

А. Е. САРГСЯН

ВЛИЯНИЕ МЯГКОГО СЛОЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ С УЧЕТОМ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТА

Постановка задачи. В настоящее время при микрорайонировании приращение сейсмической балльности определяется в зависимости от соотношения акустических жесткостей и напластований различных грунтов сравниваемых площадок, а также на измерении и сопоставлении параметров колебаний точек, расположенных на поверхности рассматриваемых площадок, или их спектральных характеристик [8].

Но, как известно, при сильных землетрясениях (от 7 баллов и выше) мягкие грунты проявляют пластические свойства и испытывают значительные остаточные деформации [6, 8, 11].

По данным С. В. Медведева [8], при сильных землетрясениях от 7 до 9 баллов напряжения в слое мягкого грунта достигают 10 кг/см^2 . При таких напряжениях, как показывают последние экспериментальные данные [2, 3, 6], в грунтах сильно проявляются пластические свойства и возникают остаточные деформации.

В работах [2, 3, 6, 7] отмечается, что диаграмма напряжение-деформация при сейсмических воздействиях может быть представлена билинейным законом, причем разгрузка происходит параллельно упругому участку диаграммы. Конкретная форма диаграммы может быть получена путем использования значений скоростей распространения продольных упругих и упруго-пластических волн для различных грунтов [6].

На основе результатов экспериментальных работ [6] нами составлена табл. 1 в форме, удобной для дальнейшего хода расчета.

Используя экспериментальные данные о динамических свойствах грунтов и с помощью существующих решений Х. А. Рахматулина [9, 10], Г. М. Ляхова [7], А. П. Силицына [11] и др. о распространении упруго-пластических волн в однородной среде грунта, можно получить решение для двухслойного основания и определить параметры колебания на поверхности земли с учетом отражения и преломления волн на нижней границе слоя.

Отражение и преломление волн на нижней границе слоя. Рассмотрим эффект отражения и преломления при прямом падении продольной стационарной сейсмической волны на нижнюю границу слоя.

При этом скальное основание считается упругим, а вышележащий слой грунта — упруго-пластическим. В такой постановке задача является одномерной и для описания явления достаточно воспользоваться диаграммами одноосного сжатия и разгрузки (рис. 1).

Классификация грунтов и скальных пород по динамическим упруго-пластическим свойствам

Наименование грунтов и скальных пород	Плотность $[\frac{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}{\text{см}^3}]$	Динамическая жесткость грунтов $[\frac{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}{\text{см}^2}]$		Отношение $m_1/m_2 = K_1$
		упругих m_1	упруго-пластических m_2	
Насыпные грунты (пески, супеси, суглинки), рыхлые неводонасыщенные	$(1,30 - 1,70) \cdot 10^{-6}$	$(1,30 - 2,5) \cdot 10^{-2}$	$(0,65 - 1,70) \cdot 10^{-2}$	1,0 - 5,0
Грунты естественной структуры (пески, суглинки, лесс; рыхлые малоблажные)	$(1,40 - 1,80) \cdot 10^{-6}$	$(2,80 - 18) \cdot 10^{-2}$	$(1,4 - 4,5) \cdot 10^{-2}$	2,0 - 4,0
Гравийно-галечные и песчаные водонасыщенные грунты, супеси, суглинки средней влажности	$(1,60 - 2,0) \cdot 10^{-6}$	$(6,40 - 32) \cdot 10^{-2}$	$(3,2 - 10,0) \cdot 10^{-2}$	1,5 - 3,0
Суглинистые и глинистые грунты плотные полутвердые и твердые, сильно выбитые, рыхлые, полускальные породы.	$(1,70 - 2,60) \cdot 10^{-6}$	$(22,1 - 51) \cdot 10^{-2}$	$(13,6 - 65) \cdot 10^{-2}$	1,3 - 2,0
Скальные изверженные и метаморфические (гранит, гнейс, базальт, диорит и др.) трещиноватые породы	$(2,4 - 3,0) \cdot 10^{-6}$	$(72 - 150) \cdot 10^{-2}$	$(55,2 - 105) \cdot 10^{-2}$	1,1 - 1,5
Скальные изверженные и метаморфические (гранит, мрамор и др.) нетрещиноватые породы	$(2,6 - 3,3) \cdot 10^{-6}$	$(106 - 115) \cdot 10^{-2}$	$(91 - 138) \cdot 10^{-2}$	1,0 - 1,2

Будем интересоваться явлениями вблизи раздела и проведем решение задачи в координатах Лагранжа (h, t) , где $h = \int_0^z \rho \cdot dz$,

ρ — плотность грунта;
 z — пространственная координата Эйлера;
 t — параметр времени.

Поместим начало координат на границе полупространства. Ось h направим вверх, по направлению распространения падающей волны (рис. 2). Как известно из работ [10, 11], распространение продольных волн в такой системе описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - m_1^2 \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial h^2} = 0, \quad (1)$$

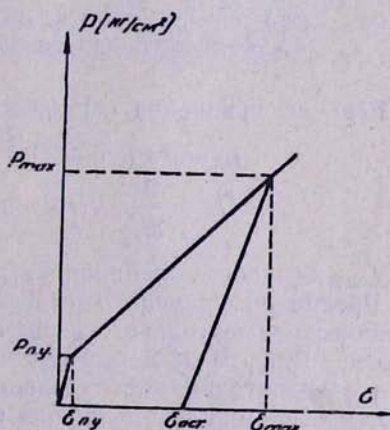


Рис. 1. Динамическая диаграмма напряжения-деформация грунта при $\sigma \leq (10 \div 15) \text{ кгс/см}^2$

где $i=0$ — относится к скальным породам;
 $i=1$ — в упругих и разгрузочных, а
 $i=2$ — в пластических областях слоя;
 m_i — скорость распространения волны в координатах (h, t) , т. е.
 акустическая жесткость областей
 p — давление на фронте волны.

