

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.231-245

Влияние соотношения жесткостей здания и многослойного грунтового основания на сейсмический отклик системы

Валерия Александровна Пшеничкина, Станислав Юрьевич Иванов,
Сергей Сергеевич Рекунов, Алексей Александрович Чураков

Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ); г. Волгоград, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время в инженерной практике для оценки совместной динамической работы зданий с грунтовым основанием применяется модель штампа, лежащего на упругом однородном основании. Наличие слоев с резко отличающимися жесткостями, а также порядок их расположения в грунтовой толще приводит к значительным изменениям спектра резонансных частот и величины динамического отклика. Поэтому для корректной оценки резонансных процессов, возникающих при совместных колебаниях сооружения и основания, важно учитывать неоднородность и слоистую структуру грунтового основания. Цель исследования — анализ реакции системы «сооружение – многослойное основание» в зависимости от соотношений их жесткостей, а также в сопоставлении результатов, полученных при моделировании многослойного и эквивалентного однородного основания.

Материалы и методы. Используется расчетная модель горизонтальной слоистой среды. Рассматривается сооружение как элемент слоистой системы с приведенными жесткостными характеристиками. Сейсмическая нагрузка в виде вертикальной распространяющейся сдвиговой волны моделируется стационарным случайным процессом. Для анализа применяются амплитудно-частотные характеристики системы в целом, а также для каждого отдельного слоя, спектральные плотности выхода и коэффициенты динамичности.

Результаты. Установлено, что при снижении жесткости здания увеличивается его вклад в общую амплитудно-частотную характеристику системы. Выполнена численная оценка изменения коэффициента динамичности при изменении параметров системы. Произведено сопоставление отклика сооружения на многослойном основании с откликом на однородном основании с эквивалентными характеристиками.

Выводы. Упрощенное представление грунта как однородного без учета его слоистой структуры снижает величину коэффициента динамичности до 30 %. Резонансные частоты системы «здание – жесткий слой – слабый слой» в основном определяются резонансными частотами слабого нижнего слоя, особенно при увеличении жесткости зданий. Аналогичная картина характерна и для однородного основания. В системе «здание – слабый слой – жесткий слой» резонансные частоты зависят от частот слоев основания, а также от собственных частот здания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сейсмическая нагрузка, система «сооружение – основание», импедансы, многослойное основание, резонансные частоты, амплитудно-частотная характеристика, свободные колебания, резонансные частоты, коэффициент динамичности, вероятностный расчет

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Пшеничкина В.А., Иванов С.Ю., Рекунов С.С., Чураков А.А. Влияние соотношения жесткостей здания и многослойного грунтового основания на сейсмический отклик системы // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 2. С. 231–245. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.231-245

Автор, ответственный за переписку: Валерия Александровна Пшеничкина, vap_hm@list.ru.

Influence of the stiffness ratio of the building and the multilayer soil foundation on the seismic response of the system

Valeria A. Pshenichkina, Stanislav Yu. Ivanov, Sergey S. Rekunov, Alexey A. Churakov
Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Currently, in engineering practice, a model of a die lying on an elastic homogeneous base is used to evaluate the joint dynamic operation of buildings with a soil base. The presence of layers with sharply different stiffness, as well as the order of their location in the soil column, leads to significant changes in the spectrum of resonant frequencies and the magnitude of the dynamic response. Therefore, it is important to take into account the inhomogeneity and layered structure of the soil foundation for a correct assessment of resonance processes arising from joint vibrations of the structure and the foundation. The purpose of the study is to analyze the reaction of the “structure – multilayer base” system depending on the ratios of their stiffness, as well as to compare the results obtained by modelling a multilayer and equivalent homogeneous base.

Materials and methods. A computational model of a horizontal layered medium is used. The structure as an element of a layered system with reduced stiffness characteristics. The seismic load in the form of a vertical propagating shear wave is modeled by a stationary random process. The amplitude-frequency characteristics of the system as a whole, as well as for each individual layer, spectral output densities and dynamic coefficients are used for analysis.

Results. It was found that with a decrease in the rigidity of the building, its contribution to the overall amplitude-frequency response of the system increases. A numerical assessment of the change in the dynamism coefficient with changes in the system parameters has been performed. A comparison was made of the response of a structure on a multilayer base with a response on a single base with equivalent characteristics.

Conclusions. The simplified representation of the soil as homogeneous, without taking into account its layered structure, reduces the value of the dynamism coefficient to 30 %. The resonant frequencies of the “building – hard layer – weak layer” system are mainly determined by the resonant frequencies of the weak lower layer, especially with an increase in the rigidity of buildings. A similar pattern is characteristic for a homogeneous base. In the “building – weak layer – hard layer” system, the resonant frequencies depend on the frequencies of the base layers, as well as on the natural frequencies of the building.

KEYWORDS: seismic load, “structure – base” system, impedances, multilayer base, resonant frequencies, amplitude-frequency response, free oscillations, resonant frequencies, dynamicity coefficient, probabilistic calculation

FOR CITATION: Pshenichkina V.A., Ivanov S.Yu., Rekunov S.S., Churakov A.A. Influence of the stiffness ratio of the building and the multilayer soil foundation on the seismic response of the system. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(2):231-245. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.231-245 (rus.).

Corresponding authors: Valeria A. Pshenichkina, vap_hm@list.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие сооружений с грунтовым основанием при сейсмических колебаниях представляет собой одну из ключевых тем в области сейсмостойкого проектирования. Существует множество исследований как отечественных, так и зарубежных, посвященных анализу работы сейсмостойких зданий с учетом податливости основания, однако задача еще не имеет окончательного решения. Это обусловлено сложной динамикой взаимодействия между зданием и основанием, нелинейной реакцией грунтов и конструкций при землетрясениях, а также неопределенностью исходной информации.

Геологическое строение основания каждой площадки уникально и, как правило, имеет многослойную структуру. Геологический разрез, отображающий границы между слоями в виде интерполяционных линий между соседними скважинами, лишь приблизительно отражает реальные напластования грунта. Параметры каждого слоя, включая его форму, физико-механические свойства и толщину, также имеют случайный характер. При этом сейсмический отклик системы «сооружение – основание» в значительной степени зависит от изменчивости расчетных параметров как самой системы, так и параметров землетрясения, таких как амплитуда, спектральный состав и др.

Современные программные комплексы способны решать аналогичные задачи, учитывая перечисленные факторы. Однако применение сложных и трудоемких расчетов в проектной деятельности не является целесообразным из-за неполноты и неопределенности исходных данных. Для подобных систем более эффективно применение упрощенных интегральных моделей с использованием метода Монте-Карло.

В настоящее время в инженерной практике для оценки совместной динамической работы зданий с грунтовым основанием применяется модель прямоугольного или круглого штампа, лежащего на упругом однородном основании. Для описания жесткостных и демпфирующих характеристик основания в общем случае используется система из шести пар импедансных функций [1, 2].

В работе [3] на модели круглого фундамента на однослойном основании изучалось влияние статистической изменчивости параметров грунта на динамическую реакцию сооружения. Полученные результаты показали, что при варьировании толщины слоя на 10 % и скорости поперечной волны на 20 % коэффициенты горизонтальных импедансов снижаются на 32 и 40 %, а коэффициенты импедансов качательного движения — на 12,5 и 25 %. Учет случайных свойств основания приводит к уменьшению средней реакции конструкции за счет увеличения ее демпфирования, что рассматривается как положительный аспект при проектировании сейсмостойких зданий.

