

П. М. ХАЧАТРЯН, Р. О. АМАСЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИЙ НА МОДЕЛЯХ ИЗ НИЗКОМОДУЛЬНОГО ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА

1. Известно, что жесткие и особенно маломасштабные модели строительных конструкций и грунтов не могут сравнительно полностью воспроизводить те колебательные или сейсмические процессы, которые происходят в натурных сооружениях при сейсмических воздействиях и дают большие разбросы характерных величин.

Целью настоящего исследования были изыскания низкомодульных (с условным модулем упругости $1-200 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$) полимерных материалов для моделирования железобетонных конструкций и грунта.

Были исследованы 34 различных состава саженнаполненных резин и семь составов вальцмасс. Строительную конструкцию моделировали резиной, а грунт—вальцмассой.

2. Для подбора модельных материалов и моделирования сооружений в работе использованы концепции теории расширенного подобия твердых деформируемых тел [11].

На основе этой теории, при равенстве ускорений модели и оригинала требование к механическим свойствам модельных материалов сводится к выполнению следующих соотношений для модулей упругости $E' = \beta \cdot \gamma^{-1} E$ (1), а для коэффициента Пуассона $\mu' = \mu$ (2), для плотностей $\rho' = \delta \cdot \rho$ (3), откуда и $\beta = \alpha \cdot \delta$ (4).

Периоды T и T' свободных колебаний относятся как множители подобия времени ξ , т. е. $T' = \xi \cdot T$ (5).

Где α , β , γ , δ и ξ являются множителями подобия, соответствующие, длины, деформации, напряжений, плотности и времени.

Скорости распространения волновых возмущений V и V' в телах A и A' связаны соотношением:

$$V' = \alpha \cdot \xi^{-1} \cdot V, \quad (6)$$

Декременты свободных колебаний подобных тел должны быть равны. Моменты инерции: $J' = \alpha^4 \cdot J$, моменты сил $M' = \alpha^4 \cdot \delta \cdot M$. Сосредоточенные силы: $S' = \alpha^3 \cdot \delta \cdot S$ (7).

3. Для моделирования строительных конструкций и грунтовых напластований с заданными характеристиками механических свойств материалов и заданным изменением геометрического масштаба по уравнениям теории расширенного подобия, приведенным выше, можно вычислять все величины, которыми должны характеризоваться механические свойства материалов моделей.

Механические характеристики строительных железобетонных конструкций детально рассматриваются отдельно для каждой конструкции.

В основном железобетонные конструкции осуществляются из бетонов марки 200—300 при модулях упругости порядка $(2,65 - (3,5) \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2)$ при коэффициентах Пуассона 0,2—0,3, логарифмических деформациях 0,3—0,4 и объемной массе порядка $2,5 \text{ г/см}^3$ [16, 17].

Механические свойства горных пород меняются в пределах: модуль упругости $(10^3 - 10^5) \text{ кг/см}^2$, коэффициент Пуассона 0,2—0,3, плотность $1(1-3) \text{ г/см}^3$ [1, 3, 6].

Поскольку в лабораторных условиях размеры модели могут быть порядка десятков сантиметров, то множитель геометрического подобия δ должен иметь значение порядка $10^{-2} - 10^{-4}$. При применении низкокомодульных материалов при больших значениях множителя подобия относительной деформации γ удается обеспечить условия подобия, то есть сравнительно точно воспроизводить те колебательные или сейсмические процессы, которые происходят в натуральных конструкциях и грунтах [14].

Так как объемный вес низкокомодульных полимерных материалов [7] составляет порядка $(1,0 - 1,5) \text{ г/см}^3$, то множитель подобия плотности δ может меняться в пределах 0,5—1,0. Значения множителя подобия γ могут достигать $10^2 - 10^4$ [13].

Имея в виду вышеприведенные значения модулей упругости E и коэффициента Пуассона, при перечисленных значениях α , γ и δ из соотношений теории расширенного подобия найдем, что при соблюдении равенства ускорений для модели и оригинала, т. е. при выполнении требования $\xi^2 = \alpha \cdot \gamma$ (8), модельный материал для строительной железобетонной конструкции должен обладать модулем упругости порядка $(5 - 200) \text{ кг/см}^2$; коэффициент Пуассона должен иметь значение $(0,20 - 0,30)$, а модельный материал для грунта должен иметь модуль упругости порядка $(0,1 - 10) \text{ кг/см}^2$ с коэффициентом Пуассона $(0,2 - 0,3)$.

Существующие модельные материалы, имеющие низкие модули упругости, обладают большим коэффициентом Пуассона, принимающим значения до 150%—200% значения 0,4—0,5; а при деформациях до 40%—50%—значение 0,3—0,4.

Этим они ограничивают возможность моделирования. В частности, следует ограничиваться рассмотрением задач при малых деформациях.

