

Оценка надежности системы «сооружение – многослойное основание» с учетом жесткости, мощности и конфигурации слоев

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

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Современные исследования, посвященные количественной оценке надежности сооружений при землетрясении, как правило, не учитывают волновые эффекты, пространственную неоднородность грунтового основания и обратное воздействие сооружения на движение грунта. Цель исследования — оценка надежности системы «сооружение – многослойное основание» с учетом влияния таких факторов, как жесткость сооружения, толщина и плотность слоев грунта, скорость распространения поперечной сейсмической волны, несущая частота сейсмического воздействия. Мерой надежности системы принята вероятность превышения коэффициента динамичности заданного значения.

Материалы и методы. Используется расчетная модель горизонтальной слоистой среды. Сооружение рассматривается как элемент слоистой системы с приведенными жесткостными характеристиками. Сейсмическая нагрузка в виде вертикальной распространяющейся сдвиговой волны моделируется стационарным случайным процессом. Выходные характеристики системы — спектральная плотность ускорения, амплитудно-частотная характеристика и коэффициент динамичности на любом уровне каждого слоя и сооружения. По результатам серии расчетов коэффициент динамичности формулируется как нелинейная функция шести случайных аргументов. Линеаризация функции проводится методом планирования эксперимента. Строится функция надежности.

Результаты. Получены аналитические зависимости функции коэффициента динамичности для двух вариантов основания с повышенными и пониженными значениями жесткости слоев с различным порядком их чередования. Выполнена оценка адекватности принятой линейной модели. Установлены вероятности превышения нормативного значения коэффициента динамичности для зданий различной жесткости с учетом влияния мощности слоев грунтового основания.

Выводы. Принятый в нормах коэффициент динамичности, который для всех категорий грунтов не превышает значения 2,5, не может обеспечить требуемый уровень надежности сейсмостойких зданий и должен определяться на основе расчетов с учетом жесткости сооружения и характеристик многослойного основания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оценка надежности, система «сооружение – основание», многослойное основание, коэффициент динамичности, амплитудно-частотная характеристика, нелинейная функция случайных аргументов, метод планирования эксперимента, вероятностный расчет

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Пшеничкина В.А., Иванов С.Ю., Рекунов С.С., Чураков А.А. Оценка надежности системы «сооружение – многослойное основание» с учетом жесткости, мощности и конфигурации слоев // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 6. С. 888–898. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.888-898

Автор, ответственный за переписку: Станислав Юрьевич Иванов, stassuz-1-14@yandex.ru.

Reliability assessment of the system “structure – multilayer foundation” taking into account stiffness, capacity and configuration of layers

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

ABSTRACT

Introduction. Modern studies on the quantitative assessment of the reliability of structures during earthquakes generally do not consider wave effects, the spatial heterogeneity of soil foundations, and the reverse impact of the structure on ground motion. The purpose of this work is to evaluate the reliability of the “structure – multilayer foundation” system, considering factors such as stiffness of the structure, the thickness and density of soil layers, the propagation speed of the transverse seismic wave, and the dominant frequency of seismic action. The reliability measure of the system is taken as the probability of the dynamic coefficient exceeding a specified value.

Materials and methods. A computational model of a horizontally layered medium is used. The structure is considered an element of the layered system with equivalent rigidity characteristics. Seismic loading in the form of a vertically propagat-

ing shear wave is modelled as a stationary random process. The output characteristics of the system include the spectral density of acceleration, the amplitude — frequency response, and the dynamic coefficient at any level of each layer and the structure. Based on a series of calculations, the dynamic coefficient is formulated as a nonlinear function of six random arguments. The function is linearized using the experimental design method, and the reliability function is constructed.

Results. Analytical dependencies of the dynamic coefficient function were obtained for two types of foundations with increased and decreased stiffness values of layers, with different orders of their alternation. An assessment of the adequacy of the adopted linear model was conducted. The probabilities of exceeding the normative value of the dynamic coefficient were determined for buildings of varying rigidity, considering the influence of the thickness of the soil foundation layers.

Conclusions. The dynamic coefficient adopted in the standards, which does not exceed 2.5 for all soil categories, cannot ensure the required reliability level of earthquake — resistant buildings and should be determined based on calculations that account for the rigidity of the structure and the characteristics of the multilayer foundation.

KEYWORDS: reliability assessment, “structure – foundation” system, multilayer foundation, dynamic coefficient, amplitude-frequency characteristic, nonlinear function of random arguments, the method of experimental design, probabilistic calculation

FOR CITATION: Pshenichkina V.A., Ivanov S.Yu., Rekunov S.S., Churakov A.A. Reliability assessment of the system “structure – multilayer foundation” taking into account stiffness, capacity and configuration of layers. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(6):888-898. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.888-898 (rus.).

Corresponding author: Stanislav Yu. Ivanov, stassuz-1-14@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие строительных объектов с многослойными основаниями во время землетрясений — актуальная тема сейсмостойкого проектирования на протяжении многих лет. Однако проблема остается нерешенной в полной мере, что связано со сложностью моделирования динамических процессов в неоднородном грунтовом основании, нелинейной работой грунтов и сооружений, а также высокой степенью неопределенности исходных данных [1, 2].

