

УДК 699.841

ИНЖЕНЕРНАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ

Э. Е. Хачиян

К исследованию сейсмического воздействия на сооружение
 с учетом его протяженности

(Представлено академиком АН Армянской ССР А. Г. Назаровым 17/II 1975)

1. При обычных расчетах сооружений на сейсмические воздействия в качестве расчетной схемы принимается консольный брус со сосредоточенными массами. При этом предполагается, что все основание под сооружением одновременно получает одни и те же ускорения и перемещения, и сейсмическое возмущение мгновенно распространяется по его высоте. Для сооружений незначительных размеров, возводимых на скальных грунтах, такая расчетная схема может считаться вполне приемлемой.

Однако для зданий и сооружений, имеющих в плане значительную протяженность и большую высоту такая расчетная схема неточно отражает действительную картину динамического поведения конструкции и может привести к существенным погрешностям.

Из-за сложности задачи пока не имеются практические рекомендации по учету протяженности и немгновенного распространения сейсмического возмущения при расчетах на сейсмическое воздействие. Различным аспектам приближенного учета влияния протяженности (в плане) посвящены работы (1-3) и др. По вопросу немгновенного распространения сейсмического возмущения по высоте, насколько нам известно, нет данных. Между тем, как показывают наши экспериментальные исследования и результаты, приведенные в работе (4), значения скоростей распространения ударной волны по высоте здания изменяются в пределах 200—1000 м/сек, что значительно меньше значения скорости распространения поперечных волн в отдельных элементах конструкций. Это явление, по-видимому, следует объяснить наличием в зданиях структурных неоднородностей в виде перекрытий, проемов, различных стыков и соединений, которые существенно изменяют картину распространения поперечных волн. Поэтому при расчетах сооружений на сейсмические воздействия необходимо учитывать конечную величину скорости (вместо бесконечной) распространения поперечных волн.

В настоящей статье выведены уравнения движения линейного осциллятора при учете протяженности сооружения в плане. Вопросы учета немгновенности распространения поперечных волн по высоте сооружения здесь не рассматриваются.

2. Будем считать, что различные точки основания сооружения в данный момент времени испытывают различные смещения и ускорения. Обозначим ускорения точек основания через $y_0(t, x)$. В настоящее время, пока отсутствуют записи ускорения и смещения грунта близких друг к другу точках грунта, поэтому судить о характере $y_0(t, x)$ нет возможности. Учитывая также, что длина сооружения в плане значительно меньше, чем эпицентральное расстояние, будем считать, что распространяющееся сейсмическое возмущение, оставаясь постоянным, доходит до данной точки основания сооружения с определенной скоростью v , величина которой зависит от грунтовых условий данной местности. В таком предположении функцию ускорения $y_0(t, x)$ можно представить в виде $y_0^*(t - \frac{x}{v})$. Для получения спектра сейсмических реакций с учетом протяженности сооружения, рассмотрим простую рамную систему с одной степенью свободы (рис. 1.а). Для упрощения будем считать ригель

