

УДК 624.012.4: 624.042.7

**ВЛИЯНИЕ ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЙ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОСНОВАНИЯ С  
МАЛОЭТАЖНЫМИ ЗДАНИЯМИ**

Асп. Раджабзадег Могсен (Иран),  
канд. техн. наук О.В. Кичаева

**ВПЛИВ ҐРУНТОВИХ УМОВ НА ВЗАЄМОДІЮ ОСНОВИ З МАЛОПОВЕРХОВИМИ  
БУДІВЛЯМИ**

Асп. Раджабзадег Могсен (Иран),  
канд. техн. наук О.В. Кічаєва

**THE EFFECT OF GROUND CONDITIONS ON THE INTERACTION OF LOW-RISE BUILDINGS  
WITH BASE**

Ph.D. Student Rajabzadeh Mohsen (Iran),  
cand. of techn. sciences O.V. Kichaeva

*В данной статье исследуется влияние грунтовых условий на взаимодействие основания с 5-этажными каркасными зданиями. Исследование было проведено с помощью программы ABAQUS; принята упругопластическая модель грунта. Полученные результаты анализа периодов зданий с учетом и без учета взаимодействия системы «основание – сооружение» показывают, что эффект учета этого взаимодействия достаточно значителен.*

***Ключевые слова:** грунтовые условия, взаимодействие сооружения и основания, упругопластическая модель грунта.*

У даній статті досліджується вплив ґрунтових умов на взаємодію основи з 5-поверховими каркасними будинками. Дослідження було проведено за допомогою програми ABAQUS; прийнята пружньопластична модель ґрунту. Отримані результати аналізу періодів будівель з урахуванням і без урахування взаємодії системи «основа - споруда» показують, що ефект обліку цієї взаємодії досить значний.

**Ключові слова:** ґрунтові умови, взаємодія споруди і підстави, пружньопластична модель ґрунту.

*For the most realistic assessment of the dynamic behavior of structures must consider most of the factors that have a significant effect on this behavior: the velocity of propagation of longitudinal and transverse waves in the soil, seismic stiffness soil conditions influence joint vibrations of buildings and grounds, character bearing structures on the ground and many other factors. One of the most important parameters to assess the real dynamic behavior of the building and the whole system "foundation - foundation - structure" is the account of the subgrade. Also one of the main issues in the analysis of interaction phenomena of the "grounds - foundation - structure" is the choice of an appropriate model of the system.*

*One way is to create a model of the " grounds - foundation - structure " using the finite element method. With this method it is possible to take into account most of the major factors affecting the dynamic operation of the system.*

*In the present study modeled low-rise buildings with a base, specify the elastoplastic model, and with good reason. After the simulation was carried out modal analysis, providing definition of forms and periods of free oscillations. Were considered different types of soils with different velocities of transverse waves, and then were analyzed values were periods of free oscillations of buildings with and without foundation in the form of the ratio of  $T_{(i)}/T$ .*

*It was found that when the subgrade in a uniform design scheme "grounds - foundation - structure", increases the period of free oscillations of the building; weaker foundation soils increase the oscillation period of the building. Also found that the smaller the rate of passage of the transverse waves have a founding primers, the greater the ratio of the periods. Joint consideration of the " grounds - foundation - structure" becomes more pronounced for higher modes of vibration.*

**Key words:** soil conditions, interaction buildings and grounds, elastoplastic model of a ground.

**Введение.** При анализе последствий землетрясений просматривается четкая связь между ґрунтовыми условиями площадки и уровнем повреждения зданий, т.к. ґрунтовые напластования влияют на динамическое поведение здания (сооружения).

На изменение сейсмической активности различных типов ґрунтов существенное влияние оказывают: скорости распространения продольных и поперечных волн в ґрунтах, сейсмическая жесткость ґрунтов и её соотношение в слоях ґрунта, резонансные свойства ґрунта, влияние условий совместного колебания здания и основания, соотношение особенностей спектра сейсмических колебаний ґрунта и динамических свойств сооружения, характер опирания сооружения на ґрунт и многие другие факторы.