Сходные результаты получены в исследовании [4], где отмечается значительное влияние изменчивости параметров основания, таких как скорость поперечной волны и толщина слоя, а также интегральных характеристик сооружения (радиус фундамента и высота расположенной на нем конструкции) на функции импеданса жесткого круглого фундамента, опирающегося на поверхность однослойного основания.

Отмечается, что при исследовании взаимодействия конструкции с основанием следует учитывать такие факторы, как пространственная неоднородность и неопределенность расчетных параметров грунта, а также его нелинейную работу во время землетрясения [5, 6]. К наиболее важным параметрам, характеризующим динамическое поведение грунта, авторы относят модуль сдвига и коэффициент затухания.

Для учета нелинейной работы грунта применяются упрощенные методы, такие как эквивалентная линейная модель [5, 6] или нелинейный статический сейсмический анализ [7].

Вместе с тем современные исследования последствий землетрясений выявили и негативные эффекты взаимодействия сооружений с основанием [8]. При сравнении нормативных расчетных спектров с фактическими спектрами отклика выявлено [9], что увеличение основного периода колебаний сооружения, вызванное взаимодействием с основанием, не всегда приводит к снижению отклика. В связи с этим преобладающая в строительном проектировании точка зрения о полезной роли учета податливо-

сти основания на реакцию сооружения рассматривается как чрезмерное упрощение, что может снизить безопасность конструкций.

В труде [10] подчеркивается различие динамического отклика сооружения на податливом и жестком основании. На примере исследования 4-, 8- и 12-этажных железобетонных зданий показано, что эффект взаимодействия особенно ярко проявляется для жестких сооружений, расположенных на слабом грунте с невысокой динамической жесткостью.

Результаты анализа сейсмической уязвимости зданий средней этажности [11] продемонстрировали, что уменьшение жесткости грунта приводит к увеличению периодов колебаний и большей сейсмической повреждаемости зданий. Для рассматриваемых объектов максимальная несущая способность может быть снижена до 15 %.

В рассмотренных работах авторы использовали модель грунта в виде однослойного основания, ограниченного коренными породами. Эта модель актуальна для грунтовой толщи с приблизительно одинаковыми динамическими характеристиками слоев.

Наличие слоев с резко отличающимися жесткостями, а также порядок их расположения в грунтовой толще приводят к значительным изменениям спектра резонансных частот и величины динамического отклика на свободной поверхности грунта [12]. Поэтому для корректной оценки резонансных процессов, возникающих при совместных колебаниях сооружения и основания, важно учитывать неоднородность и слоистую структуру грунтового основания. Для решения задачи распространения сейсмических волн через многослойные грунты в инженерной сейсмологии применяется волновая модель горизонтальной слоистой среды.

Анализ сейсмического отклика на свободной поверхности грунта при распространении поперечной волны через случайные многослойные среды показал, что реальные грунты значительно отличаются от теоретического однородного грунта [13]. Учет стохастической неоднородности однослойного основания приводит к увеличению его демпфирующих свойств и смещению спектра собственных частот в область более низких значений, в то время как для многослойных грунтов со случайными толщинами слоев наблюдается усиление реакции на свободной поверхности и сдвиг резонансных частот в сторону высоких значений. Это явление особенно выражено для мягких слоев [13, 14].

Впервые концепция применения модели слоистой среды для анализа системы «сооружение – основание» была предложена в работах А.П. Сеницына, Э.Е. Хачияна и Е.С. Медведевой [15, 16]. Сооружение может рассматриваться как прямоугольный брус с приведенными характеристиками, если размеры его структурных неоднородностей меньше длины сейсмической волны [17]. Это условие соблюдается

для большинства сейсмостойких зданий массового строительства. В работах авторов [18, 19] проведена верификация модели слоистой среды с целью представления сооружения также в виде многослойной системы. Задача решена в вероятностной постановке для произвольного количества слоев.

Цель настоящего исследования заключается в анализе реакций системы «сооружение – многослойное основание» в зависимости от соотношений их жесткостей, а также в сопоставлении результатов, полученных при моделировании многослойного и эквивалентного однородного основания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчетная схема системы «сооружение – многослойное основание» с произвольным количеством слоев на основе модели горизонтальной слоистой среды приведена на рис. 1. Система состоит из $n + 2$ слоев с различными параметрами плотности ρ_j , модуля сдвига G_j , скорости распространения поперечных волн V_{sj} и мощности H_j ($j = 0, 1, \dots, n + 1$). Сооружение (слой 0) рассматривается как сдвигаемый брус с приведенными характеристиками [15], слой $n + 1$ — жесткое подстилающее полупространство.

Сейсмическую нагрузку моделируем в виде сдвиговой волны $\tilde{f}(t)$, вертикально распространяющейся из коренных пород в горизонтально-слои-

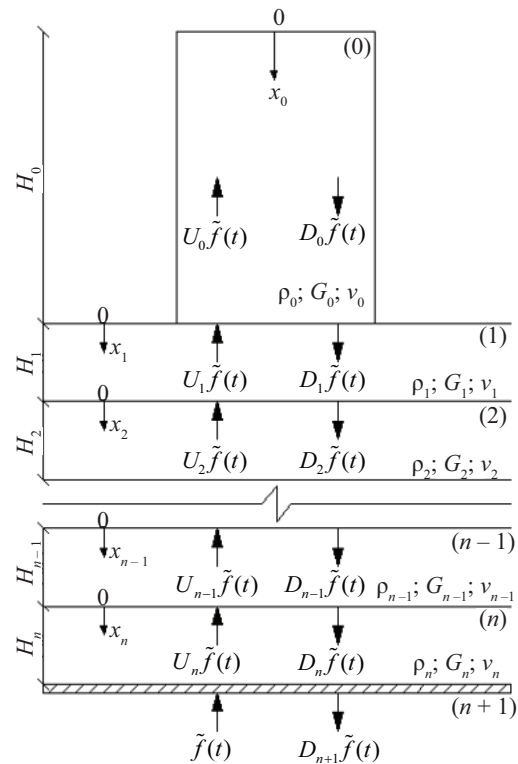


Рис. 1. Расчетная модель системы «сооружение – многослойное основание»

Fig. 1. Calculation model of the “structure – multilayer base” system

Из уравнений (9) находим АЧХ отдельно для каждого слоя (10) и АЧХ для системы «сооружение – многослойное основание» в целом (11):

$$h(\omega, x_j) = \frac{F_j(\omega, x_j)}{F_{j+1}(\omega, 0)}; \quad (10)$$

$$x_j = 0, \dots, H_j; j = 0, 1, \dots, n;$$

$$h(\omega, x) = \frac{F(\omega, x)}{F_{n+1}(\omega, 0)}; \quad (11)$$

$$x = 0, \dots, H; H_j = H_0 + H_1 + \dots + H_n,$$

где $F(\omega, x)$ — амплитуда колебаний всего пакета слоев; $F_{n+1}(\omega, 0)$ — амплитуда волны, входящей из коренных пород в поверхностные слои основания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование взаимодействия сооружения с многослойным основанием в зависимости от жесткостей сооружения и составляющих слоев грунта. Для анализа используем следующие параметры отклика системы: АЧХ $h(i\omega_k)$, спектральную плотность $S_F(\omega)$ и коэффициент динамичности $\beta(x)$.