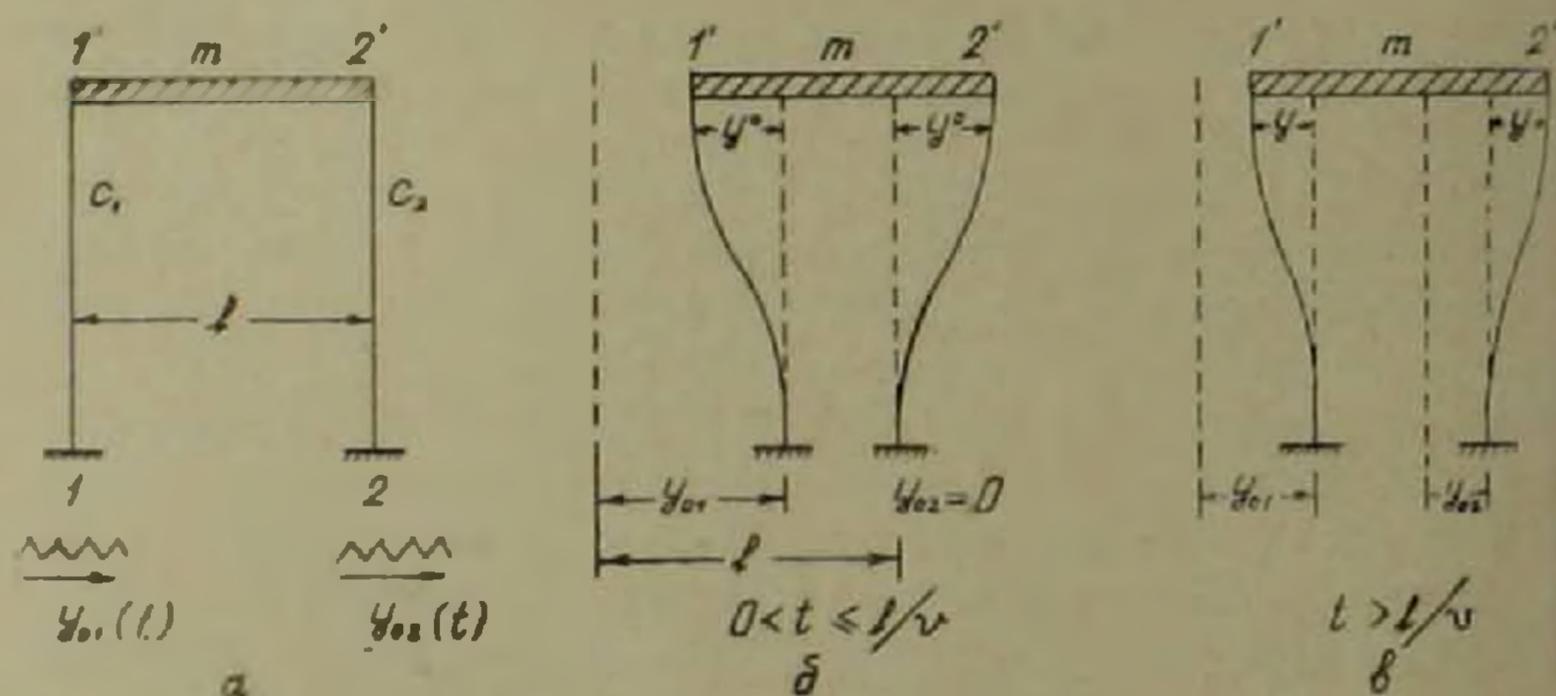


Рис. 1

рамы абсолютно жестким с массой m и совершающим поступательные перемещения. Жесткости стоек соответственно обозначим через c_1 и c_2 , а расстояние между стойками — через l . В общем случае будем считать, что левая опора рамы колеблется с законом $y_{01}(t)$, а правая — $y_{02}(t)$. Будем считать, что сейсмическая волна распространяется от левой опоры к правой со скоростью v . В промежутке времени $0 < t < \frac{l}{v}$ кинематическая схема движения системы будет иметь вид, показанный на рис. 1,б. Абсолютное перемещение инертной массы (ригеля) в этом случае будет $y_{01} - y^0$, где y^0 — деформация системы.

Согласно принципу Даламбера для составления уравнения равновесия необходимо к массе приложить реакции от перемещения опор и силу инерции $-m(y_{01} - y^0)''$. Реакция от перемещения нижней левой опоры 1 (рис. 1,а) на уровне верхней точки 1' (на уровне массы) будет $+c_1 y_1$, от перемещения верхней точки 1' на том же уровне $-c_1(y_{01} - y)$, и от перемещения верхней точки 2': $-c_2(y_{01} - y)$. Поэтому уравнение равновесия будет иметь вид

$$-m(y_{01} - y^0)'' + c_1 y_1 - c_1(y_{01} - y) - c_2(y_{01} - y) = 0$$

или

$$m y^0'' + (c_1 + c_2) y^0 - c_2 y_{01} = m y_{01}'' \quad (1)$$

При этом $y^0 = 0$, $y^{0'} = 0$, когда $t = 0$.