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами.** Таким образом, в силу сложности и адекватного описания

(численного или аналитического), учет всех факторов затруднен. Однако для наиболее реалистической оценки динамического поведения здания (сооружения) необходимо, по возможности, учитывать большинство факторов, в значительной степени влияющих на это поведение. Важнейшим факторов для оценки реального динамического поведения здания и в целом системы «основание – фундамент – сооружение», является учет ґрунтового основания.

Одним из основных вопросов при анализе взаимодействия системы «основание – фундамент – сооружение», является выбор соответствующей модели данной системы. Хорошо зарекомендовавшим себя способом является создание модели системы с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [1]. С помощью МКЭ возможно учесть большинство основных факторов, влияющих на динамическую работу системы.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Работы, исследующие данную проблематику, выполнялись Ghanad, Bargi и Kramer; в них, с разной точностью и сложностью, были предложены различные методы, которые аналитически описывают такие модели [2, 3, 4]. Влияние грунтовых условий на сооружения рассматривалось С.В. Медведевым, S. Okamoto, Ю.И. Немчиновым [5], Н.Г. Марьенковым, М.А. Клячко, С.В. Поляковым и многими другими учеными.

**Определение цели и задачи исследования**

1. Создание соответствующей численной модели для изучения взаимодействия системы «основание – фундамент – сооружение».
2. Оценка взаимодействия основания и сооружения при задании упругопластической модели для грунта.
3. Анализ учета грунтового основания, обладающего различными динамическими характеристиками, в единой расчетной схеме «основание – фундамент – сооружение» и его влияние на работу здания.

Для достижения поставленной цели выполнено четыре модели 5-этажных зданий с основанием и без основания; конечные элементы заданы с учетом нелинейности. После моделирования выполнялся модальный анализ, предусматривающий определение форм и периодов свободных колебаний. Были рассмотрены различные виды грунтов с разными скоростями поперечных волн, после чего анализировались значения периодов свободных колебаний зданий с учетом и без учета основания в виде соотношения  $T_{(i)}/T$ .

**Основная часть исследования.** Характеристики моделируемого здания: 5-этажное железобетонное здание, форма в плане симметричная, высота этажа 3,2 м, общая высота - 16 метров (рис. 1). Конструктивная система здания – каркасная в обоих направлениях. Перекрытие выполнено в виде второстепенных балок, плит и пенопластовых блоков. Внешние стены толщиной 25 см, внутренние – толщиной 15 см из керамических блоков. Проект здания, а также все нагрузки и воздействия заданы в соответствии с нормативными документами Ирана [6].