Выбраны три здания с несущими стенами из монолитного железобетона (класс бетона — В20; класс арматуры — А400) различной геометрии (рис. 2).

Здание 1: размеры в плане 42×30 м; начальная высота здания 66 м; количество этажей 20.

Здание 2: размеры в плане $32,4 \times 12$ м; начальная высота здания 30,36 м; количество этажей 12.

Здание 3: размеры в плане $18,45 \times 15$ м; начальная высота здания 44,8 м; количество этажей 16.

Проведем серию расчетов, постепенно понижая этажность, соответственно увеличивая жесткость здания. Геометрические размеры зданий и их эффективные расчетные параметры ρ_0 , G_0 и V_{s0} приведены в табл. 1.

Рассматривалось двухслойное основание, сложенное грунтами, существенно различающимися по сейсмическим жесткостям. Расчет системы проводился для трех вариантов основания (рис. 3).

Вариант 1: здание — приповерхностный слабый грунт — жесткий грунт.

Вариант 2: здание — жесткий грунт — слабый грунт.

Вариант 3: здание — однородный грунт с эквивалентными приведенными характеристиками.

Расчетные характеристики грунтов приняты в соответствии с СП 358.1325800.2017, категории грунтов по сейсмическим свойствам — в соответствии с СП 14.13330.2018 (табл. 2).

Предварительно была выполнена оценка необходимости учета сейсмического взаимодействия для выбранных зданий и типов грунтового основания.

Для оценки значимости обратного воздействия сооружения на колебания основания в работе [21] А.М. Уздин использует две зависимости — $\tilde{m}(a_0, \chi)$ и $m_*(a_0)$. Параметры взаимодействия:

$$a_0 = \frac{\omega r}{v_2} \text{ — безразмерная резонансная частота;}$$

$$m_0 = \frac{m}{\rho \cdot r^3} \text{ — относительная масса сооружения;}$$

$$\chi = \frac{K_x h^2}{K_\phi} \text{ — соотношение между сдвиговой и по-}$$

воротной жесткостью фундамента.

В приведенных формулах используются следующие обозначения: ω — частота основного тона колебаний сооружения на жестком основании; r — приведенный радиус фундамента; v_2 — скорость распространения сдвиговых волн в основании; ρ — плотность грунта основания; K_ϕ и K_x — соответственно поворотная и сдвиговая жесткости фундамента, определяемые согласно работе [22]; h — расстояние от уровня подошвы фундамента до его центра тяжести.

На рис. 4 приведена картина степени взаимодействия сооружения с основанием [21] в зависимости от соотношения их жесткостей.

Плоскость $m_0 - 0 - a_0$ разделена кривыми $\tilde{m}(a_0, \chi)$, $m_*(a_0)$ и линиями $a_{0,\min} = 0,28$, $a_{0,\max} = 0,95$ на 6 зон влияния. В зонах 1, 2 процессы взаимодействия сооружения с основанием незначительны. Зона 3 характеризуется существенным влиянием основания. В зонах 4 и 5 влияние обратного воздействия сооружения на грунт необходимо учитывать при $\chi < \chi_*(a_0)$, а в зоне 6 — при $a_0 > a_{0,\max}$.

Для всех вариантов зданий и грунтовых оснований параметры m_0 и a_0 соответствуют 3, 4 и 5 зонам.

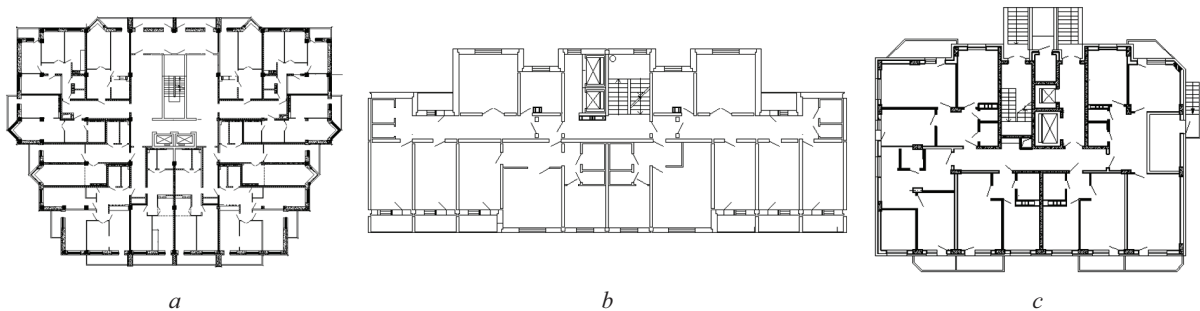


Рис. 2. Планы зданий: а — здание 1; б — здание 2; в — здание 3

Fig. 2. Building plans: a — building 1; b — building 2; c — building 3

Табл. 1. Расчетные характеристики зданий
Table 1. Design characteristics of buildings

Номер Number	Количество этажей Number of floors	Эффективная плотность ρ_0 , г/см ³ Effective density ρ_0 , g/cm ³	Скорость распространения поперечной волны V_{s0} , м/с The velocity of the transverse wave propagation V_{s0} , m/s	Сдвиговая жесткость G_0 , Н/м ² Shear stiffness G_0 , N/m ²	Высота H , м Height H , m
1	5	0,038	767,5	22 383,2	15
	7		729,1	20 201,1	21
	9		693,4	18 270,6	27
	12		647,8	15 945,1	36
	16		598,3	13 603,4	48
	20		581,4	12 168,4	66
2	3	0,06	843	42 641,1	7,59
	5		828,8	41 212,2	12,65
	7		808,8	39 248,9	17,71
	9		788,3	37 280,1	22,77
	12		756,1	34 301,7	30,36
3	3	0,029	377,9	4142,5	8,4
	5		326,3	3087,3	14
	7		288,8	2418	19,6
	9		261,9	1989,9	25,2
	12		232,8	1572,3	33,6
	16		206,6	1237,7	44,8

Это означает, что взаимодействие здания с основанием должно учитываться. Количественную оценку степени взаимодействия получаем, используя рассматриваемую в работе модель горизонтальной слоистой среды.

Принимая стационарную модель сейсмической нагрузки $\tilde{f}(t)$, используем спектральную плотность вида:

$$S_f(\omega) = D_f \frac{2\alpha}{\pi} \left(\frac{m^2 + \omega^2}{m^2 + 2a\omega^2 + \omega^4} \right),$$

где D_f — дисперсия сейсмического ускорения; $m^2 = a_2 + \beta^2$; $a^2 = a^2 - \beta^2$.

Усредненные коэффициенты спектральной плотности $D_f = 1 \text{ м/с}^2$; $\alpha = 7 \text{ с}^{-1}$; $\beta = 16 \text{ с}^{-1}$.

