

УДК 624.04; 69.07

**С. Ю. Иванов**

*Волгоградский государственный технический университет*

### **УЧЕТ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ СИСТЕМЫ «СООРУЖЕНИЕ — ОСНОВАНИЕ» В СЕЙСМОСТОЙКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Приведен анализ результатов исследования динамических характеристик системы «сооружение — основание» при изменении соотношения сейсмической жесткости здания к жесткости основания. Расчеты выполнены для зданий бескаркасного типа. Приведено аналитическое решение задач динамики зданий с учетом совместной работы сооружения с грунтовым массивом. Показаны значения несущих частот при разных грунтовых условиях и конфигурации здания в плане. По результатам исследования выявлено, что для зданий без активной сейсмозащиты можно уменьшить возможный вред от сейсмического воздействия путем эффективной планировки здания.

**Ключевые слова:** динамические характеристики, слоистая модель, аналитический расчет, сейсмическая жесткость.

Анализом работы зданий и конструкций сооружений при сейсмическом воздействии занимается большой круг исследователей. Существуют различные способы устройства сейсмозащиты зданий, однако их большая часть базируется на методах, позволяющих поглощать энергию, полученную от сейсмической волны, из чего можно сделать вывод, что основным параметром при землетрясении является энергия [1]. Определение энергии сейсмической волны, а также ее потерь при движении от эпицентра к объекту является одной из приоритетных задач современной инженерной практики [2].

Ряд исследователей отмечают, что для определения энергии в здании при землетрясении необходимо знать определенные жесткостные характеристики здания [3]. Одной из таких характеристик является сейсмическая жесткость грунта. В [4] приведен расчет сейсмической жесткости с помощью разбиения здания на слои, однако не исследуется совместная работа грунта со зданием при землетрясении. *Целью* данного исследования является оценка совместной работы основания и здания в части влияния типа грунта и конфигурации здания в плане на основные динамические характеристики конструкций. Для этого проведен модальный анализ системы «сооружение — основание» при разных соотношениях сейсмической жесткости здания и грунта. Сейсмическая жесткость здания определялась в соответствии с методикой, изложенной в [4].

Слои состоят из вертикальных элементов и разделены между собой воздушными промежутками (рис. 1). Определим общую площадь горизонтальных сечений:

$f_c$  — площадь стен в пределах этажа;

$f_n$  — площадь перегородок в пределах этажа;

$f_g$  — площадь воздушных проемов в пределах этажа.

Общая площадь горизонтальных сечений равна сумме:

$$F = f_c + f_n + f_g. \quad (1)$$

Упругости для стен и перегородок обозначены:

$k_c$  — для стен в пределах этажа;

$k_n$  — для перегородок в пределах этажа.

Плотности:

$\rho_c$  — для стен в пределах этажа;

$\rho_n$  — для перегородок в пределах этажа.

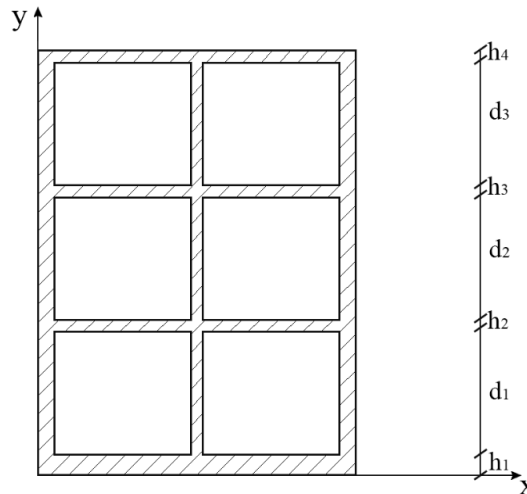


Рис. 1. Схема вертикального разреза здания

В [5] установлено, что для многослойных пластинок с плоскопараллельными слоями, имеющих толщину  $b_i$  и упругость  $k_i$ , в которых распространяется плоская волна в направлении слоистости, средние значения упругости  $k_m$  и плотности  $\rho_m$  определяются приближенными формулами:

$$\rho_m = \frac{\sum b_i \rho_i}{\sum b_i}, \quad (2)$$

$$k_m = \frac{\sum b_i k_i}{\sum b_i}. \quad (3)$$

Различие между многослойной пластинкой и этажом в здании состоит в разделении слоев воздушной прослойкой [6, 7].