Расхождение в значениях коэффициентов Пуассона для материалов оригинала и модели может сильно повлиять на распределение напряжений в моделях. В некоторых частных случаях влиянием коэффициента Пуассона можно пренебречь без существенного ущерба для точности моделирования.

В связи с этим возникла проблема (при малых перемещениях моделируемых строительных конструкций и грунтов) употребления низкокомодульных полимерных материалов применительно к моделированию для целей изучения некоторых вопросов инженерной сейсмологии.

В основном для этой цели нами применялись резина и вальцмасса. Наши исследования показали, что для разных составов резин и вальцмасс физико-механические характеристики принимали в среднем следующие значения (табл. 1).

Как известно [8, 15], и по нашим данным, резина и вальцмасса при деформациях до 10÷15% имеют почти прямолинейную связь между напряжением и деформацией.

4. В качестве конкретного примера моделируем железобетонную дымовую трубу цилиндрического сечения на грунте средней прочности (щебень, пыль, пески). Дымовая труба сделана из железобетона марки

Таблица 1

Физико-механические характеристики резины и вальцмасс

Материал	Статический модуль упругости $E_{ст}$ (кг. см. ⁻²)	Объемный вес ρ (г. см. ⁻³)	Коэффициент Пуассона μ	Коэффициент поглощения энергии ψ	Логарифмический декремент Δ	Скорость прохождения продольной волны $V_{прод.}$ (м. сек. ⁻¹)
Резина	7÷200 и более	0,60÷1,45	0,20÷0,45	0,4÷0,28	0,2÷1,44	55÷630
Вальц-масса	3÷13	1,35÷1,37	0,33÷0,41	0,44÷1,16	0,6÷0,9	24÷34

Таблица 2

Физико-механические характеристики бетона марки 300 и грунта

Материал	Статический модуль упругости $E_{ст}$ (кг. см. ⁻²)	Объемный вес ρ (г. см. ⁻³)	Коэффициент Пуассона μ	Логарифмический декремент Δ	Скорость прохождения продольной волны $V_{прод.}$ (м. сек. ⁻¹)
Железобетон марки 300	$3,15 \cdot 10^5$	2,50	0,20÷0,30	0,300	3÷4,5 и более
Грунт средней прочности	$1,2 \cdot 10^5$	2,65	0,25÷0,30	—	1,5÷2,5 и более 4

300, для которого, как и для грунта средней прочности, характерны следующие физико-механические характеристики [2, 5, 19, 20], табл. 2.

По теории расширенного подобия при равенстве коэффициентов Пуассона модельного материала и материала оригинала должны быть подобными и их диаграммы деформации и напряжения. Тогда, сопоставляя индикаторные кривые ($\sigma-\varepsilon$) исследованных резин и вальцмасс с индикаторными кривыми железобетона марки «300» и индикаторными кривыми грунтов средней прочности [8, 9], заметим сходство нескольких образцов. Ниже приведены физико-механические характеристики некоторых таких образцов.

Таблица 3

Физико-механические характеристики некоторых модельных образцов

Материал	Статический модуль упругости $E_{ст.}$ (кг. см. ⁻²)	Объемный вес ρ (г. см. ⁻³)	Коэффициент Пуассона μ	Логарифмический декремент Δ	Скорость прохождения продольной волны $V_{прод.}$ (м. сек. ⁻¹)
Резина 6	18,0	1,314	0,280	0,350	85,4
Резина 34	29,0	1,278	0,360	0,304	83,1
Вальцмасса: Глицерин (В. Гл.) — 10,00	13÷10	1,360	0,360	0,600	33,4
	10÷8	1,265	0,380	0,640	32,3

Имея в виду вышеотмеченные пункты, перейдем к расчету модели туннута и модели трубы.

а) *Моделирование грунта.* Грунт под дымовой трубой моделируем вальцмассой «Крепкая».

Принимаем исходными данными скорости распространения продольных волн в оригинале и в модели. Тогда, имея данные табл. 2 и 3, и также формулы (1) — (8) при $V_{гр.} = 2,40$ км/сек, получаем:

Таблица 4

Исходные величины моделирования грунта вальцмассами

Материал	$\frac{\alpha}{\xi}$	$\frac{\beta}{\gamma} \cdot 10^5$	λ
В:Гл—1:0,00	0,01375	9,58	0,513
В:Гл—1:0,05	0,1318	8,33	0,477

С другой стороны, если для маломасштабных полимерных моделей множителю подобия геометрических размеров α дадим значения

$\frac{1}{90}, \frac{1}{100}, \frac{1}{110}, \frac{1}{120}, \frac{1}{130}, \frac{1}{140}, \frac{1}{150}, \frac{1}{160}$ и учтем формулы (4) и