Особенностями геологического строения основания являются его слоистая структура и статистическая изменчивость расчетных параметров, таких как плотность, скорость прохождения упругих волн и толщина слоев. Эти характеристики в значительной степени определяют сейсмический отклик системы «сооружение – основание». Исследование таких систем возможно только на вероятностной основе. Как подчеркивается в работе [3], именно вероятностный подход играет важную роль в понимании неопределенностей в проектировании и обеспечивает рациональный и риск-информированный подход к анализу геотехнических систем.

Ключевые положения статистической теории сейсмостойкости, включающей теорию сейсмического риска, динамику сооружений и теорию надежности, разработаны В.В. Болотиным [4]. Общая схема оценки сейсмической надежности сооружений состоит из следующих этапов:

- установления вероятностных характеристик сейсмического воздействия (интенсивность, спектральный состав, продолжительность интенсивной фазы);
- описания динамического поведения конструкций под действием сейсмического сотрясения основания с учетом нелинейных эффектов вплоть до достижения аварийного состояния;
- оценки показателей риска уязвимости конструкций как условной и полной вероятности превышения ее расчетных параметров.

Современные исследования направлены на изучение главных аспектов статистической теории сейсмостойкости.

В труде [5] отмечается, что величина сейсмической надежности определяется интегралом, состоящим из двух функций: первая — это «кривая сейсмической опасности», основанная на распределениях сейсмичности и интенсивности колебаний грунта; вторая — условные распределения реакций конструкций. Исследуются различные подходы к оценке этих функций и их зависимостей.

Авторы публикаций [6, 7] анализируют вероятности сейсмического разрушения для отдельных видов конструкций.

В статье [8] рассматривается функция несущей способности на базе предельного сдвига основания железобетонных каркасных зданий. Предложен новый полуаналитический метод оценки сейсмической надежности конструкций в нелинейной постановке, который включает в себя метод точечной оценки, анализ статической нелинейности (pushover analysis) и метод первого порядка надежности FORM¹. Получены некоторые закономерности сейсмической надежности конструкций в зависимости от коэффициента вариации сейсмического воздействия и коэффициентов корреляции сейсмических сил на уровне этажей.

На примере многопролетного сталебетонного композитного моста [9] исследуется влияние неопределенностей, связанных с величиной сейсмической опасности и уязвимостью конструкций сооружения. Результаты показали, что выбор модели для прогнозирования движения грунта, нелинейный метод моделирования и количество записей землетрясений, принятых для анализа, являются факторами, которые вносят наибольший вклад в изменчивость индекса сейсмической надежности.

В настоящее время подавляющее большинство исследований сосредоточено на оценке сейсмиче-

¹ EN 1990:2002. Eurocode 0: Basis of Structural Design. Brussels : European Committee for Standardization (CEN), 2002. 105 p.

ской надежности непосредственно конструкций зданий и сооружений. Объединенная система «конструкция – фундамент – грунт» часто игнорируется при проведении аналитического или численного динамического анализа [10].

Вместе с тем функция распределения интенсивности колебаний грунта в значительной степени зависит от пространственной неоднородности и неопределенности его расчетных характеристик, а также от соотношения жесткостей сооружения и основания.

Представлены результаты изучения распространения сейсмической волны в виде белого шума в многослойном грунте со случайной толщиной слоев и случайным распределением модуля сдвига по профилю грунта [11]. Установлено влияние этих параметров на характер передаточных функций отклика системы. Многослойность грунта со случайными параметрами мощности слоев приводит к усилению среднего движения на дневной поверхности грунта по сравнению с реакцией однородного многослойного основания с детерминированными характеристиками и смещению собственных частот в сторону более высоких значений. В работе [12] также сделан вывод, что стохастический характер грунта влияет на изменчивость спектров отклика на его поверхности.

Ряд публикаций посвящен вероятностному анализу влияния на сейсмический отклик системы

«сооружение – основание» следующих параметров: модуль сдвига и коэффициент демпфирования грунта [13], соотношение модулей сдвига грунта и конструкции [14], скорость распространения поперечных волн в грунте, толщина однородного слоя и высота конструкции [15].

Цель настоящего исследования — оценка надежности системы «сооружение – многослойное основание» с учетом влияния таких факторов, как жесткость сооружения, мощность и плотность слоев грунта, скорость распространения поперечной сейсмической волны, несущая частота сейсмического воздействия. В качестве критерия надежности системы принят коэффициент динамичности. Используется волновая модель слоистой среды, которая впервые была предложена в трудах А.П. Сеницына, Э.Е. Хачияна и Е.С. Медведевой [16, 17] для анализа взаимодействия системы «сооружение – основание».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматривается вероятностная задача колебаний системы «сооружение – многослойное основание» под действием случайной сейсмической нагрузки.

Расчетная схема системы с произвольным количеством слоев, основанная на волновой модели горизонтальной слоистой среды, приведена на рис. 1.