Коэффициент динамичности системы находим как отношение стандартов ускорений выходной и входной случайных функций. Для пакета слоев входная нагрузка из подстилающего слоя коренных пород равна сумме падающей и отраженной волны. Дисперсия этой нагрузки равна дисперсии функции:

$$F_{n+1}(\omega, 0) = 1 + D_{n+1}(\omega); D_{F_{n+1}} \approx 2;$$
$$\beta(x) = \sqrt{\frac{D_F(x)}{D_{F_{n+1}}}} \approx \sqrt{\frac{D_F(x)}{2}}.$$

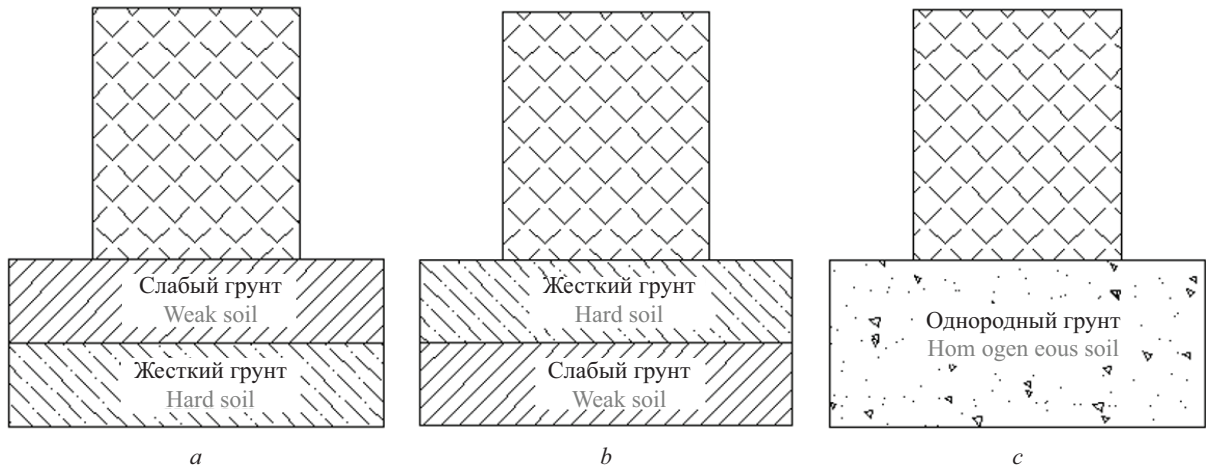


Рис. 3. Варианты расчета системы «сооружение – основание»: а — вариант 1; б — вариант 2; с — вариант 3
Fig. 3. Calculation options for the “structure – base” system: a — option 1; b — option 2; c — option 3

Табл. 2. Расчетные характеристики слоев грунта
Table 2. Calculated characteristics of soil layers

Тип грунта Type of soil	Категория грунта Soil category	Наименование слоя Name of the layer	Плотность ρ_p , г/см ³ Density ρ_p , g/cm ³	Скорость распространения поперечной волны V_{sp} , м/с The velocity of the transverse wave propagation V_{sp} , m/s	Мощность H_p , м Thickness H_p , m
Жесткий грунт Hard ground	II	Лессовый грунт водонасыщен- ный Loess soil water saturated	2,0	700	20
Слабый грунт Weak ground	III	Суглинки аэрированные Aerated loams	1,75	210	20
Однородный грунт Homogeneous soil	III*	—	1,875	455	40

Примечание: * — определено ориентировочно исходя из средневзвешенных физических характеристик однородного грунтового слоя.
Note: * — determined tentatively based on weighted average physical characteristics of homogeneous soil layer.

На рис. 5 приведены графики изменения коэффициентов динамичности в зависимости от этажности (жесткости) здания для трех вариантов моделирования грунтового основания. Как видно из графиков, в большинстве случаев замена двухслойного грунта однородным с приведенными характеристиками приводит к занижению коэффициента динамичности системы.

Также на графиках видно, что если под фундаментом здания находится жесткий грунт, то колебания здания оказывают несущественное влияние на величину коэффициента динамичности всей системы. Исключение составляют здания с низкой скоростью прохождения волны (здание 3), т.е. с низкой сейсмической жесткостью. В случае, когда под фундаментом здания находятся слабые грунты, учет совместной работы здания с основанием обязателен,

поскольку колебания здания вносят значительный вклад в общие колебания системы и, соответственно, в величину коэффициента динамичности. Аналогичные выводы были получены в работе [23].

Коэффициент динамичности представляет собой интегральную характеристику реакции системы и зависит от распределения ее резонансных частот в диапазоне несущих частот сейсмического воздействия. Для более глубокого изучения особенностей колебательных процессов в системе «сооружение – многослойное основание» целесообразно проанализировать распределение ее резонансных частот.

В рамках исследования проведен анализ влияния жесткости здания на распределение резонансных частот в системе «сооружение – многослойное основание». Рассматривались АЧХ системы для различных этажностей (жесткостей) здания применительно к трем ранее описанным вариантам основания, а также АЧХ здания как компонента многослойной системы. На графиках в табл. 3 АЧХ всей системы «здание – основание» обозначены синим цветом, АЧХ здания — красным цветом. Зеленым цветом выделен график спектральной плотности сейсмического ускорения грунта, который позволяет оценить диапазон частот, соответствующий максимальным амплитудам спектра.

Как видно из графиков, представленных в табл. 3, с увеличением жесткости здания уменьшается его влияние на динамические характеристики всей системы.

В табл. 4 представлены основные результаты расчетов сейсмического отклика здания № 1 с различной жесткостью (этажностью) для трех вариантов грунтовых условий.

С увеличением жесткости здания наблюдается рост коэффициента динамичности на уровне контакта с основанием как для жесткого, так и для податливого

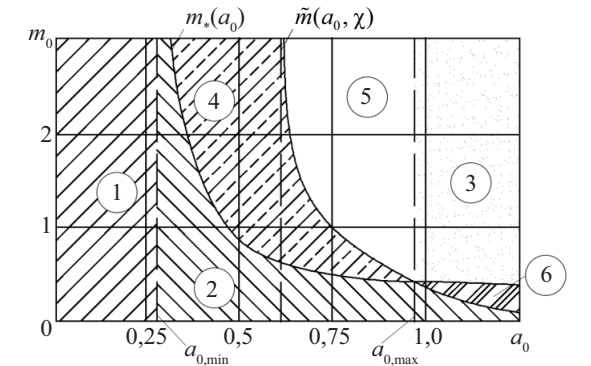


Рис. 4. Зоны различного влияния здания на основание в соответствии с трудом [21]
Fig. 4. Zones of different influence of the building on the foundation in accordance with [21]