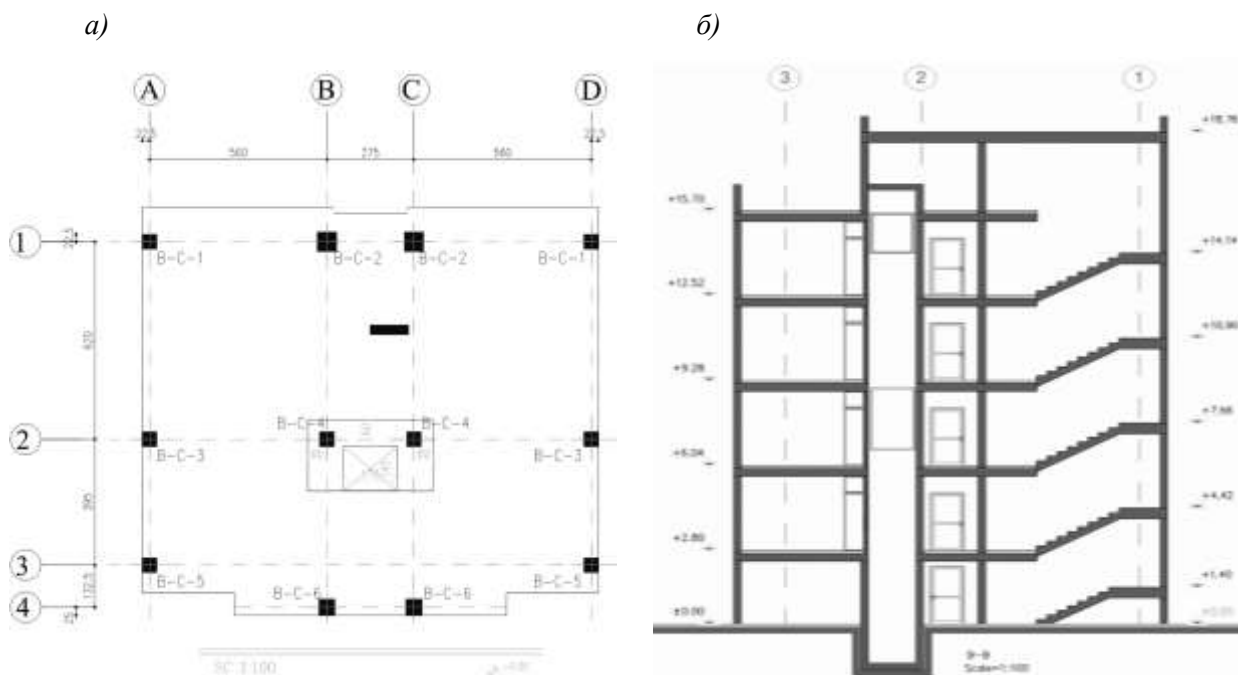


Рис. 1. Конструктивная схема здания:  
а – схема расположения колонн; б – поперечный разрез здания

Грунт представлен в виде модели упругого полупространства в соответствии теорией прочности Кулона — Мора, массив

грунта разделен на ближнюю и дальние области, мощность массива составляет 30 м (рис. 2). Предполагается, что массив грунта

подстигается скальным основанием. Ближняя область грунтового массива длиной 60 м включает в себя зоны грунта, располагающегося непосредственно под фундаментными конструкциями, дальняя зона представляет собой полубесконечную пластину. Грунтовой массив, прилегающий к

зданию, моделируется объемными конечными элементами, каждый узел имеет три степени свободы. На стыке конечных элементов фундамента и грунта вводятся коэффициенты, учитывающие фактор трения на контакте фундамент - грунт.

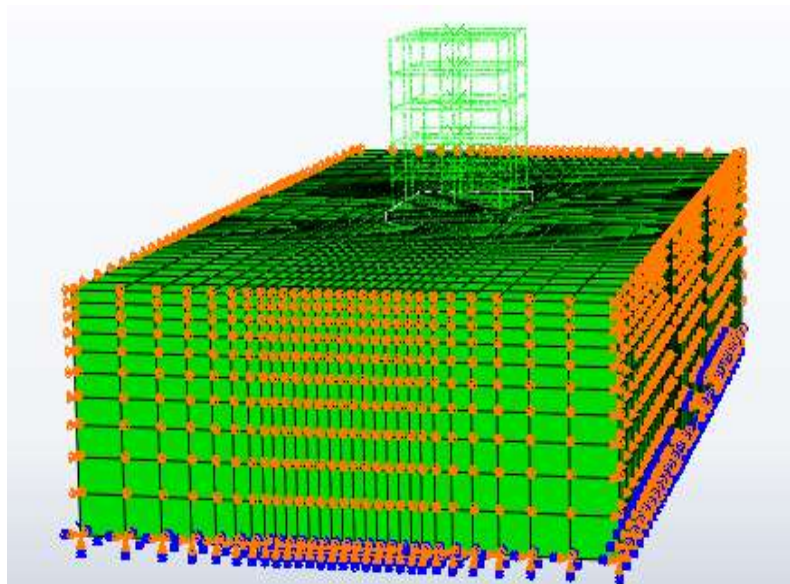


Рис. 2. Конечно-элементная модель здания и полубесконечного основания

Классификация грунтов, а также их сейсмические свойства приняты в соответствии с нормами 2800 [6] и NEHRP [7]. Критерием классификации грунтов в этих нормативных

документах является скорость распространения поперечных волн в грунтах. Другие свойства грунтов приведены в табл. 1 [8].

