
МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК. 624.131.32:550.834

ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

© 2016 г. И. Г. Миндель, В. В. Севостьянов, Б. А. Трифонов, Н. А. Рагозин

*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия. E-mail: igelab@mail.ru.*

Поступила в редакцию 31.06.2015 г.

Рассматриваются теоретические модели упруго-вязко-пластических сред, к которым относятся дисперсные породы, на предмет связи их деформационно-прочностных свойств при статических нагрузках с упругими характеристиками при динамических воздействиях. Приводятся корреляционные зависимости между показателями деформационных и прочностных свойств различных типов дисперсных пород с характеристиками их упругих свойств по данным сейсмоакустики.

Ключевые слова: *упруго-вязко-пластичная среда, дисперсные грунты, деформационно-прочностные свойства, сейсмоакустика.*

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшая задача инженерно-геологических и инженерно-геотехнических изысканий для капитального строительства – определение деформационных и прочностных свойств грунтов. Для получения показателей этих свойств грунтов, в том числе дисперсных, используются лабораторные и полевые способы испытаний, каждый из которых обладает определенными преимуществами и недостатками, а также ограниченной областью применения. В лабораторных условиях испытания образцов грунтов проводят на компрессионных и сдвиговых приборах различного типа. В полевых условиях для определения деформационных характеристик проводят испытания опытными штампами, прессиометрами, статическим зондированием, а для определения показателей прочности выполняется статическое и динамическое зондирование, испытания на срез целиков грунта, а также путем вращательного и поступательного среза в скважинах. Сравнительно редко используют геофизические методы оценки деформационных и прочностных свойств грунтов, хотя, в соответствии с новейшими нормативными документами, полевые испытания необходимо сочетать “с геофизическими для интерпретации данных и выявления взаимосвязей между характеристиками грунта, определяемыми различными методами” (п. 6.3.10 СП 47.13330.2012 [24]). Среди геофизических методов при изучении свойств

грунтов предпочтение отдается сейсмоакустическим, основанным на возбуждении и приеме упругих колебаний, которые распространяются в горной породе и несут информацию о ее свойствах. Основное достоинство сейсмоакустических методов, которые по частотам колебаний делятся на сейсмические, акустические и ультразвуковые, – возможность получения показателей свойств грунтов без нарушения их сплошности в массиве.

В бывшем Советском Союзе сейсмоакустические методы изучения упругих и деформационно-прочностных свойств скальных пород были начаты в конце 50-х и начале 60-х годов прошлого столетия в связи со строительством гидроэлектростанций в Сибири, Средней Азии и Закавказье, в основном, специалистами Гидропроекта. Работы и публикации А.И. Савича, Ф.М. Ляховицкого, В.Н. Никитина, В.И. Коптева и других специалистов в отношении изучения свойств скальных пород методами сейсмоакустики послужили толчком для их применения при исследовании дисперсных грунтов. С конца 60-х и с начала 70-х XX в. сейсмоакустика стала использоваться с целью изучения физико-механических свойств дисперсных пород в различных их состояниях (тогда чаще употребляли термин “рыхлые породы”) [3, 7, 8, 16, 17 и др.]. С применением этих же методов в середине прошлого столетия приступили к изучению физико-механических свойств мерзлых

дисперсных пород, особенности изучения которых, в том числе при их оттаивании, заслуживают специального рассмотрения и в настоящей статье не затрагиваются.

СОСТАВ ДИСПЕРСНЫХ ПОРОД

В механике грунтов (грунтами называют любые породы, подлежащие исследованию для целей строительства) грунты разделяют по основным строительным свойствам на скальные и нескальные. Под нескальными понимают горные породы как природные тела, характеризующиеся раздробленностью и дискретностью. К ним относятся горные породы, представляющие собой дисперсные системы “несвязные” (сыпучие) и “связные”, прочность которых во много раз меньше прочности самих минеральных частиц. Если в скальных породах прочность внутренних связей между зернами того же порядка, что и прочность самих минеральных частиц, то в дисперсных породах основную роль в сопротивляемости внешним воздействиям играют водно-коллоидные оболочки, обволакивающие твердые частицы и агрегаты. В коллоидной химии дисперсной системой называется гетерогенное (многофазное) вещество, в котором хотя одна фаза представлена твердыми частицами размерами от молекулы до щебня [14]. К дисперсным породам относят пески, супеси, суглинки, глины, а также обломочные с различным содержанием песчано-глинистого заполнителя. Эти породы представляются трехфазными системами (или четырехфазными в частично мерзлых породах). Они состоят из зерен или агрегатов и цемента, образующего скелет, а также из жидкостей и газов, заполняющих поровое пространство между зернами (агрегатами). Прочность таких грунтов зависит не столько от прочности самих минеральных частиц, сколько от совершенства их упаковки в слабосвязанных грунтах и от прочности структурных связей в связных. Структурные связи между твердыми зернами и агрегатами грунта определяются сложными физико-химическими явлениями. Академик П.А. Ребиндер подразделял структурные связи на коагуляционные и конденсационные (водно-коллоидные), характеризующиеся вязкопластическими свойствами, и кристаллизационные, характеризующиеся жесткими упругими свойствами [22]. Если первые при разрушении способны восстанавливаться, то кристаллизационные связи, как правило, разрушаются необратимо. Отсюда ясно, что деформационные и прочностные свойства таких сред уже при небольших нагрузках за-

висят не столько от их упругих, но и в значительной степени от вязкопластических свойств.

ХАРАКТЕР ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ПОРОД

Приведенные сведения о дисперсных грунтах свидетельствуют о сложности строения реальной среды, представленной связными и слабосвязанными образованиями, о сложности тех закономерностей, которые хотя бы приближенно отражали процесс их деформирования. На характер деформирования такой среды под воздействием напряжений влияют упругие, вязкие и пластические свойства, но в зависимости от интенсивности напряжений, скорости их изменения и продолжительности воздействия могут превалировать те или иные механизмы сопротивления. Поясним это положение на примере получения деформационных характеристик дисперсных пород – модуля деформации ($E_{деф}$), статического и динамического модулей упругости (E_c , E_d). Эти величины являются аналогами и представляют собой некоторые коэффициенты пропорциональности между напряжением (σ) и деформацией (ϵ), определяемые из опытов при различных условиях и различных абсолютных значениях σ и ϵ (рис. 1).

Если рассмотреть график зависимости деформации от напряжения при статических испытаниях (например, зависимость осадки штампа от удельного давления), то на ветви нагружения можно выделить три участка (см. рис. 1):

I – участок упругих деформаций, в пределах которого деформации грунта практически полностью обратимы. Для рассматриваемых грунтов предел прочности, выше которого наблюдаются остаточные деформации, составляет $\sigma = 0.001 \div 0.05$ МПа. Относительные деформации на этом участке лежат в пределах $10^{-4} \div 10^{-5}$.

II – участок в сравнительно небольшом диапазоне изменения давлений (обычно до 0.2 МПа, реже до 0.3 МПа), для которого с достаточной степенью приближения принимают гипотезу о линейной зависимости между напряжением и деформацией. Условный предел пропорциональности для большинства разновидностей грунтов ($\sigma_{пр}$) не превышает $0.1 \div 2.0$ МПа, абсолютная величина относительных деформаций на этом участке изменяется от нескольких сотых до нескольких тысячных долей единицы. На этом участке основная доля деформаций относится к остаточным, а также к деформациям, связанным с уплотнением и проявлением вязких и пластических свойств среды.

III — участок интенсивно протекающих деформаций при напряжениях, превышающих $\sigma_{пр}$. Эти деформации обусловлены не только названными выше причинами (упругие, остаточные, связанные с уплотнением), но и с ползучестью скелета и кристаллизационных структурных связей, вязким течением и другими факторами. Зависимость между напряжением и деформацией носит явно выраженный нелинейный характер. Деформации могут превышать сотые доли единицы и сопровождаются нарушением внутренней структуры среды. На этом участке среде даже приблизительно нельзя приписать определенные механические свойства вне зависимости от наложенных мгновенных условий.

При распространении сейсмических волн смещения и деформации на некотором удалении от пункта возбуждения колебаний весьма малы и максимальные относительные деформации не превышают $10^{-5} \div 10^{-6}$, т.е. приходится на самое начало прямолинейной ветви на диаграмме σ – ϵ (хотя и в этом случае неупругие свойства проявляются достаточно резко в процессе диссипации волновой энергии).

