

СВОЙСТВА ЛЬДА И МЕРЗЛЫХ ПОРОД

УДК 551.341;500.3

ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДУЛЯ УПРУГОСТИ  
МЕРЗЛЫХ И ТАЛЫХ ГРУНТОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ  
СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

О. К. Воронков

*ОАО Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева,  
195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 21, Россия*

Предлагается методика корректировки значений динамического модуля упругости  $E_d$  грунтов, определяемого сейсморазведкой в условиях малых амплитуд деформаций ( $\varepsilon = 10^{-6}..10^{-3}\%$ ), применительно к условиям сильных низкочастотных землетрясений ( $\varepsilon = 10^{-3}..10^{-1}\%$ ). Установлено, что чем ниже абсолютное значение  $E_d$  грунтов, определенное сейсморазведкой, тем в большее число раз оно отличается от значения  $E_d$  по данным динамических методов, но в условиях больших амплитуд деформаций. В неуплотненных и слабоуплотненных дисперсных грунтах (пески и др.) отношение рассматриваемых модулей упругости может достигать 5 и более раз, а в монолитных скальных породах оно приближается к 1. В мерзлых глинистых грунтах это отношение близко к 2.

*Сильные землетрясения, динамический модуль упругости, мерзлые и талые грунты, сейсморазведка, корректировка*

ESTIMATES OF THE VALUES OF SOIL DYNAMIC ELASTICITY MODULUS IN FROZEN  
AND THAW SOILS AS APPLIED TO THE STRONG EARTHQUAKES' CONDITIONS

O. K. Voronkov

*Vedeneev National Research Institute of Hydraulic Engineering, 195220, St.-Petersburg, Gzhatskaya str., 21, Russia*

A procedure is suggested for adjustment of the values of soil dynamic elasticity modulus  $E_d$  determined by seismic survey under low strain amplitudes ( $\varepsilon = 10^{-6}..10^{-3}\%$ ), to be adapted to strong low frequency earthquakes ( $\varepsilon = 10^{-3}..10^{-1}\%$ ). It has been established that the lower the absolute value of  $E_d$  determined by seismic survey the more the difference from  $E_d$  according to dynamic procedures but in the conditions of greater strain amplitudes. In unconsolidated or poorly consolidated disperse soils (sands, etc), the ratio between the above elasticity moduli may amount to or exceed 5, while it approaches 1 in monolithic rock, and  $\approx 2$  in unfrozen clay soils.

*Strong earthquakes, dynamic elasticity modulus, frozen and thaw soils, seismic survey, adjustment*

ВВЕДЕНИЕ

Метод сейсморазведки, позволяющий в натуральных условиях оперативно определять значения скоростей продольной  $v_p$  и поперечной  $v_s$  волн, на сегодня является основным методом оценки динамических характеристик деформируемости грунтовых плотин и их оснований в натуральных условиях. Как известно, значения динамических характеристик деформируемости — модуля упругости  $E_d$ , модуля сдвига  $G_d$ , коэффициента Пуассона  $\mu_d$  и др., определенных сейсмо-акустическими методами (сейсморазведка, акустика, ультразвук), соответствуют упругим малым деформациям при кратковременных знакопеременных напряжениях малой величины (доли кПа). В области значительных напряжений и амплитуд деформаций, характерных для

условий сильных землетрясений, нарушается линейный характер связи деформаций и напряжений. Поэтому основное ограничение метода сейсморазведки при решении данной задачи состоит в том, что динамические характеристики, определенные этим методом (преобладающие частоты  $f_{np} = 20..100$  Гц, амплитуда деформаций  $\varepsilon = 10^{-6}..10^{-3}\%$ ) в общем случае, могут отличаться от таковых в условиях сильных землетрясений и взрывных воздействий ( $f_{np} = 0,5..5$  Гц и  $\varepsilon = 10^{-2}..1,0\%$ ).

Лабораторные динамические испытания грунтов позволяют реализовать условия относительно высоких значений напряжений ( $10^5..10^7$  Па) и амплитуд деформаций ( $10^{-3}..10^{-1}\%$ ), характерных для условий землетрясений. Основной недостаток лабораторных испытаний обус-

ловлен невозможностью сохранить естественную структуру грунта, его свойства, естественные условия дренирования, естественное напряженное состояние, неопределенностью в этом случае масштабного коэффициента для перехода от характеристик образцов к характеристикам массива и др.

Поэтому Ф. Рихарт [Richart, 1975] и Н. Д. Красников [1981] рекомендовали комплексировать полевой и лабораторный методы, получить соответствующие графики  $E_d(\epsilon)$  с перекрытием значений  $E_d$  в некотором диапазоне  $\Delta\epsilon$ , а затем экстраполировать „сейсморазведочный“ модуль  $E_{d(c/p)}$  на „сейсмологическую“ область, т. е. привести к значению  $E_{d(c/n)}$ . Эта корректировка, по мнению авторов, может осуществляться двояко:

1) в предположении, что величина разности между модулями  $\Delta E_d$ , определенными сейсморазведкой и в лаборатории, постоянна, а следовательно, график  $E_{d(c/p)} = f(\epsilon)$  можно экстраполировать на область сейсмологических значений  $\epsilon$  путем изменения ординаты лабораторной кривой на величину  $\Delta E_d$ ;

2) в предположении, что отношение модулей  $E_d$ , определенных в полевых и в лабораторных условиях (при одном и том же значении  $\epsilon$ ), постоянно; используя этот постоянный коэффициент, можно трансформировать лабораторную кривую  $E_d = f(\epsilon)$  в кривую  $E_{d(c/p)} = f(\epsilon)$  до значений  $E_{d(c/n)}$ .

