

УДК 624.04; 69.07

**В. А. Пшеничкина, С. С. Рекунов, С. Ю. Иванов, Чанчан М.,
С. Хамиси, А. С. Жиденко**

Волгоградский государственный технический университет

ПРИМЕНЕНИЕ СЛОИСТОЙ МОДЕЛИ К РАСЧЕТАМ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗДАНИЙ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

В статье приведены результаты исследования динамических характеристик различных типов зданий, представленных в виде модели слоистой системы, при сейсмическом воздействии. Приведено аналитическое решение задач динамики зданий средней этажности, в том числе с учетом работы совместной работы со свайно-грунтовым массивом. Полученные значения частот, периодов и форм колебаний сопоставлялись с пространственными конечно-элементными моделями и моделью сплошного консольного стержня.

Ключевые слова: динамические характеристики, слоистая модель, сейсмическое воздействие, аналитический расчет.

Проблема взаимодействия сооружений с основанием при сейсмических воздействиях в настоящее время является одной из актуальных задач теории сейсмостойкости. В процессе землетрясения сооружение колеблется совместно с грунтовым основанием, и характер этих колебаний определяется соотношением динамических свойств грунтов строительной площадки и конструкций надфундаментной части [1, 2].

Грунты представляют собой нелинейную среду, прочностные и деформационные характеристики которой обладают стохастической изменчивостью. При прохождении сейсмической волны через грунт в нем возникает трехосное напряженно-деформированное состояние, изменяющееся в каждый момент времени. При этом происходит многократное отражение и преломление сейсмической волны при переходе от одного слоя к другому, а также при взаимодействии с сооружением.

Современные методы расчета позволяют решать подобные задачи, но в проектной практике они не используются ввиду их сложности и трудоемкости.

В практических расчетах задача решается в три этапа.

1. Грунтовое основание рассматривается как линейное вязкоупругое тело с осредненными характеристиками, слабо зависящими от особенностей конкретного основания [3]. К ним относятся плотность, модуль упругости, модуль сдвига, коэффициент Пуассона и коэффициент относительной диссипации энергии. Эти характеристики могут быть получены непосредственно при лабораторных и полевых испытаниях грунтов. Основание рассматривается либо однородным, либо горизонтально слоистым. Грунт при отсутствии сооружения моделируется в виде эквивалентной горизонтально-слоистой системы, каждая плоскость которой движется как жесткое тело [4, 5].

2. Взаимодействие фундамента и грунтового основания сводится к динамической контактной задаче жесткого штампа на поверхности однородного полупространства [6, 7]. Смещение штампа происходит под действием

нагрузки от сооружения и реакции со стороны основания. Штамп имеет шесть степеней свободы. Для линейной задачи определяют операторную матрицу равнодействующих сил реакции основания, представляющую собой матрицу коэффициентов динамической жесткости основания (матрицу импедансов).

В инженерной практике динамическая контактная задача сводится к достаточно приближенной расчетной схеме штампа, установленного на жесткую платформу, с системой пружин и вязких демпферов по шести степеням свободы. При сопоставлении с решением динамической контактной задачи для полупространства получены эмпирические формулы эквивалентных жесткостей и коэффициентов демпфирования для импедансов круглых и прямоугольных в плане штампов. Платформенная модель рассматривалась в работах [3, 8—10]. Модель используется для фундаментов поверхностного заложения и приемлема только для однородного полупространства [1]. Задача существенно усложняется для неоднородных оснований, имеющих, как правило, слоистое строение. Нижележащие слои грунта оказывают значительное влияние на кинематические параметры верхнего слоя и колебания надземных сооружений [4]. Задача расчета жесткого штампа на слоистом основании решена в работах [11—14].

3. На третьем этапе методами строительной механики проводится расчет динамических характеристик сооружения и его реакции на сейсмическую нагрузку, определяются усилия и деформации конструкций. При необходимости учета податливости основания с использованием платформенной модели уточняются динамические свойства системы, а также напряженно-деформированное состояние конструкций. Расчеты сооружений, как правило, выполняются в пространственной постановке с применением стандартных расчетных комплексов на основе МКЭ.

Таким образом, расчет системы «сооружение — основание» на сейсмические нагрузки связан со следующими неопределенностями: динамических характеристик многослойных оснований, параметров сейсмической нагрузки, условностью расчетных моделей. Поэтому расчет таких систем должен выполняться с вероятностных позиций с последующей оценкой надежности полученного решения [15, 16].

При этом целесообразно использование упрощенных аналитических моделей сооружений и применение аналитических методов вероятностного расчета рассматриваемых стохастически нелинейных систем [17].