Для получения хотя бы приближенного представления о соотношении между модулем деформации дисперсных пород и модулем упругости (например, по данным сейсмоакустики) рассмотрим некоторые механические модели подобной среды с учетом влияния режима изменения напряжения и времени приложения нагрузки.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИСПЕРСНЫХ ПОРОД

При рассмотрении моделей дисперсных пород, представляющих собой сложную упруго-вязко-пластическую среду, примем ряд допущений, схематизирующих эту среду.

Будем представлять грунт в виде однородной изотропной сплошной среды. Состояние сплошной изотропной среды, а также изменение этого состояния определяется непрерывным соотношением между определенными функциями механических (напряжение, перемещение, их производные) и термодинамических переменных. Таким соотношением является “уравнение состояния” среды [25]. Для грунтов, изменение состояния которых сопровождается непрерывным изменением внутренней структуры, существование уравнения состояния можно допустить только в случае малых неупругих деформаций. В качестве уравнения состояния обычно рассматриваются чисто механические уравнения, в предположении об одинаковой зависимости механических пе-

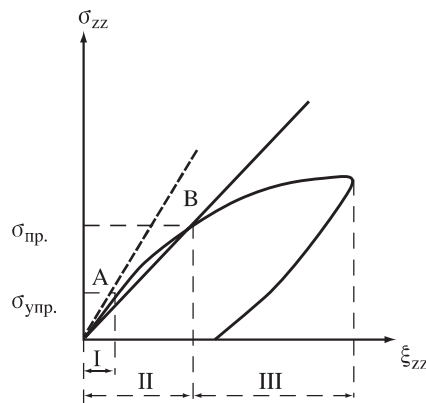


Рис. 1. График зависимости деформации (ϵ_{zz}) от напряжения (σ_{zz}).

ременных от термодинамических, т.е. процессы деформирования исследуются в изотермических или адиабатических условиях. Такое допущение является приближением, часто весьма грубым. Однако для упрощения математического аппарата при построении теории неупругой сплошной среды пренебрегают незначительными градиентами температуры и давлений между соседними точками среды, возникающими при деформировании. Наконец, последнее допущение, видимо сильно искажающее результаты исследования в приложении к грунтам, это условие постоянства плотности среды в процессе деформирования.

Рассмотрим некоторые наиболее простые механические модели грунтов.

Механическую модель Максвелла представляют в виде пружины и демпфера, соединенных последовательно [12, 25].

Одномерное уравнение состояния упруго-вязко-пластической среды Максвелла (в случае, если не достигается предел текучести) имеет следующий вид:

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma (\sigma = \sigma_{11}, \epsilon = \epsilon_{11}), \quad (1)$$

где σ , ϵ и t — соответственно напряжение, деформация и время; E — эффективный модуль упругости, равный $\lambda + 2\mu$ в случае объемных деформаций и равный μ — в случае сдвиговых деформаций (λ и μ — константы Ляме); η — эффективный коэффициент вязкости, равный $\eta'' + 2\eta'$ в случае объемных деформаций (η'' и η' — соответственно коэффициенты объемной и сдвиговой вязкости), и η' — в случае сдвиговых деформаций.

При постоянной скорости нагружения $\frac{d\sigma}{dt} = V_\sigma$ и конечной нагрузке $\sigma = V_\sigma \cdot t$ при соответствующей

щих подстановках в уравнение (1) и после интегрирования с начальными условиями $\varepsilon = 0$ и $t = 0$, получаем решение:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} V_{\sigma} t + \frac{1}{2\eta_1} V_{\sigma} t^2. \quad (2)$$

К определенному моменту времени $t = t_1$ $\sigma_1 = V_{\sigma} t_1$ и после соответствующих подстановок и элементарных преобразований уравнение (2) приводим к виду:

$$E_{\text{деф}} \approx \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} = \frac{2\eta_1 E}{2\eta_1 + E \frac{\sigma_1}{V_{\sigma}}}. \quad (3)$$

Уравнение (3) при известных значениях модуля упругости и коэффициента вязкости, заданных скоростях нагружения, например на штамп, позволяет определить отношение конечной нагрузки к относительной деформации грунта, т.е. модуль деформации. При конечных нагрузках порядка $0.1 \div 0.3$ МПа на штамп оцененные по зависимости (3) значения $E_{\text{деф}}$ и значения по результатам испытаний опытным штампом (с учетом оценки η по совместным сейсмоакустическим и штамповым испытаниям) оказались достаточно близкими [17, 12].

При сдвиговых напряжениях и деформациях уравнение (3) можно представить в виде:

$$\tau_1 = \frac{2\eta G}{2\eta + G \frac{\tau_1}{V_{\tau}}} \cdot \varepsilon_1, \quad (4)$$

где τ_1 – сдвигающее напряжение к моменту времени t_1 ($\tau_1 = V_{\tau} \cdot t_1$); V_{τ} – постоянная скорость нарастания тангенциального напряжения; ε_1 – деформация формоизменения к моменту времени t_1 ; η – коэффициент сдвиговой вязкости; G – модуль упругости сдвига. Уравнение (4) по модели Максвелла позволяет оценить в приложении к дисперсным грунтам общее сопротивление сдвигу, которое, по результатам геотехнических испытаний на сдвиговых приборах, получается с использованием угла внутреннего трения и удельного сцепления по известной зависимости Кулона.

В случае распространения в среде Максвелла плоской поперечной волны уравнение движения преобразуется в следующий вид [13, 17]:

$$\frac{\partial^3 U}{\partial y^2 \partial t} = \frac{\rho}{G} \cdot \frac{\partial^3 U}{\partial t^3} + \frac{\rho}{\eta} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad (5)$$

где U – перемещение, G – модуль упругости сдвига, ρ – плотность, η – коэффициент сдвиговой вязкости.

В случае периодического возмущения с учетом частного решения и замены $tp = \eta/G$ (t_p – время релаксации) получаются выражения для фазовой скорости $C(\omega)$, коэффициента поглощения $\alpha(\omega)$ и декремента поглощения $\Delta_s(\omega)$ [25]:

$$C(\omega) = \sqrt{\frac{2G}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 t_p^2}} - 1}}, \quad (6)$$

$$\alpha(\omega) = \omega \sqrt{\frac{\rho}{2\mu}} \sqrt{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 t_p^2}} - 1}, \quad (7)$$

$$\Delta_s(\omega) = \alpha(\omega) \frac{C(\omega)}{\omega} = \omega t_p \left[\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 t_p^2}} - 1 \right]. \quad (8)$$

Формулы (6) и (7) выражают для среды Максвелла характер зависимости фазовой скорости и коэффициента поглощения от частоты (вернее, от соотношения между частотой и временем релаксации), когда $\omega \gg \frac{1}{t_p}$, и поэтому произведения

$\omega t_p \gg 1$, $C(\omega) \rightarrow C_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$, $\alpha(\omega) \rightarrow 0$. Если произведение ωt_p мало, то скорость становится пропорциональной $\sqrt{\omega t_p}$, а коэффициент поглощения приобретает хорошо известное в литературе выражение $\alpha(\omega) \approx \sqrt{\frac{\rho \omega}{2\eta}}$ и также пропорционален $\sqrt{\omega}$. При $\omega t_p \approx 1$ фазовая скорость и коэффициент поглощения $\alpha(\omega) \approx \frac{1}{2} \frac{\rho C_0}{\eta}$ не зависят от частоты, а декремент поглощения $\Delta_s = 0.41$.

МОДЕЛЬ КЕЛЬВИНА

В механической модели сплошной среды Кельвина пружина и демпфер соединены параллельно. Уравнение состояния такой среды выражается как

$$\sigma = G\varepsilon + G^1 \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t}, \quad (9)$$

где G – модуль упругости, G^1 – константа демпфера.

При распространении в среде Кельвина упругой волны после решения уравнения движения с учетом (9) и в случае $\sigma = \sigma_0$ получаем выражение:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{G} (1 - e^{-t/t_p}), \quad (10)$$

где $t_p = G/G^1$ – время релаксации.