(5), получим:

Таблица 5

Множители подобия моделирования грунта вальцмассами

α	В:Гл—1:0,00					В:Гл—1:0,05				
	λ	$\beta \cdot 10^3$	γ	ξ		λ	$\beta \cdot 10^3$	γ	ξ	
				по формуле (8)	по таблице (4)				по формуле (8)	по таблице 4
0,80	0,513	6,46	67,4	0,916	0,908	0,477	5,96	71,5	0,944	0,948
0,90		5,73	60,0	0,816	0,809		5,30	63,6	0,840	0,844
1,00		5,17	53,9	0,733	0,728		4,77	57,2	0,756	0,759
1,20		4,30	44,8	0,608	0,607		3,97	47,6	0,629	0,633
1,50		3,44	35,9	0,478	0,483		3,18	38,1	0,504	0,507
1,60		3,23	33,7	0,448	0,454		2,98	35,7	0,472	0,473

б) *Моделирование железобетонной трубы.* При моделировании железобетонной дымовой трубы учтем, что множители подобия для грунта и конструкции должны быть одинаковыми [11, 12].

Моделируем железобетонную дымовую трубу, принимая в качестве исходных данных множители подобия для вальцмассы, то есть В:ГЛ—1:0,00. Тогда, имея в виду табл. 2 и 5, также формулы (3), (4) и (5), для подбираемого модельного материала трубы получаем.

$$E' = \frac{\beta}{\gamma} \cdot E = 9,58 \cdot 10^{-5} \cdot 3,15 \cdot 10^5 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \approx 30 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \quad \text{и} \quad \rho' = \lambda \cdot \rho = 0,513 \cdot$$

$$2 \cdot 2,50 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} = 1,282 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

Сопоставляя полученные данные, то есть физико-механические характеристики модельного материала трубы, с табл. 2, заметим, что подбираемым модельным материалом для железобетона марки 300 с достаточной большой точностью (ошибка до 3,0%) является резина 34.

Легко убедиться, что для железобетона марки «300» и резины 34 сохраняется то же самое отношение скоростей прохождения продольных волн, что и для В:Гл—1:0,00 и грунта средней прочности.

Так, из табл. 2 принимаем для железобетона марки 300 $V_{\text{прод.}} = 6 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$, а из табл. 3 для резины 34 $V_{\text{прод.}} = 83,1 \text{ м/сек}$, тогда:

$$\frac{\pi}{\xi} = \frac{V'}{V} = \frac{83,1}{6000} = 0,01385,$$

которое почти совпадает с данными табл. 4.

Таким образом, кривые «деформация—напряжение» модельных материалов (резина 34 и В:Гл—1:0,00) с достаточной точностью (средняя ошибка до 10%) можно преобразовать в индикаторные кривые оригинала: железобетона марки 300 и грунта средней прочности. Графики показаны на рис. 1 и 2. Модель трубы изготовлена в масштабе 1:10 из резины 34 на Ереванском заводе РТИ (табл. 6 и 7).

Варка и изготовление вальцмасс для модели грунта осуществлены по методике, описанной в [4].

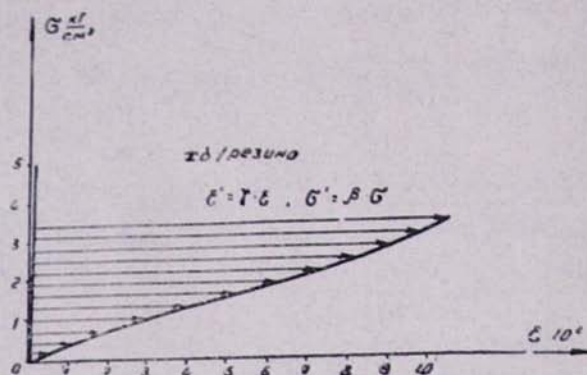


Рис. 1. Индикаторные кривые для подобных материалов—железобетона и резины

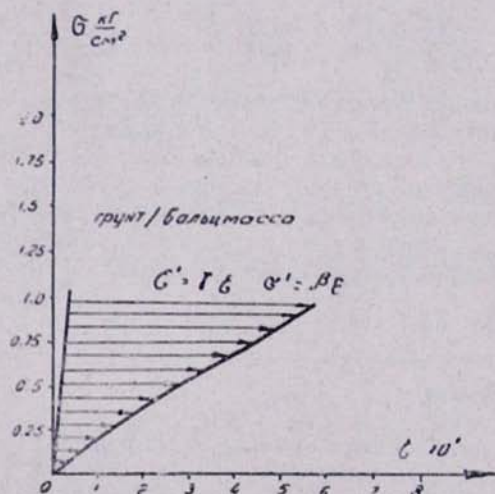


Рис. 2. Индикаторные кривые для подобных материалов—грунта средней прочности и вальцмассы