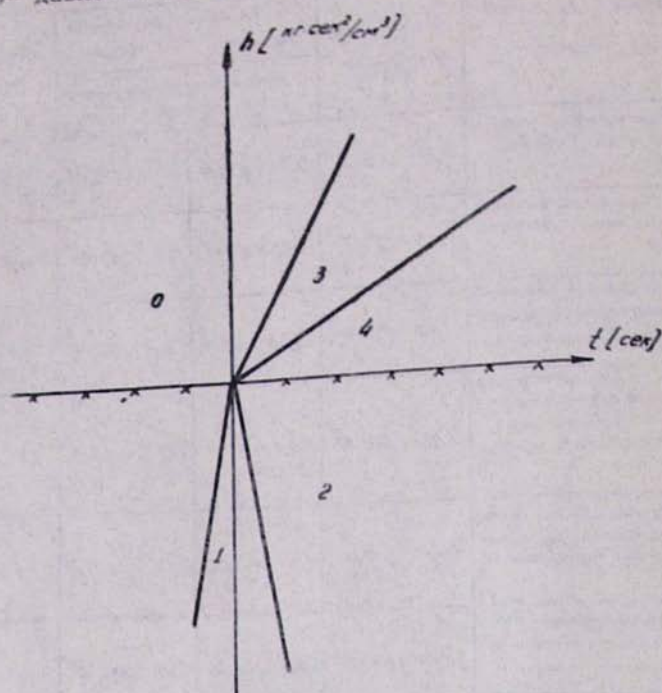


Рис. 2. Схема областей различных решений при отражении и преломлении волн на границе упруго-упругопластических сред: 1 и 2 — области падающей и отраженной упругих волн; 3 и 4 — области преломленных упругой и пластической волн

Решение уравнения (1) представим в виде [7]:

$$\left. \begin{aligned} p_k &= F_{1k}(h - m_i t) + F_{2k}(h + m_i t) \\ U_k &= \frac{1}{m_i} [F_{1k}(h - m_i t) - F_{2k}(h + m_i t)] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где U_k — скорость колебания частиц в пределах области «к».

Рассмотрим случай, когда форма падающей волны имеет вид постоянного прямоугольного импульса. В этом случае в пределах любой области (рис. 2) 1, 2, 3, 4 параметры (U_k, p_k) остаются постоянными и, следовательно, произвольные функции (F_{1k}, F_{2k}) тоже превращаются в постоянные величины в пределах данной области.

Для определения величин p_k и U_k воспользуемся известным соотношением на фронте волны [8]:

$$p_k \pm m_i U_k = p_j \pm m_i \cdot U_j \quad (3)$$

и условиями на границе двух слоев. На этой границе претерпеваю

разрыв плотности среды и скорость распространения волны, а давление и скорость частиц остаются непрерывными.

Тогда на основе лучевой схемы (рис. 2) с учетом соотношения (3) запишем следующее:

на фронте падающей волны

$$p_{\text{под}} - m_0 \cdot U_{\text{под}} = 0, \quad (\text{а})$$

на фронте отраженной волны

$$p_{\text{отр}} + m_0 \cdot U_{\text{отр}} = p_{\text{под}} + m_0 \cdot U_{\text{под}}, \quad (\text{б})$$

на фронте проходящей упругой волны

$$p_{\text{пу}} - m_1 \cdot U_{\text{пу}} = 0, \quad (\text{в})$$

на фронте проходящей пластической волны

$$p_{\text{пр}}^{\text{пл}} - m_2 \cdot U_{\text{пр}}^{\text{пл}} = p_{\text{пу}} - m_2 \cdot U_{\text{пу}}, \quad (\text{г})$$

на границе раздела

$$p_{\text{от}} = p_{\text{пр}}^{\text{пл}}; \quad U_{\text{от}} = U_{\text{пр}}^{\text{пл}}. \quad (\text{д})$$

Переходим к совместному решению этих уравнений. Задача состоит в том, чтобы, имея скорость колебания частиц на падающей волне, определить скорость колебания частиц и давления на проходящей упругой и пластической волне.

На основе условия (д), (б) примет вид:

$$p_{\text{под}} + m_0 \cdot U_{\text{под}} = p_{\text{пр}}^{\text{пл}} + m_0 \cdot U_{\text{пр}}^{\text{пл}}.$$

Далее, учитывая (а), последнее выражение можно представить так:

$$2m_0 \cdot U_{\text{под}} = p_{\text{пр}}^{\text{пл}} + m_0 \cdot U_{\text{пр}}^{\text{пл}}. \quad (\text{б}')$$

С другой стороны, из (г) с учетом (в) имеем:

$$p_{\text{пр}}^{\text{пл}} - m_2 \cdot U_{\text{пр}}^{\text{пл}} = (1 - m_2/m_1) \cdot p_{\text{пу}}. \quad (\text{г}')$$

Если предварительно задать значение $U_{\text{под}}$, то уравнение (б') и (г') составят определяемую систему уравнений относительно давления и скорости колебания частиц $U_{\text{пр}}^{\text{пл}}$ на фронте проходящей пластической волны:

$$\left. \begin{aligned} p_{\text{пр}}^{\text{пл}} + m_0 \cdot U_{\text{пр}}^{\text{пл}} &= 2m_0 \cdot U_{\text{под}} \\ p_{\text{пр}}^{\text{пл}} - m_2 \cdot U_{\text{пр}}^{\text{пл}} &= (1 - m_2/m_1) \cdot p_{\text{пу}} \end{aligned} \right\}$$

В результате решения этой системы получим:

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{пр}}^{\text{пл}} &= \frac{2m_2}{m_0 + m_2} \cdot U_{\text{под}} - \frac{m_1 - m_2}{m_0 + m_2} \cdot U_{\text{пу}} \\ p_{\text{пр}}^{\text{пл}} &= \frac{2m_0 m_2}{m_0 + m_2} \cdot U_{\text{под}} + \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{m_1 - m_2}{m_0 + m_2} p_{\text{пу}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $U_{\text{пу}} = p_{\text{пу}}/m_1$; $p_{\text{пу}}$ — предел упругости, давление которого определяется по диаграмме сжимаемости и разгрузки (рис. 1).

Принимаем следующие обозначения: $k_1 = m_1/m_2$; $k_0 = m_0/m_2$, тогда система (4) будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{вп}}^{\text{пл}} &= \frac{2k_0}{1+k_0} U_{\text{под}} - \frac{k_1-1}{k_0+1} p_{\text{пу}}/m_1 \\ p_{\text{вп}}^{\text{пл}} &= \frac{k_0}{k_0+1} 2m_2 \cdot U_{\text{под}} + \frac{k_0}{k_0+1} \left(1 - \frac{1}{k_1}\right) p_{\text{пу}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Рассмотрим эти формулы подробно. Когда $k=1$, получим известные соотношения для случая, когда соприкасаются два упругих полу-пространства:

$$p_{\text{вп}}^{\text{пл}} = \frac{2m_1}{m_0+m_1} \cdot p_{\text{под}}; \quad U_{\text{вп}}^{\text{пл}} = \frac{2m_0}{m_0+m_1} \cdot U_{\text{под}}. \quad (5')$$

Следовательно, формула (5) охватывает наиболее широкий интервал отражения и преломления, чем известные до сих пор соотношения (5'). Вторая формула системы (5) представлена в таком виде:

$$p_{\text{вп}}^{\text{пл}} = \frac{k_0}{k_0+1} \left[2m_2 U_{\text{под}} + \left(1 - \frac{1}{k_1}\right) p_{\text{пу}} \right].$$

Учитывая, что для скальных пород (табл. 1) $k_0 \gg 1$, из последнего уравнения получаем:

$$p_{\text{вп}}^{\text{пл}} = 2m_2 U_{\text{под}} + \left(1 - \frac{1}{k_1}\right) p_{\text{пу}}. \quad (5'')$$

Эта формула показывает, что на величину давления, которое действует на нижнюю границу упруго-пластического слоя, несущественно влияют акустические характеристики упругих скальных пород.