Таблица 1. Сравнение коэффициентов поглощения сейсмических волн в моделях Максвелла и Кельвина

Соотношение между ω и t_p	Модель Максвелла	Модель Кельвина	
	поперечные волны	продольные волны	поперечные волны
$\omega t_p \ll 1$	$\alpha_s(\omega) = \sqrt{\frac{\rho\omega}{2\eta}}$	$\alpha_p(\omega) = \frac{2}{3} \frac{\eta\omega^2}{\rho C_{op}^3}$	$\alpha_s(\omega) = \frac{\eta\omega^2}{2\rho \cdot C_{os}^3}$
$\omega t_p \gg 1$	$\alpha_s(\omega) \rightarrow 0$	$\alpha_p(\omega) = \sqrt{\frac{8\rho\omega}{3\eta}}$	$\alpha(\omega) = \sqrt{\frac{\rho\omega}{2\eta}}$
$\omega t_p \approx 1$	$\alpha_s(\omega) \approx \frac{1}{2} \frac{\rho C_{os}}{\eta}$	$\alpha_p(\omega) \approx \frac{1}{4} \frac{\rho C_{op}}{\eta}$	$\alpha_s(\omega) \approx \frac{1}{3} \frac{\rho C_{os}}{\eta}$

Интересно сравнить закономерности в изменении коэффициентов поглощения волн при распространении в среде в зависимости от соотношения частоты колебаний и времени релаксации (решение для среды Кельвина заимствовано из [25]). Такое сравнение приводится в табл. 1.

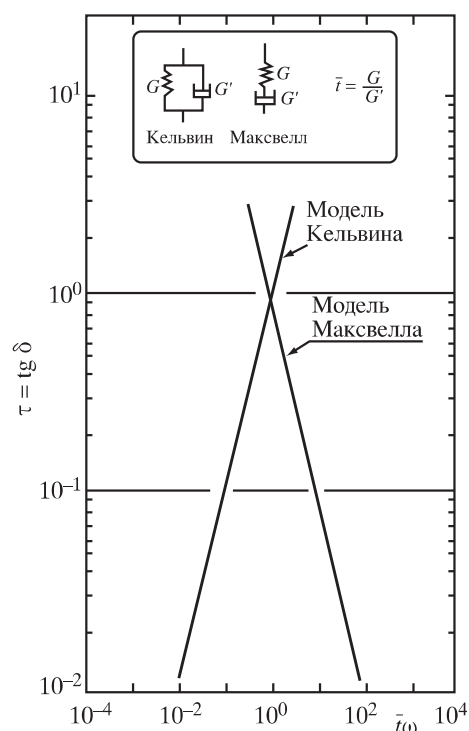
Закономерности изменения характеристик поглощения сейсмических волн в упруго-вязких моделях Максвелла и Кельвина наглядно иллюстрируются рис. 2 из книги К. Ишихары [12]. На рис. 2 $\bar{t} = \tau = G/G'$ – время релаксации, коэффициент потерь $\tau = \operatorname{tg} \delta$ – аналог коэффициента поглощения в табл. 1.

Как следует из табл. 1 и рис. 2, в отношении закономерностей поглощения упругих волн в моделях Максвелла и Кельвина при $\omega t_p \approx 1$ результаты оценки величин коэффициента поглощения оказываются весьма близкими и независимыми от частоты, что не согласуется с большинством экспериментальных данных. Правда, теоретическое значение логарифмического декремента поглощения, как следует из выражения (8), оказывается при этом равным 0.41. Заметим, что для большинства песчано-глинистых пород экспериментальные декременты поглощения продольных и поперечных волн на сейсморазведочных частотах от 5 до 200 Гц попадают в диапазон от 0.2 до 2.0 [2, 17–19 и др.], т.е. не кардинально отличаются от теоретической оценки по моделям Максвелла и Кельвина.

На основании простейших механических моделей Максвелла и Кельвина, рассмотренных выше, нами предпринята попытка оценить показатель вязкости некоторых пород. Отметим только, что в этом случае оцениваются так называемые динамические характеристики вязкости, которые отличаются от статических так же, как динамические модули упругости Ед отличаются от моду-

лей деформации Едеф, определяемых при других уровнях напряжений и деформаций.

Для оценки воспользуемся конкретным примером результатов определения с помощью сейсморазведочных исследований лессовидных суглинков естественной влажности на одном из опытных участков: $V_p = 420$ м/с, $V_s = 250$ м/с, $\rho = 2 \cdot 10^3$ кг/м³, $\alpha_{p,s} \approx 0.10 \div 0.13$ м⁻¹, $f_p = 100$ Гц, $f_s = 50$ Гц. При оценке показателя динамической вязкости по зависимости из табл. 1 для модели Максвелла в случае $\omega t_p \approx 1$ при подстановке приведенных выше по результатам эксперимента значений плотности, скорости поперечных волн и коэффициента поглощения получим оценочное

**Рис. 2.** Коэффициенты потерь как функции частоты в моделях Максвелла и Кельвина [12].

значение динамического коэффициента сдвиговой вязкости $\eta \approx 0.2 \cdot 10^6$ Па · с. При оценке показателя по зависимости из табл. 1 для модели Кельвина в случае $\omega t_p \ll 1$ при подстановке плотности, скорости продольных волн, круговой частоты $\omega = 2\pi f$ получаем динамический коэффициент вязкости $\eta \approx 0.5 \cdot 10^8$ Па · с. Как видно, по разным зависимостям с использованием параметров по продольным и поперечным волнам динамические коэффициенты различаются на два порядка.

Отметим, что в инженерной геологии используют не динамические, а статические коэффициенты вязкости, полученные на основании приложения статических нагрузок, масштаб времени которых составляет минуты и часы. Из зависимости (3), приведенной выше на основании рассмотрения модели Максвелла, коэффициент вязкости можно оценить с использованием экспериментально полученных модуля упругости E_d и модуля деформации $E_{деф}$ для маловлажных суглинков по следующей формуле:

$$\eta_{ст} = 0.5 \cdot \frac{E_d \cdot E_{деф}}{E_d - E_{деф}} \cdot \frac{\sigma_{t1}}{V_\sigma}. \quad (11)$$

В этом случае коэффициент вязкости можно принимать в качестве статического, поскольку $E_{деф}$ в эксперименте получен по данным испытаний опытным штампом. Возьмем для примера упомянутые выше маловлажные лессовидные породы с $V_s = 250$ м/с, тогда $E_d = 2(1 + \mu) \rho V_s^2 = 260$ МПа ($V_p/V_s = 1.7$). Модуль деформации по данным испытаний опытным штампом $E_{деф} = 19$ МПа. При условии $\sigma_{t1} = 0.3$ МПа и $V_\sigma = 0.003$ МПа/с при подстановке в (11) приведенных выше значений E_d и $E_{деф}$ получим $\eta_{ст} \approx 2 \cdot 10^9$ Па · с.

По данным И.М. Горьковой [6], для пылеватых отложений озерно-аллювиального генезиса статическое значение коэффициента вязкости оценивается в $(1.7-2.0) \cdot 10^9$ Па · с, что весьма близко к упомянутому значению коэффициента вязкости для подобных грунтов, оцененного с привлечением данных сейсмоакустики. Если воспользоваться установленными для различных дисперсных грунтов корреляционными связями между $E_{деф}$ и E_d , приведенными ниже, то по зависимости (11) представляется возможность при некоторых условиях оценить коэффициенты вязкости грунтов только по данным сейсмоакустики.

Таким образом, по материалам сейсмоакустики представляется возможность оценить некоторые реологические характеристики грунтов, что ранее не практиковалось. Хотя в этом направлении

следует продолжить как теоретические, так и экспериментальные исследования.

Выше рассмотрены наиболее простые модели упруго-вязких сред. Однако в отечественной и зарубежной литературе приводятся результаты анализа более сложных упруговязкопластических сред на предмет возможной оценки характеристик деформационных и прочностных свойств дисперсных пород по данным изучения их волновыми методами. Например, В.А. Григорьев [9] при рассмотрении упруговязкопластической неоднородной среды получил зависимость модуля деформации ($E_{деф}$) от мгновенного модуля упругости E_1 (по данным сейсмоакустики) и модуля упруго-вязкой деформации E_2 , а также от эквивалентной величины начальных напряжений $\sigma_{вн}$ и некоторой функции пластичности $\Phi(\epsilon)$ при предельной относительной деформации:

$$E_{деф} = k_1 E_1 \pm \frac{\bar{\sigma}_{вн}}{\epsilon}, \text{ где } k_1 = \frac{1 - \frac{\Phi(\epsilon)}{\epsilon}}{\frac{E_1}{E_2} + 1}. \quad (12)$$

На основании рассмотрения экспериментальных данных об изменении общего коэффициента затухания α и его составляющих α_η (потери за счет релаксационных процессов), α_ϕ (потери за счет внутреннего трения) и α_r (потери за счет рассеяния на дефектах среды) в зависимости от частоты зондирующего импульса и состояния грунтов В.А. Григорьев пришел к выводу о возможности использования характеристик затухания для оценки реологических свойств грунтов (при низких частотах) и для оценки их структуры (при высоких частотах). Однако конкретные зависимости между характеристиками прочностных, деформационных и реологических свойств грунтов, с одной стороны, и параметрами затухания — с другой В.А. Григорьевым в его публикациях не приведены. И его упоминания о возможности оценки реологических свойств грунтов по характеристикам затухания и поглощения волн различного частотного состава представляются весьма перспективными и должны быть предметом дальнейших исследований.