Данные натурной трубы и ее модели

Наименование величин	Натура		Модель	
	обозначения	численные значения	обозначения	при $\alpha = 1:100$
Высота трубы	H	50,00 м	H'	50,00 см
Внешний диаметр ствола	D	4,52 м	D'	4,52 см
Внутренний диаметр ствола:				
а) без футеровки;	d	4,12 м	d'	3,62 см
б) с футеровкой;	d_1	3,62 м	d'_1	
Толщина ствола трубы:				
а) без футеровки;	ΔR	0,20 м	$\Delta R'$	0,50 см
б) с футеровкой	Δr	0,45 м	$\Delta r'$	
Объем футеровки	$V_{\text{фут.}}$	132,70 м ³	$V'_{\text{фут.}}$	288 см ³
Объем ж/б ствола	$V_{\text{ств.}}$	135,65 м ³	$V'_{\text{ств.}}$	
Вес футеровки ствола	$G_{\text{фут.}}$	238,76 т	$G'_{\text{фут.}}$	300 г
Вес ж/б ствола	$G_{\text{ств.}}$	329,12 т	$G'_{\text{ств.}}$	
Давление ствола на основание:				
а) без футеровки;	$P_{\text{жбств.}}$	12,50 кг.с.м. ⁻²	$P'_{\text{жбств.}}$	63,8 г.с.м. ⁻²
б) с футеровкой;	$P_{\text{сфств.}}$	16,40 кг.с.м. ⁻²	$P'_{\text{сфств.}}$	
Истинное статическое давление грунта	$P_{\text{ист.}}$	1,163 кг.с.м. ⁻²	$P'_{\text{ист.}}$	3,37 г.с.м. ⁻²
Вес погонного метра ствола:				
а) без футеровки;	$q_{\text{жб.}}$	6,78 т.м. ⁻¹	$q'_{\text{жб.}}$	7,4 г.с.м. ⁻¹
б) с футеровкой;	$q_{\text{сф.}}$	11,50 т.м. ⁻¹	$q'_{\text{сф.}}$	
Высота фундамента	h	4,50 м	h'	4,50 см
Вес фундамента трубы	$G_{\text{фунд.}}$	736,88 т	$G'_{\text{фунд.}}$	370 г
Диаметр основания фундамента	D_1	12,00 м	D'_1	12,00 см
Периоды собственных колебаний трубы:				
I тон	T_1	1,09 сек	T'_1	0,68 сек
II тон	T_2	0,174 сек	T'_2	0,127 сек
III тон	T_3	0,062 сек	T'_3	0,045 сек

Модель основания в плане представляла собой квадрат размерами 0,60×1,60 м и высотой 48 см, который моделировал грунт глубиной больше 43 м. Модель трубы поставили в геометрическом центре плана основания модели. Измерения моделей осуществили датчиками ускорения СПЭД-56 и плоскими тензодатчиками смещения. На горизонтальной плоской поверхности модели грунта, вдоль межперпендикуляра к одной стороне квадрата, поставили 4 датчика СПЭД-56 и 6 датчиков смещения, а на трубе—2 датчика СПЭД-56 на нижнем конце трубы и четыре датчика смещения. Схема расположения датчиков приведена на рис. 3.

Модель испытывали на горизонтальный удар. Ударили в центре торца основания модели грунта, перпендикулярно к расположению датчиков. В центре этого же торца прикрепили деревянную доску, чтобы получить плоские бегущие волны по всему основанию.

5. Особенности динамических испытаний моделей заключались в выявлении поведения модельной трубы и модели грунта из низкомолекулярных полимерных материалов при разных сейсмических ударах.