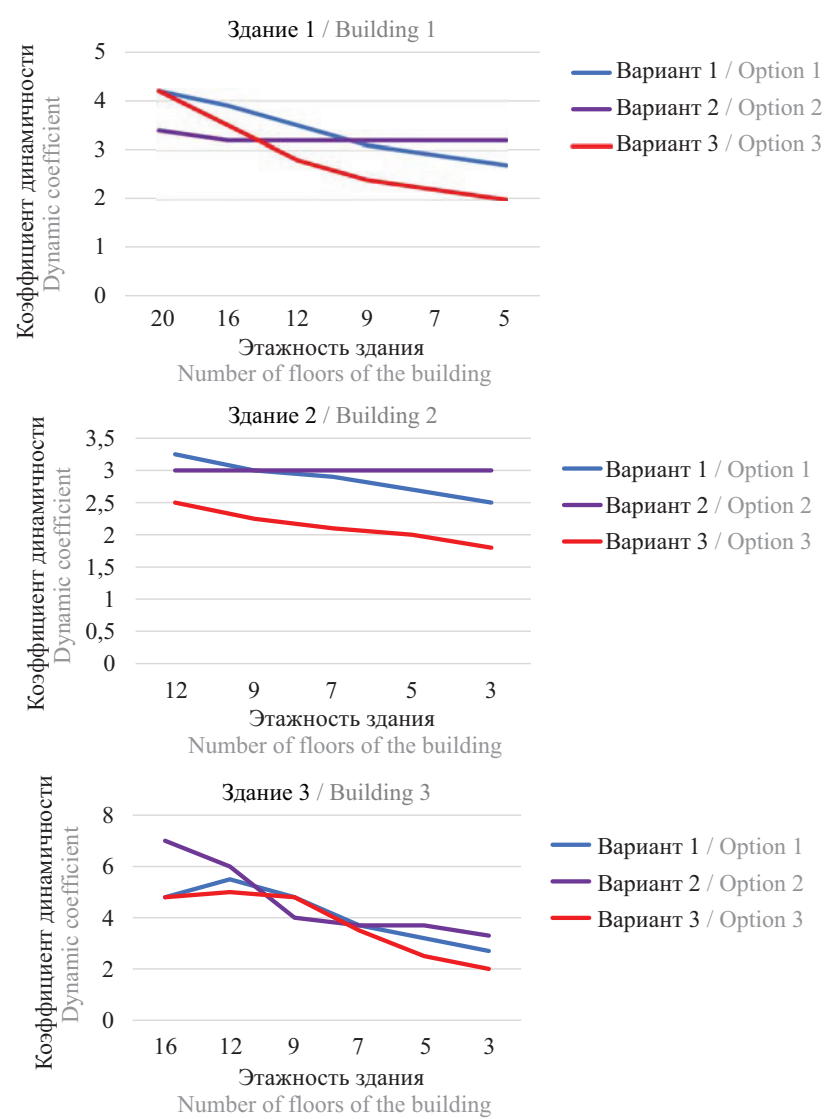
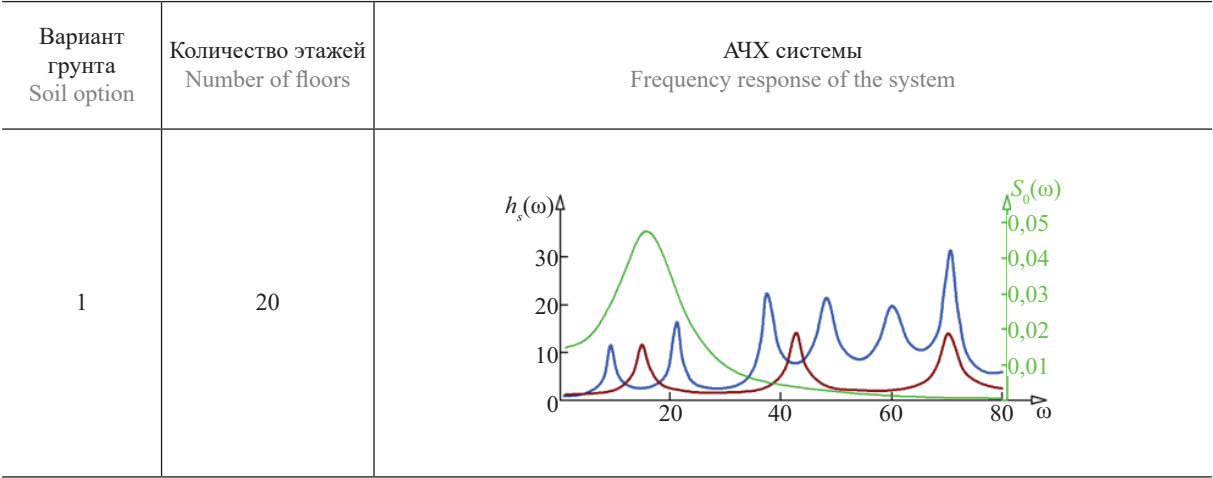


Рис. 5. Коэффициенты динамичности системы «сооружение – многослойное основание» при различной этажности здания

Fig. 5. Dynamic coefficients of the “structure – multilayer foundation” system with different storeys of the building

Табл. 3. Распределение резонансных частот системы «здание – основание» для здания № 1 с различным числом этажей
Table 3. Distribution of resonant frequencies of the “building – base” system for building No. 1 with a different number of floors



Продолжение табл. 3 / Continuation of the Table 3

Вариант грунта Soil option	Количество этажей Number of floors	АЧХ системы Frequency response of the system
2	20	
3		
1	12	
2		
3		
1	5	

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

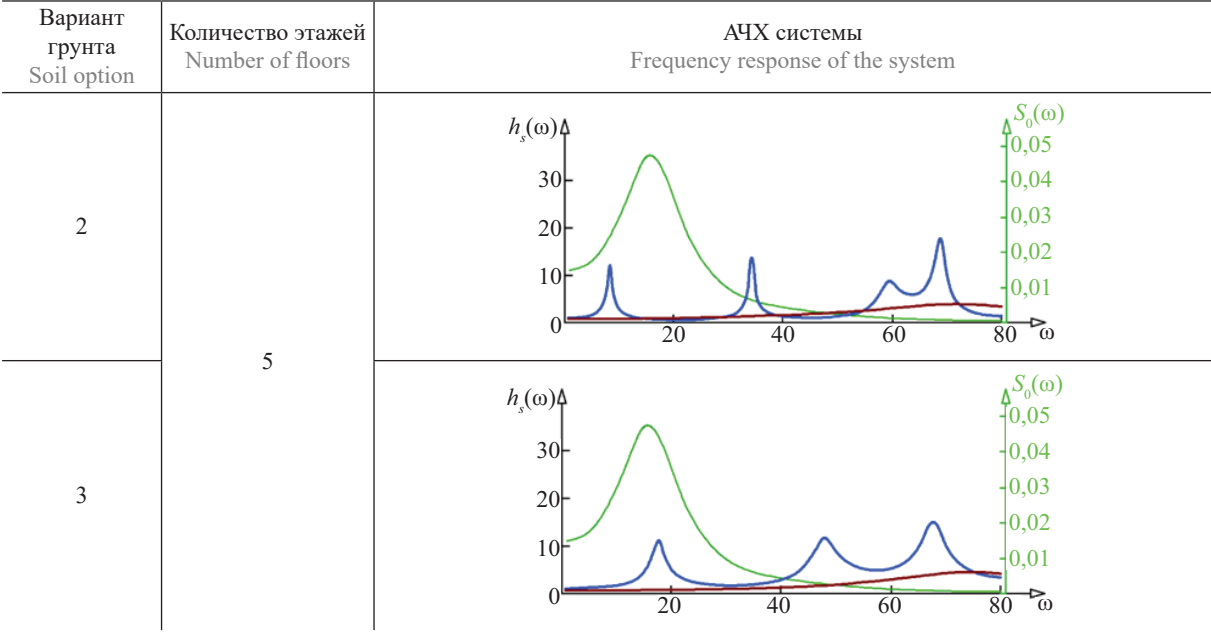


Табл. 4. Коэффициенты динамичности и распределение резонансных частот по слоям системы «здание – основание»
Table 4. Dynamic coefficients and distribution of resonant frequencies across the layers of the building – base system

