

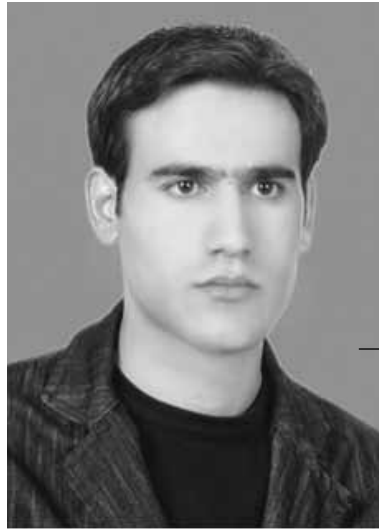
**КИЧАЕВА ОКСАНА ВЛАДИМИРОВНА**

Кандидат технических наук, доцент кафедры геотехники и подземных сооружений Харьковского национального университета строительства и архитектуры.

Основные направления научной деятельности: исследование взаимодействия системы «основание – фундамент – сооружение» в сложных инженерно-геологических условиях; численное моделирование системы ОФС при статических и динамических воздействиях; оценка рисков при реконструкции сооружений; реконструкция и эксплуатация зданий в сложных инженерно-геотехнических условиях; техническая диагностика строительных конструкций и зданий.

Автор более 50 научных работ.

E-mail: o\_kichaeva@mail.ru

**РАДЖАБЗАДЕГ МОГСЕН**

Магистр, аспирант кафедры геотехники и подземных сооружений Харьковского национального университета строительства и архитектуры.

Основные направления научной деятельности: исследование взаимодействия системы «основание – фундамент – сооружение» в сейсмических районах; численное моделирование системы «основание – фундамент – сооружение» при статических и динамических воздействиях.

Автор 6 научных работ.

E-mail: mohsen5435@yahoo.com

УДК 624.131.5: 624.07

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ «ОСНОВАНИЕ – ФУНДАМЕНТ – СООРУЖЕНИЕ» ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

*Ключевые слова: экспериментальные исследования, система «основание – фундамент – сооружение», напряженно-деформированное состояние, сейсмическое воздействие.*

*У статті аналізуються динамічні випробування моделей будівель і розглядаються найбільш важливі аспекти роботи як конструкцій, так і ґрунтової основи при різноманітних видах ґрунтів.*

*В статье анализируются динамические испытания масштабных моделей зданий и рассматриваются наиболее важные аспекты работы как конструкций, так и ґрунтового основания при различных видах ґрунтов.*

*This paper analyzes the dynamic testing of building scale models and are examined the most important aspects of both structures and subgrade at different types of soils.*

**ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ.**

Сейсмические колебания, воздействующие на конструкции здания, являются функцией нескольких параметров, таких как: воздействие очага землетрясения, направление волны, взаимодействия ґрунтового основания со зданием, ґрунтовых условий площадки и др. Воздействие очага землетрясения представлено магнитудой землетрясения, местом его расположения и механизмом разломов земной коры. Конечным результатом воздействия этих параметров является запись сейсмического движения свободной поверхности ґрунта. Механизм взаимодействия ґрунта со зданием обусловлен податливостью ґрунта под фундаментом и движением фундамента здания относительно свободной поверхности.

Учет указанных эффектов определяет величину инерционных сил и значения реальных перемещений системы «основание – фундамент – сооружение» при действии сейсмических движений свободной поверхности ґрунта. Вопросы взаимодействия основания и сооружения в случае наличия нескольких близких расположенных зданий (сооружений) осложняет вопросы взаимодействия

системы «основание – фундамент – сооружение».

**АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ.**

В последние годы были проведены многочисленные исследования для определения сдвигов свободной поверхности грунта при сейсмических воздействиях. Результатом этого исследования явились нормативные документы, такие как NENRP и UBC [1, 2]. За последние три десятилетия также проводились широкие исследования с целью определения напряженно-деформированного состояния системы «основание – фундамент – сооружение» [3, 4], и предложены упрощенные зависимости для учета взаимодействия системы (например, ATC [3]).