Модели, основанные на теории наследственности (последствия) Больцмана

В основе теории последствия лежит принцип наложения (суперпозиции) деформаций и напряжений. Согласно принципу суперпозиции деформации ϵ_1 и ϵ_2 , вызванные в разное время напряжениями σ_1 и σ_2 , складываются, т.е. предпо-

лагается, что напряжения σ_1 и σ_2 вызовут деформацию $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$. Принцип суперпозиции Больцман использовал для постулирования линейной теории наследственности.

Если в момент времени t (отсчет времени ведется от начала нагружения) в течение малого промежутка времени ΔS к телу приложено напряжение $\sigma(s)$, то в момент времени $t > s$ испытываемая телом деформация пропорциональна напряжению $\sigma(s)$, длительности воздействия ΔS и некоторой убывающей во времени функции $K(t-s)$.

Учитывая принцип линейного наложения остаточных деформаций, вызванных до момента времени t , вся деформация в этот момент будет равна:

$$\int_0^t K(t-s)\sigma(s)ds. \quad (13)$$

С учетом того, что в момент времени t напряжение вызовет также мгновенную деформацию $\frac{\sigma(t)}{E}$ (E – модуль упругости), полная деформация в момент времени t в случае непрерывного нагружения выражается уравнением:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \int_0^t K(t-s)ds. \quad (14)$$

Функция $K(t-s)$ называется функцией памяти или ядром ползучести. Если уравнение (14) решить относительно $\sigma(t)$, то получим:

$$\sigma(t) = E \cdot \varepsilon(t) - \int_0^t \Gamma(t-s)\varepsilon(s)ds, \quad (15)$$

где функция памяти $\Gamma(t-s)$ называется ядром релаксации и связана с ядром ползучести $K(t-s)$ (функция $\Gamma(t-s)$ является резольвентой интегрального уравнения (14) и определяется с помощью известных в теории интегральных уравнений приемов).

Из уравнения Больцмана (его еще называют уравнением Больцмана–Вольтерра) можно в качестве частных случаев получить, например, уравнения Максвелла и Кельвина.

Таким образом, на основании сравнительно простых теоретических моделей дисперсных пород появляется возможность по данным сейсмоакустических измерений определить величину модуля упругости E и оценить значение характеристик вязкости η . Отсюда вытекает возможность оценки по результатам определения скоростей и

параметров поглощения сейсмических волн некоторых характеристик ползучести грунтов. В настоящее время имеется еще очень небольшой и разрозненный фактический материал по определению характеристик ползучести грунтов различными методами. По мере накопления такого материала появится возможность сопоставления данных сейсмоакустики и других методов изучения процесса ползучести грунтов, что позволит установить, перспективно ли применение сейсмоакустики в этом направлении.

В приложении к распространению в среде упругих колебаний теорию наследственности Больцмана применил Б.В. Дерягин [11]. Он предположил, что объемная деформация в этом случае чисто упругая, а сдвиговая деформация обладает последствием.

На основании решения соответствующих уравнений Б.В. Дерягиным получены следующие выражения:

$$\text{коэффициент поглощения } \alpha_p = \frac{\pi}{3} \frac{BV_s^2 \omega}{\mu V_p^3}, \quad (16)$$

$$\text{декремент поглощения } \Delta_p = \frac{2\pi^{2B}}{\mu} \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2, \quad (17)$$

где μ – коэффициент Пуассона, B – некоторая постоянная, характеризующая реологические свойства грунта.

Согласно положениям Б.В. Дерягина [11], коэффициент поглощения пропорционален частоте колебаний, а декремент от нее не зависит, что в большинстве случаев подтверждается экспериментом. Величина B может служить некоторой характеристикой реологических свойств грунтов.

Г.И. Гуревичем [10] была предложена теория поглощения сейсмических колебаний, основанная на зависимости характеристик колебаний (скоростей и декрементов) как от Гуковских модулей, так и от модулей последствия. Согласно Г.И. Гуревичу, модули последствия (сдвига, объемного расширения и др.) определяются плотностью упаковки и прочностью связей частиц в среде. Кроме того, автор предполагает существование непрерывного спектра времен релаксации в некотором ограниченном интервале от 10^{-8} до 10^4 с, в пределах которого скорости и декременты поглощения мало зависят от частоты.

Для “рыхлых” грунтов релаксационный модуль, например, сдвига (μ_R), определяется из выражения:

$$\mu_R \cdot R \approx \frac{\pi^2}{2} \frac{\rho V_s^2}{\Delta_s}, \quad (18)$$

где R – безразмерная величина, характеризующая спектр времен релаксаций.

По утверждению Г.И. Гуревича и Л.В. Молотовой [10, 18], величина отношения Гуковских и релаксационных модулей является надежной характеристикой степени прочности породы. Кроме того, из многочисленных теорий поглощения теория Г.И. Гуревича лучше других согласуется с результатами экспериментов. Представляется перспективным использовать для характеристик физико-механических свойств грунтов не только Гуковские, но и релаксационные модули. Однако необходимость точного определения декрементов поглощения и некоторая неопределенность величин, подобных приведенной выше величине R , делают в настоящее время затруднительным использование указанных модулей в практических целях.

Достаточно подробно и полно рассматриваются в научной и справочной литературе модели зернистых сред, к каким относятся обломочные и песчаные породы. Так, Ф.М. Ляховицкий с учётом результатов исследований Ф. Гасмана, Д. Уайта и Р. Сенгбуша получил зависимость скорости продольных и поперечных волн от модуля Юнга и коэффициента Пуассона материала шаров, от величин, определяемых объемной упругостью заполнителя, и от величин, определяемых контактной упругостью между шарами, зависящей в свою очередь от вертикальных напряжений, а также от коэффициентов, обусловленных типом упаковки идеальных шаров [15, 8, 21]. Для краткости эти известные зависимости для воздушно-сухой и водонасыщенной зернистой среды здесь не приводятся. Следует только заметить, что теоретические зависимости в зернистых средах и экспериментально полученные зависимости скоростей в реальных средах качественно близки, но в количественном отношении имеют иногда значительные расхождения. Это объясняется несколькими причинами: уплотнением породы с ростом давления, наличием некоторых структурных связей, неоднородностью шаров по литологическому составу, особенностями заполнителя и другими факторами.

В.И. Бондаревым предложена модель песчано-глинистого грунта, основанная на усложненной модели зернистой среды, а именно: кварцевые ядра (шары) содержат пористую глинисто-коллоидную оболочку, через которую осуществляется контакт шаров [4]. По утверждению В.И. Бондарева, использование его теоретической модели для нахождения скоростей продольных волн в песчано-глинистых грунтах приводит к более ре-

альным результатам, чем по зависимости Гасмана–Уайта–Ляховицкого.

На основании проведенного анализа некоторых моделей сред можно сделать следующие выводы.

1. Скорости распространения продольных и поперечных волн, измеренные при различных частотах зондирующих импульсов, декременты (или коэффициенты) их поглощения можно использовать для оценки деформационных и прочностных характеристик грунтов, их вязкости, ползучести и некоторых других свойств. Теоретические предположки, как было показано, для этого имеются. Но, учитывая несовершенство самих моделей, грубость некоторых допущений, а также трудности в определении характеристик поглощения, экспериментальные значения которых сильно отличаются от “теоретических” в силу сложности механизма поглощения, на данном этапе развития как сейсмоакустических, так и инженерно-геологических методов изучения свойств грунтов приходится пользоваться не столько функциональными, сколько статистическими зависимостями.

2. Рассмотрение теоретических вопросов позволяет уяснить сущность процессов деформирования грунтов и выбрать наиболее правильную форму корреляционной зависимости между различными характеристиками.