Упругость продольной волны в каждом элементе определяется:

$$k_i = \frac{E_i}{1 - \sigma^2}, \quad (4)$$

где  $E_i$  — модуль упругости (Юнга) элемента, а  $\sigma$  — коэффициент Пуассона.

Если распространяется поперечная волна, то упругость равна модулю сдвига:

$$k_i = G = \frac{E_i}{2(1-\sigma)}. \quad (5)$$

Исходя из этого, упругость  $k_{dp}$ :

$$k_{dp} = \frac{\sum f_i E_i}{(1-\sigma^2)F}. \quad (6)$$

Так как  $V = \sqrt{\frac{k}{\rho}}$ , то можно найти значение скоростей распространения продольной и поперечной волны в элементе  $d$ :

$$V_{dp} = \sqrt{\frac{\sum f_i E_i}{(1-\sigma^2)\sum f_i \rho_i}}; \quad (7)$$

$$V_{ds} = \sqrt{\frac{\sum f_i E_i}{2 \cdot (1-\sigma)\sum f_i \rho_i}}. \quad (8)$$

В зависимости от того, какую волну мы рассматриваем (продольную или поперечную) [8], расчет упругости слоя будет выполняться по следующим формулам:

$$\text{для продольной волны: } k_{hp} = \frac{(1-\sigma)E_h}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}; \quad (9)$$

$$\text{для поперечной волны: } k_{hs} = G = \frac{E_h}{2 \cdot (1+\sigma)}. \quad (10)$$

Так как слой-характеристики этажа отличаются от характеристик перекрытия, нужно находить эффективную плотность в слоях [4]:

$$\rho_{\text{э}} = \frac{\sum \rho_d d_n + \sum \rho_h h_n}{\sum d_n + \sum h_n}. \quad (11)$$

По аналогии с плотностью нужно рассчитывать и эффективную упругость слоя. Она будет зависеть от направления волны:

$$\text{для продольной: } k_{hp} = \frac{\sum d_n + \sum h_n}{\sum \frac{d_n}{k_{dp}} + \sum \frac{h_n}{k_{hp}}}; \quad (12)$$

$$\text{для поперечной: } k_{hs} = \frac{\sum d_n + \sum h_n}{\sum \frac{d_n}{k_{ds}} + \sum \frac{h_n}{k_{hs}}}. \quad (13)$$

Подставив эти уравнения в уравнение скорости, найдем эффективную скорость распространения [9—11] для продольных и поперечных волн в здании:

$$V_{эп} = \sqrt{\frac{k_{эп}}{\rho_э}} = \frac{\sum d_n + \sum h_n}{\sqrt{(\sum \frac{d_n}{k_{дп}} + \sum \frac{h_n}{k_{hp}})(\sum \rho_d d_n + \sum \rho_h h_n)}}; \quad (14)$$

$$V_{зс} = \sqrt{\frac{k_{зс}}{\rho_э}} = \frac{\sum d_n + \sum h_n}{\sqrt{(\sum \frac{d_n}{k_{дс}} + \sum \frac{h_n}{k_{hs}})(\sum \rho_d d_n + \sum \rho_h h_n)}}. \quad (15)$$

Для анализа взаимодействия грунта со зданием принято 4 типа грунта (песок, супесь, суглинок, глина) и 3 типа планов зданий (рис. 2).