Система «сооружение — основание» рассматривается как слоистая среда, состоящая из бесконечных по горизонтали слоев со своими физико-механическими характеристиками. Нижний подстилающий скальный слой представляет собой однородное полупространство. Принимается вертикальное распространение поперечных сейсмических волн.

В отличие от основания сооружение не является сплошным телом и содержит структурные неоднородности в виде стен, колонн, перегородок, перекрытий, которые составляют 20...30 % от его объема. Однако, как установлено в [18], при размерах структурных неоднородностей, значительно меньших длины сейсмической волны, такие среды можно рассматривать как однородные с приведенными параметрами упругости и плотности.

Цель данной статьи — установление адекватности применения слоистой модели для расчета динамических характеристик зданий. Рассматриваются здания невысокой этажности (до шести этажей) с несущими стенами.

Динамические характеристики слоистой системы

Пусть задана система из n слоев (рис. 1), каждый слой которой характеризуется плотностью ρ_k , модулем сдвига G_k и высотой h_k . Вязкие свойства среды, мало влияющие на периоды колебаний, не учитываются.

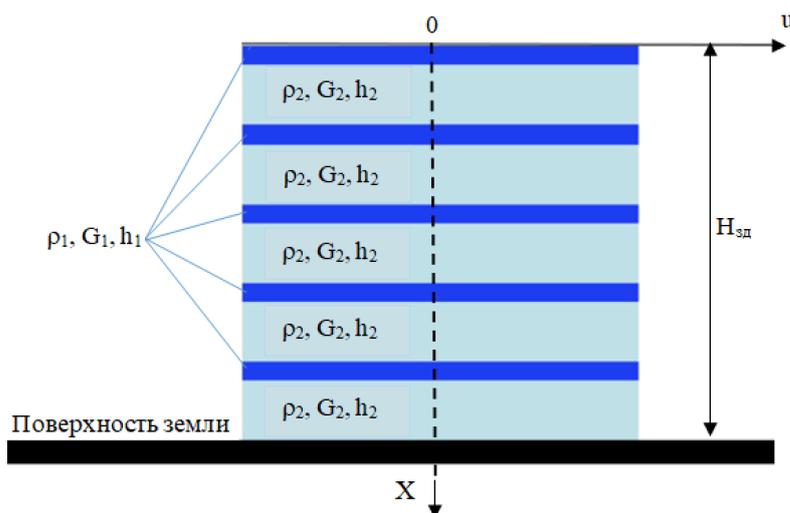


Рис. 1. Расчетная схема здания как слоистой системы

Уравнение свободных поперечных колебаний системы описывается дифференциальным уравнением второго порядка:

$$G_k \frac{\partial^2 \cdot u_k(x, t)}{\partial x^2} - \rho_k \frac{\partial^2 \cdot u_k(x, t)}{\partial t^2} = 0, \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad (1)$$

$$h_{k-1} < x \leq h_k, \quad k = 1, 2, \dots, n,$$

где $u_k(x, t)$ — горизонтальное смещение слоя с координатой x .

Решение уравнения (1) ищем в виде

$$u_k(x, t) = u_k(x) \cdot \sin(p \cdot t), \quad (2)$$

где p — искомая частота свободных колебаний неоднородной толщи.

После разделения переменных получим уравнение свободных колебаний

$$u_k''(x) + \lambda_k^2 \cdot u_k(x) = 0, \quad (3)$$

где $\lambda_k^2 = \frac{p^2 \cdot \rho_k}{G_k}$. (4)

Решение (3) определяем в виде

$$u_k(x) = A_k \cdot \sin(\lambda_k \cdot x) + B_k \cdot \cos(\lambda_k \cdot x). \quad (5)$$

Неизвестные параметры A_k , B_k и p находим из граничных условий:
при $x = 0$

$$u_i'(0) = 0, \quad (6)$$

при $x = H$

$$u_n(H) = 0, \quad H = \sum_{k=1}^n h_k \quad (7)$$

и условий равенства деформаций сдвига и напряжений на уровнях плоскостей раздела слоев

$$u_k(h_k) = u_{k+1}(h_k), \quad (8)$$

$$G_k \cdot u_k'(h_k) = G_{k+1} u_{k+1}'(h_k), \quad k = 1, 2, \dots, n-1, \quad (9)$$

$$\begin{cases} A_1 = 0; \\ A_n \sin \lambda_n H + B_n \cos \lambda_n H = 0; \\ A_k \sin \lambda_k h_k + B_k \cos \lambda_k h_k = A_{k+1} \sin \lambda_{k+1} h_k + B_{k+1} \cos \lambda_{k+1} h_k; \\ A_k G_k \lambda_k \cos \lambda_k h_k - B_k G_k \lambda_k \sin \lambda_k h_k = A_{k+1} G_{k+1} \lambda_{k+1} \cos \lambda_{k+1} h_k - B_{k+1} G_{k+1} \lambda_{k+1} \sin \lambda_{k+1} h_k. \end{cases} \quad (10)$$

Так как система уравнений (10) относительно $2n$ неизвестных коэффициентов A_k и B_k однородна, то единственное нетривиальное ее решение имеет место только при равенстве нулю детерминанта $2n$ степени, образованного из коэффициентов неизвестных.