Таблица 1

Характеристики грунтов

Категория грунта по нормам 2800	Описание	Скорость распространения поперечных волн $V_s$ , м/сек	Удельный вес грунта $\gamma$ (кН/м <sup>3</sup> )	Коэффициент Пуассона	Модуль сдвига $G$ (Н/м <sup>2</sup> )
I	Скальные грунты	650	19	0,30	$845 \times 10^6$
II	Скальные грунты выветрелые и сильно выветрелые	430	18	0,35	$669,8 \times 10^6$
III	Пески гравелистые, крупные и средней крупности плотные	310	18	0,40	$192,2 \times 10^6$
IV	Глинистые грунты	150	17	0,40	$45 \times 10^6$

В связи с небольшой толщиной грунтов (30 м), а также для моделирования реального поведения грунта, были использованы два слоя грунтов с различными свойствами. Характеристики верхнего песчаного слоя представлены в табл. 2 [9]. Для моделирования дальней зоны как полубесконечной пластины, по границе грунта используются элементы,

пружины и амортизаторы, которые присоединяются к узлам элементов в направлении землетрясения (горизонтальное направление). Влияние работы пружин в вертикальном и вращательных направлениях предполагается незначительным. Закрепление основания на платформы вдоль UY и UX и UZ выполнено шарнирным.

Таблица 2

Характеристики песчаного грунта

Наименование грунта	Толщина слоя грунта	Скорость распространения поперечных волн $V_s$ , м/сек	Удельный вес грунта $\gamma$ (кН/м <sup>3</sup> )	Коэффициент Пуассона	Модуль сдвига G (Н/м <sup>2</sup> )	Модуль деформации E (Н/м <sup>2</sup> )
Рыхлый песок	3 м	150	18	0,3	$7,7 \times 10^6$	$20,0 \times 10^6$

Чтобы рассчитать жесткость пружин и коэффициент демпфирования амортизаторы в направлении горизонтальных осей и угла поворота, используются соотношения, предложенные Barkan и Горбуновым-Посадовым [10, 11].

$$K_x = \frac{G\beta_z \sqrt{BL}}{1-\nu}, \quad (1)$$

$$K_y = 2(1+\nu)G\beta_x \sqrt{BL}, \quad (2)$$

$$K_\theta = \frac{G\beta_\phi BL^2}{1-\nu}, \quad (3)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  
 $G$  – модуль сдвига грунтов,  
 $L, B$  – длина и ширина прямоугольного фундамента,  
 $\beta_x, \beta_z, \beta_\phi$  – коэффициенты, зависящие от глубины заложения фундамента.

Значения вычисленных коэффициентов для узлов конечно-элементной сетки показаны в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты жесткости и демпфирования, принятые в расчете

Типы грунтов	Коэффициент жесткости средних узлов, Н/м	Коэффициент жесткости конечных узлов, Н/м	Коэффициенты демпфирования средних узлов, Н·сек/м	Коэффициенты демпфирования конечных узлов, Н·сек/м
I	$1517025.5909 \times 10^5$	$106763.9405 \times 10^5$	8007734.160	3988060.31
II	$91695.25979 \times 10^5$	$64533.20254 \times 10^5$	6225711.027	3100566.35
III	$21293.67097 \times 10^5$	$14985.87603 \times 10^5$	3000118.557	1494137.23
IV	$5983.345561 \times 10^5$	$4210.907313 \times 10^5$	1590322.453	792022.029
Рыхлый песок	$1117.33810 \times 10^5$	$786.350570 \times 10^5$	342261.0856	576529.124

После моделирования системы «основание – фундамент – сооружение» с учетом и без учета основания, выполнялся

модальный анализ и определялись формы и периоды свободных колебаний сооружения (рис. 3).