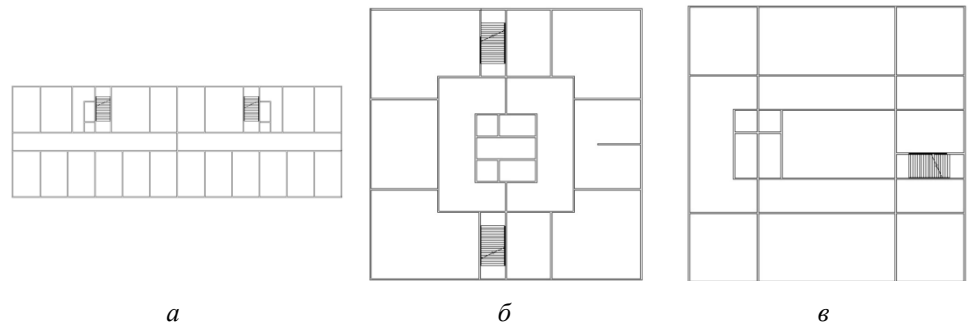


Рис. 2. Планировка зданий для исследования:  
*a* — 24×72 м; *б* — 36×36 м; *в* — 36×36 м

Приняты толщина стен 400 мм, высота этажа 2,8 м, толщина перекрытия 220 мм. Расчет проведен при помощи ПК ЛИРА-САПР (рис. 3). Характеристики грунта приняты в соответствии СП 58.1325800.2017. За контрольные параметры выбраны частота и период колебания системы. Результаты вычисления занесены в табл. 1.

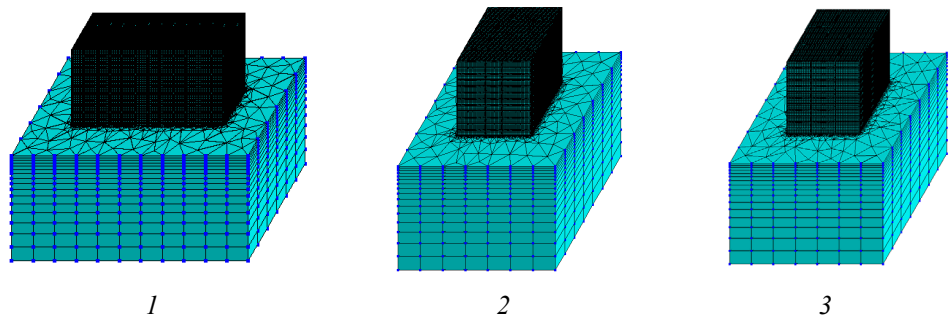


Рис. 3. Расчетные модели в ПК ЛИРА-САПР

Также для исследования использовались первые формы колебаний для каждого типа грунта и для каждого плана здания (табл. 2).

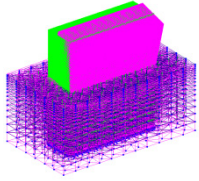
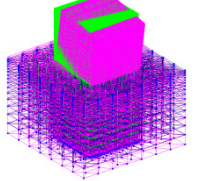
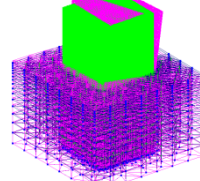
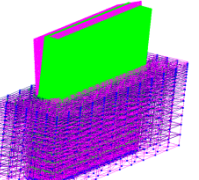
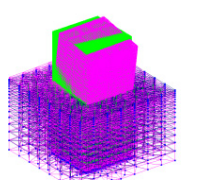
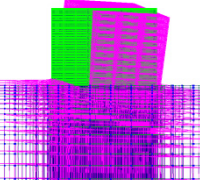
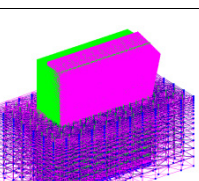
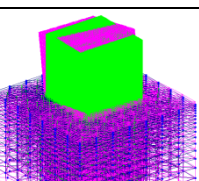
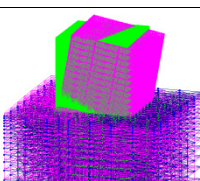
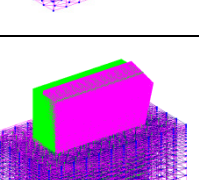
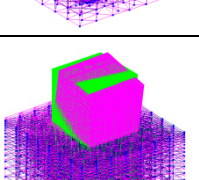
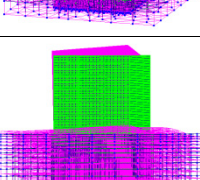
Таблица 1