Использование такой двоякой корректировки приводило к существенно разным значениям  $E_{d(c/n)}$ .

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СВЯЗИ „СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНОГО“  $E_{d(c/p)}$  И „СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО“  $E_{d(c/n)}$  МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ ГРУНТОВ**

Как известно, при нагружении грунтовой среды связь напряжения  $\sigma$  с деформацией  $\epsilon$  в широком диапазоне  $\epsilon$  (например, при  $\epsilon \geq 10^{-6} \dots 1,0 \%$ ) отлична от линейной (закона Гука), и в общем случае описывается степенной функцией вида:

$$\sigma = \alpha \epsilon^\beta, \tag{1}$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — константы для данной породы и конкретных условий нагружения (скорость нагружения, максимальная нагрузка), для разных грунтов основной диапазон изменения  $\beta = 0,1 \dots -0,9$  (очевидно, что при  $\beta = 1$  закон Гука выполняется).

В частном случае (при среднем  $\beta = 0,5$ ) эта связь описывается параболой (рис. 1):

$$\sigma^2 = \alpha' \epsilon, \tag{2}$$

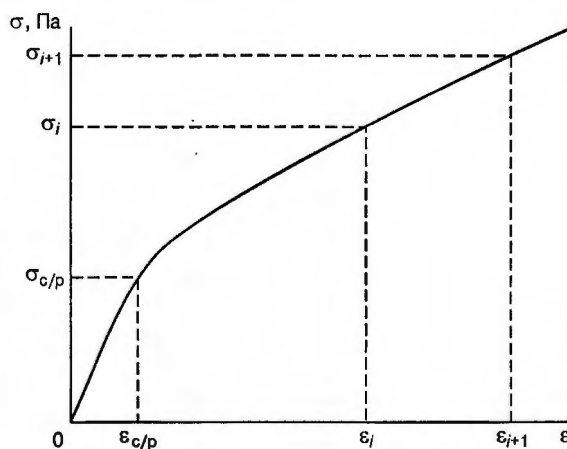


Рис. 1. Нелинейная связь „напряжение  $\sigma$ —деформация  $\epsilon$ “ при нагружении грунтовой среды.

где  $\alpha' = \text{const}$  для данного грунта в конкретных условиях нагружения.

С некоторой условностью полагаем, что „сейсморазведочный“ модуль упругости  $E_{d(c/p)}$  (или „начальный“ модуль по Н. Д. Красникову), определяемый в области малых напряжений и деформаций (в упругой области), можно записать:

$$E_{d(c/p)} = \frac{\sigma_{c/p}}{\epsilon_{c/p}}. \tag{3}$$

Подставляя (3) в (2), получим:

$$E_{d(c/p)} \sigma_{c/p} = \alpha. \tag{4}$$

„Сейсмологический“ модуль (или „мгновенный“ модуль по Н. Д. Красникову), отвечающий области упругопластической деформации (см. рис. 1), определяется как:

$$E_{d(c/n)} = \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{\epsilon_{i+1} - \epsilon_i}. \tag{5}$$

Из уравнения (2) следует:

$$\sigma_{i+1}^2 = \alpha' \epsilon_{i+1}, \tag{6}$$

$$\sigma_i^2 = \alpha' \epsilon_i. \tag{7}$$

Вычитая левые и правые части (7) из (6), получаем:

$$\sigma_{i+1}^2 - \sigma_i^2 = \alpha'(\epsilon_{i+1} - \epsilon_i) \tag{8}$$

или

$$(\sigma_{i+1} + \sigma_i)(\sigma_{i+1} - \sigma_i) = \alpha'(\epsilon_{i+1} - \epsilon_i). \tag{8a}$$

Подставляя (4) и (5) в (8a), получаем:

$$E_{d(c/n)} = \frac{E_{d(c/p)} \sigma_{c/p}}{\sigma_{i+1} + \sigma_i}. \tag{9}$$

Величины  $\sigma_{i+1}$  и  $\sigma_i$  одного порядка, а учитывая, что они много больше значения  $\sigma_{c/p}$ , при-

ближенно примем, что  $\sigma_i \approx \sigma_{i+1} \equiv \sigma_{c/l}$ . Поэтому из (9) следует:

$$E_{д(c/l)} \approx 0,5 E_{д(c/p)} \frac{\sigma_{c/p}}{\sigma_{c/l}} \quad (10)$$

Полученное выражение (10) свидетельствует о возможном существовании функциональной связи значений  $E_{д(c/l)}$  и  $E_{д(c/p)}$ . Вместе с тем следует отметить, что нормальное напряжение в упругой волне прямо пропорционально относительному ускорению грунта, его плотности, преобладающему периоду и скорости продольной волны. Следовательно, отношение  $\sigma_{c/p}/\sigma_{c/l}$  в неявном виде (через скорость волны) зависит от величины модулей упругости грунта в „сейсморазведочном“ и „сейсмологическом“ диапазонах.