Записав систему из $2n$ однородных уравнений относительно $2n$ неизвестных коэффициентов A_k и B_k и приравняв ее определитель нулю, найдем собственные частоты p_k . При подстановке значений

$$\lambda_k = p_k \sqrt{\frac{\rho_k}{G_k}} \quad (11)$$

в (5) получим соответствующие формы свободных колебаний.

На рис. 2 приведена матрица коэффициентов при неизвестных A_k и B_k для системы из n слоев. Здесь приняты следующие обозначения:

$$t_{ij} = \frac{h_i}{v_j}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (12)$$

где v_j — скорость прохождения сейсмической волны в j -м слое,

$$G_{ii} = \frac{G_i}{v_i}. \quad (13)$$

Для вычисления частот и форм свободных колебаний системы из n слоев разработана программа в среде MathCAD.

$$\begin{bmatrix}
1 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \sin(pt_{n+2,n} + pt_{n+2,n+1} + pt_{n+2,n+2}) \cos(pt_{n+2,n} + pt_{n+2,n+1} + pt_{n+2,n+2}) \\
\sin(pt_{n,n}) & \cos(pt_{n,n}) & -\sin(pt_{n+1,n}) & -\cos(pt_{n+1,n}) & \dots & \dots & 0 & 0 \\
\frac{G_{n,n}}{G_{n+1,n+1}} \cos(pt_{n,n}) & -\frac{G_{n,n}}{G_{n+1,n+1}} \sin(pt_{n,n}) & -\cos(pt_{n+1,n}) & \sin(pt_{n+1,n}) & \dots & \dots & 0 & 0 \\
\dots & \dots \\
\dots & \dots \\
0 & 0 & \dots & \dots & \sin(pt_{n+1,n+1}) & \cos(pt_{n+1,n+1}) & -\sin(pt_{n+2,n+1}) & -\cos(pt_{n+2,n+1}) \\
0 & 0 & \dots & \dots & \frac{G_{n+1,n+1}}{G_{n+2,n+2}} \cos(pt_{n+1,n+1}) & -\frac{G_{n+1,n+1}}{G_{n+2,n+2}} \sin(pt_{n+1,n+1}) & -\cos(pt_{n+2,n+1}) & \sin(pt_{n+2,n+1})
\end{bmatrix}$$

Рис. 2. Матрица коэффициентов при неизвестных A_k и B_k для системы из n слоев

Определение приведенных параметров слоистой системы

Здание рассматривается как слоистая система, состоящая из чередующихся однородных слоев, образованных перекрытиями, и неоднородных слоев, образованных вертикальными конструкциями с пустотами между ними. Параметры однородных слоев ρ_1 , G_1 , h_1 , эффективные параметры неоднородных слоев $\rho_3 = \rho_2$, $G_3 = G_2$, $h_3 = h_2$. Направление сейсмической волны вертикальное.

Расчетные эффективные параметры для неоднородных слоев вычисляем по формулам (7) и (8).

Эффективная плотность слоя

$$\rho_3 = \frac{A_c \cdot \rho_c}{A}. \quad (14)$$

Эффективный модуль сдвига при прохождении поперечной волны

$$G_3 = \frac{A_c \cdot E_c}{2 \cdot (1 + \mu) \cdot A}, \quad (15)$$

где A_c — площадь вертикальных конструкций (стен, колонн, перегородок), μ — плотность материала вертикальных конструкций; E_c — модуль упругости; A — площадь горизонтального сечения этажа.

Модуль сдвига в перекрытии при прохождении поперечной волны:

$$G_1 = \frac{E_1}{2(1 + \mu)}, \quad (16)$$

где μ — коэффициент Пуассона.