**НЕРЕШЕННЫЕ ЧАСТИ ОБЩЕЙ ПРОБЛЕМЫ.**

Тем не менее, вышеуказанные предложения еще не были проверены экспериментально. Большая часть исследований в этой области посвящена моделированию с помощью аналитических и численных методов (методами конечных и граничных элементов). В данных исследованиях участвуют: собственно система «основание – фундамент – сооружение», фактор расстояния между зданиями, свойства грунтового основания, сейсмические воздействия и т.д. Однако, роль и значение указанных параметров для практического применения прояснены не окончательно [5 - 7]. Но по результатам экспериментальных исследований, возможно получить достаточно близкие к реальной картине данные сейсмических уязвимостей конструкций [8].

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.**

Целью данной статьи является анализ результатов экспериментальных исследований работы и напряженно-деформированного состояния системы «основание – фундамент – сооружение», полученных путем испытаний масштабных моделей при динамических воздействиях.

**ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА.**

Экспериментальные испытания выполнены в Тегеранском научно-исследовательском институте сейсмологии (Иран) согласно Национального исследовательского плана №31303269, а также в рамках выполнения диссертационной работы аспиранта Раджабаздега М.

Для экспериментальных исследований взаимодействия системы «основание – фундамент – сооружение» выполнены четыре конструктивные модели высотой 5, 10, 15, 20 этажей, имитирующие здания. При построении моделей была использована теория подобия, коэффициент масштабирования равен 1/100.

Конструктивные модели зданий были созданы в виде металлического каркаса на резьбовых соединениях; стальные листы на уровне пола формировали собственный вес конструкций. Высота этажа 3 см, вес этажа - 0,4 кг, размер фундамента 20 x 20 см (рис. 1, 2).

Для экспериментальных исследований грунтовых моделей был принят спектр ускорения грунта землетрясения, произошедшего в провинции Ирана Табас в 1978 г., нормированный на пиковое значение  $I_g$ .

В процессе подготовки экспериментов был изготовлен цилиндрический контейнер диаметром 120 см и высотой 70 см с гибкой стенкой (рис. 3), в который поочередно помещались образцы грунтов различного типа.

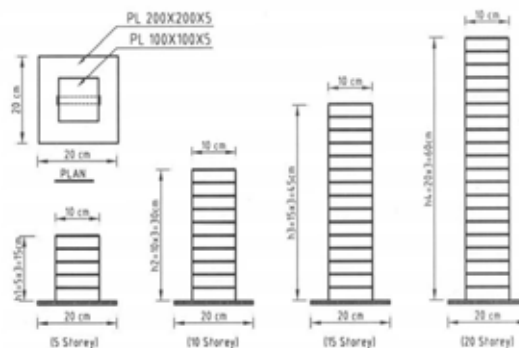


Рис. 1. Схемы 5, 10, 15, 20-этажных моделей зданий.



Рис. 2. Внешний вид 5, 10, 15, 20-этажных моделей зданий.



Рис. 3. Вид экспериментальной установки.

Таблица 1. Характеристики экспериментальных образцов грунтов

Категория грунта по нормам 2800	Описание грунтов	$V_s$ , (м/с)	$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	Ускорение грунта, g	Сдвиговая жесткость грунта $G$ , Н/м <sup>2</sup>
I	Скальные грунты	650	20	0,30	$845 \times 10^6$
II	Скальные грунты выветрелые и сильновыветрелые	430	20	0,35	$669,8 \times 10^6$
III	Пески гравелистые, крупные и средней крупности плотные	310	20	0,40	$192,2 \times 10^6$
IV	Глинистые грунты	150	20	0,40	$45 \times 10^6$



Рис. 4. Реализация экспериментального исследования модели 5-этажного здания на грунте.



Рис. 5. Реализация эксперимента при исследовании взаимодействия двух моделей зданий.

Стенки контейнера выполнены в виде мягкой резиновой мембраны, обеспечивающей сдвиговые деформации грунта. Стальные змеевидные накладки вокруг податливой стены обеспечивали ограничение бокового давления, нижняя пластина представляла собой модель скального основания. Характеристики грунтов представлены в табл. 1.