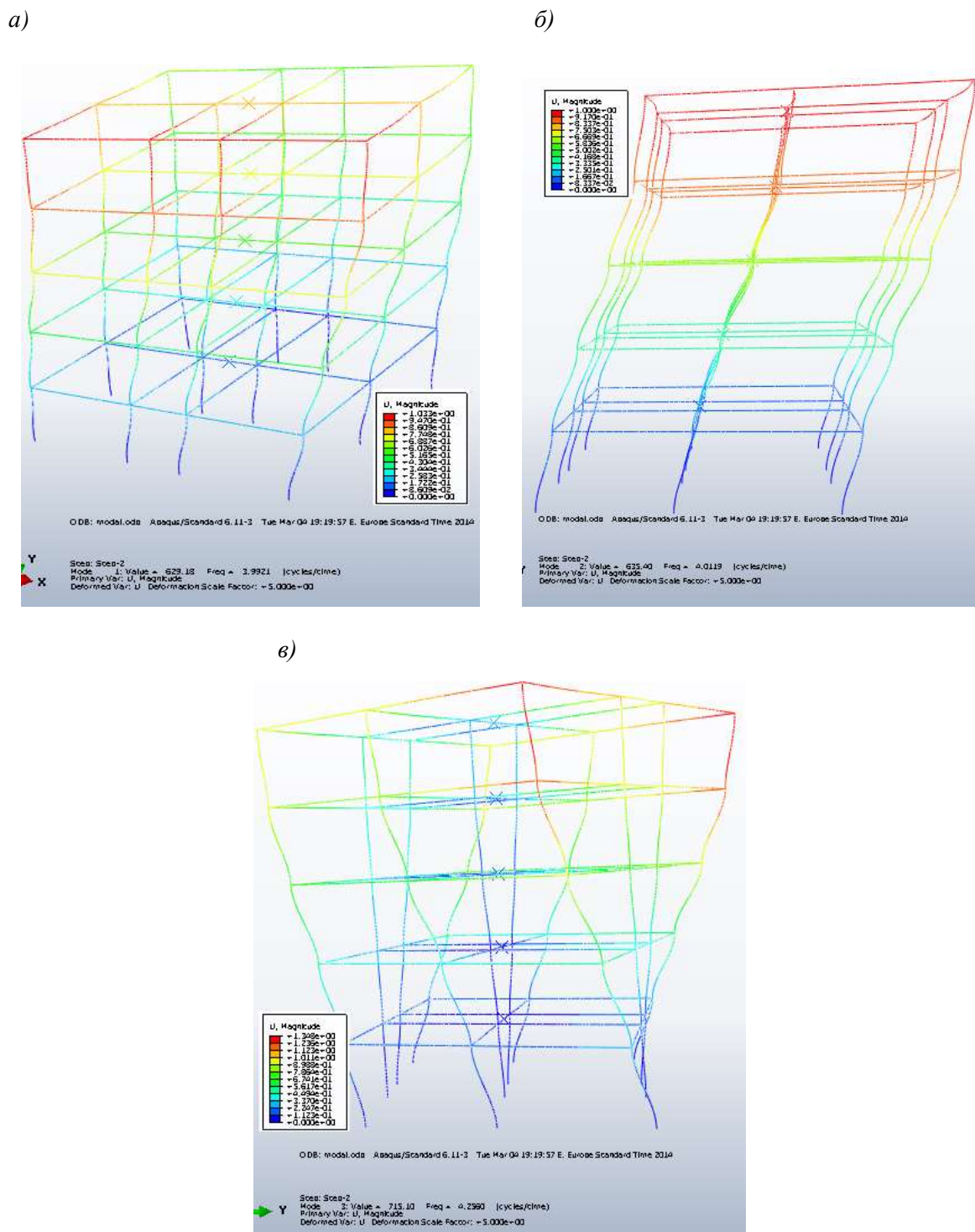


Рис. 3. Первые три формы колебаний здания: а – 1-я; б – 2-я; в – 3-я форма

Анализ влияния основания и сооружение на период здания заключался в сравнении периодов свободных колебаний первых 12 форм моделей 5-ти этажных зданий, рассчитанных с учетом основания -  $T_{(i)}$  и без

учёта основания -  $T$ , и в определении соотношения периодов свободных колебаний  $T_{(i)}/T$ , где  $i$  – тип грунтов в соответствии с табл. 1 (табл. 4, рис. 4).