Формулой (5'') можно определить величину скорости колебания частиц на падающей волне, когда в мягком грунте появляется пластическая волна.

Эти условия можно представить в виде:

$$p_{\text{вп}}^{\text{пл}} > p_{\text{пу}}.$$

Откуда получим формулу, представляющую практический интерес:

$$U_{\text{под}} > \frac{1}{2k_1 m_2} p_{\text{пу}}. \quad (6)$$

Для насыпных грунтов $P_{\text{пу}} = (0,4 \div 0,5) \text{ кгс/см}^2$, $k_1 = 5 \div 3$, тогда из условия (6) получим $U_{\text{под}} > (2,5 \div 3) \text{ см/сек}$. Для грунтов естественной структуры $P_{\text{пу}} = (0,5 \div 0,8) \text{ кгс/см}^2$, $k_1 = 4 \div 2$, откуда $U_{\text{под}} > (3 \div 4) \text{ см/сек}$.

На рис. 3, а показана зависимость изменения давления на падающей (1), проходящей пластической (2) и на проходящей упругой волне (3) при $k_1=1$ от скорости колебания частиц на падающей волне.

Рис. 3, б показывает, что зависимость скорости колебания частиц падающей волны и скорости колебания частиц на проходящей волне в случае упруго-пластической (2) и упругой моделей грунта не претерпевает существенного изменения, если слой подстилают жесткие скальные породы. В итоге чего коэффициенты преломления практически одинаковы, т. е. $tg \alpha_{\text{пл}} \approx tg \alpha_{\text{уп}}$ и они полностью совпадают в случае $k=1$.

Точки пересечения линий (2) и (3) на рис. 3, а и 3, б указывают значения $U_{под}$, $U_{прех}$ и $P_{прех}$, при которых на нижней границе начинается возникать первая пластическая волна. Как показали численные результаты, приведенные выше, пластическая волна рыхлых грунтов начинается распространяться при $U = (2 \div 4)$ см/сек, указывая тем самым, что начиная с 7 баллов в рыхлых грунтах возникает процесс образования пластических деформаций. Это полностью совпадает с данными в [8, 13].

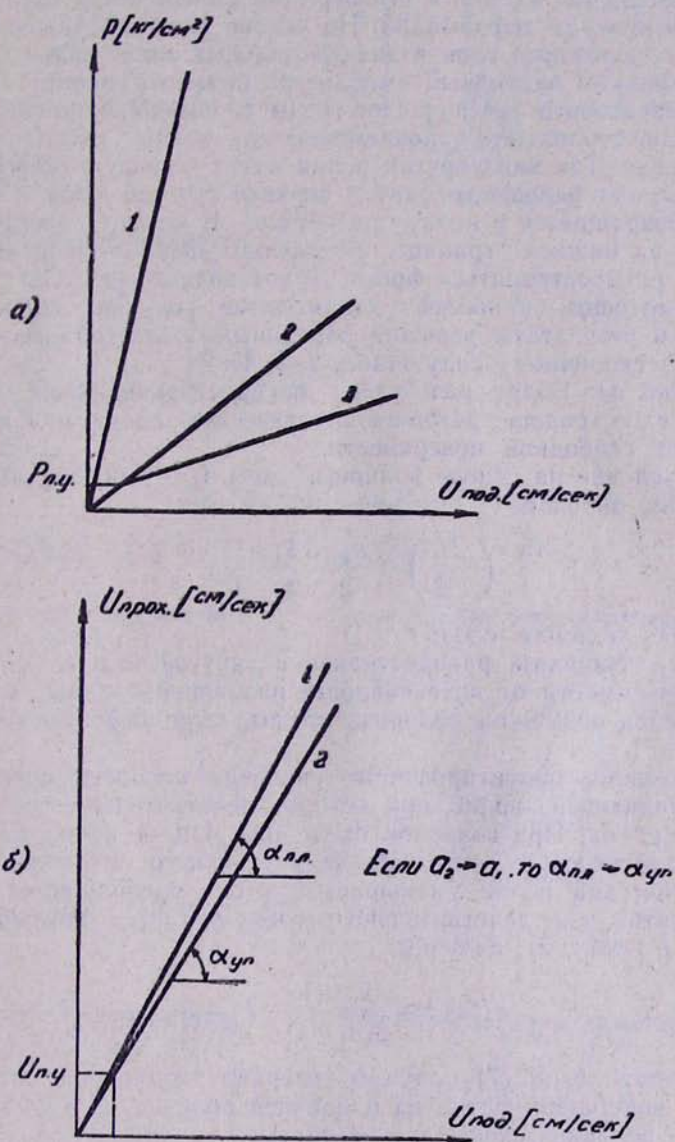


Рис. 3. Изменение параметров волн на границе упруго-пластического полупространства

Возможные волновые сетки. Для наглядного изучения напряженно-деформированного состояния слоя и определения кинематических параметров на поверхности решается возможная волновая

сетка, образующаяся при сейсмических воздействиях на данную стропильную площадку.

Рассматриваются наиболее возможные волновые сетки, которые образуются в рыхлом слое в зависимости от физических характеристик грунта и подстилающих пород, от соотношения толщины слоя и периода падающей волны и от интенсивности землетрясения.

Как известно, в записях землетрясений обычно выделяются 1-3 периода, колебания которых проявляют наибольшую интенсивность. Принимается, что именно в эти периоды колебания в грунте проявляются пластические деформации. На основе этих соображений для рассмотрения колебаний слоя в эпицентральных зонах сильных землетрясений приложим одиночный импульс на нижнюю границу слоя.

Из начального сечения слоя ($h=0$) в момент времени $t=0$ начинают распространяться одновременно две волны сжатия—упругая и пластическая. Так как упругая волна имеет большую скорость распространения, она раньше доходит к верхней границе слоя и после отражения превращается в волну разгрузки. В момент времени $t=T/2$ давление на нижней границе мгновенно исчезает и из сечения $h=0$ начинает распространяться фронт первой волны разгрузки.