*Расчетные параметры слоистой системы*

№	Тип грунта	Период колебаний, с <sup>-1</sup>	Частота колебаний, Гц
1	Песок	0,358837	0,443755
	Супесь	0,342769	0,464557
	Суглинок	0,354239	0,449515
	Глина	0,309464	0,514554
2	Песок	0,320585	0,496704
	Супесь	0,307731	0,517451
	Суглинок	0,318887	0,499349
	Глина	0,281149	0,566375
3	Песок	0,317791	0,501071
	Супесь	0,305160	0,521810
	Суглинок	0,316321	0,503399
	Глина	0,279373	0,569975

Таблица 2

*Первая форма колебаний при разных типах грунта*

Тип грунта/ тип плана	1	2	3
Песок			
Супесь			
Суглинок			
Глина			

Затем по формулам, описанным выше, для каждого плана здания вычислена сейсмическая жесткость здания в продольном и поперечном направлениях. Сейсмическая жесткость грунта [12—14] взята из рекомендаций по сейсмическому микрорайонированию (РСМ-73), после этого найдено отношение сейсмической жесткости здания к сейсмической жесткости грунта [15—17]. Данные занесены в табл. 3, 4.

Таблица 3

*Сейсмическая жесткость здания*

План	1	2	3
Размеры в плане, м	24×72	36×36	36×36
Сейсмическая жесткость в плане продольная, $\frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{см}^{-3}}$	0,0884231	0,0908421	0,0835512
Сейсмическая жесткость в плане поперечная 1, $\frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{см}^{-3}}$	0,2078003	0,2046324	0,1981613
Сейсмическая жесткость в плане поперечная 2, $\frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{см}^{-3}}$	0,1858793	0,1981613	0,1981613

Таблица 4

*Сейсмическая жесткость грунта и отношение жесткостей*

План	1	2	3	Грунт
Сейсмическая жесткость грунта (продольная), $\frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{см}^{-3}}$	0,95	0,95	0,95	Песок
	0,87	0,87	0,87	Супесь
	1,15	1,15	1,15	Суглинок
	2,1	2,1	2,1	Глина
Сейсмическая жесткость грунта поперечная, $\frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{см}^{-3}}$	0,65	0,65	0,65	Песок
	0,4	0,4	0,4	Супесь
	0,5	0,5	0,5	Суглинок
	0,85	0,85	0,85	Глина
Отношение сейсмической жесткости здания к сейсмической жесткости грунта продольной	0,093077	0,095623	0,087949	Песок
	0,101636	0,104416	0,096036	Супесь
	0,07689	0,078993	0,072653	Суглинок
	0,042106	0,043258	0,039786	Глина
Отношение сейсмической жесткости здания к сейсмической жесткости грунта поперечной 1	0,319693	0,314819	0,304864	Песок
	0,519501	0,511581	0,495403	Супесь
	0,415601	0,409265	0,396323	Суглинок
	0,244471	0,240744	0,233131	Глина
Отношение сейсмической жесткости здания к сейсмической жесткости грунта поперечной 2	0,285968	0,304864	0,304864	Песок
	0,464698	0,495403	0,495403	Супесь
	0,371759	0,396323	0,396323	Суглинок
	0,218682	0,233131	0,233131	Глина

Далее проведен анализ динамики изменения периода [18—21] и частоты колебаний, а также изменения отношения сейсмических жесткостей зданий к сейсмическим жесткостям грунтов (рис. 4—8). На рисунках 4, 5 видно, что период колебаний для всех планов уменьшается при увеличении сейсмической жесткости грунта, а частота колебаний увеличивается. Вместе с тем кривая отношения сейсмических жесткостей также уменьшается, однако имеет другой характер. Так, при изменении пиковых значений частоты колебания на 16 % отношение сейсмических жесткостей менялось от 23 % до 54 %. Это показывает, что планировка этажа значительно влияет на динамические характеристики системы «сооружение — основание».