3. Следует совершенствовать теоретические модели сред и, по мере накопления экспериментального материала и проверки с его помощью пригодности тех или иных моделей, более широко применять последние на практике.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВЯЗИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ДИСПЕРСНЫХ ПОРОД С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ИХ УПРУГИХ СВОЙСТВ

Ко второму десятилетию XXI в. накоплен значительный опыт в получении корреляционных связей между показателями физико-механических свойств дисперсных пород и характеристиками их упругих свойств, которые определяются сейсмоакустическими методами. Для каждого параметра известно несколько способов расчета и формы связей. Наибольшее предпочтение следует отдавать зависимостям, где находятся простейшие связи между интегральными характеристиками физико-механических и упругих свойств, например между модулем деформации и модулем упругости Юнга, между общим сопротивлением сдвигу и модулем упругости сдвига, имеющими

Таблица 2. Корреляционные зависимости между модулем деформации (Едеф) и динамическим модулем упругости (Ед) для дисперсных грунтов

№ п/п	Типы и состояние грунтов	Корреляционная зависимость	Коэффициент корреляции	Авторы, источники
Слабосвязные грунты				
1	Дресвяные, щебенистые и крупнообломочные грунты	$E_{деф} = 0.1E_d - 16$	0.92	Бондарев [23]
2	Пески неводонасыщенные	$E_{деф} = 0.085E_d + 3$	0.84	Агеев [23]
3	Пески неводонасыщенные	$E_{деф} = 0.116E_d - 4.7$	0.92	Агеев, Бондарев [23]
4	Пески водонасыщенные	$E_{деф} = 0.044E_d + 3.1$	0.94	[21]
Связные грунты				
5	Супесь, суглинки, глины	$E_{деф} = 0.108E_d - 1.9$	—	Бондарев [3, 23]
6	Лессовидные суглинки Прикамья	$E_{деф_k} = 0.036E_d + 2.8$	—	Бондарев [3]
7	Лессовидные суглинки выше УГВ	$E_{деф_{ш}} = 0.045E_d + 7$	0.81	Миндель [16]
8	Лессовидные суглинки с обломками выше УГВ	$E_{деф_{ш}} = 0.033E_d + 6.5$	—	Миндель [17]
9	Суглинки выше УГВ	$E_{деф} = 0.036E_d + 2.6$	—	Аникин [1]
10	Юрские глины (бат-келловейский ярус, Москва)	$E_{деф} = 0.037E_d$	0.71	Трифонов и др. [20]
11	Юрские глины, оксфордский ярус, Москва	$E_{деф} = 0.045E_d - 8$	0.74	Трифонов и др. [20]
Песчано-глинистые грунты				
12	Песчано-глинистые грунты природной влажности	$E_{деф} = 0.064E_d + 3.5$	0.91	Григорчук [23]
13	Песчано-глинистые неводонасыщенные	$E_{деф} = 0.116E_d - 4.2$	0.93	Бондарев [23]
14	Песчано-глинистые неводонасыщенные	$E_{деф} = 0.094E_d + 0.4$	0.89	Бондарев [3]
15	Песчано-глинистые неводонасыщенные	$E_{деф} = 0.061E_d - 2.85$	—	Бондарев [3]

Примечание. Едеф и Ед в МПа.

одинаковую размерность и представляющими собой аналоги, но полученные при различных уровнях воздействий (напряжений). Известны как корреляционные зависимости между интегральными параметрами свойств грунтов при статических нагрузках, с одной стороны, и скоростями продольных и поперечных волн — с другой, так и между отдельными показателями, например физических свойств грунтов с теми же скоростями. Как правило, при установлении и использовании корреляционных зависимостей необходимо иметь сведения о методологии получения соответствующих величин: лабораторными или полевыми методами при геотехнических испытаниях, а также ультразвуковыми, акустическими и сейсмическими способами при волновых воздействиях. Желательно также разделять дисперсные грунты на слабосвязные и связные.

Ниже приводятся примеры полученных различными авторами соответствующих корреляционных зависимостей.

Примеры зависимостей между модулем деформации (Едеф) слабосвязных и связных грунтов и динамическим модулем упругости Юнга (Ед) приведены в табл. 2. Следует учесть, что указанные в табл. 2 модули деформации получались различными способами: в лаборатории с помощью компрессионных испытаний (отмечены индексом “к”), в полевых условиях испытаниями опытными штампами или прессиометрами в скважинах (соответственно отмеченные индексами “ш” и “п”). В тех случаях, когда индексы не указаны, способы получения значений Едеф в источниках не были названы. В табл. 2 приведены самые простые по форме корреляционные зависимости между Едеф и Ед. Известны корреляционные

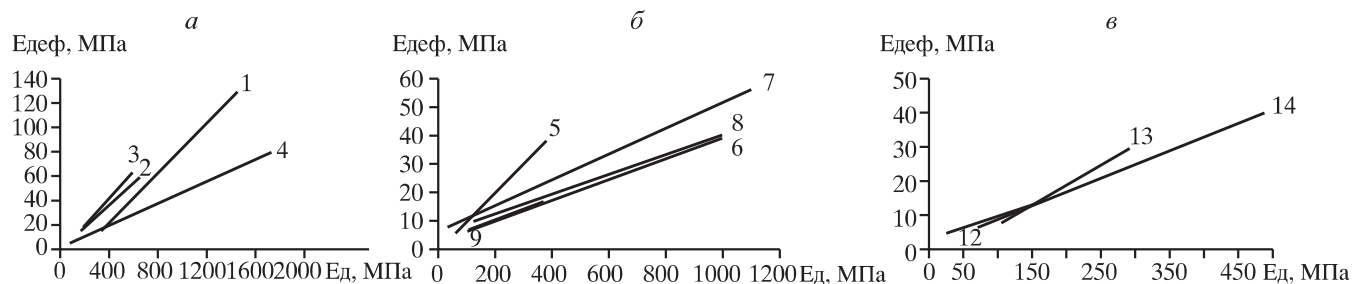


Рис. 3. Графики зависимости модуля деформации $E_{\text{деф}}$ от динамического модуля упругости E_d для: *а* – крупнообломочных грунтов, неводонасыщенных и водонасыщенных песков; *б* – глинистых грунтов (супесей, суглинков разного генезиса, глин); *в* – песчано-глинистых грунтов. Корреляционные зависимости, соответствующие номерам графиков, приведены в табл. 2.

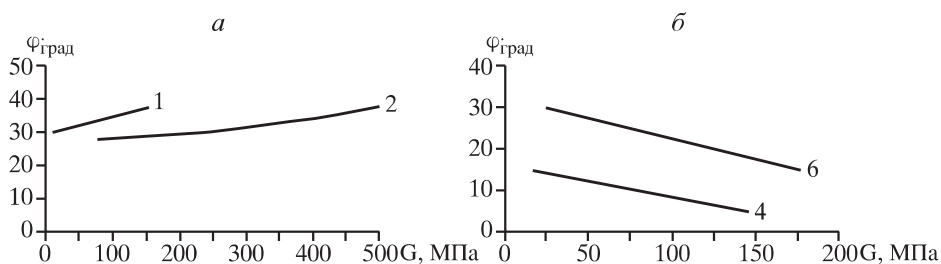


Рис. 4. Графики корреляционных зависимостей между углом внутреннего трения (в градусах) и модулем упругости сдвига (в МПа) для: *а* – песков выше УГВ и водонасыщенных песков; *б* – суглинков неводонасыщенных и песчано-глинистых грунтов. Индексы прямых соответствуют номерам в табл. 3 [4, 23].

связи между модулем деформации дисперсных пород, с одной стороны, и скоростями продольных и поперечных волн – с другой, с введением в множественные зависимости глубины залегания, коэффициента Пуассона, параметров плотности и влажности [3, 4, 20, 23 и др.]. Однако усложнение корреляционных связей, как правило, не приводит к уменьшению погрешностей определения $E_{\text{деф}}$ по данным сейсмоакустики. В.И. Бондарев провел сравнительный анализ в отношении точности определения $E_{\text{деф}}$ дисперсных грунтов геотехническими и сейсмоакустическими методами и установил среднюю относительную погрешность определения $E_{\text{деф}}$ по данным сейсмоакустики в $10 \div 13\%$ [4].

На рис. 3 в качестве примера приведены графики связи модуля деформации ($E_{\text{деф}}$) и динамического модуля упругости (E_d) для крупнообломочных и песчаных грунтов, глинистых грунтов (супесей, суглинков разного генезиса, глин) и неразделенных песчано-глинистых грунтов.

Прочностные характеристики дисперсных грунтов, как было упомянуто ранее, целесообразно связывать с динамическими модулями сдвига или со скоростями поперечных волн (или отношением скоростей продольных и поперечных волн, особенно в водонасыщенных грунтах). К недостаткам установления таких связей относится различная

размерность между углом внутреннего трения φ в градусах, который определяется наклоном графика в координатах $\sigma - P$, где σ – напряжение сдвига и P – вертикальное давление по данным испытаний в сдвиговых приборах, а динамические характеристики имеют размерность МПа (модуль упругости сдвига G) или м(км)/с (скорости P - и S -волн). Более обоснованным, с физической точки зрения, было бы установление корреляционной связи общего сопротивления сдвигу $\tau = P \cdot \operatorname{tg} \varphi + C$, где C – удельное сцепление, с модулем упругости сдвига G , но принятыми расчетными и нормативными характеристиками прочности для дисперсных пород являются именно величины φ и C . Вместе с тем установленные связи φ и C как с G_d , так и с V_s или V_p/V_s с успехом используются в практике для оперативной оценки прочностных показателей дисперсных пород. В табл. 3 приведены известные примеры установленных связей между прочностными показателями дисперсных грунтов φ и C и модулем упругости сдвига G .