После момента $t > \frac{l}{v}$, когда правая опора также начнет перемещаться, кинематическая схема будет иметь вид, показанный на рис. 1в. В этом случае абсолютное перемещение системы будет $y_{01} - y$, где y — деформация системы. Сила инерции, как и до $t < \frac{l}{v}$, будет $-m(y_{01}'' - y'')$, а реакции на уровне массы от перемещения опор будут: левой нижней опоры $+c_1 y_{01}$, левой верхней опоры $-c_1(y_{01} - y)$, правой нижней опоры $+c_2 y_{02}$ и правой верхней опоры $-c_2(y_{01} - y)$ (так как точки 1' и 2' должны иметь одинаковое перемещение). Следовательно, уравнение равновесия будет иметь вид

$$-m(y_{01} - y)'' + c_1 y_{01} - c_1(y_{01} - y) + c_2 y_{02} - c_2(y_{01} - y) = 0$$

или

$$m y'' + (c_1 + c_2) y + c_2(y_{02} - y_{01}) = m y_{01}'' \quad (2)$$

При этом $t = \frac{l}{v}$, $y = y_0$, $y' = y_0'$

Если предположить, что обе опоры вовлекаются в движение одновременно с одинаковым законом $y_{01} = y_{02}$, то из уравнения (2) получим обычное уравнение линейного осциллятора, применяемое в инженерной сейсмологии. Принимая жесткости стоек $c_1 = c_2 = c$ (как это часто имеет место), а поглощение энергии при колебаниях по эквивалентной гипотезе Фойгта^(5,6), и учитывая вышесказанное подставляя

$$y_{02}(t) = y_{01}\left(t - \frac{l}{v}\right) = y_0\left(t - \frac{l}{v}\right)$$

из (2) получаем*

$$y'' + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 y + \frac{2\delta}{T} y' = y_0''(t) - \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \left[y_0\left(t - \frac{l}{v}\right) - y_0(t) \right] \quad (3)$$

где T — период свободных колебаний;

δ — декремент колебания.

Общее решение уравнения (3) будет:

* Поглощением энергии, связанным с реакцией перемещения опор, пренебрегаем.

$$y = e^{-\frac{\delta}{T}t} \left(y^0 \cos \frac{2\pi}{T} t + \frac{y^{0'} + \frac{\delta}{T} y^0}{\frac{2\pi}{T}} \sin \frac{2\pi}{T} t \right) + \frac{T}{2\pi} \int_0^t \left\{ y_0''(\xi) + \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \left[y_0(\xi) - y_0 \left(\xi - \frac{l}{v} \right) \right] \right\} e^{-\frac{\delta}{T}(t-\xi)} \sin \frac{2\pi}{T}(t-\xi) d\xi \quad (4)$$

где y^0 и $y^{0'}$ вычисляются из первоначального уравнения (1).

Таким образом, как видно из выведенных формул, при учете протяженности сооружения его напряженно-деформированное состояние будет зависеть не только от ускорения грунта (акселерограммы), но и от его перемещения (сейсмограммы). Кроме того, как видно из (4), дополнительные напряжения и перемещения, связанные с протяженностью сооружения зависят не только от длины сооружения и скорости распространения сейсмической волны на данном грунтовом участке, но и от периода свободных колебаний самого сооружения.

3°. По предыдущим результатам аналогично можно исследовать сейсмические колебания одноэтажной рамы с n стойками, расположенными на расстоянии l_k (рис. 2). Когда сейсмическая волна в момент