Вариант моделирования основания A variant of modelling the base	Этажность Number of floors	20	12	5
	H ₀ , м m	66	36	15
	G ₀ , Н/м ² N/m ²	12 168,4	15 945,1	22 383,2
Коэффициенты динамичности Dynamic coefficients				
1 слабый грунт – жесткий грунт weak soil – hard soil	β(H ₀)	2,2	2,50	2,4
	β(0)	4,2	3,5	2,7
	β _{отн} / β _{res}	2,0	1,0	0,3
2 жесткий грунт – слабый грунт hard soil – weak soil	β(H ₀)	2,2	2,8	3,1
	β(0)	3,4	3,2	3,2
	β _{отн} / β _{res}	1,2	0,4	0,1
3 однородный грунт homogeneous soil	β(H ₀)	1,6	1,8	1,8
	β(0)	4,2	2,8	2
	β _{отн} / β _{res}	1,6	1,0	0,2
Резонансные частоты, с ⁻¹ Resonant frequencies, s ⁻¹				
1	Собственные частоты здания (слой 0) Building natural frequencies (layer 0)	ω ₁ = 13,0 ω ₂ = 42,4 ω ₃ = 70,0	ω ₁ = 30,2 ω ₂ = 84,8	ω ₁ = 85,1
	Слой 1 Layer 1	ω ₁ = 9,4 ω ₂ = 22,3 ω ₃ = 39,0 ω ₄ = 52,7 ω ₅ = 68,4	ω ₁ = 12,6 ω ₂ = 32,3 ω ₃ = 52,4 ω ₄ = 74,4	ω ₁ = 15,4 ω ₂ = 43,0 ω ₃ = 69,7
	Слой 2 Layer 2	ω ₁ = 37,3 ω ₂ = 46,8 ω ₃ = 61,1 ω ₄ = 71,3	ω ₁ = 11,3 ω ₂ = 29,7 ω ₃ = 47,2	ω ₁ = 38,4 ω ₂ = 57,8 ω ₃ = 74,6

Окончание табл. 4 / End of the Table 4

Резонансные частоты, с ⁻¹ Resonant frequencies, s ⁻¹				
1	На уровне контакта со зданием At the level of contact with the building	$\omega_1 = 9,0$ $\omega_2 = 21,5$ $\omega_3 = 37,7$ $\omega_4 = 49,4$ $\omega_5 = 60,7$	$\omega_1 = 11,8$ $\omega_2 = 48,0$ $\omega_3 = 62,4$ $\omega_4 = 77,2$	$\omega_1 = 14,6$ $\omega_2 = 39,6$ $\omega_3 = 58,1$ $\omega_4 = 74,7$
	На уровне верха здания At the top level of the building	$\omega_1 = 9,5$ $\omega_2 = 29,5$ $\omega_3 = 37,7$ $\omega_4 = 49,4$ $\omega_5 = 61,1$	$\omega_1 = 12,2$ $\omega_2 = 30,2$ $\omega_3 = 47,8$ $\omega_4 = 62,4$ $\omega_5 = 77,2$	$\omega_1 = 14,8$ $\omega_2 = 39,7$ $\omega_3 = 58,2$ $\omega_4 = 74,7$
2	Собственные частоты здания (слой 0) Building natural frequencies (layer 0)	$\omega_1 = 14,8$ $\omega_2 = 42,6$ $\omega_3 = 70,0$	$\omega_1 = 30,6$ $\omega_2 = 86,3$	$\omega_1 = 84,8$
	Слой 1 Layer 1	$\omega_1 = 39,6$ $\omega_2 = 58,5$ $\omega_3 = 74,0$	$\omega_1 = 26,3$ $\omega_2 = 59,2$	$\omega_1 = 50,4$
	Слой 2 Layer 2	$\omega_1 = 7,2$ $\omega_2 = 17,5$ $\omega_3 = 34,7$ $\omega_4 = 43,2$ $\omega_5 = 64,7$	$\omega_1 = 8,1$ $\omega_2 = 36,7$ $\omega_3 = 65,5$	$\omega_1 = 8,7$ $\omega_2 = 34,7$ $\omega_3 = 64,3$
	На уровне контакта со зданием At the level of contact with the building	$\omega_1 = 7,2$ $\omega_2 = 17,5$ $\omega_3 = 34,7$ $\omega_4 = 64,7$	$\omega_1 = 8,1$ $\omega_2 = 36,7$ $\omega_3 = 65,5$	$\omega_1 = 8,7$ $\omega_2 = 34,7$ $\omega_3 = 64,3$
	На уровне верха здания At the top level of the building	$\omega_1 = 7,2$ $\omega_2 = 17,5$ $\omega_3 = 34,7$ $\omega_4 = 43,2$ $\omega_5 = 64,7$ $\omega_6 = 70,1$	$\omega_1 = 7,9$ $\omega_2 = 30,6$ $\omega_3 = 36,7$ $\omega_4 = 65,5$	$\omega_1 = 8,7$ $\omega_2 = 34,6$ $\omega_3 = 64,1$
3	Собственные частоты здания (слой 0) Building natural frequencies (layer 0)	$\omega_1 = 14,8$ $\omega_2 = 42,5$ $\omega_3 = 70,1$	$\omega_1 = 30,4$	$\omega_1 = 84,7$
	Слой 1 Layer 1	$\omega_1 = 11,6$ $\omega_2 = 22,3$ $\omega_3 = 41,0$ $\omega_4 = 55,2$	$\omega_1 = 16,1$ $\omega_2 = 32,5$ $\omega_3 = 55,5$	$\omega_1 = 18,3$ $\omega_2 = 50,4$ $\omega_3 = 76,5$
	На уровне контакта со зданием At the level of contact with the building	$\omega_1 = 11,6$ $\omega_2 = 22,3$ $\omega_3 = 41,0$ $\omega_4 = 55,2$	$\omega_1 = 16,1$ $\omega_2 = 32,5$ $\omega_3 = 55,5$	$\omega_1 = 18,3$ $\omega_2 = 50,4$ $\omega_3 = 76,5$
	На уровне верха здания At the top level of the building	$\omega_1 = 11,9$ $\omega_2 = 21,9$ $\omega_3 = 41,0$ $\omega_4 = 55,2$	$\omega_1 = 16,1$ $\omega_2 = 32,5$ $\omega_3 = 55,5$	$\omega_1 = 18,3$ $\omega_2 = 50,4$ $\omega_3 = 76,5$

приповерхностного слоя грунта. На уровне верха здания коэффициент динамичности уменьшается, а также уменьшается смещение верха здания относительно основания $\beta_{\text{отн}}$: для верхнего слабого слоя с 2,0 до 0,3, для верхнего жесткого слоя с 1,2 до 0,1. То есть сооружение начинает перемещаться совместно с основанием практически как единое целое, что приводит к снижению усилий в конструкциях.

Расчеты подтвердили, что спектр собственных частот здания с учетом его взаимодействия с основанием смещается в сторону более низких значений по сравнению со спектром частот здания на абсолютном жестком основании. При этом наблюдается сгущение спектра. Так, в диапазоне $[0, 80]$ с⁻¹ количество собственных частот 20-этажного здания, расположенного на верхнем слое слабого грунта, увеличилось с 3 до 5. Для 5-этажного здания — с 1 до 4. На верхнем жестком слое соответственно с 3 до 6 и с 1 до 3.