Модуль сдвига для здания в целом:

$$G_{3, \text{зд}} = \frac{\sum h_1 + \sum h_2}{\sum \frac{h_1}{G_1} + \sum \frac{h_2}{G_2}}. \quad (17)$$

Эффективная плотность здания в целом:

$$r_{3, \text{зд}} = \frac{\sum r_1 h_1 + \sum r_3 h_2}{\sum h_1 + \sum h_2}. \quad (18)$$

Скорость распространения поперечных волн в перекрытии в вертикальном направлении:

$$v_1 = \sqrt{\frac{G_1}{\rho_1}}. \quad (19)$$

Скорость распространения поперечных волн на этаже в вертикальном направлении:

$$v_2 = \sqrt{\frac{G_3}{\rho_3}}. \quad (20)$$

Скорость распространения поперечных волн в здании в вертикальном направлении:

$$v_{\text{э,зд}} = \sqrt{\frac{G_{\text{э,зд}}}{\rho_{\text{э,зд}}}}. \quad (21)$$

Расчет здания как слоистой системы

Пример 1. Рассмотрим условное пятиэтажное бескаркасное здание с несущими стенами. Здание обладает следующими характеристиками (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Расчетные параметры слоистой системы

$h_1, \text{м}$	$\rho_1, \text{т} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$	$G_1, \text{т}/\text{м}^2$	$v_1, \text{м}/\text{с}$	$h_2, \text{м}$	$\rho_2, \text{т} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$	$G_2, \text{т}/\text{м}^2$	$v_2, \text{м}/\text{с}$
0,25	0,22	$1,25 \cdot 10^5$	627,6	3,0	0,037	$2,083 \cdot 10^4$	935,5

Согласно теоретическому расчету [4] получаем следующие формы колебаний.

Первая форма (теоретическая). Частота колебаний $56,974 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$, период колебаний $0,11 \text{ с}^{-1}$ (рис. 3).

Вторая форма (теоретическая). Частота колебаний $169,807 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$, период колебаний $0,037 \text{ с}^{-1}$ (рис. 4).

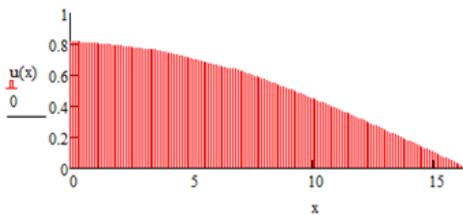


Рис. 3. Первая форма колебаний (теоретическая)

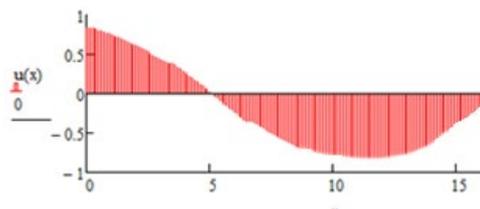


Рис. 4. Вторая форма колебаний (теоретическая)

Третья форма (теоретическая). Частота колебаний $278,638 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$, период колебаний $0,023 \text{ с}^{-1}$ (рис. 5).

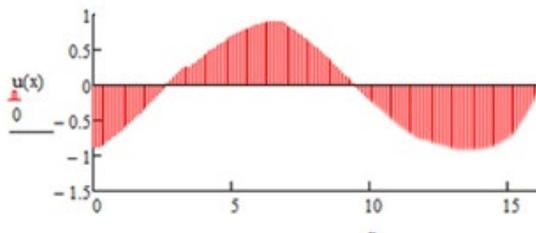


Рис. 5. Третья форма колебаний (теоретическая)

Как показали результаты многочисленных натурных исследований, проведенных в ЦНИИСК [19], динамические характеристики железобетонных и кирпичных зданий средней этажности с достаточной степенью соответствия описываются расчетной моделью сплошного консольного стержня с приведенными характеристиками при абсолютно жестком или упругом основании.

Поэтому для анализа полученных результатов проводим расчет этого же здания с использованием модели сплошного консольного стержня с жесткой заделкой в основании и по пространственной модели МКЭ в стандартных вычислительных комплексах.

Приведем формы колебаний, полученные по результатам расчет в ПК «Лира САПР» (рис. 6).