Горизонтальными ударами в центре торца модели грунта, перпен-

Расчет дымовой трубы

Номер участка	Формы колебаний																	
	Наружный диаметр D , м	Толщина стенки ствола Δr , см	Длина участка x_j , м	Высота основания до центра тяжести, м	Относительная высота x_j/H	Вес участка Q_k , т	первая				вторая				третья			
							вычисленные ординаты X_{j5}	коэффициент формы колебаний γ_{j1}	сейсмическая сила S_{j1} , т	изгибающий момент M_{j1} , тм	X_{2j}	γ_{2j}	S_{2j} , т	M_{2j} , тм	X_{3j}	γ_{3j}	S_{3j} , т	M_{3j} , тм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Основание трубы				0	0	0	0	0	0	35,386	0	0	0	16,27	0	0	0	+7,217
1	4,52	4,0	5	2,5	0,05	57,8	0,087	0,0972	0,679	30,51	0,43	0,0628	3,135	8,11	9,98	0,1945	27,15	-4,115
2				7,5	0,15		0,11	0,1228	0,856	26,12	1,39	0,233	11,13	-0,600	25,76	0,524	73,20	-15,530
3				12,5	0,25		0,18	0,2080	1,454	21,507	2,54	0,381	19,05	-7,76	28,09	0,568	79,30	-17,009
4				17,5	0,35		0,26	0,2900	2,03	17,079	3,67	0,536	26,75	-13,00	16,90	0,330	46,10	-11,366
5				22,5	0,45		0,41	0,4575	3,20	12,923	4,28	0,626	31,13	-15,60	-0,95	-0,185	-25,81	-1,113
6				27,5	0,55		0,58	0,6470	4,52	9,101	3,90	0,569	28,35	-15,067	-15,40	-0,305	42,60	6,56
7				32,5	0,65		0,79	0,8820	6,17	5,746	1,36	0,1986	9,50	-11,701	-18,84	-0,367	-51,20	9,971
8				37,5	0,75		1,01	1,127	7,86	3,060	0,03	0,0438	2,19	-7,345	-10,56	-0,206	-28,70	8,263
9				42,5	0,85		1,18	1,317	9,20	1,004	-2,48	-0,362	-18,05	-2,77	3,29	0,064	8,93	3,69
10				47,5	0,95		1,29	1,439	10,04	0	-3,80	-0,555	-27,70	0	13,54	0,264	36,85	0

параллельно к расположению датчиков, получили плоские волны по всему основанию модели. Датчиками смещения № 1, 2, 3, 4, 5 и 6 записали смещения в разных точках грунта, а датчиками смещения № 7, 8, 9 и 10—смещения в разных точках трубы.

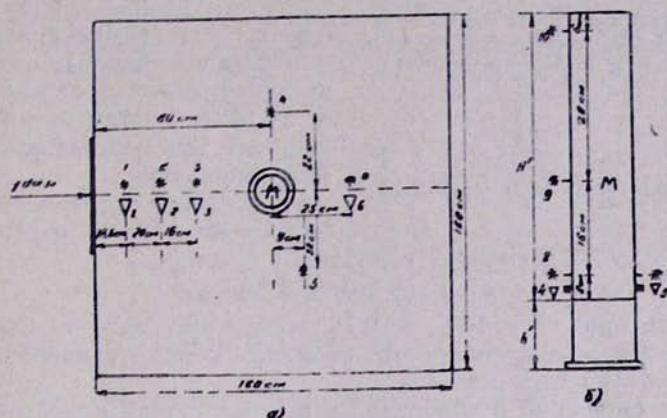


Рис. 3. Расположение датчиков на модели: а—на поверхности грунта; б—на модели трубы (*—датчики смещения, ∇ —датчики ускорения, М—модель трубы, Н'—высота модели трубы, Н—высота основания модели трубы)

Ускорения в различных точках поверхности грунта записали датчиками ускорения № 1, 2, 3 и 6, а вблизи основания трубы—датчиками № 5 и 4, расположенными в противоположных точках модели (см. рис. 3).

Модель грунта, изготовленную из вальцмассы, ударяли с разными силами соударения $P_{уд}$.



Рис. 4. Блок-схема регистрации: а—смещений; б—ускорений моделей.

Регистрацию опытов осуществили осциллографом ПОБ-12М. Блок-схема регистрации изображена на рис. 4. По этим записям определяли периоды свободных колебаний трубы и логарифмические декременты колебаний (рис. 5).

Логарифмические декременты колебания модели трубы определили по формуле:

$$\Delta = \ln \frac{z_1}{z_{i+1}},$$

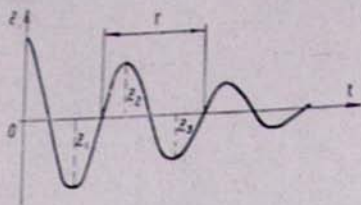


Рис. 5. Вид затухающих колебаний

(где z_i и z_{i+1}) — последующие амплитуды колебаний), сообщая свободному концу модели трубы слабый удар и оставляя свободно колебаться при неподвижном положении основания.

Получилось, что период T' свободных колебаний модели трубы и

логарифмический декремент колебаний Δ' равны:

$$T' = 0,68 \text{ сек} \text{ и } \Delta' = 0,287.$$

Так как при $\alpha = 1:100$ $\xi = 0,73$, то для натурной трубы получаем $T = \xi^{-1} \cdot T' = 0,92 \text{ сек}$, которое от периода 1 тона колебаний натурной трубы отличается на 15%.

Записи смещений и ускорений в разных точках модели трубы приведены на рис. 6 а, б и 7. Расшифровывая записи на трубе, замечаем, что отдельные тоны колебания трубы не выражены четко, а датчики записали какое-то среднее перемещение из трех тонов.