На рис. 4 приведены примеры зависимостей угла внутреннего трения (φ , градус) от динамического модуля упругости сдвига (G) для песков выше УГВ и водонасыщенных песков, а также неводонасыщенных суглинков и песчано-глинистых грунтов. Индексы прямых соответствуют номерам в табл. 3.

Таблица 3. Корреляционные зависимости между показателями прочностных свойств дисперсных грунтов и модулем упругости сдвига

№ п/п	Типы и состояние грунтов	Корреляционная зависимость	Коэффициент корреляции	Авторы, источники
Слабосвязные грунты				
1	Пески выше УГВ	$\varphi^0 = 5.64 \cdot 10^{-2}G + 29$	0.72	Бондарев [23]
2	Пески водонасыщенные	$\varphi^0 = 0.378 \cdot 10^{-4}G + 28.6$	0.76	Бондарев [23]
3	Пески выше УГВ	$C = 82.37 \cdot 10^{-5}G - 0.108$	0.85	Бондарев [23]
Связные грунты				
4	Суглинки неводонасыщенные	$\varphi^0 = 16.1 - 0.076G$	0.65	Аникин [1]
5	Лессовидные суглинки	$C = 4.8 \cdot 10^{-4}G - 0.008$	0.90	Миндель [23]
6	Песчано-глинистые грунты	$\varphi^0 = 32.5 - 0.099G$	0.72	Аникин [1]
7	Песчано-глинистые грунты	$C = 4.8 \cdot 10^{-4}G + 0.0087$	0.82	Бондарев [23]

В.И. Бондарев для песков и глинистых грунтов Урала и Сибири установил корреляционные зависимости угла внутреннего трения φ в градусах от отношения скоростей продольных и поперечных волн V_p/V_s с достаточно высокой теснотой связи (коэффициенты корреляции $r = 0.8 \div 0.9$) [3, 4]. Графики таких зависимостей показаны на рис. 5.

Для удельного сцепления C также установлены корреляционные зависимости с модулем упругости сдвига G , с V_s и V_p/V_s (см. табл. 3) [3, 4, 21 и др.]. На рис. 6 из книги О.К. Воронкова заимствованы графики связи сцепления от модуля упругости сдвига [5]. Следует отметить, что все корреляционные зависимости C от динамических характеристик по данным сейсмоакустики установлены для диапазона изменения C от 0.01 до 0.15 МПа и пределов изменения G от 5 до 300 МПа.

При геотехнических исследованиях свойств дисперсных грунтов в нашей стране и за рубежом широко применяются методы динамического и статического зондирования. В строительных правилах [23] приводятся таблицы, позволяющие по значению удельного сопротивления грунта под конусом (q_c) при статическом зондировании и по условному динамическому сопротивлению грунта погружению зонда (P) при динамическом зондировании определять нормативные значения модуля деформации и угла внутреннего трения песчаных и глинистых грунтов. За рубежом при динамическом зондировании стандартным конусом (SPT) принято использовать значения N – число ударов при погружении зонда на 30 см. В частности, по значениям N оцениваются скорости поперечных волн или динамические модули упругости сдвига (G_0) в водонасыщенных песках и “слабых” гли-

нистых грунтах. Например, по данным японских исследователей $V_s(\pm 64 \text{ м/с}) = 106.2 \cdot N^{0.289}$ [27] и $G_0 = aN^b$, где a изменяется от 1.0 до 1.58 МПа, b – от 0.67 до 0.80 в зависимости от типа грунта [12].

В Еврокоде-8 [26] для толщи плотных песков, гравийных грунтов и очень плотных глин мощностью 30 м при $N > 50$ приведены значения $V_s = 360 \div 800 \text{ м/с}$, в песчано-глинистых грунтах при $N = 15 \div 50$ – $V_s = 180 \div 360 \text{ м/с}$, в относительно более слабых песчано-глинистых грунтах при $N < 15$ – $V_s < 180 \text{ м/с}$. На основании сведений о возможности оценки нормативных значений модуля деформации и угла внутреннего трения песков, суглинков и глин по значениям q_c по данным статического зондирования, используя соответствующие корреляционные зависимости этих показателей деформирования и прочности с динамическими модулями упругости (E_d или G_d), можно перейти к оценочным значениям q_c по данным сейсмоакустики. Например, воспользовавшись табл. И.7 в Приложении И СП 47.13330.2012 [24] и зависимостями 2 и 3 в приведенной выше табл. 3 для аллювиальных и флювиогляциальных песков, получим $q_c = 0.074 \cdot E_d - 11$. В графическом отображении эта зависимость показана на рис. 7.

Известны зависимости для дисперсных грунтов между рядом их физических показателей (плотность, пористость, влажность, показатели консистенции и др.), с одной стороны, и скоростями продольных и поперечных волн – с другой. Такие связи приведены в нескольких публикациях [3, 4, 7, 8]. Здесь для примера в табл. 4 приведены корреляционные зависимости между плотностью



Рис. 5. Зависимость между углом внутреннего трения и отношением V_p/V_s для водонасыщенных песков [3, 4].

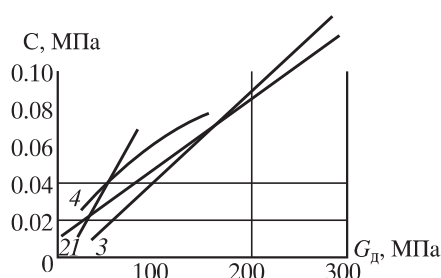


Рис. 6. График связи сцепления (C) и динамического модуля сдвига (G_d) для талых неводонасыщенных пород при положительной температуре: песчано-глинистые грунты: 1 – Урала и Западной Сибири, 2 – ряда районов России (по В.И. Бондареву); 3 – лессы и лессовидные суглинки Юга Украины (по И.Г. Минделю); 4 – четвертичные суглинки средней полосы России при ускоренном сдвиге (по О.П. Аникину) [1].

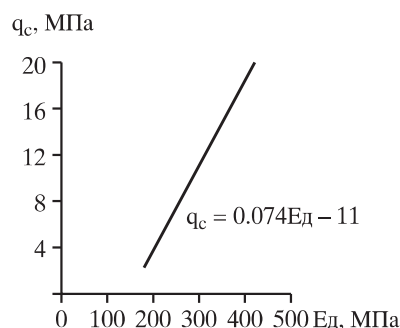


Рис. 7. Зависимость между сопротивлением внедрению конуса (q_c) по данным статического зондирования и модулем упругости (E_d) по данным сейсмоакустики для аллювиальных и флювиогляциальных песков. Построена по данным таблицы И.7 [СП 47.13330.2012] и зависимостям 2, 3 в табл. 3.

(ρ_0) и плотностью скелета ($\rho_{ск}$) грунтов и скоростями V_p или V_s .

Заметим, что связи между отдельными показателями физических свойств дисперсных грунтов с такими интегральными характеристиками, как скорости P - и S -волн или динамические модули упругости E_d и G_d , с теоретической точки зрения, мало обоснованы, так как показатели физических свойств характеризуют лишь отдельные свойства среды, сумма и взаимодействие которых и определяет ее реакцию на внешние воздействия. А именно: изучение реакции грунтов на внешние воздействия по существу цель инженерных изысканий.

Вместе с тем установление корреляционных связей плотности, влажности, степени влажности, коэффициентов пористости, показателей консистенции со скоростями P - и S -волн в дисперсных грунтах различного литологического состава в различных регионах в некоторых случаях могут оказаться полезными для предварительной оперативной оценки характеристик их физических свойств.