Изложенное выше указывает на целесообразность поиска связей значений  $E_{д(c/l)}$  и  $E_{д(c/p)}$  на основе данных экспериментальных исследований.

### КОРРЕКТИРОВКА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СКАЛЬНЫХ И НЕСКАЛЬНЫХ ПОРОД (КРОМЕ НЕМЕРЗЛЫХ ГЛИНИСТЫХ)

Методика предлагаемой корректировки. Остановимся на предлагаемой нами корректировке значений  $E_d$  применительно к расчетам напряженно-деформированного состояния сооружения вместе с основанием с учетом сейсмических нагрузок.

Задача исследования сводилась к обобщению известных на сегодня немногочисленных примеров определения  $E_{д(c/p)}$  и  $E_{д(c/l)}$  для одних и тех же пород (объектов) либо для близких аналогов. При этом в качестве  $E_{д(c/p)}$  мы принимали значения  $E_d$ , определенные по скорости упругих волн не только сейсморазведкой, но и другими динамическими методами (например, ультразвуковым и резонансным) изучения мерзлых грунтов [Вовк и др., 1980; Винсон, 1983], однако при соблюдении условия:  $\epsilon < 10^{-3}\%$ .

Соответственно в качестве  $E_{д(c/l)}$  принимались значения  $E_d$ , определенные любыми динамическими методами в условиях больших амплитуд деформаций ( $\epsilon \geq 10^{-2}\%$ ).

Очевидно, что в рамках линейной теории упругости  $E_{д(c/l)} = E_{д(c/p)}$ , однако известные на сегодня экспериментальные данные, обобщенные нами в табл. 1, свидетельствуют, что  $E_{д(c/p)} \geq E_{д(c/l)}$  и это общем случае обусловлено нелинейным характером связи „напряжение  $\sigma$ —деформация  $\epsilon$ “. Отметим некоторую условность самой характеристики  $E_{д(c/l)}$ , поскольку рассматриваемый нелинейный процесс описывается с использованием привычной линейной характеристики — модуля упругости, определяемого при различных амплитудах деформации (и соответственно — при разных напряжениях и частотах).

Ориентируясь на вид уравнения (10) и учитывая большой диапазон изменения реальных значений  $E_d$  — 3—4 порядка (см. табл. 1), мож-

Таблица 1.

Значения „сейсморазведочного модуля“  $E_{д(c/p)}$  при  $\epsilon \leq 10^{-3}\%$  и „сейсмологического модуля“  $E_{д(c/l)}$  при  $\epsilon \approx 10^{-2} \dots 10^{-1}\%$

Порода и ее состояние	$E_{д(c/p)}$ , МПа	$E_{д(c/l)}$ , МПа	Источник
Песок (г. Подпорожье, Ленингр. обл.), немерзлый, при вертикальной нагрузке $\sigma = 0,05$ МПа (виброкомпрессионные опыты)	160	30	[Музафаров и др., 1981]
То же, при $\sigma = 0,1$ МПа	260	80	»
То же, при $\sigma = 0,2$ МПа	480	160	»
Каменная наброска и щебенистый материал (средние значения $E_d \approx 2,5G_d$ ) грунтов тела следующих плотин: Чарвакская, Нурекская, Храмская I, Ортогокойская, Карачуновская	1650	915	[Красников, 1981]
Галечно-гравелистый материал плотин: Сионская, Иркутская	1250	750	[Красников, 1981] [Джурик и др., 1999]
Песок (песчано-намывная Кременчугская плотина)	450	120	[Красников, 1981]
Суглинок сезонномерзлый (средние значения при $t \approx -5$ °С)	6400	5140	[Вовк и др., 1980]
Щебень льдонасыщенный (средние значения при $t = -10$ °С)	28 000	18 000	[Воронков, 1992; Хорьков и др., 1990]
Песок мерзлый (средние значения при $t = -4$ °С)	10 400	4900	[Винсон, 1983]
Пылеватый и глинистый мерзлые грунты (средние значения при $t = -4$ °С)	6300	2210	[Винсон, 1983]
Образцы скальных пород, немерзлые (для средних условий различие $E_d$ оценивается максимальной величиной 19 %)	$\approx 50 000$	41 500	[Савич, Яценко, 1979]
Монолитные скальные породы с низким декрементом поглощения	80 000	78 500	[Савич и др., 1969]
$\Delta \leq 0,02$ (теоретические оценки, по В. Футерману)	100 000	100 000	