При ударах в вальцессе (грунте) и в модели трубы волны распространялись, имея периоды: $T'_{\text{вальц.}} = 0,12 \text{ сек}$ и $T'_{\text{труба}} = 0,1 \text{ сек}$. Откуда, зная связь между периодом колебаний и круговой частотой

$$k = \frac{2\pi}{T}, \text{ получаем:}$$

$$k'_{\text{вальц.}} = P = \frac{2\pi}{T'_{\text{вальц.}}} = \frac{6,28}{0,12} = 52 \text{ сек}^{-1} \text{ и}$$

$$k'_{\text{трубы}} = k' = \frac{2\pi}{T'_{\text{трубы}}} = \frac{6,28}{0,1} = 62,8 \text{ сек}^{-1}.$$

6. Определение сейсмической силы модели трубы. Известно [10, 18], что при колебаниях основания по произвольному закону $y_0(t)$ дифференциальное уравнение движения будет:

$$y'' + \frac{2\pi}{T} \cdot \alpha^* \cdot y' + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot y = -y_0''(t),$$

где T — период колебания; $\alpha^* = \frac{\psi}{2\pi}$ — коэффициент внутреннего трения. Сейсмическая нагрузка S будет:

$$S = \frac{Q}{g} (y_0'' + y'') = \frac{Q \cdot \tau(T, \alpha^*)}{g}, \quad (9)$$

где Q — вес сооружения, а $\tau(T, \alpha^*)$

$$\tau(T, \alpha^*) = \frac{2\pi}{T} \int_0^t y_0''(\xi) \cdot e^{-\frac{\alpha^* \pi}{T}(t-\xi)} \cdot \sin \frac{2\pi}{T}(t-\xi) d\xi \quad (10)$$

представляет ускорение линейного осциллятора с периодом T и декре-

коэффициентом колебания α^* и называется приведенным сейсмическим ускорением, которое выполняет роль максимального сейсмического ускорения $\tau_{\max}(T, \alpha^*)$, сообщенного сооружению. Значит, для определения сейсмической нагрузки, действующей на сооружение, необходимо значение $\tau(T, \alpha^*)$.

Если зафиксировать α^* и по оси абсцисс откладывать периоды свободных колебаний T , а по оси ординат—приведенное сейсмическое ускорение, то получим график $\tau(T, \alpha^*)$, называемый спектром приведенных сейсмических ускорений.

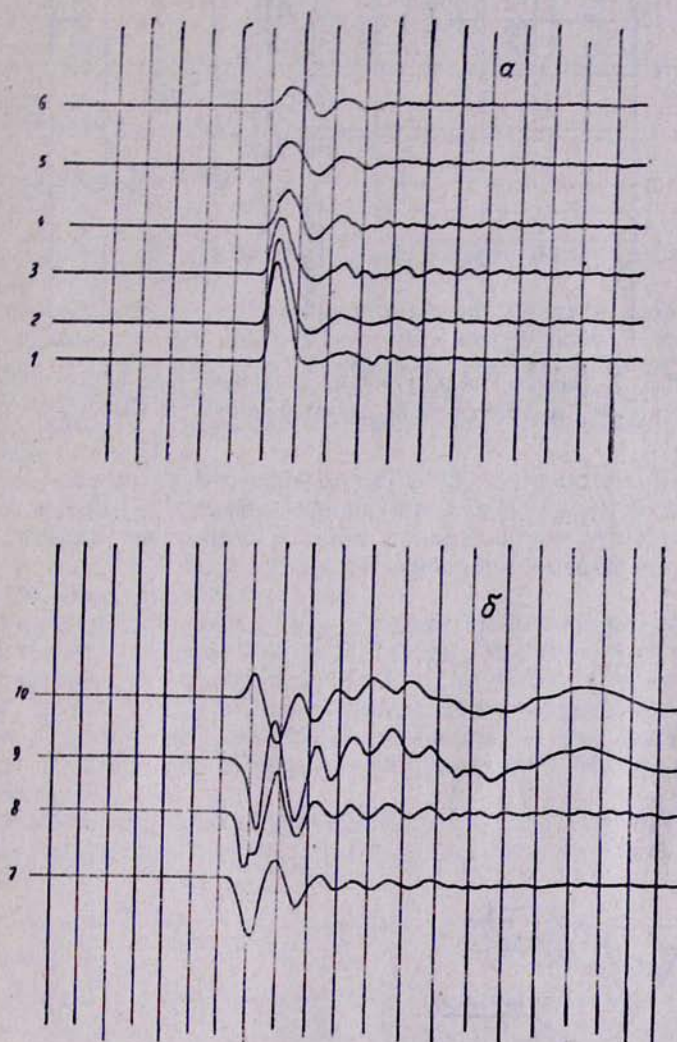


Рис. 6. Типичная осциллограмма смещений: а—на вальцмассе; б—на модели трубы (где 1,2,...,10—датчики смещений).