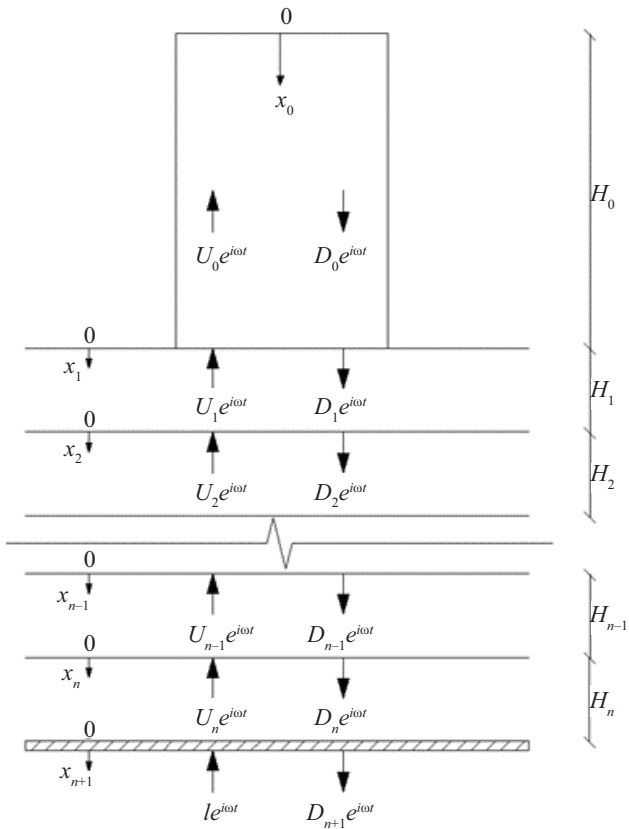


Рис. 1. Расчетная модель системы «сооружение – многослойное основание»

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

Каждый k -й слой ($k = 0, 1, 2 \dots, n + 1$) имеет следующие характеристики: скорость распространения поперечных волн V_k , модуль сдвига G_k , плотность ρ_k , мощность H_k .

Характеристики подстилающего упругого полупространства V_{n+1} , G_{n+1} , ρ_{n+1} . Сооружение в виде сдвигаемого бруса заменяется однородным слоем с приведенными характеристиками V_0 , G_0 , ρ_0 .

Принимаем вертикальное распространение сейсмической волны $\tilde{f}(t)$. Колебания каждого k -го слоя определяются взаимодействием выходящей из $(k + 1)$ -го слоя волны $U_k \cdot \tilde{f}(t)$ и отраженной от границы с $(k - 1)$ -м слоем волны $V_k \cdot \tilde{f}(t)$.

Подробно решение задачи свободных и вынужденных колебаний системы с учетом демпфирования изложено в предыдущих работах авторов [18, 19].

Сейсмическое ускорение грунтового основания задаем в виде стационарной случайной функции $\tilde{f}(t)$ с нулевым математическим ожиданием $m_f(t) = 0$ и спектральной плотностью $S_f(\omega)$. Спектральную плотность выходной случайной функции ускорений многослойной системы $\tilde{F}(x, t)$ находим методом канонических разложений:

$$S_F(\omega, x) = |h(\omega_k, x)|^2 S_f(\omega), \quad (1)$$

где $h(\omega, x)$ — амплитудно-частотная характеристика:

$$h(\omega, x) = \frac{F(\omega, x)}{F_{n+1}(\omega, 0)}; x = 0, \dots, H; H_j = H_0 + H_1 + \dots + H_n. \quad (2)$$

Дисперсия выходной случайной функции $\tilde{F}(x, t)$:

$$D_F(x) = \int_0^\infty S_F(\omega, x) d\omega. \quad (3)$$

Коэффициент динамичности системы вычисляем как отношение стандартов ускорений выходной и входной случайных функций:

$$\beta(x) = \sqrt{\frac{D_F(x)}{D_{F_{n+1}}}} \approx \sqrt{\frac{D_F(x)}{2}}, \quad (4)$$

где дисперсия $D_{F_{n+1}}$ равна сумме дисперсий падающей и отраженной волны на границе подстилающего слоя коренных пород.

Выходные параметры системы — амплитудно-частотная характеристика и коэффициент динамичности $\beta(x)$ зависят от геометрических и жесткостных характеристик грунтового основания, сооружения, а также спектра частот сейсмического воздействия. Рассматриваем коэффициент динамичности в виде функции:

$$\beta = \beta(x, V_k, H_k, \beta_s), \quad (5)$$

где β_s — несущая частота спектральной плотности $S_f(\omega)$; V_k, H_k, β_s — случайные величины с нормальным законом распределения.

В данной постановке функция $\beta(x, V_k, H_k, \beta_s)$ представляет собой нелинейную функцию случайных аргументов. Для линеаризации функции применяем метод планирования эксперимента. Получив уравнения регрессии, проводим оценку надежности системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Решение задачи оценки надежности системы «здание – основание» выполняем на примере двухслойного основания, сложенного жестким и слабым грунтом с двумя вариантами расположения слоев (рис. 2). Границы интервала варьирования факторов представлены в табл. 1.