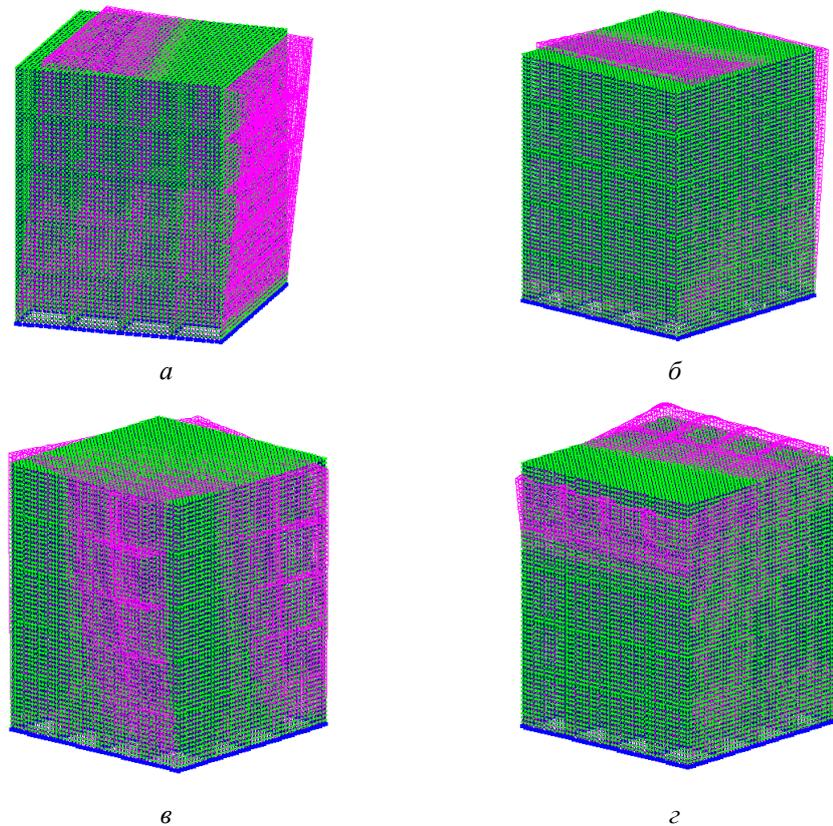


Рис. 6. Результаты расчета в ПК «Лира САПР»: *а* — первая форма колебаний; *б* — вторая форма колебаний; *в* — третья форма колебаний; *г* — четвертая форма колебаний

Полученные результаты (табл. 2) показывают достаточно близкие значения первых трех частот свободных колебаний, вычисленных по слоистой модели и модели сплошного стержня, а также первой сдвиговой частоты пространственной модели МКЭ. Вторая форма колебаний пространственной модели соответствует сдвиговым колебаниям в перпендикулярном направлении, третья и четвертая соответствуют крутильным колебаниям в горизонтальной и вертикальной плоскостях и не могут рассматриваться в рамках слоистой модели.

Т а б л и ц а 2

Результаты сравнения расчетов по теоретическим и численной моделям

Результаты расчета			Расхождение, %	
ПК «Лира САПР»	Консольный стержень	Слоистая модель	Слоистая модель/консольный стержень	Слоистая модель/ПК «Лира САПР»
<i>Периоды колебаний</i>				
0,109	0,104	0,11	5,455	0,909
—	0,035	0,037	5,405	—
—	0,021	0,023	8,696	—
<i>Частоты колебаний</i>				
57,711	60,671	56,974	6,094	1,294
—	182,013	169,807	6,706	—
—	303,355	278,638	8,148	—

Пример 2. Выполним расчет трехэтажного каркасно-связевого железобетонного здания (рис. 7).

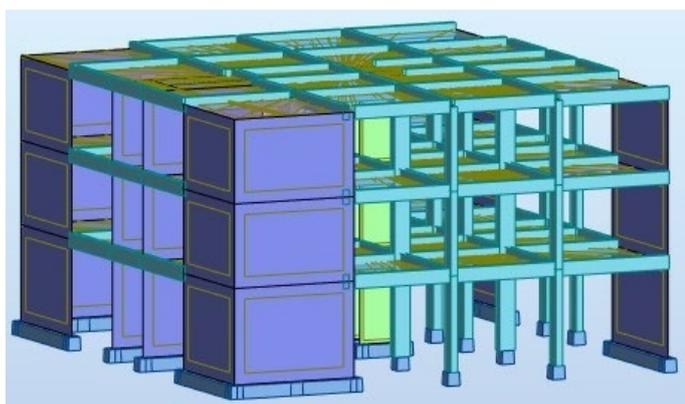


Рис. 7. Расчетная схема здания

Несущими элементами каркаса здания являются колонны, диафрагмы жесткости, балки и плиты перекрытия. Основные геометрические характеристики:

- высота здания 11 м;
- высота этажа 3,5 м;
- длина 21 м;
- ширина 19,4 м.

Модальный анализ здания проводим в ПК Robot Structural Analysis.

Для моделирования каркаса применялись следующие КЭ:

- frame с двумя узлами, каждый из которых имеет шесть степеней свободы для балок и колонны;
- прямоугольный элемент оболочки shell для диафрагм;
- перекрытия принимаются бесконечно жесткими в своей плоскости.

Основание принято недеформируемым. Результаты численного расчета в ПК Robot приведены на рис. 8 и 9.