Придавая α^* значения $\alpha_1^*=0,12$; $\alpha_2^*=0,26$ и $\alpha_3^*=0,60$ и принимая для периода шаг табуляции $\Delta T=0,0025$ сек, получаем спектральные кривые $\tau(T)$ для грунта модели в четырех точках: датчики № 1, 2, 3, 6, а для трубы в двух точках: датчики № 4 и 5.

Вычисление интеграла (10) осуществлено на ЭВМ «Минск-22»,

численные значения $\tau(T)$ приведены в табл. 8, а спектры этих приведенных ускорений показаны на рис. 8.

Анализируя эти спектры, замечаем, что приведенные сейсмические ускорения достигают своих максимальных значений как для грунта,

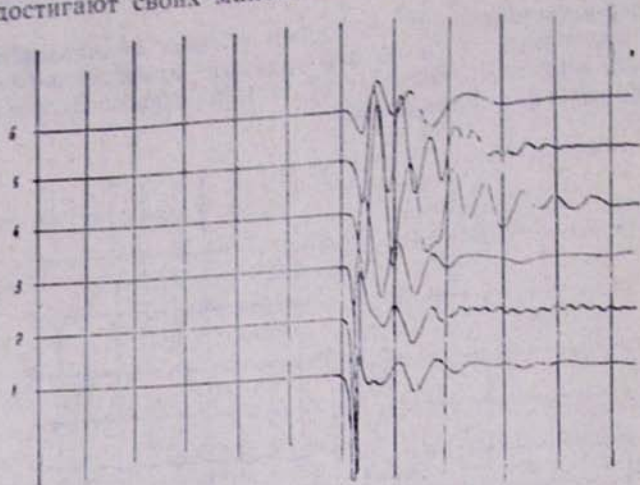


Рис. 7. Типичная осциллограмма ускорений (где 1,2,...,6—показания соответствующих датчиков ускорения СПЭД-56)

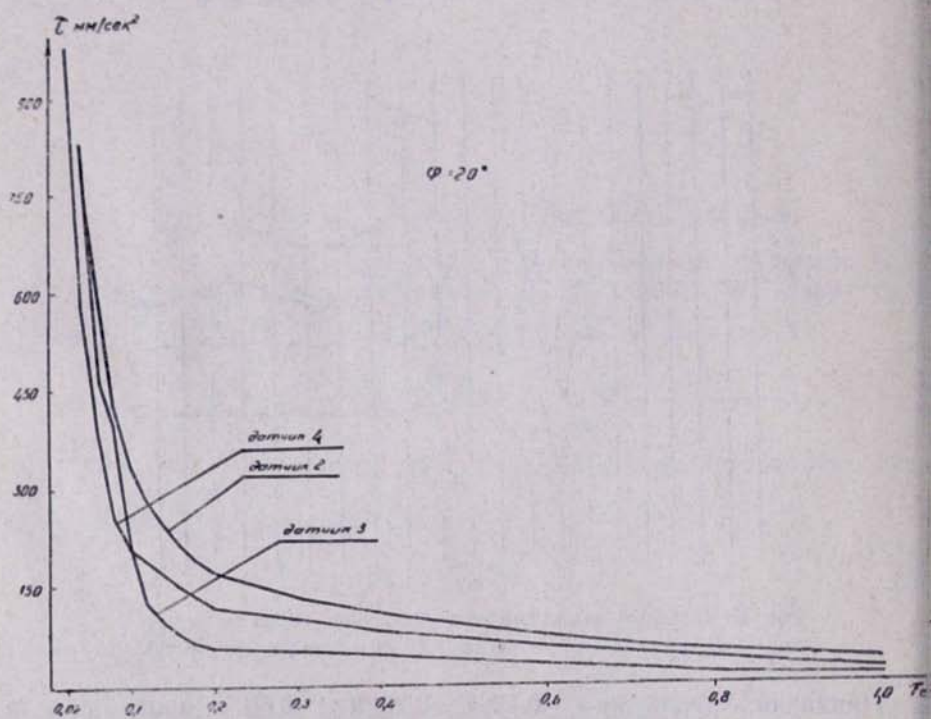


Рис. 8. Спектры приведенных ускорений в разных точках модели грунта и модели трубы

Таблица 8.

Максимальные значения приведенных ускорений τ в долях g и соответствующие им частоты ν колебаний, в $гц$

Горизонтальная сила соударения (тонн)	Датчики на вальцмассе				Датчики на трубе	
	2		3		4	
	τ/g	ν	τ/g	ν	τ/g	ν
2,46	0,094	50	0,087	50	0,112	50
3,70	0,099	50	0,083	50	0,111	50
4,92	0,110	50	0,100	50	0,130	50
6,13	0,097	50	0,092	50	0,146	50
7,33	0,103	50	0,094	50	0,154	50
Расстояние датчика от плоскости соударения (см)	38,5		54,5		80,0	
Расстояние датчика от поверхности вальцмассы (см)	—		—		5,0	

и для трубы при частоте колебаний, равной 50 $гц$ (датчики № 1 и 5 работали неустойчиво).