Таблица 4

Значения периодов форм колебаний моделей 5-ти этажных зданий, рассчитанных с учетом основания  $T_{(i)}'$  и без учёта основания  $T$ , и соотношение периодов  $T_{(i)}'/T$  для двухслойного грунта

№	$T$ , с	$T_{(I)}'$ , с	$T_{(II)}'$ , с	$T_{(III)}'$ , с	$T_{(IV)}'$ , с	$T_{(I)}'/T$	$T_{(II)}'/T$	$T_{(III)}'/T$	$T_{(IV)}'/T$
1	1.420	1.433	1.474	1.709	2.010	1.00907	1.0379	1.20358	1.41156
2	1.260	1.271	1.3077	1.5665	1.778	1.01017	1.03767	1.19811	1.51851
3	1.092	1.103	1.1331	1.3083	1.6582	1.00536	1.0439	1.20031	1.63484
4	0.428	0.430	0.446	0.5152	0.749	1.00552	1.04299	1.20388	1.75209
5	0.410	0.413	0.428	0.554	1.007	1.00676	1.04479	1.35203	2.4572
6	0.358	0.360	0.376	0.598	1.133	1.0061	1.05199	1.6712	3.16508
7	0.210	0.211	0.221	0.351	0.664	1.0061	1.05199	1.6712	3.16508
8	0.209	0.210	0.223	0.423	0.802	1.00665	1.06616	2.02553	3.83633
9	0.188	0.189	0.205	0.425	0.804	1.00664	1.0917	2.26201	4.27759
10	0.171	0.172	0.194	0.413	0.781	1.00697	1.13271	2.41715	4.56812
11	0.166	0.167	0.201	0.433	0.818	1.00743	1.21405	2.60993	4.93006
12	0.135	0.136	0.179	0.386	0.729	1.00786	1.32682	2.85801	5.39658