Резонансные частоты системы «здание – жесткий слой – слабый слой» определяются преимущественно значениями резонансных частот слабого нижнего слоя, особенно наглядно это проявляется с увеличением жесткости зданий, а также для зданий на однородном приведенном основании (в данном примере с невысокими жесткостными характеристиками). Вместе с тем в спектре резонансных частот системы возможно появление частот, соответствующих собственным частотам здания. Например, частота 70,1 с⁻¹ соответствует собственной частоте 20-этажного здания. То же относится к частоте 30,6 с⁻¹ для 12-этажного здания.

Резонансные частоты системы «здание – слабый слой – жесткий слой» включают частоты колебаний как первого, так и второго слоев основания, а также частоты самого здания.

Результаты расчета для здания второго и третьего вариантов также подтвердили данные выводы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для изучения влияния соотношения жесткостей здания и многослойного основания на динамический отклик системы при сейсмическом воздействии применяется волновая модель горизонтальной слоистой среды.

Предварительная оценка значимости обратного воздействия сооружения на колебания основания показала, что для всех вариантов зданий и грунтовых оснований, принятых для исследования, должен учитываться эффект их взаимодействия при сейсмических колебаниях.

Упрощенное представление грунта как однородного без учета его слоистой структуры снижает величину коэффициента динамичности до 30 %.

Спектр собственных частот здания при учете его взаимодействия с основанием сгущается и одновременно смещается в сторону более низких значений. Резонансные частоты системы «здание – жесткий слой – слабый слой» преимущественно определяются резонансными частотами слабого нижнего слоя, особенно при увеличении жесткости зданий. Аналогичная картина характерна и для однородного основания. В системе «здание – слабый слой – жесткий слой» резонансные частоты зависят от частот составляющих слоев основания, а также от собственных частот здания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бирбрайер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб. : Наука, 1998. 255 с.
2. Тяпин А.Г. Учет взаимодействия сооружений с основанием при расчетах на сейсмические воздействия. М. : ACB, 2014. 135 с.
3. Harichane Z., Guellil M.E., Gadouri H. Benefits of probabilistic soil-foundation-structure interaction analysis // International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering. 2018. Vol. 9. Issue 1. Pp. 42–64. DOI: 10.4018/ijgee.2018010103
4. Guellil M.E., Harichane Z., Berkane H.D., Soudouk A. Soil and structure uncertainty effects on the soil foundation structure dynamic response // Earthquakes and Structures. 2017. Vol. 12. Issue 2. Pp. 153–163. DOI: 10.12989/eas.2017.12.2.153
5. Guellil M.E., Harichane Z., Çelebi A. Comparison between non-linear and stochastic methods for dynamic SSI problems // Advances in Science, Technology & Innovation. 2019. Pp. 191–194. DOI: 10.1007/978-3-030-01656-2_43
6. Guellil M.E., Harichane Z., Çelebi E. Seismic codes based equivalent nonlinear and stochastic soil structure interaction analysis // Studia Geotechnica et Mechanica. 2020. Vol. 43. Issue 1. Pp. 1–14. DOI: 10.2478/sgem-2020-0007
7. Brandis A., Kraus I., Petrovic S. Nonlinear static seismic analysis and its application to shallow founded buildings with soil-structure interaction // Buildings. 2022. Vol. 12. Issue 11. P. 2014. DOI: 10.3390/buildings12112014
8. Bapir B., Abrahamczyk L., Wichtmann T., Prada-Sarmiento L.F. Soil-structure interaction : a state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures // Frontiers in Built Environment. 2023. Vol. 9. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1120351
9. Mylonakis G., Gazetas G. Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental // Journal of Earthquake Engineering. 2000. Vol. 4. Issue 3. Pp. 277–301. DOI: 10.1080/13632460009350372
10. Brahma A., Beneldjouzi M., Hadid M., Remki M. Evaluation of the Seismic Response of Reinforced Concrete (RC) Buildings Considering Soil-Structure-Interaction Effects // The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics. 2023. Vol. 26. Pp. 49–59. DOI: 10.55549/epstem.1409304
11. Requena-Garcia-Cruz M.V., Bento R., Durand-Neyra P., Morales-Esteban A. Analysis of the soil structure-interaction effects on the seismic vulnerability of mid-rise RC buildings in Lisbon // Structures. 2022. Vol. 38. Pp. 599–617. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.02.024

12. Алешин А.С. О достоинствах и недостатках классификации грунтов NEHRP // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 1. С. 10–31. DOI: 10.37153/2618-9283-2021-1-10-31. EDN DQFZIIY.

13. Messaoudi A., Mezouar N., Hadid M., Laouami N. Effects of soil heterogeneities on its seismic responses // Lecture Notes in Civil Engineering. 2024. Pp. 221–232. DOI: 10.1007/978-3-031-57357-6_19

14. Berkane H.D., Harichane Z., Guellil M.E., Soudouki A. Investigation of Soil Layers Stochasticity Effects on the Spatially Varying Seismic Response Spectra // Indian Geotechnical Journal. 2019. Vol. 49. Issue 2. Pp. 151–160. DOI: 10.1007/s40098-018-0301-y

15. Синицын А.П., Медведева Е.С., Хачиян Э.Е. и др. Волновые процессы в конструкциях зданий при сейсмических воздействиях. М.: Наука, 1987. 159 с.

16. Хачиян Э.Е. Сейсмические воздействия и прогноз поведения сооружений. Ереван: Гитутюн НАН РА, 2015. 555 с.

17. Sadek M., Hussein M., Chehade F.H., Arab A. Influence of soil–structure interaction on the fundamental frequency of shear wall structures // Arabian Journal of Geosciences. 2020. Vol. 13. Issue 17. DOI: 10.1007/s12517-020-05872-z

18. Пшеничкина В.А., Рекунов С.С., Иванов С.Ю. Вероятностный анализ динамических характеристик системы «сооружение – слоистое основание» // Изве-

стия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 8 (788). С. 32–43. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-32-43. EDN XZEYVI.

19. Пшеничкина В.А., Рекунов С.С., Иванов С.Ю., Жиденко А.С., Чанчан М., Хамиси С. Сравнительный анализ результатов расчета системы «здание – основание», представленной в виде слоистой модели // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: строительство и архитектура. 2023. № 1 (90). С. 43–53. EDN ELCFWD.

20. Артоболевский И.И., Боголюбов А.Н., Болотин В.В. и др. Колебания линейных систем // Вибрации в технике: справочник. 1978. 352 с.

21. Уздин А.М., Сандович Т.А., Аль-Насер-Мохомад Самих Амин. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. СПб.: Изд-во ВНИИГ, 1993. 175 с.

22. Саргсян А.Е., Гукова Е.Г., Шапошников Н.Н. Динамическая механическая модель основания сооружения с учетом инерционных свойств грунтов // Вестник МГСУ. 2012. № 2. С. 66–69. EDN PDBTYH.

23. Abdulaziz M.A., Hamood M.J., Fattah M.Y. A review study on seismic behavior of individual and adjacent structures considering the soil — Structure interaction // Structures. 2023. Vol. 52. Pp. 348–369. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.03.186

Поступила в редакцию 22 октября 2024 г.