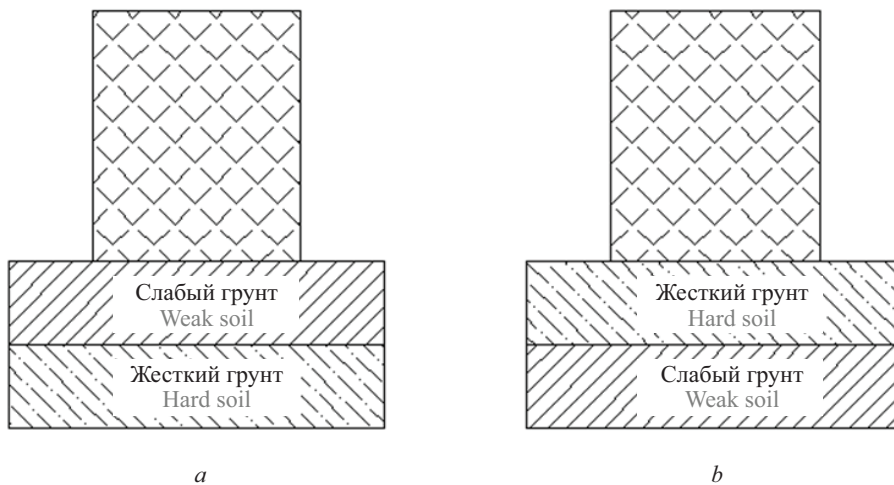


Рис. 2. Варианты системы «сооружение – основание»: а — вариант 1; б — вариант 2

Fig. 2. Variants of the “building – base” system: a — option 1; b — option 2

Табл. 1. Границы интервала варьирования факторов

Table 1. Limits of the factor variation interval

Фактор Factor	V_0 , км/с km/s	V_1 , км/с km/s	V_2 , км/с km/s	H_1 , м m	H_2 , м m	β_s , с ⁻¹ s ⁻¹
Уровни факторов Levels of factors						
Среднее / Average	0,55	0,21	0,7	17,5	17,5	19,5
—	0,2	0,0952	0,6016	5	5	9
+	0,9	0,3248	0,7984	30	30	30

Принимаем линейное уравнение регрессии вида:

$$\beta = b_0 + b_1 \cdot V_0 + b_2 \cdot V_1 + b_3 \cdot V_2 + b_4 \cdot H_1 + b_5 \cdot H_2 + b_6 \cdot \beta_s, \quad (6)$$

где b_i — коэффициенты регрессии; V_i — скорости прохождения волны в соответствующем слое; H_i — высота соответствующего слоя; β_s — несущая частота сейсмической нагрузки.

Результаты расчета позволяют сделать вывод, что практически все исследуемые параметры оказывают существенное влияние на коэффициент динамичности.

Переходя от кодированных к натуральным значениям факторов, получим функции коэффициента динамичности на уровне верха здания $\beta(0)$, на линии контакта здания с основанием $\beta(H)$ и относительного коэффициента динамичности $\beta = \beta(0) - \beta(H)$ для двух вариантов расположения слоев грунта:

1. Система «здание – слабый слой – жесткий слой»:

$$\begin{aligned} \beta(0) &= 1,3753 - 0,00287 \cdot V_0 + 0,0083 \cdot V_1 + 0,00009 \cdot V_2 + 0,069 \cdot H_1 + 0,091 \cdot H_2 + 0,0689 \cdot \beta_s; \\ \beta(H) &= 1,3569 - 0,0007 \cdot V_0 - 0,0011 \cdot V_1 - 0,0005 \cdot V_2 + 0,0326 \cdot H_1 + 0,0387 \cdot H_2 + 0,0117 \cdot \beta_s; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\beta = 0,0185 - 0,0022 \cdot V_0 + 0,0019 \cdot V_1 + 0,0005 \cdot V_2 + 0,0364 \cdot H_1 + 0,052 \cdot H_2 + 0,0572 \cdot \beta_s.$$

2. Система «здание – жесткий слой – слабый слой»:

$$\begin{aligned} \beta(0) &= 1,3874 - 0,00195 \cdot V_0 + 0,0012 \cdot V_1 + 0,0048 \cdot V_2 + 0,0105 \cdot H_1 + 0,0414 \cdot H_2 + 0,0116 \cdot \beta_s; \\ \beta(H) &= 1,4098 - 0,00007 \cdot V_0 + 0,00003 \cdot V_1 + 0,0005 \cdot V_2 + 0,0017 \cdot H_1 + 0,0168 \cdot H_2 - 0,0132 \cdot \beta_s; \\ \beta &= -0,0224 - 0,0019 \cdot V_0 + 0,0012 \cdot V_1 + 0,0043 \cdot V_2 + 0,0088 \cdot H_1 + 0,0247 \cdot H_2 + 0,0249 \cdot \beta_s. \end{aligned} \quad (8)$$

Для оценки адекватности принятой модели линейной регрессии для аппроксимации функции

коэффициента динамичности используем коэффициент детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}. \quad (9)$$

Для уравнения (7) коэффициент детерминации составляет 0,84, а для уравнения 8 — 0,61. Оба значения показывают, что полученные линейные зависимости с достаточной степенью адекватности соответствуют данным, на которых они построены.

С целью визуализации 6-мерной функции относительного коэффициента динамичности и ее линейного приближения в табл. 2 приведены плоскостные сечения, на которых одна переменная меняет значения, а остальные фиксированы на уровне математических ожиданий.

Максимальная усредненная по всем графикам погрешность линеаризации составила 10,21 % для варианта 1 и 28,9 % для варианта 2.

Функция для варианта 2 хуже поддается линеаризации и требует применения более сложных моделей. Наличие нижнего слабого слоя придает системе «сооружение – многослойное основание» ярко выраженный нелинейный характер. Линейная аппроксимация, за исключением отдельных сечений, приводит к завышению коэффициента динамичности.