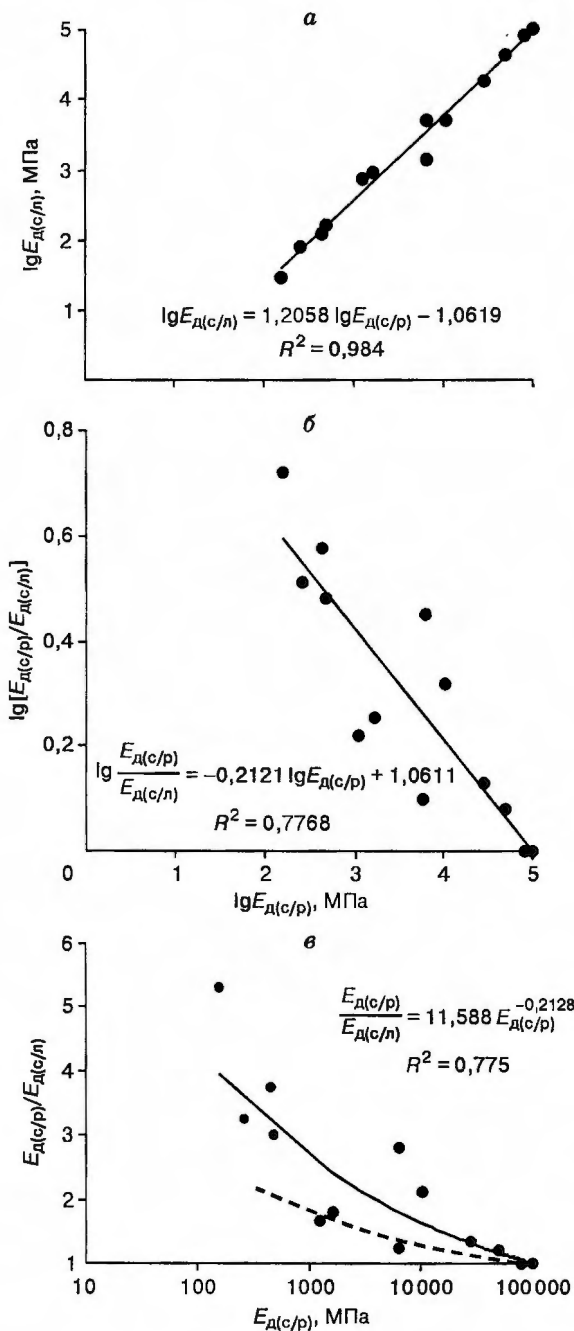


Рис. 2. К оценке динамического модуля упругости грунтов  $E_{d(c/n)}$  (применительно к условиям сильных землетрясений при амплитудах деформаций  $\epsilon = 10^{-2} \dots 10^{-1}\%$ ) на основе определенной сейсморазведкой динамического модуля  $E_{d(c/p)}$  (при  $\epsilon = 10^{-4} \dots 10^{-3}\%$ ).

а—в — варианты эмпирических связей;  $R$  — коэффициент корреляции (корреляционное отношение). Пунктирная линия — теоретическая оценка по дисперсионному соотношению В. Футгермана.

но предложить поиск корреляционных связей  $E_{d(c/n)}$  и  $E_{d(c/p)}$  в трех вариантах (рис. 2):

$$\lg E_{d(c/n)} = f [\lg E_{d(c/p)}], \quad \lg \frac{E_{d(c/p)}}{E_{d(c/n)}} = f [\lg E_{d(c/p)}],$$

$$\frac{E_{d(c/p)}}{E_{d(c/n)}} = f [E_{d(c/p)}].$$

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наиболее тесная связь (близкая к функциональной зависимости, поскольку коэффициент корреляции  $R = 0,992$ ) оказалась в первом варианте (рис. 2,а):

$$\lg E_{d(c/n)} = 1,2058 \lg E_{d(c/p)} - 1,0619 \quad (11)$$

или

$$E_{d(c/n)} = \frac{E_{d(c/p)}^{1,2058}}{11,5} \approx 0,087 E_{d(c/p)}^{1,21} \quad (11a)$$

Уравнение получено в диапазоне изменения аргумента  $E_{d(c/p)} = 160 \dots 100\,000$  МПа. Оно справедливо как для дисперсных (кроме глинистых), так и для скальных грунтов, которые могут находиться в различных состояниях (талом, мерзлом). Отметим, что эмпирические связи (11) и (11а) качественно не противоречат полученному выше уравнению (10) и пояснениям к нему.

Из рассмотрения рис. 2,б следует важный вывод: чем ниже абсолютное значение  $E_{d(c/p)}$ , тем большее число раз отличаются  $E_{d(c/p)}$  и  $E_{d(c/n)}$ . Таким образом, в неуплотненных или слабоуплотненных дисперсных грунтах при положительной температуре это различие может быть в 5 и более раз, а в монолитных скальных основаниях (при  $E_{d(c/p)} \geq 50\,000$  МПа) отношение  $E_{d(c/p)}/E_{d(c/n)}$  не превышает 1,2, причем это отношение уменьшается с ростом модуля упругости основания.

Поскольку коэффициенты корреляции в вариантах, показанных на рис. 2б, в, существенно ниже (чем на рис. 2,а) — соответственно  $R = 0,881$  (рис. 2,б) и  $R = 0,880$  (рис. 2,в), то на практике при оценке значений  $E_d$  для расчетов напряженно-деформированного состояния системы сооружение—основание с учетом сейсмических нагрузок рекомендуется использовать уравнение (11) или (11а).