Рассмотрены наиболее характерные случаи волновых сеток (рис. 4) и результаты решения различных областей волновых схем сведены к табличному виду (табл. 2, 3, 4).

Случай а). Волна разгрузки, распространяющаяся от нижней границы слоя, раньше догоняет пластическую волну, чем волна, отраженная от свободной поверхности.

Это условие на основе волновых схем 4, а—1, 2, 3 можно написать следующим образом:

$$\left(\frac{H}{T/2}\right) \geq \frac{a_1}{2} \cdot \frac{k_1+1}{k_1-1}, \quad (7)$$

где H —толщина слоя;

a_1 —скорость распространения упругой волны.

В зависимости от интенсивности падающей волны на нижнюю границу слоя возможны волновые схемы, изображенные на рис. 4, а—1, 2, 3.

Определяем ориентировочные значения скорости колебания частиц на падающей волне, при которых действительна та или иная волновая схема. При волновой схеме рис. 4, а—1 волна разгрузки догоняет пластическую волну. После внутреннего отражения давление на пластической волне уменьшается и она превращается в упругую волну сжатия, т. е. действительно условие $p_4 \leq p_{ny}$. Учитывая решение области 4 (табл. 2), получим:

$$U_{под} \leq \frac{3k_1-1}{2(k_1-1)} \cdot P_{ny}/m_1.$$

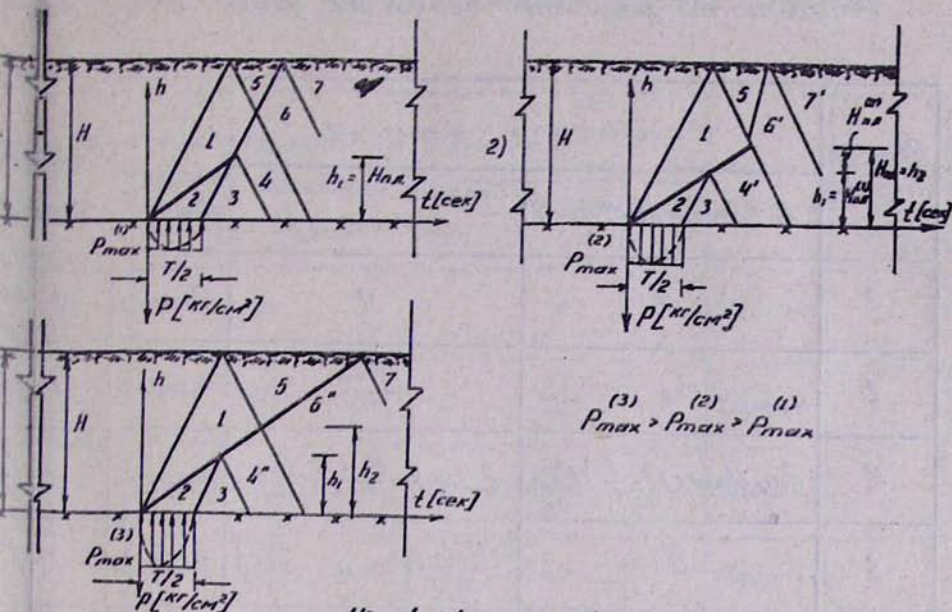
С учетом (6) и (7) получим интервал изменения интенсивности скорости колебания частиц на падающей волне, т. е. в случае действительности волновой схемы 4, а—1 имеем:

$$\frac{1}{2k_1} \cdot P_{ny}/m_1 < U_{под} \leq \frac{3k_1-1}{2(k_1-1)} \cdot P_{ny}/m_1. \quad (8)$$

Если после внутреннего отражения волны разгрузки от пластической волны сжатия, распространяющихся от нижней границы слоя,

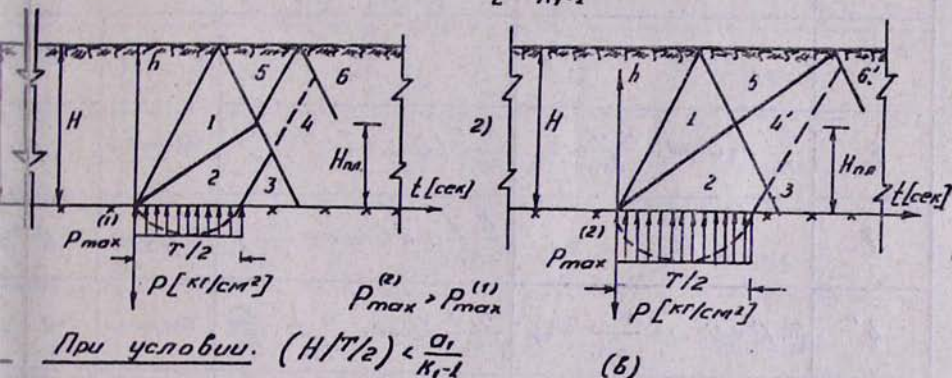
Уз $h_1 < h_2$ откуда

При условии $(H/\tau/2) > \frac{\sigma_1}{2} \cdot \frac{K_1+1}{K_1-1}$ (а)

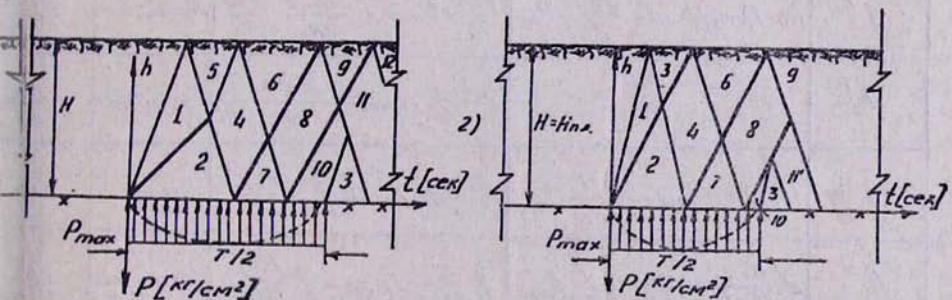


Уз $h_1 > h_2$ откуда

При условии: $\frac{\sigma_1}{K_1-1} < (H/\tau/2) < \frac{\sigma_1}{2} \cdot \frac{K_1+1}{K_1-1}$ (б)



При условии: $(H/\tau/2) < \frac{\sigma_1}{K_1-1}$ (в)



2. 4. Наиболее возможные формы волновых схем в упругопластическом слое при падении на нижнюю границу продольной сейсмической волны