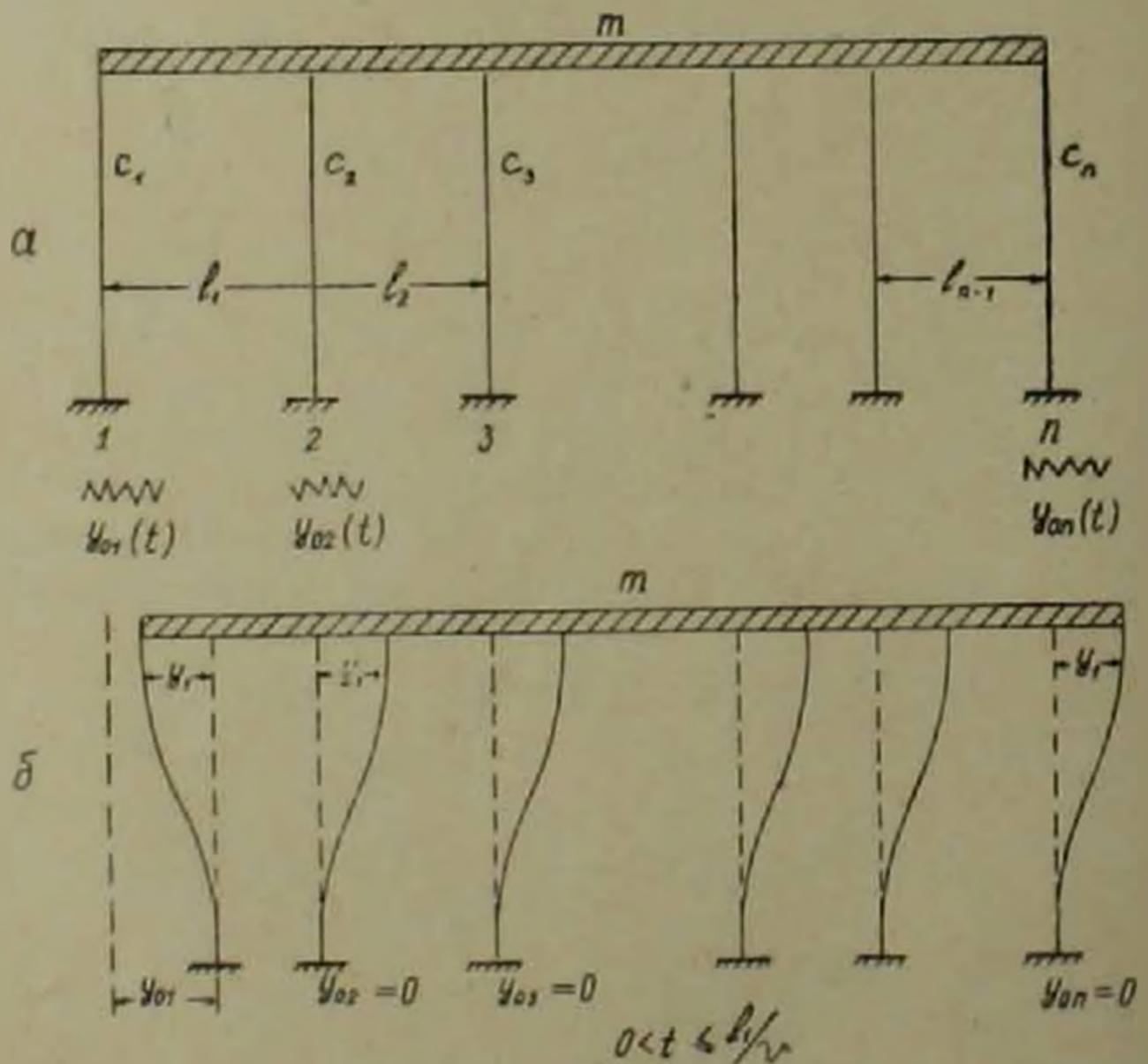


Рис. 2

времени $t_k = \frac{\sum_{i=1}^k l_i}{v}$ достигает k -ой опоры, движение системы будет выражаться уравнением

$$-m(y_{0i} - y_k) + \sum_{i=1}^k c_i y_{0i} - \sum_{i=1}^n c_i (y_{0i} - y_k) = 0 \quad (5)$$

$k = 1, 2, \dots, n-1$

с начальными условиями

$$\text{при } t_k = \frac{\sum_{i=1}^k l_i}{v}, \quad y_k = y_{k-1}, \quad y_k' = y_{k-1}', \quad k = 1, 2, \dots, n-1$$

После момента $t = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{v}$, когда сейсмическая волна достигнет крайней опоры (вовлечься в движение все опоры) уравнение движения будет иметь вид

$$-m(y_{0i} - y'') + \sum_{i=1}^n c_i y_{0i} - \sum_{i=1}^n c_i (y_{0i} - y) = 0, \quad (6)$$

где через y обозначена деформация системы после прохождения сейсмической волны через все основание сооружения. Начальные условия для уравнения (6) будут:

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{v}, \quad y = y_{n-1}, \quad y' = y_{n-1}'$$

При выводе вышеприведенных уравнений движения не учитывалось поглощение колебания. По эквивалентной гипотезе вязкого сопротивления этот учет не представляет особых затруднений, как это было в случае однопролетной рамы. Так как время прохождения сейсмической волны под сооружением, т. е. $\sum_{i=1}^n l_i/v$, значительно меньше, чем продолжительность всего землетрясения, то влиянием затухания колебаний за это время можно пренебречь.