Сопоставим полученные результаты с выводами из дисперсионных соотношений В. Футгермана [Futtermann, 1962] для однородных неидеально упругих сред (с поглощением). Используя их [Савич и др., 1969], пришли к следующей оценке отношения скоростей продольных волн  $v_{f_0}$  и  $v_{f_i}$  соответствующих частотам  $f_0$  и  $f_i$ :

$$\frac{v_{f_i}}{v_{f_0}} \approx 1 + \frac{\Delta_p}{\pi^2} \ln \frac{f_i}{f_0} \quad (12)$$

где  $\Delta_p$  — декремент поглощения продольной волны.

Учитывая, что  $E_d \sim V_p^2$ , и используя наши обозначения, из уравнения (12) получим:

$$E_{d(c/n)} \approx E_{d(c/p)} \left[ 1 + \frac{\Delta_p}{\pi^2} \ln \frac{f_{(c/p)}}{f_{(c/n)}} \right]^{-2}. \quad (13)$$

Полагая  $\frac{f_{(c/p)}}{f_{(c/n)}} = 10^2$  и задаваясь реальными значениями  $\Delta_p$ , оценим соотношения рассматриваемых модулей для следующих случаев.

1. Скальные и полускальные грунты in situ: если  $\Delta_p \approx 0,01$ , то  $E_{d(c/n)} \approx 0,99 E_{d(c/p)}$ .

2. Нескальные грунты in situ: если  $\Delta_p \approx 0,5$ , то  $E_{d(c/n)} \approx 0,66 E_{d(c/p)}$ .

3. Насыпные, слабоуплотненные грунты в плотинах, насыпях и т.д.: если  $\Delta_p \approx 1,0$ , то  $E_{d(c/n)} \approx 0,46 E_{d(c/p)}$ .

Нанесение этих данных на рис. 2, в свидетельствует о том, что теоретические оценки по В. Футерману дают заниженные отношения  $E_{d(c/p)}/E_{d(c/n)}$ , хотя и находятся в пределах поля корреляции  $\frac{E_{d(c/p)}}{E_{d(c/n)}} = f[E_{d(c/p)}]$ . Отмеченное

обстоятельство связано с тем, что соотношения В. Футермана объясняют лишь ту часть дисперсии фазовой скорости упругих волн, которая обусловлена эффектом поглощения в рамках модели однородной упругой среды.

Тем не менее уравнение (12) достаточно хорошо подтверждается результатами сейсмоакустических исследований, в которых амплитуда деформации не превышает  $10^{-5}$ . В частности, оценки по формуле (12) хорошо соответствуют экспериментально установленным отличиям на 5—15 % средних значений  $v_p$  по данным сейсмического и ультразвукового каротажа в водонасыщенных песчано-карбонатных породах [Карус, Сакс, 1966], а также данным натуральных акустических исследований на морском пляже, где в водонасыщенном песке установлено увеличение  $v_p$  от 1500 до 1750 м/с, а в сухом песке — от 180 до 260 м/с с ростом частоты от 25 до 800 кГц [Вильчинская, 1987].

Поэтому для указанной области значительных деформаций ( $\epsilon > 10^{-5}$ ) вместо формулы (13) можно рекомендовать более общее выражение (14), учитывающее зависимость модуля упругости от амплитуды деформации  $\epsilon$ :

$$E_{d(c/n)} \approx E_{d(c/p)} \left[ 1 + \frac{\Delta_p}{\pi^2} \ln \frac{f_{(c/p)} \epsilon_{(c/n)}}{f_{(c/n)} \epsilon_{(c/p)}} \right]^{-2}, \quad (14)$$

где  $\epsilon_{(c/p)} \approx 10^{-5}$ ,  $\epsilon_{(c/n)} > 10^{-5}$ .

Отметим, что если  $E_{d(c/p)}$  определено не по данным сейсморазведки, а например, акустики (т. е. при  $\epsilon < 10^{-5}$ ), то и в этом случае при

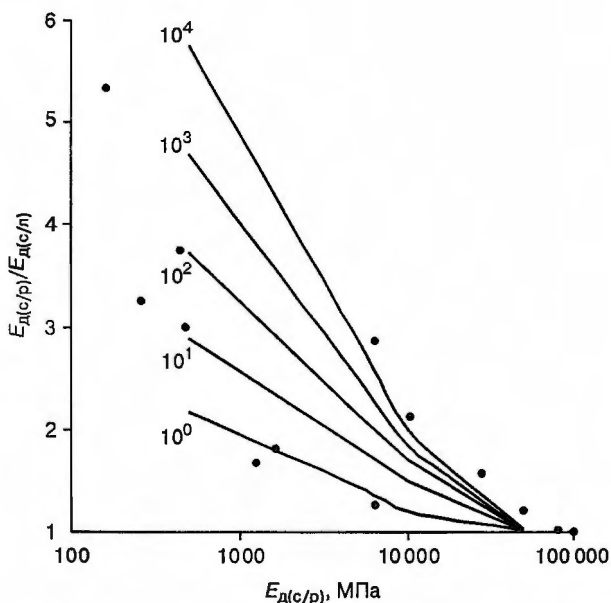


Рис. 3. Поле корреляции связи  $E_{d(c/p)}/E_{d(c/n)}$  в зависимости от  $E_{d(c/p)}$  и расчетные кривые с параметром  $\epsilon_{(c/n)}/\epsilon_{(c/p)}$ , отвечающие условиям землетрясений различной интенсивности.