Нагружен е/Собств. форма	Частота (Гц)	Период (сек)	Отн.мас.UX (%)	Отн.мас.UY (%)
4/ 1	5.63	0.18	70.91	0.04
4/ 2	5.81	0.17	70.95	75.94
4/ 3	9.04	0.11	76.83	75.94
4/ 4	22.06	0.05	97.79	75.95
4/ 5	22.32	0.04	97.80	97.53
4/ 6	24.58	0.04	97.80	97.53
4/ 7	25.94	0.04	97.92	97.53
4/ 8	25.97	0.04	98.03	97.53
4/ 9	26.69	0.04	98.03	97.53
4/ 10	27.18	0.04	98.23	97.53
4/ 11	27.34	0.04	98.23	97.56
4/ 12	28.88	0.03	98.24	97.56

Рис. 8. Частоты и периоды колебаний

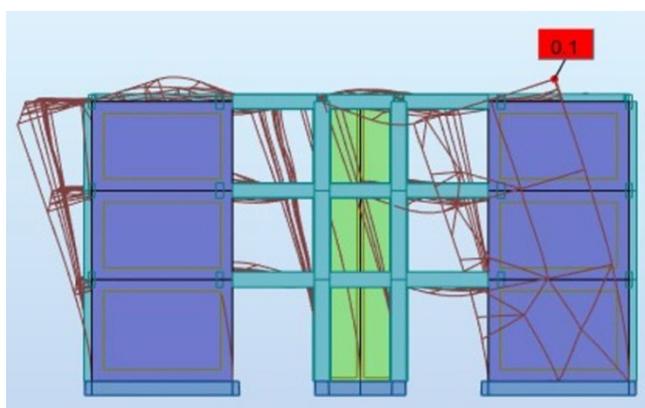


Рис. 9. Первая форма колебаний

Результаты вычислений показывают достаточно высокое совпадение частот свободных колебаний по расчетной модели слоистой системы с частотами колебаний сплошного стержня. Погрешности вычисления собственных частот составляют: по первой форме колебаний 3,2 %, по второй — 0,7 %, по третьей — 8 %. Период колебаний по первой сдвиговой форме, вычисленный в ПК Robot Structural Analysis, составляет 0,18 с, по модели слоистой системы — 0,226 с.

Пример 3. Рассмотрим сооружение в виде простой этажерки размерами в плане $5,8 \times 5,8$ м, высотой 10,5 м на свайном основании (рис. 10). Сваи приняты сечением $0,3 \times 0,3$ м длиной 8,0 м. Все конструкции сооружения выполнены из железобетона с модулем упругости $E_c = 3 \cdot 10^6$ т/м². Грунты основания представлены глинами полутвердыми плотностью 1,75 т/м³ с динамическим модулем упругости $E_g^{din} = 11\ 025$ т/м².

Исследуемая этажерка представлена в виде системы из четырех слоев. Каждый из слоев отвечает соответствующему элементу сооружения. Так, первый слой — плита покрытия, второй — вертикальные несущие конструкции (колонны), третий — плита ростверка, четвертый — свайно-грунтовый массив с приведенными характеристиками. Расчетные параметры слоистой системы приведены в табл. 3 и 4.

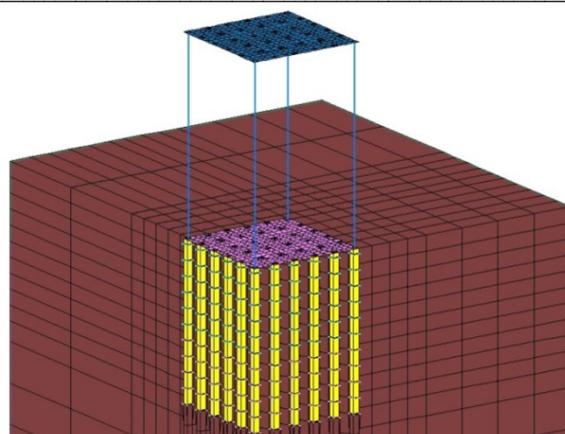


Рис. 10. Физическая модель исследуемого сооружения

Таблица 3

Расчетные параметры слоистой системы

Номер слоя	h_n , м	ρ_1 , т · с ² /м ⁴	G_n , т/м ²	v_n , м/с
1-й (плита покрытие)	0,2	2,8	$1,25 \cdot 10^5$	2113
2-й (колонны)	10,0	2,8	$3,378 \cdot 10^3$	2113
3-й (плита ростверка)	0,3	2,8	$1,25 \cdot 10^5$	2133
4-й (свайно-грунтовый массив)	8,0	1,851	$1,145 \cdot 10^4$	786,6

Таблица 4

Расчетные параметры сооружения в целом

Группа параметров № 1	h_n , м	ρ_1 , т · с ² /м ⁴	G_n , т/м ²	v_n , м/с
Расчетные параметры	18,5	2,39	$3,77 \cdot 10^3$	397,20
Группа параметров № 2	EA , т	EI , т · м ²	GA , т	q , т/м
Параметры жесткости	$1,009 \cdot 10^9$	$1,402 \cdot 10^8$	$1,268 \cdot 10^6$	80,4