Построение функции надежности

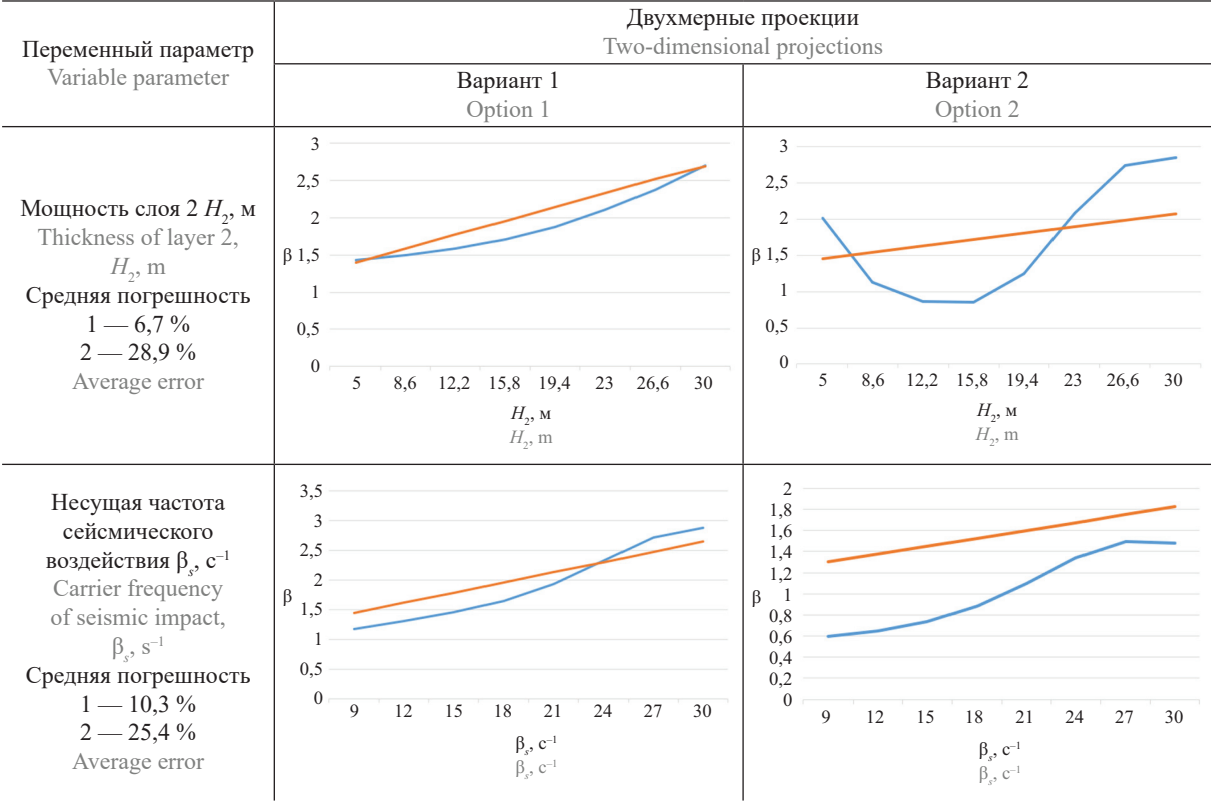
Коэффициент динамичности системы «сооружение – многослойное основание» рассматривается в виде линейной функции шести аргументов. Как было установлено в предыдущих исследованиях [18, 19], все из аргументов оказывают значительное влияние на величину коэффициента динамичности. При этом каждый из аргументов может рассматриваться как случайная величина. Вместе с тем в настоящем исследовании авторы считают целесообразным провести оценку функции надежности с учетом статистической изменчивости только трех параметров: скоростей поперечных волн в грунтовом основании V_1 и V_2 , а также несущей частоты сейсмических колебаний грунта β_s . Остальные параметры рассматриваем детерминированными

Табл. 2. Плоскостные сечения функции относительного коэффициента динамичности для вариантов системы: 1 — «здание – слабый слой – жесткий слой»; 2 — «здание – жесткий слой – слабый слой»

Table 2. Flat-walled sections of the relative coefficient of dynamism function for system variants: 1 — “building – weak layer – hard layer”; 2 — “building – hard layer – weak layer”

Переменный параметр Variable parameter	Двухмерные проекции Two-dimensional projections	
	Вариант 1 Option 1	Вариант 2 Option 2
Скорость распространения сдвиговой волны в здании V_0 , м/с ² The speed of the shear wave propagation in the building, V_0 , m/s ² Средняя погрешность 1 — 10,2 % 2 — 15,6 % Average error		
Скорость распространения поперечной волны в слое 1 V_1 , м/с ² The velocity of the transverse wave propagation in layer 1, V_1 , m/s ² Средняя погрешность 1 — 6,8 % 2 — 23,4 % Average error		
Скорость распространения поперечной волны в слое 2 V_2 , м/с ² The velocity of the transverse wave propagation in layer 2, V_2 , m/s ² Средняя погрешность 1 — 10,1 % 2 — 21,2 % Average error		
Мощность слоя 1 H_1 , м Thickness of layer 1 H_1 , m Средняя погрешность 1 — 8,2 % 2 — 24,1 % Average error		

Окончание табл. 2 / End of the Table 2



ми, и функцию надежности строим для отдельных значений этих параметров.