расчетах по формуле (14) следует принимать значение  $\epsilon_{(c/p)} = 10^{-5}$ , поскольку в сейсмоакустическом диапазоне заметной зависимости  $v_p$  от  $\epsilon$  не установлено.

На рис. 3 показаны кривые, рассчитанные по формуле (14) с параметром  $\epsilon_{(c/n)}/\epsilon_{(c/p)} = 1 \dots 10^4$ , причем кривая с параметром 10 в первом приближении отвечает условиям землетрясения средней интенсивности,  $10^2$  — сильному,  $10^3$  — разрушительному,  $10^4$  — катастрофическому землетрясению.

Очевидно, что при  $\epsilon_{(c/n)}/\epsilon_{(c/p)} = 1$  кривая соответствует оценке В. Футермана. При расчетах кривых, как и ранее, приняты  $f_{(c/p)}/f_{(c/n)} = 10^2$  и указанные выше значения  $\Delta_p$ . Из рисунка видно, что расчетные кривые практически охватывают все поле корреляции графика.

### ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕМЕРЗЛЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Согласно Ю. И. Васильеву [1988], исследовавшему в естественных условиях глинистые грунты при динамических нагрузках, нелинейная связь напряжения и деформации начинает проявляться в слабых глинистых грунтах при землетрясениях более 8,5 балла (суглинки, лесовидные суглинки, делювиальная красная глина), а в более прочных глинистых грунтах —

ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДУЛЯ УПРУГОСТИ

Таблица 2. Динамические характеристики немерзлых глинистых грунтов зоны аэрации (на глубине 1,5—2,0 м) по данным сейсморазведки и полевого метода определения диаграммы сдвига при взрывах малых зарядов ВВ в скважинах (по Ю. И. Васильеву)

Порода (район)	Сейсморазведка (с/р)					По диаграмме сдвига			
	$v_p$ , м/с	$v_s$ , м/с	$\mu_d$	$G_d$ , МПа	$E_d$ , МПа	$\gamma = 0 \dots 0,0015$		$\gamma = 0,0015 \dots 0,01$	
						$G_{d1}$ , МПа	$E_{d1}$ , МПа	$G_{d2}$ , МПа	$E_{d2}$ , МПа
Суглинок (Саратовская обл.)	280	140	0,31	33	87	32	85	17	44
Глина красная делювиальная (Казахстан)	335	211	0,15	75	174	64	147	15	34
Суглинок лессовидный адыр-ный (Таджикистан)	320	156	0,31	41	108	67	175	17	44
Суглинок влажный слабый (Казахстан)	290	165	0,23	46	114	82	200	70	172
Глина коренная красноцвет-ная, сухая (Казахстан)	450	297	0,10	150	330	122	268	65	136
Глина плотная влажная (Ка-захстан)	650	260	0,38	115	317	126	348	67	185
Суглинок лессовидный с суп-есью (Казахстан)	380	236	0,16	95	220	190	440	63	146
Лесс сухой (Казахстан)	385	256	0,08	111	240	237	512	107	231
Среднее для глинистых пород зоны аэрации	386	215	0,21	115	199	115	272	53	124

при землетрясениях свыше 9,0 баллов (сухая коренная глина, плотная влажная глина, сухие лессы, переслаивание лессовидных суглинков и супесей). Исследовались аэрированные грунты в верхней части разреза на глубине 1,5—2,0 м при взрывах малых зарядов взрывных веществ (ВВ) в скважинах и измерении напряжений сдвига  $\tau_c$  и деформаций сдвига  $\gamma$ , что позволяло определить диаграмму сдвига („скелетную кривую“) изучаемого грунта в диапазоне  $\gamma = 0 \dots 0,01$ . Для каждого из изученных глинистых грунтов выделены два практически прямолинейных отрезка графика  $\tau_c(\gamma)$ : начальный при  $\gamma = 0 \dots 0,0015$  и второй при  $\gamma = 0,0015 \dots 0,01$ .

В этих же грунтах определены скорости распространения продольной  $v_p$  и поперечной  $v_s$  упругих волн.

Приведенные Ю. И. Васильевым данные позволяют приблизительно оценить динамические модули упругости и сдвига (табл. 2). При таких оценках мы приняли среднюю плотность грунтов в естественном залегании  $\delta = 1,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и предположили, что коэффициент Пуассона  $\mu_d$ , определенный по скорости упругих волн, остается неизменным и при динамических испытаниях для определения диаграммы сдвига. Последнее допущение не вносит значительной погрешности в оценки  $E_d$ , поскольку  $\mu_d$  входит как слагаемое в формулу:  $E_d = 2(1 + \mu_d) G_d$ .