В начале 1980-х годов была разработана компьютерная программа “Грунт-2”, позволяющая рассчитывать по годографам наземных наблюдений методом преломленных волн (МПВ) и скважинных наблюдений методом вертикального сейсмического профилирования (ВСП) скорости P - и S -волн в зависимости от глубины. Позже к этой программе была подключена подпрограмма “Волна” для расчета по скоростям V_p и V_s модуля деформации для песков, супесей, суглинков и глин по корреляционным зависимостям вида $E_{деф} = a + bE_d + c\mu + dZ$, где E_d – модуль упругости Юнга; μ – динамический коэффициент Пуассона; Z – глубина в м; a, b, c, d – численные коэффициенты, значения которых определялись для каждого типа дисперсных грунтов (песков различной крупности, супесей, суглинков и глин от твердых до текучих). Аналогичные корреляционные зависимости от динамических параметров были включены в программу “Волна” для угла внутреннего трения и удельного сцепления. Сопоставление результатов расчетов $E_{деф}$, φ^0 и C по программе “Волна” с независимыми результатами определения этих показателей по данным лабораторных испытаний показали сравнительно удовлетворительную сходимость: расхождения не превышали $20 \div 25\%$.

В заключение раздела об оценке показателей деформационных и прочностных свойств дисперсных пород по данным сейсмоакустики следует

Таблица 4. Корреляционные зависимости между показателями плотности дисперсных грунтов и скоростями продольных и поперечных волн

№ п/п	Типы и состояние грунтов	Корреляционная зависимость	Коэффициент корреляции	Авторы, источники
Слабосвязные грунты				
1	Пески любой степени влажности	$\rho_0 = 1.115 \cdot V_s + 1444$	0.84	Бондарев [4]
2	Пески любой степени влажности	$\rho_{ск} = 0.332 \cdot V_s + 1660$	0.81	Бондарев [4]
Связные грунты				
3	Четвертичные суглинки неводонасыщенные	$\rho_0 = 1719 + 0.29 \cdot V_p$	0.67	Аникин [1]
4	Песчано-глинистые грунты неводонасыщенные	$\rho_0 = 1850 \cdot (10^{-3} \cdot V_p)^{0.232}$	0.78	Бондарев [1]
5	Песчано-глинистые грунты любой влажности	$\rho_0 = 2180 \cdot (10^{-3} \cdot V_s)^{0.222}$	0.78	Бондарев [1]
6	Лессы	$\rho_{ск} = 1190 + 0.475 \cdot V_s$	0.67	Горяинов, Полякова, [7]
7	Четвертичные суглинки неводонасыщенные	$\rho_{ск} = 1380 + 0.33 \cdot V_p$	0.67	Аникин [1]

Примечание. ρ_0 и $\rho_{ск}$ в кг/м³, V_p и V_s в м/с.

отметить перспективность этого направления инженерной геофизики. По мере совершенствования как геотехнических испытаний, так и сейсмоакустических методов следовало бы продолжить поиски новых корреляционных связей для различных типов грунтов с учетом их региональных особенностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникин О.П., Горшенин Ю.В. Методические рекомендации по определению состава, состояния и свойств грунтов сейсмоакустическими методами. М.: ВНИИ Транспортного строительства, 1985. 89 с.
2. Берзон И.С., Епинатьева Л.М., Парийская Л.Н., Стародубовская Е.А. Динамическая характеристика сейсмических волн в реальных средах. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 511 с.
3. Бондарев В.И. Рекомендации по применению сейсмической разведки для изучения физико-механических свойств рыхлых грунтов в естественном залегании для строительных целей. М.: Стройиздат, 1974. 142 с.
4. Бондарев В.И. Сейсмический метод определения физико-механических свойств нескальных грунтов. Екатеринбург: УГГГА, 1997. 220 с.
5. Воронков О.К. Инженерная сейсмика в криолитозоне (изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов). СПб.: Изд-во ОАО "ВНИИГ им Б.Е. Веденеева", 2009. 401 с.
6. Горькова И.М. Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях. М.: Стройиздат, 1975. 150 с.
7. Горяинов Н.Н., Полякова Т.А. Применение методов сейсмоакустики для определения физико-механических свойств глинистых грунтов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М.: ВИЭМС, 1970. С. 46–55.
8. Горяинов Н.Н., Ляховицкий Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. М.: Недра, 1979. 144 с.
9. Григорьев В.А. Сейсмоакустические и комплексные методы определения деформативных и прочностных характеристик грунтов // Динамика оснований и фундаментов. М.: Изд-во НИИОСП, 1969. Т. 11. С. 90–97.
10. Гуревич Г.И. Деформируемость сред и распространение сейсмических волн. М.: Наука, 1974. 484 с.
11. Дерягин Б.В., Кусаков М.М. Свойства тонких слоев жидкости и их влияние на взаимодействие твердых поверхностей // Изв. АН СССР. Отд. математических и естественных наук. 1936. № 5. С. 1571–1588.
12. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях. СПб.: НПО "Геореконструкция-Фундаментпроект", 2006. 383 с.
13. Кригер Н.И., Алешин А.С., Кожевников А.Д., Миндель И.Г. Сейсмические характеристики лессовых пород в связи с геологическим окружением и техногенезом. М.: Наука, 1980. 103 с.
14. Кригер Н.И., Кожевников А.Д., Миндель И.Г. Сейсмические свойства дисперсных пород (сейсмоли-

- тоэкологический подход). М.: ИНЖЭКО, 1994. 195 с.
15. Ляховицкий Ф.М. О скоростях распространения продольных волн в зернистых средах // Тр. Гидропроекта. 1960. Сб. 3. С. 319–325.
 16. Миндель И.Г. Изучение физико-механических свойств лессовидных пород сейсмоакустическими методами // Тр. ПНИИИС. 1970. Вып. 4. С. 278–298.
 17. Миндель И.Г. Методика сейсмоакустических исследований физико-механических свойств связанных и малосвязных грунтов // Тр. ПНИИИС. 1975. Вып. 35. С. 3–25.
 18. Молотова Л.В. Изучение скоростей распространения продольных и поперечных волн в реальных средах // Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИФЗ им. О.Ю. Шмидта, 1967. 20 с.
 19. Николаев А.В. Сейсмические свойства грунтов. М.: Наука, 1965. 184 с.
 20. Николаев И.А., Зиангиров Р.С., Трифонов Б.А., Миндель И.Г. и др. Оценка строения и свойств дочетвертичных дисперсных и скальных карбонатных грунтов в массиве сейсмоакустическими методами // Инженерные изыскания для строительства: практика и опыт Мосгоргеотреста. М.: ООО Изд-во “Перспект”, 2012. С. 257–273.
 21. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии / Под ред. Н.Н. Горяинова. М.: Наука, 1992. 260 с.
 22. Ребиндер А.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. М.: Наука, 1979. 384 с.
 23. СП 11-105-97. Часть VI. Правила производства геофизических работ. М.: Госстрой России, 2004. 50 с.
 24. СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. М.: Госстрой РФ, 2013.
 25. Фрейденваль А., Гейрингер Х. Математические теории неупругой сплошной среды. М.: Физматиздат, 1962. 432 с.
 26. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. EN 1998-1 : 2004.
 27. Ogura K., Nakanishi S. Development of the Suspension S-wave Logging System//OYO Corporation Technical Report, № 2, Tokyo, 1980. P. 37–50.
 - with seismoacoustic methods]. Moscow, VNII Transportnogo stroitel'stva Publ., 1985, 89 p. (in Russian).
 2. Berzon, I.S., Epinat'eva, L.M., Pariiskaya, L.N., Starodubrovskaya, E.A. *Dinamicheskaya kharakteristika seismicheskikh voln v real'nykh sredakh* [Dynamic characteristic of seismic waves in actual media]. Moscow, AN SSSR Publ., 1962, 511 p. (in Russian).
 3. Bondarev, V.I. *Rekomendatsii po primeneniyu seismicheskoi razvedki dlya izucheniya fiziko-mekhanicheskikh svoistv rykhlykh gruntov v estestvennom zaleganiy dlya stroitel'nykh tselei* [Recommendations for the application of seismic survey for the study of physico-mechanical properties of loose soils in situ for the construction purposes]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1974, 142 p. (in Russian).
 4. Bondarev, V.I. *Seismicheskii metod opredeleniya fiziko-mekhanicheskikh svoistv neskal'nykh gruntov* [Seismic method of determination of physico-mechanical properties of soils]. Ekaterinburg, UGGA Publ., 1997, 220 p. (in Russian).
 5. Voronkov, O.K. *Inzhenernaya seismika v kriolitozone (izuchenie stroeniya i svoistv merzlykh i talykh gornnykh porod i massivov)* [Engineering seismology in the permafrost zone (the study of structure and properties of frozen and nonfrozen soils, rocks and massifs)]. St. Petersburg. OAO “VNIIG im. B.E. Vedeneeva” Publ., 2009, 401 p. (in Russian).
 6. Gor'kova, I.M. *Fiziko-khimicheskie issledovaniya dispersnykh osadochnykh porod v stroitel'nykh tselyakh* [Physicochemical studies of fine-grained sedimentary rocks in construction purposes]. Moscow. Stroiizdat Publ., 1975. 150 p. (in Russian).
 7. Goryainov, N.N., Polyakova, T.A. *Primenenie metodov seismoakustiki dlya opredeleniya fiziko-mekhanicheskikh svoistv glinistykh gruntov pri gidrogeologicheskikh i inzhenerno-geologicheskikh issledovaniyakh* [Application of seismoacoustico methods to the determination of physico-mechanical properties of clay soils upon hydrogeological and engineering-geological studies]. Moscow. VIEMS Publ., 1970, pp. 46–55 (in Russian).
 8. Goryainov, N.N., Lyakhovitskii, F.M. *Seismicheskie metody v inzhenernoi geologii*. [Seismic methods in engineering geology]. Moscow. Nedra Publ., 1979, 144 p. (in Russian).
 9. Grigor'ev, V.A. *Seismoakusticheskie i kompleksnye metody opredeleniya deformativnykh i prochnostnykh kharakteristik gruntov* [Seismoacoustic and combined methods of determining deformation and strength characteristics of soils]. *Dinamika osnovanii i fundamentov*. Moscow. NIOSP Publ., 1969, vol. 11. pp. 90–97 (in Russian).
 10. Gurevich, G.I. *Deformiruemost' sred i rasprostraneniye seismicheskikh voln* [Deformability of media and