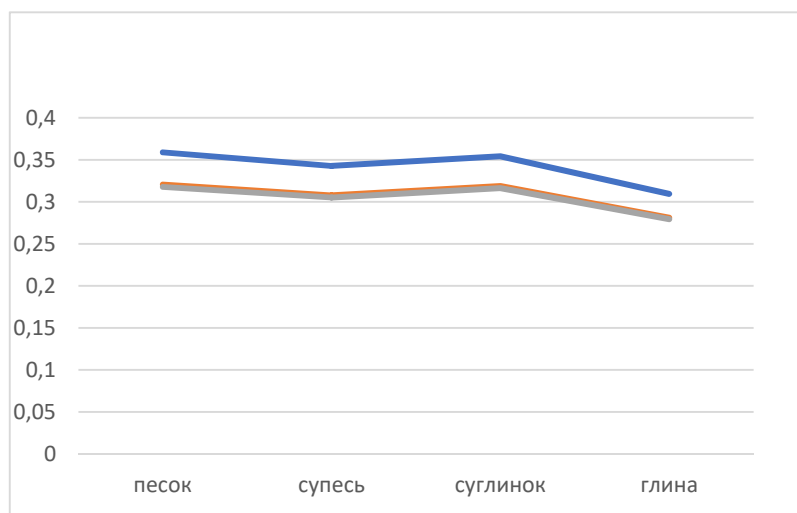


Рис. 4. Период колебания системы «здание — основание»

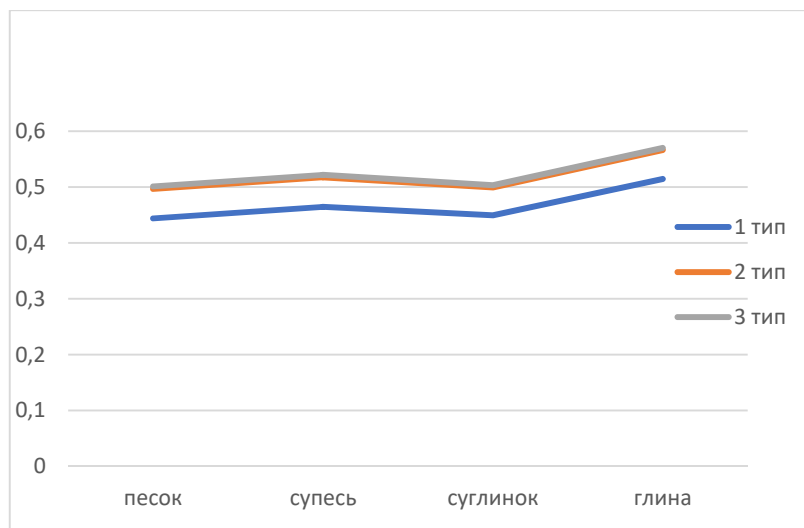


Рис. 5. Частота колебания системы «здание — основание»

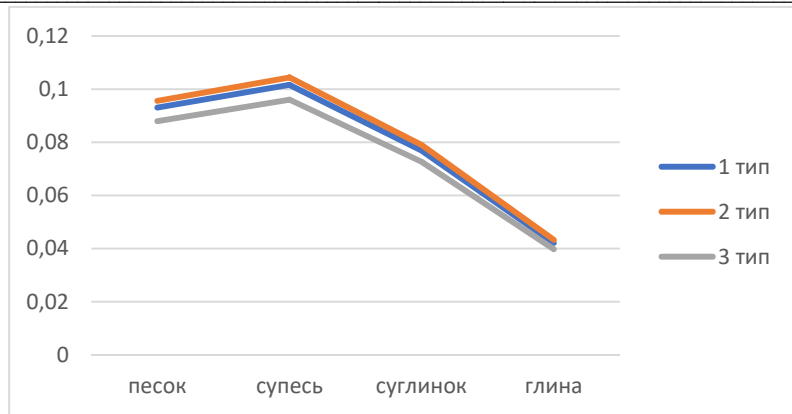


Рис. 6. Отношение сейсмической жесткости здания к сейсмической жесткости грунта (продольная)