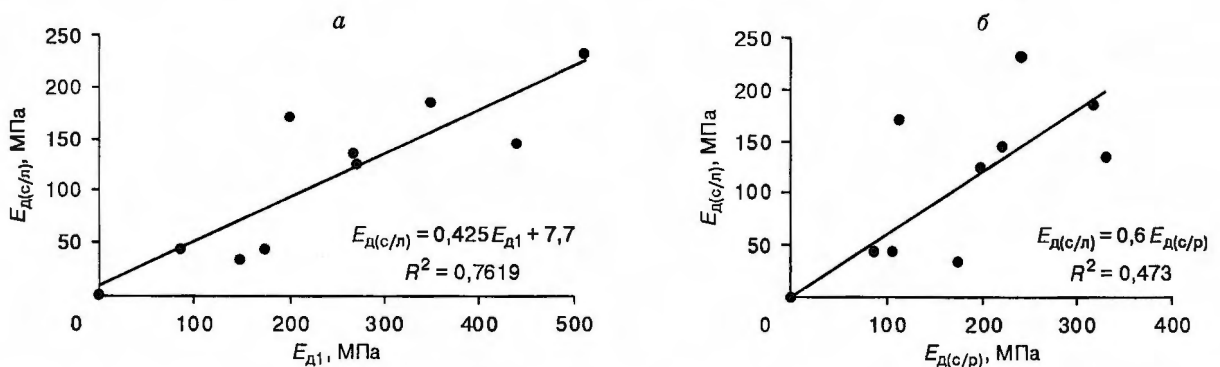


Рис. 4. К оценке значения  $E_{d(c/n)}$  глинистых грунтов зоны аэрации по известным величинам  $E_d$ , определенным при малых амплитудах деформаций.

а — связь  $E_{d(c/n)}$  с  $E_{d1}$ , определенным по данным регистрации напряжений и деформаций в грунте при взрывах зарядов ВВ в скважине; б — связь  $E_{d(c/n)}$  с  $E_{d(c/p)}$ , определенным по скорости распространения упругих волн; R — коэффициент корреляции.

Используем ранее принятые обозначения для  $E_d$ , определенного по скорости упругих волн как  $E_{d(c/p)}$ , и считаем, что  $E_{d2} \equiv E_{d(c/n)}$ . На рис. 4 показана связь модулей  $E_{d(c/n)}$  с  $E_{d(c/p)}$  и  $E_{d1}$ , которая в первом приближении свидетельствует, что  $E_{d(c/n)}$  примерно в 2 раза меньше, чем динамические модули упругости  $E_{d(c/p)}$ ,  $E_{d1}$ , определенные разными методами в условиях малых амплитуд деформаций. Коэффициенты корреляции связей, показанных на рис. 4, соответственно равны:  $R = 0,87$  (см. рис. 4,а) и  $R = 0,69$  (см. рис. 4,б).

Следует отметить, что отношение  $E_{d(c/p)}/E_{d(c/n)}$  мерзлых глинистых грунтов не обнаруживает зависимости от абсолютного значения  $E_{d(c/p)}$  в отличие от других пород, рассмотренных выше.

### О ДИНАМИЧЕСКОМ КОЭФФИЦИЕНТЕ ПУАССОНА ГРУНТОВ

Как известно, динамический коэффициент Пуассона  $\mu_d = \varphi \left( \frac{v_s}{v_p} \right)$ . Влияние амплитуды деформации  $\varepsilon$  (в интересующем нас диапазоне  $10^{-5} \dots 10^{-1}$ ) на  $\mu_d$  (или на отношение  $v_s/v_p$ ) до настоящего времени экспериментально не изучено.

Руководствуясь теоретическими оценками дисперсии скорости объемных волн  $v_p$  и  $v_s$  (работы Г. Кольского, В. Футермана, Г. Гуревича, А. Савича и др.) и учитывая, во-первых, что формула вида (12) справедлива как для продольных, так и для поперечных волн, а во-вторых, что значения декрементов поглощения продольных и поперечных волн близки между собой, есть все основания полагать приблизительно пропорциональное изменение  $v_p$  и  $v_s$  с уменьшением частоты  $f$  и ростом  $\varepsilon$  в рассматриваемых диапазонах. Отсюда в первом приближении следует вывод, что:

$$\mu_{d(c/p)} \approx \mu_{d(c/n)} \quad (15)$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Значительная часть криолитозоны России характеризуется повышенной сейсмичностью. Проектирование и реконструкции крупных инженерных сооружений предполагают расчеты напряженно-деформированного состояния системы „сооружение—основание“ с учетом сейсмических нагрузок. Для выполнения расчетов необходимо знать динамические деформационные характеристики грунтов (модуль упругости  $E_d$ , коэффициент Пуассона  $\mu_d$ ), отвечающие условиям сильных землетрясений (частота  $f = 0,5 \dots 5$  Гц, амплитуда деформаций  $\varepsilon = 10^{-2} \dots 1,0$  %).