Параметр V_0 — приведенная скорость распространения поперечных волн по высоте здания с интервалом варьирования 200–900 м/с соответствует зданиям с периодом колебаний T от 1,2 до 0,17 с.левой границе интервала соответствуют гибкие здания, правой — жесткие [17].

Параметры H_1 и H_2 — мощности грунтовых слоев.

Параметр β_s — параметр спектральной плотности случайной функции ускорения грунтового основания:

$$S_f(\omega) = D_f \frac{2\alpha}{\pi} \left(\frac{m^2 + \omega^2}{m^2 + 2\alpha\omega^2 + \omega^4} \right), \tag{10}$$

где $m^2 = a^2 + \beta_s^2$; $a^2 = a^2 - \beta_s^2$.

Статистические характеристики случайных аргументов представлены в табл. 3.

Закон распределения β как линейной функции нормально распределенных некоррелированных случайных аргументов близок к нормальному с математическим ожиданием:

$$m_\beta = \sum_{i=1}^3 \bar{b}_i m_{\bar{x}_i} + \bar{b}_0 \tag{11}$$

и дисперсией:

$$D_\beta = \sum_{i=1}^3 \bar{b}_i^2 D_{\bar{x}_i}. \tag{12}$$

В формулах (10), (11) $\bar{b}_i$, $\bar{b}_0$ — натуральные значения коэффициентов регрессии:

$$\bar{X} = (\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3) = (V_1, V_2, \beta_s). \tag{13}$$

1. Система «здание – слабый грунт – жесткий грунт».

Функция относительного коэффициента динамичности:

$$\beta = 0,0185 - 0,0022 \cdot V_0 + 0,0019 \cdot V_1 + 0,0005 \times V_2 + 0,0364 \cdot H_1 + 0,052 \cdot H_2 + 0,0572 \cdot \beta_s.$$

Математическое ожидание $m_\beta = 2,22$, дисперсия $D_\beta = 0,153$, стандарт:

$$\sigma_\beta = \sqrt{D_\beta} = 0,391.$$

Тогда плотность распределения функции коэффициента динамичности равна:

$$p(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_\beta}} \cdot e^{\frac{-(m_\beta - \beta)^2}{2\sigma_\beta^2}}. \tag{14}$$

Функция распределения:

$$F(\beta) = \int_{-\infty}^\beta p(\beta) d\beta. \tag{15}$$

При средних значениях детерминированных параметров вероятность превышения нормативного значения коэффициента динамичности составляет:

$$P(\beta > 2,5) = 1 - F(2,5) = 0,237.$$

Принимаем вероятность $P(\beta > \beta_{01}) = 0,1$ и находим соответствующее значение коэффициента дина-

Табл. 3. Статистические характеристики случайных аргументов

Table 3. Statistical characteristics of random arguments

Параметр Parameter	V_1 , м/с m/s	V_2 , м/с m/s	β_s , с ⁻¹ s ⁻¹
Вариант 1: «Здание – слабый грунт – жесткий грунт» Option 1: “Building – weak ground – hard ground”			
Математическое ожидание Mathematical expectation	210	700	19,5
Дисперсия Dispersion	4900	3600	40,96
Вариант 2: «Здание – жесткий грунт – слабый грунт» Option 2: “Building – hard ground – weak ground”			
Математическое ожидание Mathematical expectation	700	210	19,5
Дисперсия Dispersion	3600	4900	40,96

мичности для зданий различной жесткости (рис. 3). Для жестких зданий на слабом грунте коэффициент динамичности с вероятностью превышения 0,1 может быть принят равным $\beta_{01} = 2,5$, для зданий средней жесткости $\beta_{01} = 3,0$, для гибких зданий $\beta_{01} = 3,3$.

Исследование влияния мощности верхнего слабого слоя на величину коэффициента динамичности показало следующее. Для жестких зданий ($V_0 = 800$ м/с) увеличение мощности верхнего слабого слоя от 5 до 30 м не приводит к существенному увеличению коэффициента динамичности: $P(\beta > 2,5) < 0,1$. Для зданий средней жесткости ($V_0 = 550$ м/с) коэффициент динамичности увеличивается от 2,5 при $H_1 < 10$ м до 3,1 при $H_1 = 30$ м. Наибольшее значение коэффициента динамичности наблюдается для гибких зданий ($V_0 = 300$ м/с) от 3,0 при $H_1 = 5$ м до 3,7 при $H_1 = 30$ м.

Увеличение мощности нижнего жесткого слоя приводит к увеличению коэффициента динамичности: для жестких зданий от 2,5 до 2,8; для зданий

средней жесткости 2,5 до 3,3; для гибких зданий от 3,0 до 3,9.

2. Система «здание – жесткий грунт – слабый грунт».