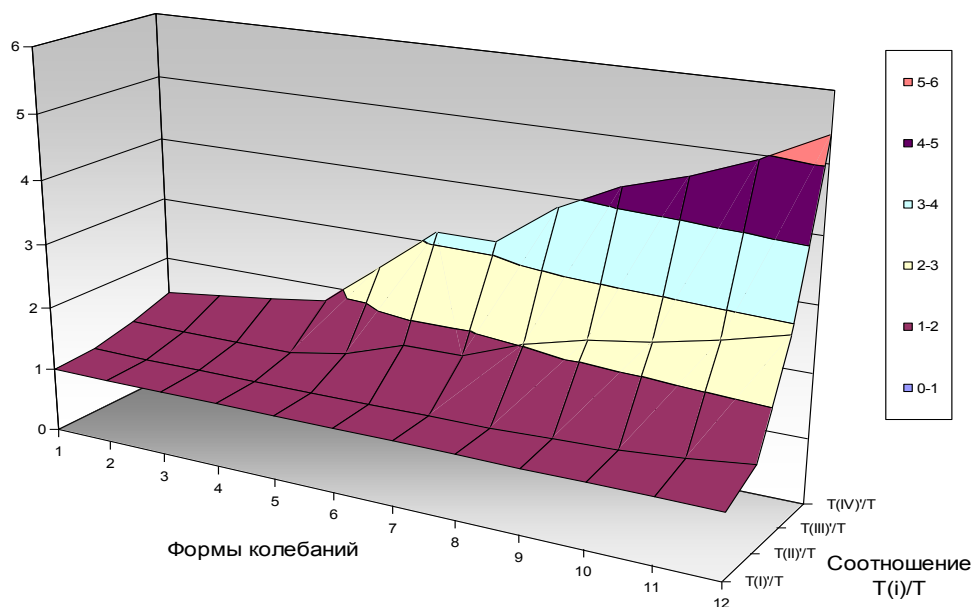


Рис. 4. Изменение соотношения  $T_{(i)}'/T$  по первым 12 формам колебаний

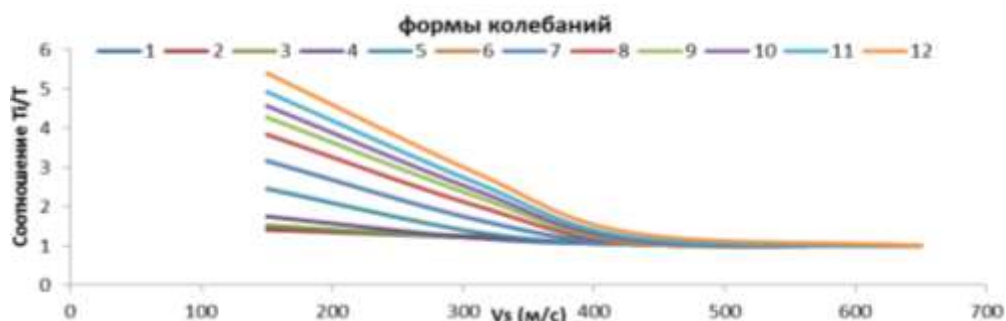


Рис. 5. Зависимость безразмерных соотношений периодов колебаний  $T_{(i)}'/T$  от скорости поперечной волны  $V_S$  для различных видов грунтов

### **Выводы из исследования и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении:**

1. При учете грунтового основания в единой расчетной схеме «основание – фундамент – сооружение», увеличивается период свободных колебаний здания.
2. Чем более слабыми являются грунты основания, тем больше период колебаний здания.
3. Чем меньшей скоростью прохождения поперечных волн обладают грунты основания, тем больше соотношение периодов  $T_{(i)'} / T$ .
4. Совместный учет системы «основание – фундамент – сооружение» становится более заметным для высших форм колебаний.

### *Список использованных источников*

1. Ghanad, M. A. Effect of Soil-Structure Interaction on Design of Buildings in terms of Earthquake [Текст] / M.A. Ghanad // Journal of earthquakes. – 2000. - №8 – С. 14-20.
2. Bargi, Kh. Fundamentals of Earthquake Engineering [Текст] / Kh. Bargi // Institute of Tehran University Publications, Third Edition. - 2000.
3. Kramer, Steven. L. Geotechnical earthquake engineering [Текст] / Steven. L. Kramer // Prentice Hall. – 1996. – 653 с.
4. Wolf, John.P. Spring-Dashpot-Mass Models for Foundation Vibrations [Текст] / John.P. Wolf // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. – 1997. - Vol. 26. - С. 931-949.
5. Немчинов, Ю.И. Сейсмостойкость зданий и сооружений [Текст] / Ю.И. Немчинов. – К.: Киев, 2008. – 480 с.
6. Iranian buildings codes and standards. Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings. Standard No. 2800, 3<sup>rd</sup> Edition // Building and Housing Research Center. – 2003. - 83 с.
7. Building Seismic Safety Council (BSSC) [Текст] / “NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings”. – 1994. – 233 с.
8. Soil Mechanics Laboratory [Текст] // Geotechnical reports. Ministry of Roads and Urban Development, Iran. – 2009. – 30 с.
9. Braja, M. Das. Principles of Soil Dynamics, Second Edition [Текст] / M. Das Braja, G.V. Ramana. – 2011. - printed in U.S.A. - 563 с.
10. Whitman, R.V., Design procedures for dynamically loaded foundations [Текст] / R.V. Whitman, F.E. Richart // ASCE Journal of Soil Mechanics. – 1967. – С. 169-192.
11. Горбунов-Посадов, М.И. Расчет конструкций на упругом основании [Текст] / М.И. Горбунов-Посадов, Т.А. Маликова, В.И. Соломин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 679 с.

Рецензент д-р техн. наук, профессор В.В. Фурсов

---

Кічаєва Оксана Володимирівна, канд. техн. наук, доцент кафедри геотехніки і підземних споруд Харківського національного університету будівництва і архітектури. Тел.: (057) 706-18-99.

E-mail: o\_kichaeva@mail.ru.

Раджабзадег Могсен, аспірант геотехніки і підземних споруд Харківського національного університету будівництва і архітектури. Тел.: (057) 706-18-99; E-mail: mohsen5435@yahoo.com.

Kichaeva Oksana V, cand. of techn. sciences, associate professor Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. Tel. (057) 706-18-99; E-mail: o\_kichaeva@mail.ru.

Rajabzadeh Mohsen, postgraduate student, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. Tel. (057) 706-18-99; E-mail: mohsen5435@yahoo.com.