Результаты решений волновых схем 4-а (123)

Область (см. рис 4а)	Результаты решения		Характеристика области	Отноше- ние P_1/P_2
	Давление P_k [кг/см ²]	Скорость колебания U_k [см/сек]		
0	0	0	Покой	0
1	P_{ny}	$\frac{P_{ny}}{m_1}$	Нагрузка	1
2	$2m_2 U_{nod} + (1 - \frac{1}{K_1}) P_{ny}$	$2U_{nod} - \frac{K_1 - 1}{K_0} \cdot \frac{P_{ny}}{m_1}$	Нагрузка	> 1
3	0	$\frac{K_1 - 1}{K_1} (2U_{nod} - \frac{P_{ny}}{m_1})$	Разгрузка	0
4	$\frac{K_1 - 1}{K_1} (m_1 U_{nod} - \frac{1}{2} P_{ny})$	$\frac{K_1 - 1}{K_1} (U_{nod} - \frac{1}{2} \frac{P_{ny}}{m_1})$	Разгрузка	< 1
5	0	$2 \frac{P_{ny}}{m_1}$	Разгрузка	0
6	$\frac{K_1 - 1}{K_1} m_1 U_{nod} - \frac{K_1 - 1}{2K_1} P_{ny}$	$\frac{K_1 - 1}{K_1} (U_{nod} - \frac{1}{2} \frac{K_1 - 3}{K_1 - 1} \frac{P_{ny}}{m_1})$	Нагрузка	< 1
7	0	$\frac{K_1 - 1}{K_1} (2U_{nod} - \frac{P_{ny}}{m_1})$	Разгрузка	0
4'	$(K_1 - 1) m_2 U_{nod} - \frac{K_1 - 1}{2K_1} P_{ny}$	$\frac{K_1 - 1}{K_1} U_{nod} - \frac{K_1 - 3}{2K_1} \cdot \frac{P_{ny}}{m_1}$	Нагрузка	> 1
6'	$(K_1 - 1) m_2 U_{nod} - \frac{3K_1 - 1}{2K_1} P_{ny}$	$\frac{K_1 - 1}{K_1} U_{nod} - \frac{7K_1 - 1}{2K_1} \frac{P_{ny}}{m_1}$	Нагрузка	< 1
7'	0	$2 \frac{K_1 - 1}{K_1} U_{nod} - \frac{5K_1 - 1}{K_1} \frac{P_{ny}}{m_1}$	Разгрузка	0
4''	$(K_1 - 1) m_2 U_{nod} - \frac{K_1 - 1}{2K_1} P_{ny}$	$\frac{K_1 - 1}{K_1} U_{nod} - \frac{K_1 - 3}{2K_1} \frac{P_{ny}}{m_1}$	Нагрузка	> 1
6''	$2 \frac{K_1 - 1}{K_1 + 1} m_2 U_{nod} - \frac{1}{K_1} P_{ny}$	$2 \frac{K_1 - 1}{K_1 + 1} U_{nod} + 2 \frac{P_{ny}}{m_1}$	Нагрузка	> 1
7''	0	$2 \frac{K_1 - 1}{K_1} U_{nod} - \frac{2K_1 - 1}{K_1} \frac{P_{ny}}{m_1}$	Разгрузка	0

Таблица 3

Результаты решений волновых схем 4-5 (1,2)

Область	Результаты решений		Характеристика	Отношение P_K/P_{ny}
	Давление P_K [кг/см ²]	Скорость колебаний частиц U_K [см/сек]		
0	0	0	Покой	0
1	P_{ny}	$\frac{P_{ny}}{m_1}$	Нагрузка	1
2	$2m_2 U_{под} + (1 - \frac{1}{K_1}) P_{ny}$	$2U_{под} - \frac{K_1 - 1}{K_0} \cdot \frac{P_{ny}}{m_1}$	Нагрузка	> 1
3	0	$\frac{K_1 - 1}{K_1} (2U_{под} - \frac{P_{ny}}{m_1})$	Нагрузка	0
4	$(K_1 + 1)m_2 U_{под} + [\frac{(K_1 - 1)(K_0 - K_1)}{2K_1 K_0}] P_{ny}$	$\frac{K_1 - 1}{K_1} U_{под} + [\frac{(K_1 - 1)(K_0 - K_1)}{2K_1 K_0}] \frac{P_{ny}}{m_1}$	Нагрузка	< 1
5	0	$\frac{2P_{ny}}{m_1}$	Разгрузка	0
6	0	$2 \frac{K_1 + 1}{K_1} U_{под} + \frac{K_1 - 1}{2K_1} \frac{P_{ny}}{m_1}$	Разгрузка	0
4'	$2m_2 U_{под} - \frac{1}{K_1} P_{ny}$	$\frac{2}{K_1} U_{под} + \frac{2K_1 - 1}{K_1} \frac{P_{ny}}{m_1}$	Нагрузка	> 1
6'	0	$\frac{4}{K_1} U_{под} + 2 \frac{K_1 - 1}{K_1} \frac{P_{ny}}{m_1}$	Разгрузка	0

Пластическая волна остается пластической, и далее, встречаясь с волной полной разгрузки, отраженной от свободной поверхности, превращается в упругую волну сжатия, то будет справедлива волновая схема 4, а—2. На основе этой схемы $P_4 > P_{ny} > P_6$, откуда с учетом волновых об-разностей 4 и 6 (табл. 2) имеем:

$$\frac{3k_1 - 1}{2(k_1 - 1)} \cdot P_{ny}/m_1 \leq U_{под} \leq \frac{3k_1 + 1}{2(k_1 - 1)} \cdot P_{ny}/m_1. \quad (9)$$

В случае, когда пластическая волна и после вторичной разгрузки остается пластической, имеем волновую схему 4, а—3. На основе этой схемы $P_6 > P_{ny}$. Учитывая решение области 6 (табл. 2), имеем:

Результаты решений волновой схемы 4-6

Область см. рис. 4-6	Результаты решений		Характеристика области	Отноше- ние P_K/P_{ny}
	Давление P_K [кг/см ²]	Скорость колебания частиц U_K [см/сек]		
0	0	0	Полой	0
1	P_{ny}	$\frac{P_{ny}}{m_1}$	Нагрузка	1
2	$2m_2 U_{под} + (1 - \frac{1}{K_1}) P_{ny}$	$2U_{под} - \frac{K_1 - 1}{K_0} \cdot \frac{P_{ny}}{m_1}$	Нагрузка	> 1
3	0	$\frac{K_1 - 1}{K_1} (2U_{под} - \frac{P_{ny}}{m_1})$	Разгрузка	0
4	$(K_1 + 1)m_2 U_{под} + \left[\frac{(K_1 - 1)(K_0 - K_1)}{2K_0 K_1} \right] P_{ny}$	$\frac{K_1 + 1}{K_1} U_{под} + \left[\frac{(K_1 - 1)(K_0 - K_1)}{2K_0 K_1} \right] \frac{P_{ny}}{m_1}$	Нагрузка	< 1
5	0	$2 \frac{P_{ny}}{m_1}$	Разгрузка	0
6	0	$2 \frac{K_1 + 1}{K_1} U_{под} + \left[\frac{(K_1 - 1)(K_0 - K_1)}{K_1 K_0} \right] \frac{P_{ny}}{m_1}$	Разгрузка	0
7	$2m_2 U_{под} + (1 - \frac{1}{K_1}) P_{ny}$	$\frac{1}{K_1} [2U_{под} + \frac{(K_1 - 1)^2}{K_1}] \frac{P_{ny}}{m_1}$	Нагрузка	> 1
8	$\frac{K_1 - 1}{K_1} m_2 U_{под} + \frac{K_1^3 - 2K_1^2 - 1}{K_1^3} P_{ny}$	$\frac{K_1 + 3}{K_1} U_{под} + \frac{K_1^2 - 2}{K_1^3} \cdot \frac{P_{ny}}{m_1}$	Нагрузка	> 1
9	0	$\frac{4K_1 + K_1^2 - 1}{K_1^2} U_{под} + \frac{K_1 - 1}{K_1} \cdot \frac{P_{ny}}{m_1}$	Разгрузка	0
10	$2m_2 U_{под} + (1 - \frac{1}{K_1}) P_{ny}$	$2 \frac{K_1 + 2}{K_1} U_{под} + \frac{2K_1^2 - 1}{K_1^2} \cdot \frac{P_{ny}}{m_1}$	Нагрузка	> 1
11	$\frac{2K_1^2 + 5K_1^2 - 4K_1 + 1}{K_1^2(K_1 + 1)} m_2 U_{под} + \frac{2K_1^2 + 2K_1 - 1}{K_1^2(K_1 + 1)} P_{ny}$	$\frac{3K_1^3 + 10K_1^2 - K_1}{K_1^2(K_1 + 1)} U_{под} + \frac{3K_1^2 - 2K_1 - 2}{K_1(K_1 + 1)} \frac{P_{ny}}{m_1}$	Нагрузка	< 1
12	0	$\frac{3K_1^4 + 13K_1^3 + 4K_1^2 - 4K_1 + 1}{K_1^3(K_1 + 1)} U_{под} + \frac{3K_1^2 - 4K_1 - 1}{K_1^2(K_1 + 1)} \frac{P_{ny}}{m_1}$	Разгрузка	0

$$U_{\text{под}} > \frac{3k_1+1}{2(k_1-1)} \cdot P_{\text{пу}}/m_1. \quad (10)$$

Случай б). Волна разгрузки, огражденная от свободной поверхности, раньше догоняет пластическую волну, чем волна разгрузки, распространяющаяся от нижней поверхности слоя. Это условие запишем аналитически:

$$\frac{a_1}{k_1-1} \leq \left(\frac{H}{T/2} \right) < \frac{a_1}{2} \cdot \frac{k_1+1}{k_1-1}. \quad (11)$$

При сравнительно малой интенсивности скорости колебания частиц на волне, падающей на нижнюю границу слоя, действительна схема 4, б—1, где при встрече пластической волны сжатия с волной разгрузки, распространяющейся от свободной поверхности слоя, пластическая волна превращается в упругую волну сжатия. С дальнейшим увеличением интенсивности скорости колебания частиц на падающей волне (волна) в результате внутреннего отражения давление на пластической волне уменьшается, но она остается пластической (волновая схема 4, б—2).

Определим интервал изменения скорости колебания частиц на падающей волне, при котором справедлива волновая схема 4, б—1. На основе этой волновой схемы $p_1 \leq p_{\text{пу}}$. Считая, что $k_0 \gg k_1$ и учитывая решения области 4 (табл. 4), имеем:

$$\frac{1}{2k_1} \cdot P_{\text{пу}}/m_1 < U_{\text{под}} \leq \frac{3k_1+1}{2(k_1+1)} \cdot P_{\text{пу}}/m_1. \quad (12)$$

На основании волновой схемы 4, б—2 $p_1 > p_{\text{пу}}$. Учитывая решение области 4 (табл. 3), можно написать, что:

$$U_{\text{под}} > \frac{3k_1+1}{2(k_1+1)} \cdot P_{\text{пу}}/m_1. \quad (13)$$

Случай в). Продолжительность импульса достаточно велика или толщина слоя достаточно мала для того, чтобы волны (упругая и пластическая) несколько раз пробегали через толщину слоя.

В этом случае образуется очень сложная волновая картина, изображенная на рис. 4, в. Условия действия этой волновой схемы можно выразить так:

$$\left(\frac{H}{T/2} \right)^{-1} < \frac{k_4+2}{a_1}. \quad (14)$$

На рис. 5 и 6 приведены результаты решения скорости колебания частиц на поверхности слоя при разных соотношениях скоростей упругой и пластических волн $k_1=1$, $k_1=2$, $k_1=3$, $k_1=4$, $k_1=5$ и сравниваются скорости колебания на поверхности слоя (при $H=0$, $k_1=k_0$).

Уменьшение скорости колебания частиц на поверхности слоя при упругом состоянии грунта объясняется затуханием скорости колебания частиц по глубине слоя. Затухание связано с пластическими свойствами грунта и происходит интенсивно, когда эти свойства ярко выражены, т. е. при больших интенсивностях падающих волн ($U_{\text{под}} > P_{\text{пу}}/m_1$). Следует отметить, что для слоев большой толщины и малого периода волны, падающей на нижнюю границу слоя, скорость колебания частиц на поверхности слоя получается меньше, чем даже на свободной поверхности скальных пород (при $H=0$, $k=4$ рис. 5, а и 6, а).