Сейсморазведка является основным методом определения динамических характеристик

грунтов в естественном залегании. Однако определяемые при этом величины характеризуют иные условия деформирования ( $f = 20 \dots 100$  Гц,  $\varepsilon = 10^{-4} \dots 10^{-3}$  %), чем при землетрясениях, поэтому „сейсморазведочные“ характеристики деформируемости нуждаются в корректировке для перехода к „сейсмологическим“.

2. В ходе исследования большинства грунтов (кроме мерзлых глинистых) установлено, что чем ниже абсолютное значение  $E_{d(c/p)}$  грунтов, определенное сейсморазведкой, тем в большее число раз оно отличается от значения  $E_{d(c/n)}$ , полученного по данным динамических методов, но в условиях больших амплитуд деформаций. В неуплотненных и слабоуплотненных грунтах (мерзлые и талые пески и др.) отношение рассматриваемых модулей упругости может быть больше в 5 и более раз, а в монолитных скальных породах (при  $E_{d(c/p)} \geq 50\,000$  МПа) оно приближается к 1.

Для рассматриваемых грунтов в мерзлом и талом состояниях рекомендуется уравнение корреляционной связи:  $\lg E_{d(c/n)} = 1,2058 \lg E_{d(c/p)} - 1,0619$ .

Уравнение получено в диапазоне  $E_{d(c/p)} = 160 \dots 100\,000$  МПа; коэффициент корреляции  $R = 0,992$ .

Предложена формула (14), позволяющая уточнить расчетные значения  $E_{d(c/n)}$  в зависимости от ожидаемой амплитуды деформаций  $\varepsilon$  при землетрясениях (проектном и максимальном расчетном).

3. Для мерзлых (или талых) глинистых грунтов (суглинки, глины, лессы) можно использовать для оценок соотношение:  $E_{d(c/n)} \approx 0,6 E_{d(c/p)}$ ; коэффициент корреляции  $R = 0,69$ .

4. Значение „сейсмологического“ коэффициента Пуассона мерзлых и талых грунтов в первом приближении допустимо полагать равным „сейсморазведочному“.

### Литература

- Васильев Ю.И. Изучение нелинейных характеристик и прочностных свойств мягкого грунта в условиях его естественного залегания с целью решения задач инженерной сейсмологии // Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность / Отв. ред. О.В. Павлов. М., Наука, 1988, с. 138—146.
- Вильчинская Н.А. Подбор эффективной релаксации и динамической вязкости для слаболинейных волн напряжений в песках // Проблемы нелинейной сейсмологии. М., Наука, 1987, с. 231—237.
- Винсон Т.С. Мерзлые грунты под динамическими нагрузками // Геотехнические вопросы освоения Севера / Под ред. О. Андерсленда, Д. Андерсона. М., Недра, 1983, с. 401—448.
- Вовк А.А., Михалюк А.В., Черный Г.И. Механические свойства мерзлых грунтов при динамическом нагружении // Основания, фундаменты и механика грунтов, 1980, № 2, с. 14—17.

## ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДУЛЯ УПРУГОСТИ

- Воронков О.К. О связи статических и динамических характеристик деформируемости мерзлых грунтов // Инженерно-геологическое изучение и оценка мерзлых, промерзающих и протаивающих грунтов (ИГК-92). СПб., Изд-во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1992, с. 115—124.
- Джурик В.И., Басов А.Д., Дреннов А.Ф. Режимные геофизические наблюдения за состоянием земляной плотины Иркутской ГЭС // Гидротехническое стр-во, 1999, № 5, с. 53—57.
- Карус Е.В., Сакс М.В. Сопоставление результатов ультразвукового каротажа и сейсмических наблюдений // Геоакустика, М., Наука, 1966, с. 95—98.
- Красников Н.Д. Сейсмостойкость гидротехнических сооружений из грунтовых материалов. М., Энергоиздат, 1981, 240 с.
- Музафаров А.А., Смильгек А.И., Толкачев Г.С. К методике определения динамических модулей деформации при компрессионных испытаниях несвязных грунтов // Динамика оснований, фундаментов и подземных сооружений: Материалы Пятой всесоюз. конф. М., НИИОСП, 1981, т. 1, с. 232—234.
- Савич А.И., Яценко З.Г. Исследование упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами. М., Недра, 1979, 214 с.
- Савич А.И., Коптев В.И., Никитин В.Н., Яценко З.Г. Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. М., Недра, 1969, 240 с.
- Хорьков В.И., Пышкин О.Б., Кривоногова Н.Ф. Экспериментальные исследования динамических деформационных свойств мерзлых грунтовых материалов // Инженерно-геологическое изучение и оценка мерзлых, промерзающих и протаивающих песчаных и крупнообломочных грунтов. СПб., Изд-во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1990, с. 12—24.
- Futtermann W.I. Dispersive body waves // J. Geophys. Res., 1962, vol. 67, No. 13, p. 5279.
- Richart F.E. Some effects of dynamic soil properties on soil — structure interaction // J. Geotech. Engin. Div. Proc. ASCE, 1975, vol. 101, p. 1197—1240.

*Поступила в редакцию  
12 мая 2002 г.*