Таким образом, до момента $t = \sum_{i=1}^n l_i/v$ движение системы будет выражаться уравнением типа (5) со стыкующими начальными условиями. После прохождения волны, учитывая малость $\sum_{i=1}^n l_i$ по сравнению с эпицентральной расстоянием, т. е. принимая

$$y_{0i}(t) = y_0 \left(t - \frac{\sum_{i=1}^k l_{i-1}}{v} \right),$$

уравнение движения системы (6) с учетом затухания можно представить в виде

$$y'' + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 y + \frac{2\delta}{T} y' = y_0''(t) + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n c_i \left[y_0(t) - y_0\left(t - \frac{\sum_{k=1}^i l_{k-1}}{v}\right) \right], \quad (7)$$

где T — период свободных колебаний системы

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n c_i}{m}}.$$

4. В некоторых случаях практические рекомендации можно получить путем осреднения ускорения грунта и приписания его ко всему основанию сооружения, т. е. принимая в качестве исходного ускорения грунта выражение

$$y_0''^{cp}(t) = \frac{1}{l/v} \int_0^{l/v} y_0''(t-\xi) d\xi. \quad (8)$$

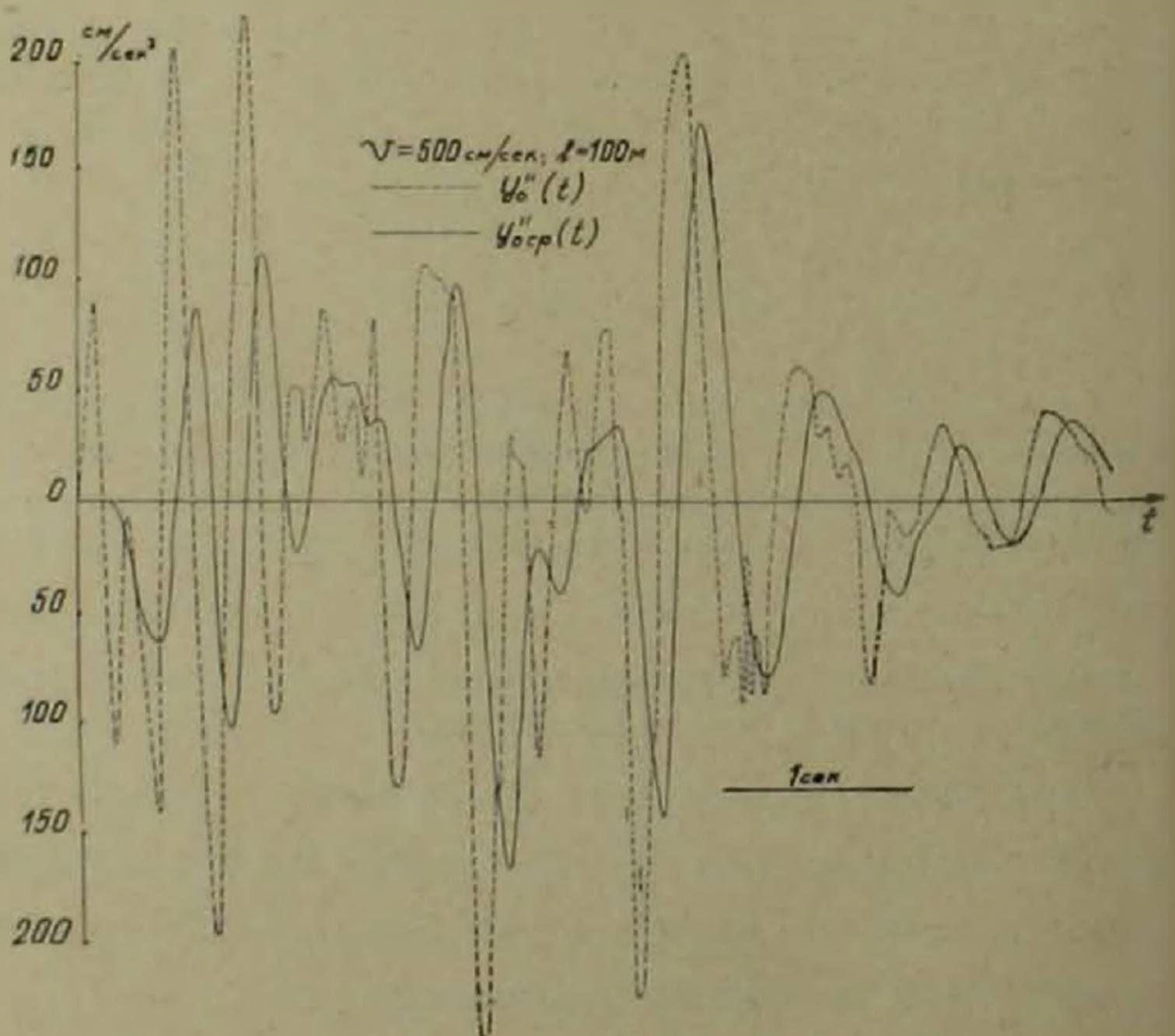


Рис. 3

При гармоническом законе для $y_0'' \left(t - \frac{x}{v} \right)$ максимальные значения интеграла (8) исследованы И. Л. Корчинским и А. А. Петровым (17).

Практический интерес представляет исследование интеграла (8) по реальным записям ускорения грунта. Для некоторых акселерограмм землетрясений были определены значения $y_0''(t)$ путем численного интегрирования (рис. 3). По полученным результатам на рис. 4 построены