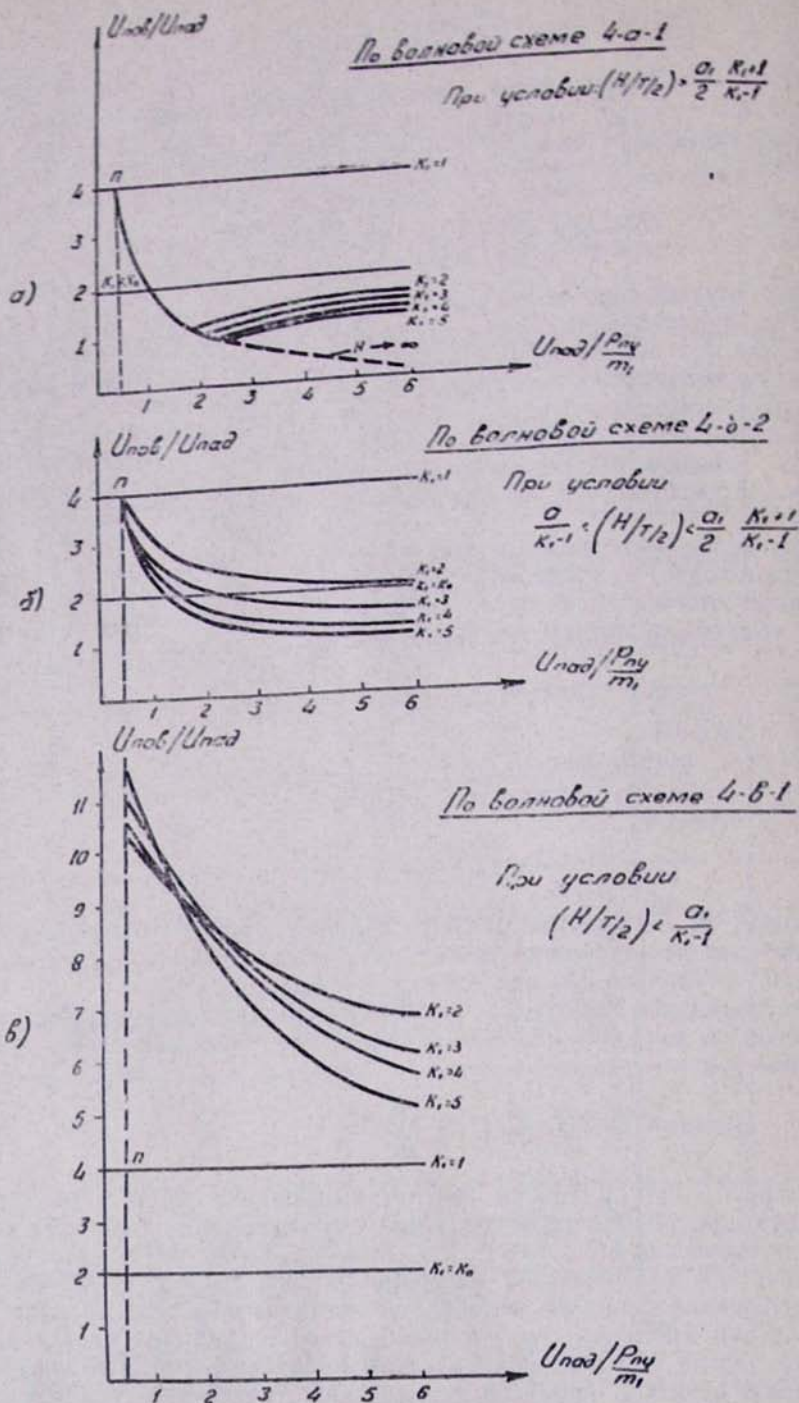


Рис. 5. Зависимость скорости колебания частиц из поверхности слоя ($U_{\text{гов}}$) от скорости колебания частиц падающей волны на нижнюю границу слоя ($U_{\text{под}}$):

$\kappa_1=1$ в упругом слое без учета интерференции;

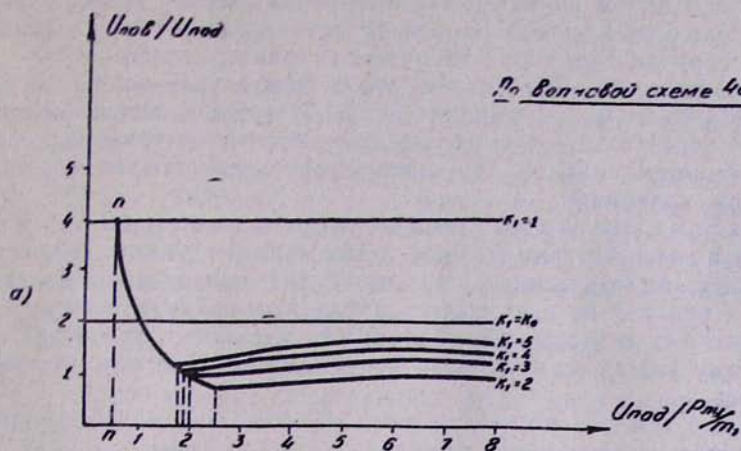
$\kappa_1=\kappa_0$ в случае, когда $H=0$ (H —толщина слоя);

$\kappa_1=2, 3, 4, 5$ в упруго-пластическом слое разного рыхлого состояния.

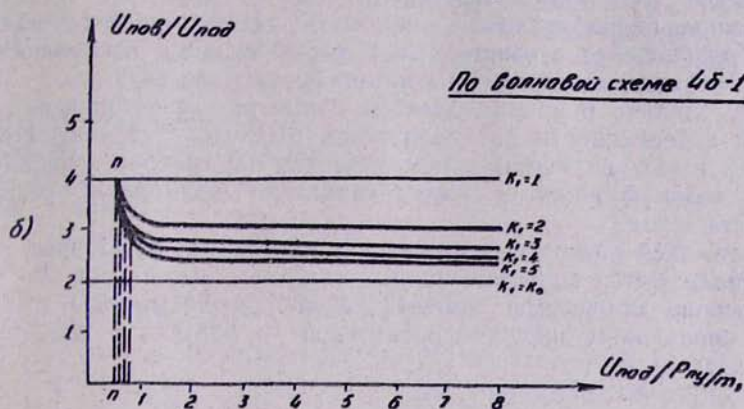
Примечание: при значении $U_{\text{под}}/\rho_{\text{нy}}/m_1 = n$ на нижней границе слоя

возникает первая пластическая волна

По волновой схеме 4а-2



По волновой схеме 4б-1



По волновой схеме 4б-1

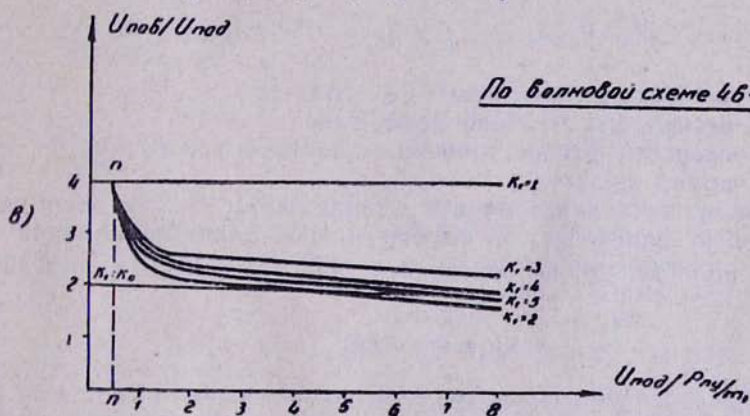


Рис. 6. Зависимость скорости колебания частиц на поверхности слоя ($U_{\text{пов}}$) от скорости колебания частиц падающей волны на нижнюю границу слоя ($U_{\text{под}}$):