Принята в доработанном виде 27 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 5 ноября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Валерия Александровна Пшеничкина — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ);** 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28; РИНЦ ID: 653059, Scopus: 57189646401, ResearcherID: ABF-4196-2020, ORCID: 0000-0001-9148-2815; vap_hm@list.ru;

Станислав Юрьевич Иванов — ассистент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ);** 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28; РИНЦ ID: 1078261, ORCID: 0000-0003-4770-8754; stassuz-1-14@yandex.ru;

Сергей Сергеевич Рекунов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ);** 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28; РИНЦ ID: 496757, Scopus: 57190969032, ResearcherID: ABB-4080-2020, ORCID: 0000-0002-9360-8239; rekunoff@mail.ru;

Алексей Александрович Чураков — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ);** 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28, РИНЦ ID: 475651, Scopus: 57214092414, ORCID: 0000-0002-0810-8177; alexei.churakov@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Birbrayer A.N. *Seismic stability analysis of structures*. St. Petersburg, Nauka, 1998; 255. (rus.).

2. Tyapin A.G. *Accounting for the interaction of structures with the foundation in seismic impact calculations*. Moscow, ASV, 2014; 135. (rus.).

3. Harichane Z., Guellil M.E., Gadouri H. Benefits of probabilistic soil-foundation-structure interaction analysis. *International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering*. 2018; 9(1):42–64. DOI: 10.4018/ijgee.2018010103

4. Guellil M.E., Harichane Z., Berkane H.D., Sadouk A. Soil and structure uncertainty effects on the soil foundation structure dynamic response. *Earthquakes and Structures*. 2017; 12(2):153-163. DOI: 10.12989/eas.2017.12.2.153
5. Guellil M.E., Harichane Z., Çelebi A. Comparison Between Non-linear and Stochastic Methods for Dynamic SSI Problems. *Advances in Science, Technology & Innovation*. 2019; 191-194. DOI: 10.1007/978-3-030-01656-2_43
6. Guellil M.E., Harichane Z., Çelebi E. Seismic codes based equivalent nonlinear and stochastic soil structure interaction analysis. *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2020; 43(1):1-14. DOI: 10.2478/sgem-2020-0007
7. Brandis A., Kraus I., Petrovic S. Nonlinear Static Seismic Analysis and Its Application to Shallow Founded Buildings with Soil-Structure Interaction. *Buildings*. 2022; 12(11):2014. DOI: 10.3390/buildings12112014
8. Bapir B., Abrahamczyk L., Wichtmann T., Prada-Sarmiento L.F. Soil-structure interaction : a state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures. *Frontiers in Built Environment*. 2023; 9. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1120351
9. Mylonakis G., Gazetas G. Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental. *Journal of Earthquake Engineering*. 2000; 4(3):277-301. DOI: 10.1080/13632460009350372
10. Brahma A., Beneldjouzi M., Hadid M., Remki M. Evaluation of the Seismic Response of Reinforced Concrete (RC) Buildings Considering Soil-Structure-Interaction Effects. *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*. 2023; 26:49-59. DOI: 10.55549/epstem.1409304
11. Requena-Garcia-Cruz M.V., Bento R., Durand-Neyra P., Morales-Esteban A. Analysis of the soil structure-interaction effects on the seismic vulnerability of mid-rise RC buildings in Lisbon. *Structures*. 2022; 38:599-617. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.02.024
12. Aleshin A.S. The advantages and disadvantages of the NEHRP soil classification. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2021; 1:10-31. DOI: 10.37153/2618-9283-2021-1-10-31. EDN DQFZIY. (rus.).
13. Messaoudi A., Mezouar N., Hadid M., Laouami N. Effects of Soil Heterogeneities on Its Seismic Responses. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024; 221-232. DOI: 10.1007/978-3-031-57357-6_19
14. Berkane H.D., Harichane Z., Guellil M.E., Sadouki A. Investigation of Soil Layers Stochasticity Effects on the Spatially Varying Seismic Response Spectra. *Indian Geotechnical Journal*. 2019; 49(2):151-160. DOI: 10.1007/s40098-018-0301-y
15. Sinitsyn A.P., Medvedeva E.S., Khachiyan E.E. et al. *Wave processes in building structures under seismic impacts*. Moscow, Nauka, 1987; 159. (rus.).
16. Khachiyan E.E. *Seismic impacts and prediction of structure behavior*. Yerevan, Gitutyun NAS RA, 2015; 555. (rus.).
17. Sadek M., Hussein M., Chehade F.H., Arab A. Influence of soil–structure interaction on the fundamental frequency of shear wall structures. *Arabian Journal of Geosciences*. 2020; 13(17). DOI: 10.1007/s12517-020-05872-z
18. Pshenichkina V.A., Rekunov S.S., Ivanov S.Yu. Probabilistic analysis of dynamic characteristics of the “structure – layered foundation” system. News of Higher Educational Institutions. *Construction*. 2024; 8(788):32-43. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-32-43. EDN XZEYVI. (rus.).
19. Pshenichkina V.A., Rekunov S.S., Ivanov S.Yu., Zhidenko A.S., Tchanchane M., Hamici S. Comparative analysis of the calculation results of the building-base system presented in the form of a layered model. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: construction and architecture*. 2023; 1(90):43-53. EDN ELCFWD. (rus.).
20. Artobolevsky I.I., Bogolyubov A.N., Bolotin V.V. et al. Oscillations of linear systems. *Vibrations in technology : handbook*. 1978; 352. (rus.).
21. Uzdin A.M., Sandovich T.A., Al-Nasser-Mohomad Samih Amin. *Fundamentals of the theory of seismic resistance and seismic-resistant construction of buildings and structures*. St. Petersburg, 1993; 175. (rus.).
22. Sargsjan A.E., Gukova E.G., Shaposhnikov N.N. Dynamic Mechanical Model of Bases of Structures That Takes Account of Inertial Properties of Soils. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 2:66-69. EDN PDBTYH. (rus.).
23. Abdulaziz M.A., Hamood M.J., Fattah M.Y. A review study on seismic behavior of individual and adjacent structures considering the soil — Structure interaction. *Structures*. 2023; 52:348-369. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.03.186

Received October 22, 2024.

Adopted in revised form on October 27, 2024.

Approved for publication on November 5, 2024.

B I O N O T E S : **Valeria A. Pshenichkina** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Building Structures, Foundations and reliability of structures; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin ave., Volgograd, 400005, Russian Federation; ID RSCI: 653059, Scopus: 57189646401, ResearcherID: ABF-4196-2020, ORCID: 0000-0001-9148-2815; vap_hm@list.ru;

Stanislav Yu. Ivanov — Assistant of the Department of Building Structures, Foundations and reliability of structures; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin ave., Volgograd, 400005, Russian Federation; ID RSCI: 1078261, ORCID: 0000-0003-4770-8754; stassuz-1-14@yandex.ru;

Sergey S. Rekunov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Structural Mechanics; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin ave., Volgograd, 400005, Russian Federation; ID RSCI: 496757, Scopus: 57190969032, ResearcherID: ABB-4080-2020, ORCID: 0000-0002-9360-8239; rekunoff@mail.ru;

Alexey A. Churakov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Structures, Foundations and Reliability of Structures; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin ave., Volgograd, 400005, Russian Federation; SPIN-code: 6565-3690, ID RSCI: Scopus: 57214092414, ORCID: 0000-0002-0810-8177; alexei.churakov@yandex.ru.

*Contribution of the authors: all the authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare that there is no conflict of interest.*