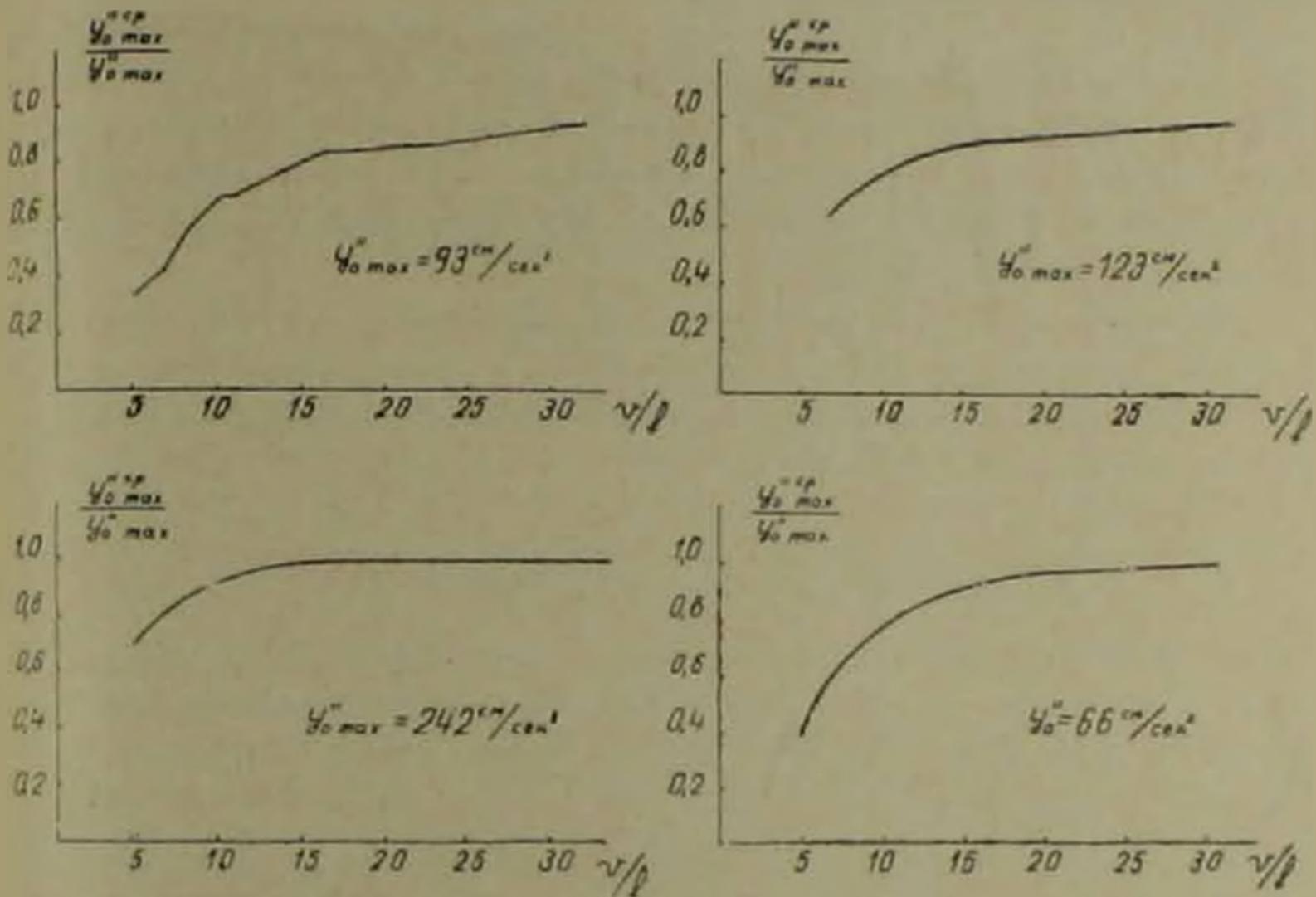


Рис. 4

зависимости $y_0''^{cp} / y_0''_{max}$ от отношения v/l , которые показывают, что влияние протяженности существенно только для таких сооружений и грунтов, для которых отношение $v/l < 10$, при $v/l > 10$ влиянием протяженности можно пренебречь. Поскольку при осреднении частотная характеристика акселерограммы изменяется незначительно (рис. 3), то для реакций сооружения также будет иметь место аналогичное явление.

Армянский научно-исследовательский институт
строительства и архитектуры

Է. Ն. ԿԱՅԻՅԱՆ,

Կառուցվածքների վրա սեյսմիկ ազդեցության մատմնասիրության շուրջը
նրանց ձգվածության հաշվարկմամբ

Սեյսմիկ ուժերի ազդեցության տակ կառուցվածքների հաշվարկման ժամանակ ընդունվում է, որ կառուցվածքի հիմքի բոլոր կետերը ստանում են

միևնույն արագացումները և տեղափոխությունները։ Այժմ շափսեր ունեցող կառուցվածքների համար, որոնք տեղադրվում են ապաստանին բնահողերի վրա այդպիսի հարցադրումը համարվում է բնորոշ։ Սակայն որոշ կառուցվածքների, որոնք հատակագծում բավական ձգվածություն ունեն և տեղադրվում են համեմատաբար փափուկ բնահողերի վրա, այդպիսի հաշվարկային սխեման կարող է բերել հրկրաշարժի ժամանակ կառուցվածքների տատանման իրական պատկերի աղավաղմանը։