$\kappa_1=1$ в упругом слое без учета интерференции;

$\kappa_1=\kappa_0$ в случае, когда $H=0$ (H —толщина слоя);

$\kappa_1=2, 3, 4, 5$ в упруго-пластическом слое разного рыхлого состояния

Примечание: при значении $U_{\text{под}}/\rho_{\text{пл}}/t_1 = n$ на нижней границе слоя

возникает первая пластическая волна

Однако в одном случае (рис. 5.в) наблюдается сильный разброс скорости колебания частиц на поверхности слоев малой толщины и большого периода падающих на нижнюю границу слоев.

Это явление объясняется тем, что в этом случае волны не успевают затухать из-за малой толщины слоя. Тем более они несколько раз пробегают через толщину слоя, складываются и поэтому на поверхности наблюдается сильное приращение интенсивности кинематических параметров колебания.

Остаточные деформации грунтов при сильных землетрясениях. Остаточные деформации грунтов, возникающие при сильных землетрясениях, наносят значительный ущерб населенным пунктам и различным наземным и подземным сооружениям.

Характер и размеры сейсмодеоформаций зависят от многих факторов, поэтому учесть их при проектировании зданий и сооружений пока не удалось.

Вместе с тем разработка вопроса об учете сейсмодеоформаций при строительстве чрезвычайно важна.

На основе разработанной методики с учетом расчета волновой схемы, образующейся в рыхлом слое, представляется возможность определить остаточные сейсмодеоформации по глубине слоя.

Чтобы сделать реальные выводы относительно приращения сейсмической интенсивности на поверхности рыхлого слоя, недостаточно определить только величины кинематических параметров колебания, не считается немаловажным и знание характера возможной осадки на поверхности слоя.

В настоящей работе для анализа и возможных остаточных деформаций используются волновые схемы, изображенные на рис. 4.

На основе диаграммы динамической сжимаемости и разгрузки (рис. 1) определяем значение остаточной деформации пластически областей:

$$\varepsilon_{\text{ост}}^{(i)} = \frac{k_i^2 - 1}{k_i^2} \cdot \frac{1}{m_2 \cdot a_2} (P_i - P_{\text{ну}}), \quad (15)$$

где P_i — действующее давление i -ой области;

ε_i — величина остаточной деформации;

a_i — скорость распространения пластической волны;

i — номер области.

Имея значение давления для данной области и определяя по соответствующей волновой схеме глубину пластических деформаций ($H_{\text{пл}}^{(i)}$) для i -ой области, можно определить значение осадки в пределах i -ой области:

$$\Delta_{\text{осд}}^{(i)} = \varepsilon_{\text{ост}}^{(i)} \cdot H_{\text{пл}}^{(i)}. \quad (16)$$

Для определения полной осадки на поверхности слоя для любого момента времени суммируются соответствующие осадки пластически областей по глубине слоя:

$$\Delta_{\text{осд}} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{\text{ост}}^{(i)} \cdot H_{\text{пл}}^{(i)}. \quad (17)$$

Практика показывает, что под действием землетрясений иногда поверхности рыхлых слоев осадка достигает нескольких десятков сантиметров [8]. Учет таких величин осадок, как известно, считается обязательным при проектировании зданий.

В результате краткого анализа можно сделать следующие выводы:

1. С учетом упруго-пластического характера грунта при сильных землетрясениях оцениваются особо важные параметры для сейсмостойкого строительства:

а) величины напряжений, при которых в грунте возникают упруго-пластические волны, вследствие чего происходит нарушение его прочности и проявляются остаточные деформации;

б) изменение сейсмической опасности на поверхности Земли при наличии упругих скальных пород в упруго-пластическом слое;

2. В настоящее время представляется возможным сделать сравнительную оценку изменения напряженного состояния по глубине слоя и интенсивности колебания на поверхности слоя в случае замены упругой модели грунта упруго-пластической.

3. Наглядно изучено напряженно-деформированное состояние излоного слоя с учетом отражения и преломления волны на нижней границе и изложен метод определения возможной величины осадки слоя.

4. Подобный метод расчета напряженно-деформированного состояния в упруго-пластическом слое может быть использован и для земляных сооружений (плотин большой протяженности) в эпицентральных зонах сильных землетрясений.

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

ЛИТЕРАТУРА

Алексеев В. Д., Григорян С. С., Кошелев Н. А. и др. Измерение волн напряжений в мягких грунтах. «Прикладная математика и теоретическая физика», № 2, 1963.

Васильев Ю. Н. и др. Опыт измерения деформаций грунта при землетрясениях. «Физика Земли», № 11, 1972.

Васильев Ю. Н. и др. Измерение напряжений и деформаций в грунте при распространении взрывных волн. Изд. АН СССР, «Физика Земли», № 1, 1969.

Григорян С. С. Об основных представлениях динамики грунтов. ПММ, т. 24, вып. 6, 1960.

Зволенский Н. В., Рыков Г. В. Отражение плоской волны и преломление ее на границе двух полупространств. ПММ, т. 23, 1965.

Красников Н. Д. Исследования для сейсмомикрорайонирования площадок строительства с учетом упруго-пластических свойств грунтов. Тр. ИФЗ АН СССР, Сб. «Вопросы инженерной сейсмологии», вып. II, 1976.

Ляхов Г. М., Полякова Н. И. Волны в плотных средах и нагрузка на сооружения. М., изд. «Недра», 1967.

Медведев С. В., Карапетян В. К., Быховский В. А. Сейсмическая нагрузка на здания и сооружения. М., изд. литературы по строительству, 1968.

Рахматуллин Х. А., Согомонян А. Я., Алексеев Н. А. Вопросы динамики грунтов. М., МГУ, 1964.

Рахматуллин Х. А., Демьянов Ю. А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках. М., Госизд. физ.-мат. лент, 1961.

Синицын А. П. Практические методы расчета сооружений на сейсмические нагрузки. М., изд. литературы по строительству, 1967.