Для воспроизведения динамических воздействий использовался вибрационный стол, на который устанавливался цилиндрический контейнер; стол имеет размеры 1,2 x 1,45 м, максимальная мощность гидравлической системы составляет 50 кН. Гидравлическая система может воспроизводить различные сочетания колебательных движений, в том числе те, которые возникают и при реальных землетрясениях.

Программа проведения экспериментов состояла из трех этапов:

- 1 этап – испытания моделей 5, 10, 15, 20-этажных зданий с жестким основанием (рис. 4);
- 2 этап – определение отклика поверхности грунта без моделей;
- 3 этап – исследование взаимодействия 5-ти этажного здания и прилегающих сооружений с разными высотами при сейсмическом воздействии (рис. 5).

Экспериментальное исследование влияния прилегающих сооружений производилось парами: 5-этажное и 5-этажное; 5-этажное и 10-этажное; 5-этажное и 15-этажное; 5-этажное и 20-этажное. Соотношение расстояний между центрами фундаментов двух зданий и размерами фундаментов принято  $d/a = 1$ ,  $d/a = 2$ ,  $d/a = 3$ ,  $d/a = 4$ , где  $d$  – расстояние между центрами фундаментов двух зданий;  $a$  – размер фундамента 5-ти этажного здания.

Первичная обработка данных содержала отбор эффективного времени землетрясений, коррекцию и фильтрацию шумов.

Средние скорости поперечных волн в моделях грунтов при колебаниях малой амплитуды выбраны таким образом:  $V_s = 65 \text{ м/с}^2$ ,  $V_s = 43 \text{ м/с}^2$ ,

$V_s = 31 \text{ м/с}^2$ ,  $V_s = 15 \text{ м/с}^2$ , что является масштабными значениями реальных скоростей поперечных волн грунтов, равных  $V_s=650\text{м/с}^2$ ,  $V_s=430\text{м/с}^2$ ,  $V_s = 310 \text{ м/с}^2$ ,  $V_s = 150 \text{ м/с}^2$  в соответствии с формулой Kiku [9]:

$$V_s = 68,3N^{0,292}, \quad (1)$$

где  $N$  – число S.P.T (Standard Penetration Test) – результаты зондирования грунта.

Указанные характеристики грунтов соответствуют нормам Ирана [10]. Динамические характеристики этих моделей (частота и затухание) при незначительном диапазоне вибраций, представлены в табл. 2, из которой видно, что эти характеристики находятся в хорошем согласии с частотами, которые получены из следующего аналитического соотношения:

$$f_n = \frac{(2n - 1)V_s}{4H_s}, \quad (2)$$

где

- $f_n$  – частота;
- $V_s$  – скорость поперечных волн;
- $H_s$  – толщина слоя грунта;
- $n$  – форма колебаний.

Уравнение (2) получено Эдрисом и Сидом в предположении, что грунт однородный, однослойный и располагается горизонтально на жестком подстилающем слое [11].

Подробнее рассмотрим результаты опыта №3. Расчетный спектр отклика грунта при землетрясении

Таблица 2. Сравнение аналитических и экспериментальных динамических характеристик образцов грунта

Этап эксперимента	Виды грунта (нормы 2800)	$V_s$ , м/с	Форма колебаний	Частота экспериментальная	Частота по расчету	Затухание грунта (%)
Опыт №1	I	65,0	Первая	25,0	24,95	4,0
			Вторая	79,0	83,62	4,7
Опыт №2	II	43,0	Первая	18,0	17,91	3,9
			Вторая	50,0	53,75	4,8
Опыт №3	III	31,0	Первая	13,0	12,91	3,8
			Вторая	35,0	38,75	4,5
Опыт №4	IV	15,0	Первая	9,0	8,70	3,7
			Вторая	27,0	28,1	4,3

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ. БУДІВЕЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТІВ

Табас определялся с различными значениями пикового ускорения грунта (ПУГ = 0,03g, ПУГ = 0,11g, ПУГ = 0,30g) (рис. 6). Как видно на рис. 8, при слабых землетрясениях с интенсивностью 5 баллов и менее (ПУГ ≤ 0,03g), амплитуда горизонтальных колебаний равна ≈ 10, при умеренном землетрясении с интенсивностью 5 - 7 баллов (0,03g ≤ ПУГ ≤ 0,11g) – примерно равна 6, и при сильном землетрясении с интенсивностью 7 баллов и выше (ПУГ = 0,30g) – равна ≈ 4. Следует отметить, что амплитуда колебаний поверхности грунта при землетрясении интенсивностью 0,03g в 2 раза больше, чем при землетрясении интенсивностью 0,3g, и в 1,7 раза больше, чем при землетрясении интенсивностью 0,11g (при максимальных значениях) (рис. 7).