REFERENCES

- spreading of seismic waves]. Moscow. Nauka Publ., 1974. 484 p. (in Russian).
11. Deryagin, B.V., Kusakov, M.M. *Svoistva tonkikh sloev zhidkosti i ikh vliyanie na vzaimodeistvie tverdykh poverkhnostei* [Properties of thin liquid layers and their influence on interaction of solid surfaces]. *Izvestiya AN SSSR. Otd. matematicheskikh i estestvennykh nauk*, 1936, no. 5, pp. 1571–1588 (in Russian).
 12. Ishikharu, K. *Povedenie gruntov pri zemletryaseniyakh* [Soil Behavior in Earthquake]. St. Petersburg. NPO "Georekonstruktsiya-Fundamentproekt" Publ., 2006, 383 p. (Ishihara K. *Soil Behaviour in Earthquake*. Geotechnics. Clarendon Press, 1996. 350 p.)
 13. Kriger, N.I., Aleshin, A.S., Kozhevnikov, A.D., Mindel', I.G. *Seismicheskie kharakteristiki lessovykh porod v svyazi s geologicheskimi okruzeniem i tekhnogenezom* [Seismic parameters of loess soils in connection with geoenvironment and technogenesis]. Moscow. Nauka Publ., 1980, 104 p. (in Russian).
 14. Kriger, N.I., Kozhevnikov, A.D., Mindel', I.G. *Seismicheskie svoistva dispersnykh porod (seismolitoekologicheskii podkhod)* [Seismic properties of fine soils (seismo-lithoecological approach)]. Moscow. IN-ZhEKO Publ., 1994, 195 p. (in Russian).
 15. Lyakhovitskii, F.M. *O skorostyakh rasprostraneniya prodol'nykh voln v zernistykh sredakh* [About velocity of distribution of longitudinal waves in granular media]. *Tr. Gidroproekta*. 1960, vol. 3, pp. 319–325 (in Russian).
 16. Mindel', I.G. *Izuchenie fiziko-mekhanicheskikh svoistv lessovidnykh porod seismoakusticheskimi metodami* [Study of physico-mechanical properties of loess soils by seismoacoustic methods]. *Tr. PNIIS*, 1970, vyp. 4, pp. 278–298 (in Russian).
 17. Mindel', I.G. *Metodika seismoakusticheskikh issledovaniy fiziko-mekhanicheskikh svoistv svyaznykh i malosvyaznykh gruntov* [Technique of seismoacoustic study of physico-mechanical properties of coherent and low coherent soils]. *Tr. PNIIS*. 1975, vyp. 35, pp. 3–25 (in Russian).
 18. Molotova, L.V. *Izuchenie skorostei rasprostraneniya prodol'nykh i poperechnykh voln v real'nykh sredakh. Avtoref. diss. kand. fiz.-mat. nauk* [Study of velocity of distribution of longitudinal and shear waves in actual media. Extended abstract of Cand. Sci. Dissertation (Phys.-Math.)]. Moscow, IFZ im. O.Yu. Shmidta Publ., 1967, 20 p. (in Russian).
 19. Nikolaev, A.V. *Seismicheskie svoistva gruntov* [Seismic properties of grounds]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 184 p. (in Russian).
 20. Nikolaev, I.A., Ziangirov, R.S., Trifonov, B.A., Mindel', I.G. et al. *Otsenka stroeniya i svoistv dochetvertichnykh dispersnykh i skal'nykh karbonatnykh gruntov v massive seismoakusticheskimi metodami*. [Estimation of structure and properties of preQuaternary soil and rock massifs by seismoacoustic methods]. *Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva: praktika i opyt Mosgorgeotresta*. [Engineering research for construction: practice and experience of Mosgorgeotrest]. Moscow, OOO "Prospekt" Publ., 2012. pp. 257–273. (in Russian).
 21. *Primenenie seismoakusticheskikh metodov v gidrogeologii i inzhenernoi geologii* [Application of seismoacoustic methods in hydrogeology and engineering geology]. Goryainov, N.N., Ed. Moscow, Nauka Publ., 1992, 260 p. (in Russian).
 22. Rebindar, A.A. *Izbrannye trudy. Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh*. [The selected works. Surface phenomena in disperse systems]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 384 p. (in Russian).
 23. *SP 11-105-97. Chast' VI. Pravila proizvodstva geofizicheskikh rabot* [Construction rules 11-105-97. Part VI. Rules of performing geophysical works]. Moscow. Gosstroj RF Publ., 2004, 50 p. (in Russian).
 24. *SP 47.13330.2012. Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva. Osnovnye polozheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 1-02-96* [Construction rules 47.13330.2012. Engineering survey for construction. Basic statements. Updated edition SNIp 11-02-96]. Moscow. Gosstroj RF Publ., 2013 (in Russian).
 25. Freidental', A., Geiringer, H. *Matematicheskie teorii neuprugoi sploshnoi sredy*. [Mathematical theories of nonelastic continuum]. Moscow. Fizmatizdat Publ., 1962, 432 p. (in Russian).
 26. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. EN 1998-1 : 2004.
 27. Ogura, K., Nakanishi, S. Development of the Suspension S-wave Logging System. *OYO Corporation Technical Report*, no. 2, Tokyo, 1980, pp. 37–50.

THE STUDY OF DEFORMABILITY AND STRENGTH OF FINE-GRAINED SOILS BY SEISMOACOUSTIC METHODS

I. G. Mindel, V. V. Sevost'yanov, B. A. Trifonov, N. A. Ragozin

Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per. 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia. E-mail: igelab@mail.ru.

Fine-grained soils represent complex three-phase media (or four-phase at negative temperatures), manifesting elastic-viscous-plastic properties. For construction purposes, their deformability and strength parameters are determined by various laboratory and field methods, requiring direct contact with ground for applying compressive or shifting load. Each method has certain advantages or drawbacks. The geophysical, in particular, seismoacoustic methods, which, being applied distantly, do not disturb the soil massif integrity (this fact being the methods' advantage) are used not often. The parameters of soil deformability and strength upon its static loading are the analogues to the parameters of elastic properties upon the dynamic impact on soil. The difference consists in different reaction of soil medium to the intensity, duration and change in time of external influences. Elastic, viscous and plastic properties are manifested to different extent in soils depending on the type of external impact in fine-grained soils. The article considers theoretical models of elastic-viscous-plastic media studying the relationships between the deformation-strength parameters at static loading and the elastic parameters upon short-term dynamic impacts. These theoretical models of fine-grained soils allow us to reveal the regularities of relationship between the deformational, strength and rheological properties of soils, on one hand, and their elastic properties, on the other hand. However, some uncertainty upon determination, for example, absorption of elastic waves, as well as certain conventional assumptions at schematization of theoretical models prevents from the wide application of these functional dependences for estimation of deformability and strength of fine-grained soils according to the parameters of elastic properties. At the same time, the analysis of models permits choosing the best physically grounded correlation option. The paper presents the correlation dependences between the indices of deformation and strength properties of various types of fine-grained soils, on one hand, and their elastic properties parameters, on the other hand, based on seismoacoustic data and suitable for practical use in engineering survey.

Keywords: *elastic-viscous-plastic medium, fine-grained soils, deformational and strength properties, seismoacoustics.*