Հողվածում ստացված է հատակագծում բավականին ձգվածություն ունեցող կառուցվածքների երկրաշարժի դեպքում տատանման հավասարումները՝ բնորոշելով, որ հիմքի տարրեր կետերը շարժվում են տարբեր օրենքներով։ Ստացված դիֆերենցիալ (3) հավասարումը ցույց է տալիս, որ այս դեպքում երկրաշարժից կառուցվածքում առաջացած իներցիոն ուժերը և դեֆորմացիաները կախված են ոչ միայն գետնի տատանման արագացումներից, այլև նրա տեղափոխություններից ու հիմք հանդիսացող բնահողում սեյսմիկ ալիքների տարածման արագությունից։

Կատարված հաշվարկումները ցույց են տալիս, որ եթե բնահողում սեյսմիկ ալիքների տարածման արագության և կառուցվածքի երկարության հարաբերությունը մեծ է 10-ից, ապա կառուցվածքի ձգվածության ազդեցությունը կարելի է արհամարել։

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

- ¹ И. Г. Корчинский, Л. А. Бородин, Гроссман и др., Сейсмостойкое строительство зданий, Госстройиздат, М., 1971. ² А. П. Симицын, Труды Института физики Земли АН СССР, № 17, 1961. ³ Ш. Г. Нупетваридзе, Труды Института строительной механики и сейсмостойкости АН ГССР, т. IX, 1963. ⁴ Е. С. Медведева, Труды Института физики Земли АН СССР, № 36, 1965. ⁵ А. Г. Назиров, Метод инженерного анализа сейсмических сил, Изд. АН Армянской ССР, Ереван, 1959. ⁶ Э. Е. Хичиян, Сейсмические воздействия на высотные здания и сооружения, изд. «Айастан», Ереван, 1971. ⁷ А. А. Петров, «Строительство и архитектура Узбекистана», № 4, 1967.