Результаты экспериментов также показывают, что главная частота колебания модели грунта при умеренных и сильных землетрясениях уменьшается соответственно на 7% и 10% в силу нелинейного поведения грунта.

В табл. 3 отображены результаты лабораторных экспериментов, а также динамические параметры моделей (частота и затухание) в диапазоне колебаний низкой амплитуды при ПУГ ≤ 0,03g и высокой амплитуды колебаний при ПУГ ≈ 0,11g. Полученные данные описывают эффекты взаимодействия системы «основание-фундамент-сооружение» по сравнению с моделями без учета основания. Видно, что имеет место снижение частоты первой формы колебаний для 5-этажного здания, равное 1,5%. Эти эффекты более значительны в

дальнейших формах. Кроме того, экспериментальные результаты показывают, что при взаимодействии всей системы ОФС, затухание увеличивается приблизительно на 30% для того же здания.

На рис. 8 отображены амплитуда и частоты колебаний при землетрясении Табас (ПУГ = 0,11g) для верха, низа 5, 10, 15 и 20-этажных моделей зданий и на поверхности грунта, на рис. 9 – частотный спектр передаточной функции Фурье тех же параметров.

Ниже, в табл. 4 и на рис. 10 - 11, приведено сравнение результатов экспериментальных и аналитических исследований соотношений безразмерных периодов для зданий различной этажности и различных видов грунтов. В данном соотношении - периоды зданий, рассчитанных с учетом основания и T - без учета основания, i – тип грунтов в соответствии с табл. 2.

Исследования показывают, что результаты экспериментальных и аналитических исследований имеют хорошую сходимость, при этом наибольшее различие связано с ответом высших мод колеба-

Таблица 1. Частота (Гц) и затухание (%) моделей без учета и с учетом основания

Модель	Фазы	Формы колебаний	С учетом основания				Без учета основания			
			Низкая амплитуда		Высокая амплитуда		низкая амплитуда		Высокая амплитуда	
			частота	затухание	частота	затухание	частота	затухание	частота	затухание
5-ти этажное, H/B = 1	Опыт №1	1	12.26	0.34	12.25	0.35	12.30	0.33	12.10	0.33
		2	14.46		15.44		15.50		15.30	
	Опыт №2	1	12.25		12.23		12.30		12.10	
		2	15.44		15.42		15.50		15.30	
	Опыт №3	1	12.10		12.08		12.30		12.10	
		2	15.25		15.23		15.50		15.30	
	Опыт №4	1	11.62		11.58		12.30		12.10	
		2	14.65		14.63		15.50		15.30	
10-ти этажное, H/B = 2	Опыт №1	1	8.03	0.70	7.52	3.50	8.20	0.66	7.60	3.40
		2	25.30		20.83		25.50		21.0	
	Опыт №2	1	8.01		7.50		8.20		7.60	
		2	25.24		20.78		25.50		21.0	
	Опыт №3	1	7.91		7.40		8.20		7.60	
		2	24.90		20.50		25.50		21.0	
	Опыт №4	1	7.55		7.06		8.20		7.60	
		2	23.78		19.58		25.50		21.0	
15-ти этажное, H/B=3	Опыт №1	1	5.46	0.80	5.30	2.00	5.35	0.45	5.20	1.17
		2	20.41		20.19		19.40		19.20	
	Опыт №2	1	5.28		5.13		5.35		5.20	
		2	19.72		19.51		19.40		19.20	
	Опыт №3	1	5.14		5.00		5.35		5.20	
		2	19.20		19.00		19.40		19.20	
	Опыт №4	1	4.71		4.58		5.35		5.20	
		2	17.59		17.41		19.40		19.20	
20-ти этажное, H/B=4	Опыт №1	1	3.69	1.20	3.64	2.10	3.75	0.60	3.70	1.30
		2	13.09		13.03		12.60		12.60	
	Опыт №2	1	3.63		3.58		3.75		3.70	
		2	12.88		12.81		12.60		12.60	
	Опыт №3	1	3.55		3.50		3.75		3.70	
		2	12.60		12.60		12.60		12.60	
	Опыт №4	1	3.22		3.17		3.75		3.70	
		2	11.44		11.44		12.60		12.60	