Функция относительного коэффициента динамичности:

$$\beta = -0,0224 - 0,0019 \cdot V_0 + 0,0012 \cdot V_1 + 0,0043 \cdot V_2 + 0,0088 \cdot H_1 + 0,0247 \cdot H_2 + 0,0249 \cdot \beta_s.$$

Математическое ожидание $m_\beta = 1,747$, дисперсия $D_\beta = 0,121$, стандарт:

$$\sigma_\beta = \sqrt{D_\beta} = 0,348.$$

При средних значениях детерминированных параметров вероятность превышения нормативного значения коэффициента динамичности составляет:

$$P(\beta > 2,5) = 1 - F(2,5) = 0,015.$$

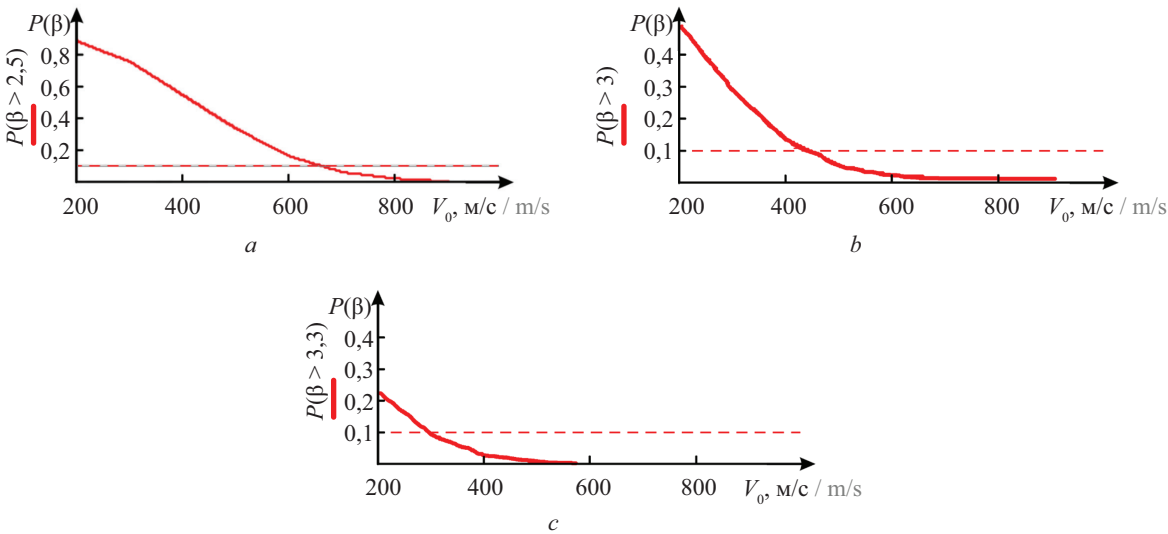


Рис. 3. Вероятности превышения заданного значения коэффициента динамичности для зданий различной жесткости: а — $\beta = 2,5$; б — $\beta = 3,0$; с — $\beta = 3,3$

Fig. 3. Probabilities of exceeding the set value of the dynamism coefficient for buildings of various stiffness: а — $\beta = 2,5$; б — $\beta = 3,0$; с — $\beta = 3,3$

Принимаем вероятность $P(\beta > \beta_{01}) = 0,1$ и находим соответствующее значение коэффициента динамичности для зданий различной жесткости. Для жестких зданий на жестком грунте коэффициент динамичности с вероятностью превышения 0,1 может быть принят равным $\beta_{01} = 2,0$, для зданий средней жесткости $\beta_{01} = 2,5$, для гибких зданий $\beta_{01} = 2,8$.

Для зданий жестких и средней жесткости увеличение мощности верхнего жесткого слоя от 5 до 30 м не приводит к существенному увеличению коэффициента динамичности: $P(\beta > 2,5) < 0,1$. Для гибких зданий при мощности слоя $H_1 = 25\text{--}30$ м коэффициент динамичности равен $\beta_{01} = 2,7$.

Увеличение мощности нижнего слабого слоя для зданий жестких и средней жесткости также не приводит к увеличению коэффициента динамичности до величины 2,5. Для гибких зданий при мощности нижнего слабого слоя $H_2 = 25\text{--}30$ м значение коэффициента динамичности равно $\beta_{01} = 2,9$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена задача оценки надежности системы «здание – многослойное основание» под действием сейсмической нагрузки в зависимости от жесткости здания, а также жесткости, мощности и конфигурации слоев грунтового основания. В качестве критерия надежности системы принят относительный коэффициент динамичности с заданной вероятностью его превышения. Коэффициент динамичности в общей постановке моделируется в виде функции

шести случайных аргументов. Проведена линеаризация функции и получены аналитические зависимости для двух вариантов двухслойного основания с повышенными и пониженными значениями жесткости слоев и различным порядком их чередования.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

Для жестких и средней жесткости зданий, опирающихся на жесткий приповерхностный слой грунта, коэффициенты динамичности с вероятностью 0,1 не превышают нормативное значение $\beta_{\max} = 2,5$, в том числе и при увеличении мощности составляющих слоев H_1 и H_2 до 30 м. Коэффициенты динамичности для гибких зданий превышают нормативное значение на 8–15 %.