Результаты расчета слоистой системы для первых трех форм колебаний приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты расчета слоистой системы

Номер формы	Частота p , рад/с	Период T , с
1	33,725	0,186
2	101,176	0,062
3	168,627	0,037

Основываясь на том, что метод слоистых систем в настоящее время трактуется как приближенный, в рамках исследования были приняты некоторые допущения. При проведении расчета МКЭ сооружение со свайно-грунтовым массивом представлено в виде маятниковой системы (консоль) с распределенной погонной массой по всей высоте. Так как объем грунтов основания несопоставимо больше исследуемого сооружения, предполагаем, что конечно-элементная модель будет иметь жесткую заделку в уровне острия свай.

Расчетные параметры, такие как продольная жесткость EA , изгибная жесткость EI , сдвиговая жесткость GA и погонная масса q маятниковой системы, соответствуют приведенным параметрам всего сооружения в целом, основываясь на параметрах каждого из слоев и геометрии сооружения.

Расчет МКЭ был выполнен в программном комплексе «Лира САПР». Консоль смоделирована двухузловыми элементами с заданными параметрами КЭ10.

В рамках исследования выполнен модальный анализ конечно-элементной консоли и установлены динамические характеристики системы. Результаты расчета МКЭ представлены в табл. 6.

Таблица 6

Динамические характеристики консоли (МКЭ)

Форма колебаний	Частота, рад/с	Период, с ⁻¹
1	33,398	0,188
2	100,192	0,063
3	166,979	0,038

В табл. 7 приведены результаты сравнения динамических характеристик сооружения с учетом типов грунтов основания методом слоистых систем, полученных аналитически, с результатами, полученными при расчете сооружения численными методами.

Таблица 7

Сравнительный анализ результатов исследования

Форма	Модель слоистой системы		ПК «Лира САПР»		Расхождение, %	
	Частота p , рад/с	Период T , с	Частота p , рад/с	Период T , с	Частота	Период
1	33,725	0,186	33,398	0,188	0,97	0,91
2	101,176	0,062	100,192	0,063	0,97	1,58
3	168,627	0,037	166,979	0,038	0,98	2,63

Выводы

Показана возможность применения модели слоистой системы для расчета динамических характеристик железобетонных зданий до шести этажей с несущими стенами, работающих преимущественно на сдвиг при горизонтальных сейсмических нагрузках. Рассмотрена также модель сооружения на свайном фундаменте. Для сравнения использовались пространственная конечно-элементная модель и модель сплошного консольного стержня.

Результаты вычислений показывают достаточно высокое совпадение частот свободных колебаний, полученных численными методами и аналитически.

Модель слоистой системы, в отличие от модели МКЭ, может быть эффективно использована для проведения аналитических вероятностных расчетов сложных систем и оценки их надежности.