Смотри рисунки 6-11 на стр. 3 обложки.

Таблиця 4. Сравнение экспериментальных и аналитических результатов

Модель			Соотношение безразмерных периодов $\bar{T}_i / T$ при результатах							
			экспериментальных				аналитических			
			$T_{(v)'} / T$	$T_{(u)'} / T$	$T_{(m)'} / T$	$T_{(w)'} / T$	$T_{(v)'} / T$	$T_{(u)'} / T$	$T_{(m)'} / T$	$T_{(w)'} / T$
Н/В=1	5-ти эт.	Низкая амплитуда	1.003	1.004	1.016	1.058	1.002	1.002	1.014	1.056
		Высокая амплитуда	0.987	0.989	1.001	1.044				
Н/В=2	10-ти эт.	Низкая амплитуда	1.011	1.013	1.036	1.086	1.001	1.003	1.017	1.065
		Высокая амплитуда	1.009	1.013	1.027	1.076				
Н/В=3	15-ти эт.	Низкая амплитуда	0.999	1.013	1.040	1.135	1.002	1.007	1.035	1.128
		Высокая амплитуда	0.991	1.013	1.040	1.135				
Н/В=4	20-ти эт.	Низкая амплитуда	1.016	1.033	1.056	1.164	1	1.011	1.039	1.144
		Высокая амплитуда	1.016	1.033	1.057	1.167				

ний. Незначительные различия в экспериментальных и аналитических результатах относятся к допущениям лабораторных исследований и численного моделирования.

**ВИВОДИ:**

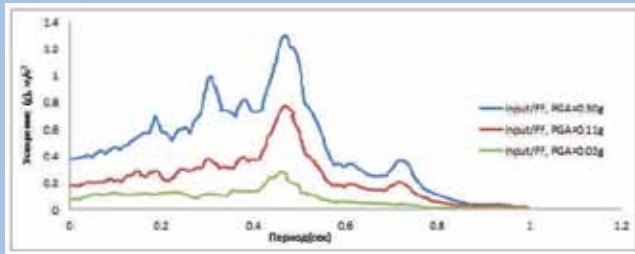
1. Выполнены экспериментальные исследования взаимодействия системы «основание – фундамент – сооружение» на масштабных моделях.
2. По результатам экспериментов получены расчетные спектры отклика грунта с различными значениями ускорений (0,03g, 0,11g, 0,30g), а также амплитудный спектр реакции для всех видов грунтов.

3. Получены динамические параметры – частота и затухание – для моделей 5-ти, 10-ти, 15-ти, 20-этажных зданий с учетом и без учета основания при низкой и высокой амплитуде колебаний.
4. Проведено сравнение результатов экспериментальных и аналитических исследований соотношений безразмерных периодов для зданий различной этажности и различных видов грунтов. Результаты экспериментов и численного моделирования имеют хорошую сходимость.
5. Определена зависимость соотношений от скорости поперечной волны для различных видов грунтов при основной форме колебаний.