При разных силах соударения ускорения грунта и сооружения получились разные. Ускорение сооружения получилось в 1,1÷1,8 раза больше, чем ускорение грунта. Например, при отклонении маятника под углом $\varphi=20^\circ$ получилось для грунта приведенное ускорение $\tau_{гр}=0,1 g$, которое соответствует землетрясению 9 баллов, а для модели трубы — $\tau=0,13 g$.

Так как модель трубы имеет вес $G'=300 g$, то по табл. 8 и формуле (9) определим сейсмические силы для модели трубы при максимальных приведенных ускорениях в точке прикрепления датчика ускорения к трубе, то есть на высоте 5,0 см от основания модели или на высоте 0,50 м от основания оригинала трубы.

Как уже отметили, при ударе датчики смещения не смогли записывать низшие тона колебания модели трубы. Поэтому по величине расчетной сейсмической силы в сечении I—I от третьего тона колебания оригинала трубы ($S_{I-1}=27,15 m$) определяем соответствующую сейсмическую силу для модели. Имея значения множителей подобия $\mu=1:100$ и $\delta=0,513$, для модели сейсмические силы можно определить по формуле (7).

Полученные результаты приведены в табл. 9. Результаты, полученные по опытам и расчетам, дают максимальную разность в среднем до 15%.

Таблица 9

Сила соударения, т	2,46	3,70	4,92	6,13	7,33
Сейсмическая сила по опытам, г	33,6	33,0	39,0	43,8	46,2
Сейсмическая сила по формуле (7), г	37,56				
Разность, %	-10,3	-12,3	+3,8	+16,6	+22,4

Ордена Трудового Красного Знамени
Институт геофизики и инженерной
сейсмологии АН Армянской ССР

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Б. А. Условия подобия при моделировании напряженного состояния тонких пластин и пологих тонких оболочек из стеклопластика. М., изд. «Наука», 1966.
2. Баркан Д. Д. Динамика оснований и грунтов. М., Госстройиздат, 1948.
3. Бессонов В. Г. Вопросы моделирования процессов деформирования в наследственных средах. В сб. «Механическое подобие конструкций из армированного материала». Киев, изд. «Наукова думка», 1970.
4. Георгиевский В. Г., Кузнецов К. А., Полоский Т. Р. Физические материалы. Гизлегпром., 1940.
5. Кабранова В. Н. Физические свойства горных пород. М., Гостоптехиздат, 1962.
6. Ломакин В. А., Безухов В. Н., Колтунов М. А. Вопросы подобия и моделирования процессов деформации линейных, вязкоупругих средств. «Механика полимеров», № 1, 1967.
7. Ломакин В. А., Колтунов М. А. Моделирование процессов деформирования нелинейных вязкоупругих сред. «Механика полимеров», № 2, 1967.
8. Малмейстер А. К., Гамуж В. П., Тетерек Г. А. Сопротивление жестких полимерных материалов. Рига, изд. «Зинатне», 1967.
9. Месчан С. Р. Механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения. М., изд. «Недра», 1974.
10. Назаров А. Г. Метод инженерного анализа сейсмических сил. Ереван, изд. АН Арм. ССР, 1959.
11. Назаров А. Г. О механическом подобии твердых деформируемых сил. Ереван, изд. АН Арм. ССР, 1965.
12. Назаров А. Г., Шагинян С. А. Руководство по исследованию механических свойств строительных конструкций на моделях. Ленинакан, изд. АН Арм. ССР, 1966.
13. Назаров А. Г. Эластические сейсмические платформы. ДАН Арм. ССР, т. XXXIV, № 5, 1962.
14. Назаров А. Г. Основная теорема подобия в применении к моделированию строительных конструкций. «Строительная механика и расчет сооружений», № 8, 15—19, 1959.
15. Резниковский М. М., Лукомекая А. М. Механические испытания каучука и резины. М., изд. «Химия», 1968.
16. СНиП П-Б, 1—62.
17. СНиП П-В, 1—62.
18. Хачиян Э. Е. Сейсмические воздействия на высотные здания. Ереван, изд. «Айастан», 1973.
19. Хачиян Э. Е. Реферативный сборник «Сейсмостойкое строительство», «Отечественный и зарубежный опыт», вып. 11, М., 1975.
20. Цытович Н. А. Механика грунтов. М., изд. «Высшая школа», 1973.