Проведенные исследования являются основой для дальнейшего обобщения модели слоистой системы и ее применения для расчета совместной работы стохастической системы «здание — фундамент — основание» на действие сейсмических нагрузок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Тяпин А. Г.* Учет взаимодействия сооружений с основанием при расчетах на сейсмические воздействия : науч. изд. М. : АСВ, 2014. 136 с.
2. *Тяпин А. Г.* Расчет сооружений на сейсмические воздействия с учетом взаимодействия с грунтовым основанием : науч. изд. М. : АСВ, 2013. 392 с.
3. *Бирбрайер А. Н.* Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб. : Наука, 1998. 255 с.
4. *Хачиян Э. Е.* Сейсмические воздействия и прогноз поведения сооружений. Ереван : Гитутюн НАН РА, 2015. 555 с.
5. Волновые процессы в конструкциях зданий при сейсмических воздействиях. М. : Наука, 1987. 130 с.
6. *Ильичев В. А.* Динамическое взаимодействие сооружений с основанием и передача колебаний через грунт (промышленная сейсмика) // Динамический расчет сооружений на специальные воздействия : справ. проектировщика. М. : Стройиздат, 1981. С. 114—128.
7. *Seed H. B., Lysmer J., Hwang R.* Soil-structure interaction analyses for evaluating seismic response // J. of the Geotechnical Engineering Div., ASCE. 1975. Vol. 101. No. GT5. Pp. 439—457
8. *Khalil L., Sadek M., Shahrour I.* Influence of the soil-structure interaction on the fundamental period of buildings // J. Earthquake Engng Struct. Dyn. 2007. No. 36. Pp. 2445—2453.
9. *Mylonakis G., Gazetas G.* Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental // J. Earthquake Engrg. 2000. Vol. 4. No. 3. Pp. 277—301.
10. *Stewart J. P., Fenves G. L., Seed R. B.* Seismic soil-structure interaction in buildings. I: Analytical Methods // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 1999. Vol. 125. No. 1.
11. *Chiang-Liang V.* «Dynamic response of structures in layered soils», MIT Res. Rep. R74-10, Soils Pub. 1974. No. 335. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
12. *Dangla P.* A plane strain soil structure interaction model // Earthquake engineering & structural dynamics. 1988. Vol. 16. No. 8. Pp. 1115—1128.
13. *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, Sept. 5—8, 2011.
14. *Messioud S., Badreddine S., Dias D.* Harmonic seismic waves response of a 3D rigid surface on heterogeneous soil layer. 15WCEE Lisbon, 2012.
15. *Pshenichkina V. A., Rekunov S. S., Bazhenov R. I.* Stochastic process simulation of soil displacement in calculations of seismic resistant buildings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Science and Technology Conference “FarEastCon 2019”. Vladivostok, Russky Island : Institute of Physics Publishing, 2020. Pp. 32—89.
16. *Чаускин А. Ю., Пиеничкина В. А.* Вероятностный расчет нелинейной динамической системы на сейсмическое воздействие уровня МР3 // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архитектура. 2017. № 47(66). С. 82—92.
17. *Дроздов В. В., Пиеничкина В. А., Сухина К. Н.* Evaluation of reliability of the earthquake resistant building provided by means of the analysis for design-basis earthquake // Procedia Engineering. Vol. 150. 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016) / Ed. by A. A. Radionov. Elsevier publishing, 2016. Pp. 1841—1847.
18. *Ризниченко Ю. В.* Сейсморазведка слоистых сред. М. : Наука, 1985. 184 с.
19. *Павлык В. С.* Определение свободных колебаний зданий с несущими стенами // Исследования по сейсмостойкости зданий и сооружений : сб. ст. ЦНИИСК. М. : Гос. изд-во лит. по стр-ву, архитектуре и строит. материалам, 1960. С. 35—59.

© *Пиеничкина В. А., Рекунов С. С., Иванов С. Ю., Чанчан М., Хамиси С., Жиденко А. С., 2022*

Поступила в редакцию
в январе 2022 г.

Ссылка для цитирования:

Применение слонистой модели к расчетам динамических характеристик зданий при сейсмических воздействиях / В. А. Пшеничкина, С. С. Рекунов, С. Ю. Иванов, Чанчан М., С. Хамиси, А. С. Жиденко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Вып. 1(86). С. 43—56.

Об авторах:

Пшеничкина Валерия Александровна — д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолГГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; rap_hm@list.ru

Рекунов Сергей Сергеевич — канд. техн. наук, доц., доц. каф. строительной механики, Волгоградский государственный технический университет (ВолГГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; rekunoff@mail.ru

Иванов Станислав Юрьевич — аспирант каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолГГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Чанчан Махиеддин — аспирант каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолГГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Хамиси Сальма — аспирант каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолГГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Жиденко Артем Сергеевич — аспирант каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолГГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; artempride@gmail.com

Valeriya A. Pshenichkina, Sergey S. Rekunov, Stanislav Yu. Ivanov, Mahieddine Chanchan, Salma Hamici, Artem S. Zhidenko

Volgograd State Technical University

APPLICATION OF THE LAYERED MODEL TO CALCULATIONS OF THE BUILDINGS DYNAMIC CHARACTERISTICS UNDER SEISMIC IMPACTS

The article presents the results of a study of the dynamic characteristics of various types of buildings, presented as a model of a layered system, under seismic impact. The analytical solution of the problems of the dynamics of medium-rise buildings is given, including taking into account the work of joint work with a pile-ground array. The obtained values of frequencies, periods and forms of oscillations were compared with spatial finite element models and the model of a solid cantilever rod.

К е y w o r d s: dynamic characteristics, layered model, seismic impact, analytical calculation.

For citation:

Pshenichkina V. A., Rekunov S. S., Ivanov S. Yu., Chanchan M., Hamici S., Zhidenko A. S. [Application of the layered model to calculations of the buildings dynamic characteristics under seismic impacts]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2022, iss. 1, pp. 43—56.

About authors:

Valeriya A. Pshenichkina — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; rap_hm@list.ru

Sergey S. Rekunov — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; rekunoff@mail.ru

Stanislav Yu. Ivanov — Postgraduate Student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation

Mahieddine Chanchan — Postgraduate Student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation

Salma Hamici — Postgraduate Student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation

Artem S. Zhidenko — Postgraduate Student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; artempride@gmail.com