy pri sejsmicheskikh vozdeystviyakh. Moscow: Nauka, 1987. 160 p. [In Russian]
8. Khachiyani E. Sejsmicheskie vozdeystviya i prognoz povedeniya sooruzhenij. Yerevan: Gitutyun. NAS RA. 2015. 555 p. [In Russian]
9. Seed H.B., Lysmer J., Hwang R. Soil-Structure Interaction Analyses for Evaluating Seismic Response. *Journal of the Geotechnical Engineering*. Div., ASCE. 1975, vol.101, no. GT5, pp. 439–457.
10. Bardet J.P., Tobita T., Nera A. Computer Program for Nonlinear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits. 2001. 44 p.
11. Schnabel P.B., Lysmer J., Seed H.B. (1972) SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites. Report no. UCB/EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December, 102 p.
12. Birbraer A.N. Raschet konstrukcij na sejsmostojkost. SPb.: Nauka, 1998. 255 p. [In Russian]
13. Tyapin A.G. Uchet vzaimodejstviya sooruzhenij s osnovaniem pri raschetax na sejsmicheskie vozdeystviya: Nauchnoe izdanie. Moscow: Izdatel'stvo ASV. 2014. 136 p. [In Russian]
14. Tyapin A.G. Raschet sooruzhenij na sejsmicheskie vozdeystviya s uchetom vzaimodejstviya s gruntovym osnovaniem. Nauchnoe izdanie. Moscow: Izdatel'stvo ASV. 2013. 392 p. [In Russian]
15. Khalil L., Sadek M., Shahrour I. (2007). Influence of the soil-structure interaction on the fundamental period of buildings. *Journal of Earthquake Engineering*. Dyn. 2007; 36: 2445 – 2453.
16. Mylonakis G., Gazetas G. (2000). Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental. *Journal of Earthquake Engineering*. Vol. 4, no. 3(2000) 277–301, Imperial College Press.
17. Stewart J.P., Fenves G.L., Seed R.B. (1999). Seismic soil-structure interaction in buildings. I: Analytical Methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 125, no. 1, January, 1999. ASCE, 1090-0241/99/0001-0026 0037.
18. Pshenichkina V.A., Zhidenko A.S., Sukhina K.N., Sukhin K.A. Modeling a "pile-soil array" system under the seismic load action taking into account shock-absorbing properties of the soil. IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering*. 913 (2020) 022011.
19. Pshenichkina V.A., Zhidenko A.S., Sukhina K.N., Drozdov V.V. Investigation of the dynamic characteristics of the “building - pile foundation” system with the random parameters of foundation soils. E3S Web of Conferences 281, 01029 (2021)
20. Dangla P. (1988). A plane strain soil-structure interaction model. *Earthquake engineering & structural dynamics*. Vol.16(8), 1115–1128.
21. Pshenichkina V.A., Rekunov S.S., Ivanov S.Yu., Makhieddin Ch., Xamisi S., Zhidenko A.S. Primenenie sloistoj modeli k raschetam dinamicheskikh kharakteristik zdaniy pri sejsmicheskikh vozdeystviyakh. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno–stroitel'nogo universiteta. Seriya: stroitel'stvo i arhitektura*. 2022, no.1 (86), pp. 43–57. [In Russian]

22. SP 358.1325800.2017 Sooruzheniya gidrotekhnicheskie. Pravila proektirovaniya i stroitelstva v seismicheskikh rajonakh. Moscow: Rosstandart; 2017. [In Russian]

Информация об авторах / Information about authors

Пшеничкина Валерия Александровна, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет. Волгоград, Российская Федерация

Valeria A. Pshenichkina, Dr. Sci. (Engineering), Professor. FS FEI HE Volgograd State Technical University. Volgograd, Russian Federation

Дроздов Вячеслав Вячеславович, кандидат технических наук, Волгоградский государственный технический университет. Волгоград, Российская Федерация
drozdov_jm@mail.ru

Vyacheslav V. Drozdov, Cand. Sci. (Engineering). FS FEI HE Volgograd State Technical University. Volgograd, Russian Federation

Жиденко Артем Сергеевич, аспирант, Волгоградский государственный технический университет. Волгоград, Российская Федерация

Artem S. Zhidenko, PhD student, FS FEI HE Volgograd State Technical University. Volgograd, Russian Federation