Если приповерхностный слой сложен слабым грунтом, то коэффициенты динамичности β_{01} с вероятностью превышения $P(\beta > \beta_{01}) = 0,1$ составляют: для жестких зданий $\beta_{01} = 2,5$, для зданий средней жесткости $\beta_{01} = 3,0$, для гибких зданий $\beta_{01} = 3,3$. Увеличение мощности слоев до 30 м приводит к увеличению коэффициентов динамичности для всех типов зданий. При $H_1 = 30$ м коэффициенты динамичности соответственно равны: $\beta_{01} = 2,6$, $\beta_{01} = 3,1$, $\beta_{01} = 3,7$. При $H_2 = 30$ м — $\beta_{01} = 2,8$, $\beta_{01} = 3,3$, $\beta_{01} = 3,9$.

Принятый в нормах коэффициент динамичности, который для всех типов грунтов не превышает значения 2,5, не может обеспечить требуемый уровень надежности сейсмостойких зданий и должен определяться на основе расчетов с учетом жесткости сооружения и характеристик многослойного основания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бирбрайер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб. : Наука, 1998. 253 с.
2. Тяпин А.Г. Учет взаимодействия сооружений с основанием при расчетах на сейсмические воздействия. М. : ACB, 2014. 135 с.
3. Sivakumar Babu G.L. Reliability and Risk Analysis in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering // Indian Geotechnical Journal. 2024. Vol. 54. Issue 5. Pp. 1705–1737. DOI: 10.1007/s40098-024-00909-6
4. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М. : Машиностроение, 1984. 312 с.
5. Allin C.C. Seismic reliability analysis of structures // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2007. Vol. 36. Issue 13. Pp. 1811–1812. DOI: 10.1002/eqe.732
6. Mackie K.R., Stojadinović B. Performance-based seismic bridge design for damage and loss limit states // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2007. Vol. 36. Issue 13. Pp. 1953–1971. DOI: 10.1002/eqe.699
7. Montiel M.A., Ruiz S.E. Influence of structural capacity uncertainty on seismic reliability of buildings under narrow-band motions // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2007. Vol. 36. Issue 13. Pp. 1915–1934. DOI: 10.1002/eqe.711
8. Lu D.-G., Song P.-Y., Yu X.-H., Wang G.-Y. Global seismic reliability analysis of building structures based on system-level limit states // The 14th World Conference on Earthquake Engineering. 2008.
9. Hofer L., Toska K., Zanini M.A. Impact of epistemic and aleatory uncertainties on the seismic reliability assessment of existing structures // Structures. 2023. Vol. 57. P. 105235. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105235
10. 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
11. 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

12. 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. Vol. 49. Issue 2. Pp. 151–160. DOI: 10.1007/s40098-018-0301-y

13. 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

14. 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

15. Guellil M.E., Harichane Z., Berkane H.D., Sadouki 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

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

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

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

Поступила в редакцию 27 декабря 2024 г.

Принята в доработанном виде 12 января 2025 г.

Одобрена для публикации 9 апреля 2025 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. им. Ленина, д. 28; SPIN-код: 3399-0668, 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. им. Ленина, д. 28; SPIN-код: 8611-7473, 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. им. Ленина, д. 28; SPIN-код: 7435-7193, 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. им. Ленина, д. 28; SPIN-код: 6565-3690, 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. Birbraer A.N. *Seismic analysis of structures*. St. Petersburg, Nauka, 1998; 253. (rus.).

2. Tyapin A.G. *Consideration of soil-structure interaction in seismic calculations*. Moscow, ASV, 2014; 135. (rus.).

3. Sivakumar Babu G.L. Reliability and Risk Analysis in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. *Indian Geotechnical Journal*. 2024; 54(5):1705-1737. DOI: 10.1007/s40098-024-00909-6

4. Bolotin V.V. *Prediction of the service life of machines and structures*. Moscow, Mashinostroyeniye, 1984; 312. (rus.).

5. Allin C.C. Seismic reliability analysis of structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2007; 36(13):1811-1812. DOI: 10.1002/eqe.732

6. Mackie K.R., Stojadinović B. Performance-based seismic bridge design for damage and loss limit states. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 2007; 36(13):1953-1971. DOI: 10.1002/eqe.699

7. Montiel M.A., Ruiz S.E. Influence of structural capacity uncertainty on seismic reliability of buildings under narrow-band motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2007; 36(13):1915-1934. DOI: 10.1002/eqe.711

8. Lu D.-G., Song P.-Y., Yu X.-H., Wang G.-Y. Global seismic reliability analysis of building structures based on system-level limit states. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. 2008
9. Hofer L., Toska K., Zanini M.A. Impact of epistemic and aleatory uncertainties on the seismic reliability assessment of existing structures. *Structures*. 2023; 57:105235. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105235
10. 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
11. 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
12. 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
13. 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
14. 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
15. Guellil M.E., Harichane Z., Berkane H.D., Sadouki 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
16. Sinitsyn A.P., Medvedeva E.S., Khachiyan E.E. et al. *Wave processes in building structures under seismic impacts*. Moscow, Nauka, 1987; 159. (rus.).
17. Khachiyan E.E. *Seismic impacts and prediction of the behavior of structures*. Yerevan, Gitutyun, 2015; 555. (rus.).
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.).

Received December 27, 2024.

Adopted in revised form on January 12, 2025.

Approved for publication on April 9, 2025.

Bionotes: **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; SPIN-code: 3399-0668, 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; SPIN-code: 8611-7473, 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; SPIN-code: 7435-7193, 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: 475651, 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.