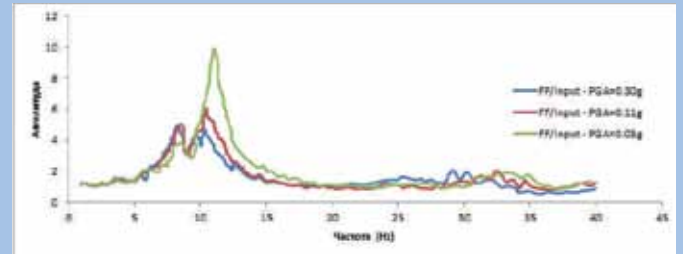
**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Building Seismic Safety Council (BSSC), "NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings, part 1. Provisions and part 2. Commentary", Rep. No. FEMA 222A. 1995.
2. Uniform Building Code (UBC), "International Conference of Building Officials", 1997.
3. Applied Technology Council (ATC), "Tentative provisions for the development of seismic regulations", Rep. No ATC 3-06, 1978.
4. J.P. Stewart, G.L. Fenves, R.B. Seed, "Seismic Soil – Structure Interaction in buildings, I: Analytical Methods and II: Empirical findings", J. of Geotech. Engng., ASCE, 125 (1), 1999.
5. J. Lysmer, T. Ukada, C.F. Tsai, H.B. Seed "FLUSH, A Computer program for Approximate 3-D Analysis of Soil –Structure Interaction problems", EERC 75-30, 1975.
6. P.J. Meymand, "Shaking table scale model tests of nonlinear Soil-Pile-Superstructure Interaction in soft clay", Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering of California, Berkeley, 1998.
7. T.Yano, Y. Kitada, M.Iguchi, T.Hirofani, K.Yashida, "Model test on dynamic cross interaction of adjacent buildings innuclear power plants", 12WCEE. 2000.
8. F. Nateghi and Ali Hossein-Zadeh, "A method for assessing the seismic vulnerability of reinforced concrete buildings with shear walls", Subcommittee - Special hazards caused by earthquakes and landslides layers of the Earth, 1978.
9. Hafezi. N, Azzi. A., " Study the empirical relationship between shear wave velocity and the standard penetration in terms of Mashhad city", 25 th Symposium of Geosciences, GEOLOGICAL SURVEY OF IRAN, February, 2007.
10. Iranian buildings codes and standards. Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings. Standard No. 2800, 3rd Edition / Building and Housing Reseach Center. - 83 p.
11. B.M. Das, "Principles of Soil Dynamics", PWS-KENT, 1993.

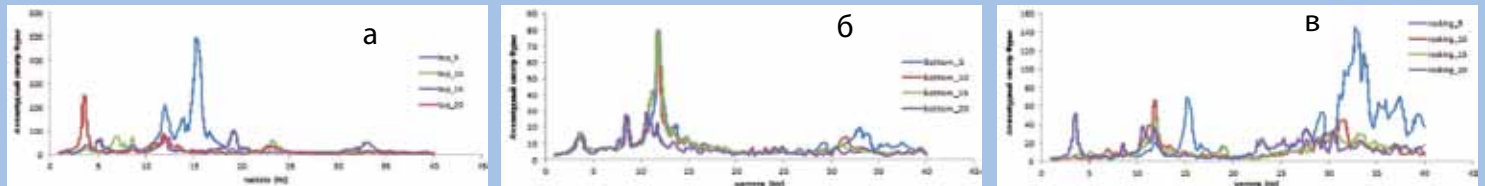
**РИСУНКИ К СТАТЬЕ КИЧАЕВОЙ О.В., РАДЖАБЗАДЕГА М.  
«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ «ОСНОВАНИЕ – ФУНДАМЕНТ – СООРУЖЕНИЕ»  
ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ»**