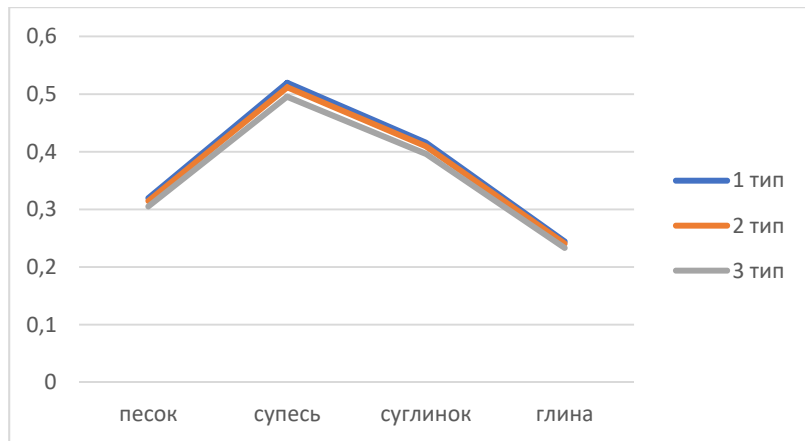


Рис. 7. Отношение сейсмической жесткости здания к сейсмической жесткости грунта (поперечная по оси x)

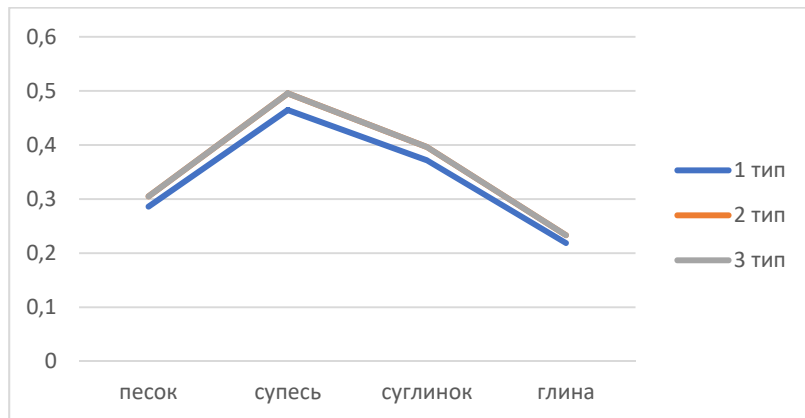


Рис. 8. Отношение сейсмической жесткости здания к сейсмической жесткости грунта (поперечная по оси y)



По результатам исследования сформулированы следующие *выводы*.

Установлено, что уменьшение отношения сейсмической жесткости здания к жесткости основания приводит к заметному увеличению частоты колебаний системы (до 16 %). Это свидетельствует о том, что взаимодействие между динамикой самого здания и его основания оказывает значительное воздействие на общие динамические характеристики системы.

Для зданий без активной самоизоляции можно использовать конфигурацию в плане для уменьшения возможных последствий при сейсмических воздействиях. Соотношение сейсмических жесткостей здания и грунта менялось от 23 % до 54 %, а первая несущая частота от 9 % до 16 %, что показывает возможность регулирования динамических характеристик системы «сооружение — основание» путем эффективной планировки здания.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Тяпин А. Г.* Учет взаимодействия сооружений с основанием при расчетах на сейсмические воздействия. М. : АСВ, 2014 г. 136 с.
2. *Хачиян Э. Е.* Сейсмические воздействия и прогноз поведения сооружений. Ереван : Гитутюн, НАН РА, 2015. 555 с.
3. *Уздин А. М., Сандович Т. А., Аль-Насер-Мохомад С. А.* Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. СПб., 1993. 89 с.
4. *Синицын А. П., Медведева Е. С., Хачиян Э. Е.* Волновые процессы в конструкциях зданий при сейсмических воздействиях. М. : Наука, 1987. 130 с.
5. *Ризниченко Ю. В.* Проблемы сейсмологии. Избранные труды. М. : Наука, 1985. 408 с.
6. *Корнев Б. Г., Рабинович И. М.* Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. Справочник проектировщика. М. : Стройиздат, 1981. С. 114—128.
7. *Seed H. B., Lysmer J., Hwang R.* Soil-Structure Interaction Analyses for Evaluating Seismic Response // Journal of the Geotechnical Engineering Division, 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 // Journal of the Geotechnical Engineering Division. 2007. Vol. 36. Pp. 2445—2453.
9. *Mylonakis G., Gazetas G.* Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental // Journal of Earthquake Engineering. 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. URL: [https://www.academia.edu/9765835/Seismic\\_Soil\\_Structure\\_Interaction\\_in\\_Buildings\\_I\\_Analytical\\_Methods](https://www.academia.edu/9765835/Seismic_Soil_Structure_Interaction_in_Buildings_I_Analytical_Methods).
11. *Chiang-Liang V.* Dynamic response of structures in layered soils. Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, 1974. URL: <https://hdl.handle.net/1721.1/138620>.
12. *Dangla P.* A plane strain soil-structure interaction model // Earthquake engineering & structural dynamics. 1988. Vol. 16. Iss. 8. Pp. 1115—1128.
13. *Пиеничкина В. А., Эмба С. И., Сидякин П. А., Щитов Д. В.* Оценка сейсмостойкости жилищного фонда Ставропольского края // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 4(103). С. 452—456.
14. *Pshenichkina V. A., Sukhina K. N., Drozdov V. V.* Probabilistic method for service life estimation of reinforced concrete roof trusses of operated industrial building // International Review of Civil Engineering. 2016. Vol. 7. No. 6. Pp. 158—163.
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. 032089.
16. *Дроздов В. В., Пиеничкина В. А., Евтушенко С. И.* Инженерная методика оценки сейсмической надежности зданий по предельно допустимому риску // Интернет-вестник ВолгГАСУ. 2013. № 2(27). С. 10.
17. *Павлык В. С.* Определение свободных колебаний зданий с несущими стенами // Исследования по сейсмостойкости зданий и сооружений, сборник статей ЦНИИСК. М. : Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1960. С. 35—59.