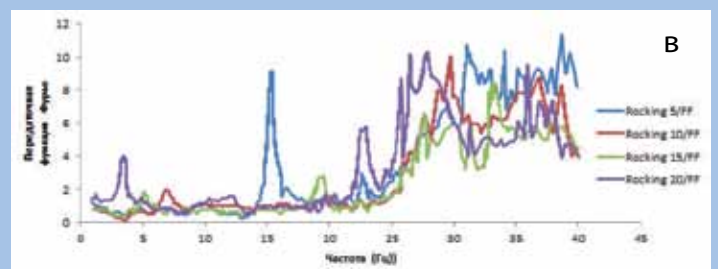
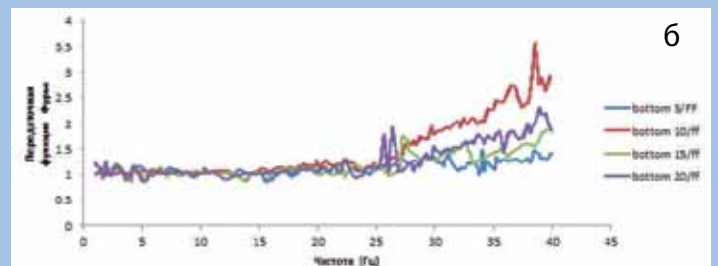
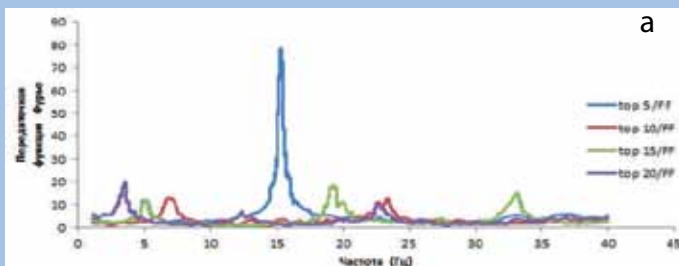
**Рис. 6.** Расчетный спектр отклика грунта при различных уровнях ускорения (при 5% затухании).



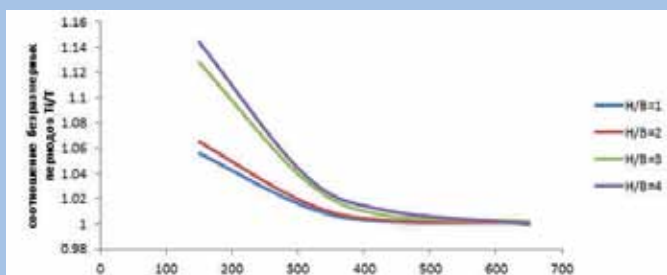
**Рис. 7.** Амплитудный спектр реакции грунта при различных уровнях ускорения (при 5% затухании).



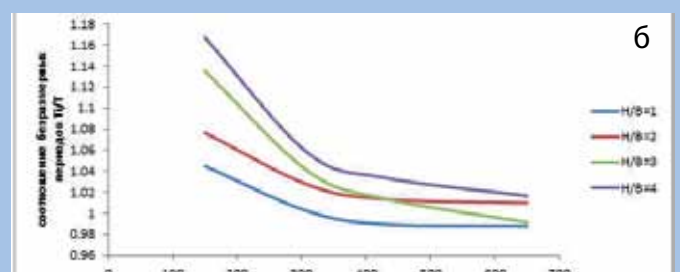
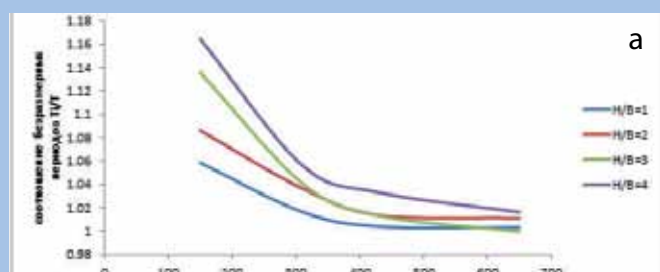
**Рис. 8.** Амплитуды и преобладающие частотные характеристики колебаний моделей здания при землетрясении Табас (ПУГ = 0,11g) для: а) верха; б) низа 5, 10, 15 и 20-этажных моделей зданий; в) на поверхности грунта.



**Рис. 9.** Частотный спектр колебаний моделей здания при землетрясении Табас (ПУГ = 0,11g) для: а) верха; б) низа 5, 10, 15 и 20-этажных моделей зданий; в) на поверхности грунта.



**Рис. 10.** Аналитические результаты, описывающие зависимость безразмерных соотношений периодов колебаний  $T(i)/T$  от скорости поперечной волны  $V_s$  для различных видов грунтов при основной форме колебаний.



**Рис. 11.** Экспериментальные результаты, описывающие зависимость безразмерных соотношений периодов колебаний  $T(i)/T$  от скорости поперечной волны  $V_s$  для различных видов грунтов при основной форме колебаний: а) низкая амплитуда; б) высокая амплитуда.