18. Рекунов С. С. Об оценке надежности и восстановлении эксплуатационных качеств мостовых сооружений // Транспортные сооружения. 2016. Т. 3. № 2. URL: <http://t-s.today/PDF/07TS216.pdf>.

19. Рекунов С. С., Чураков А. А. Исследование вопросов надежности сооружений разных типов при экстремальных воздействиях. Ч. 1 // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2023. № 2(44). С. 57—61.

20. Сравнительный анализ результатов расчета системы «здание — основание», представленной в виде слоистой модели / В. А. Пшеничкина, С. С. Рекунов, С. Ю. Иванов, А. С. Жиденко, М. Чанчан, С. Хамиси // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 1(90). С. 43—53.

21. Ignatiev A. V. Obtaining the dynamic frequency equation for the plate calculation by the Finite Element Method in the form of a classical mixed method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/456/1/012110/pdf>.

© Иванов С. Ю., 2024

Поступила в редакцию  
в январе 2024 г.

Ссылка для цитирования:

Иванов С. Ю. Учет сейсмической жесткости системы «сооружение — основание» в сейсмостойком строительстве // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Вып. 1(94). С. 33—42. DOI: 10.35211/18154360\_2024\_1\_33.

Об авторе:

**Иванов Станислав Юрьевич** — ассистент каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; stassuz-1-14@yandex.ru

**Stanislav Yu. Ivanov**

**Volgograd State Technical University**

## CONSIDERATION OF THE SEISMIC RIGIDITY OF THE “STRUCTURE — BASE” SYSTEM IN EARTHQUAKE-RESISTANT CONSTRUCTION

The analysis of the results of the study of the dynamic characteristics of the „building — base“ system with a change in the ratio of the seismic stiffness of the building to the stiffness of the base is presented. Calculations were performed for frameless buildings. The analytical solution of the problems of building dynamics is given, taking into account the joint work of the structure with the soil mass. The values of the carrier frequencies under different ground conditions and the configuration of the building in the plan are shown. According to the results of the study, it was revealed that for buildings without active seismic protection, it is possible to reduce the possible damage from seismic effects by effectively planning the building.

**К e y w o r d s:** dynamic characteristics, layered model, analytical calculation, seismic rigidity.

*For citation:*

Ivanov S. Yu. [Consideration of the seismic rigidity of the “structure — base” system in earthquake-resistant construction]. *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], 2024, iss. 1, pp. 33—42. DOI: 10.35211/18154360\_2024\_1\_33.

*About author:*

**Stanislav Yu. Ivanov** — Assistant, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; stassuz-1-14@yandex.ru