

Деформационные характеристики четвертичных глинистых грунтов по результатам инженерно-геологических и ультразвуковых исследований

М.Л. Владов, С.К. Николаева, А.Н. Ошкин, Е.В. Пиоро

Ключевые слова: глинистые грунты, деформационные свойства, ультразвуковые исследования, корреляционные взаимосвязи

Аннотация

В статье приводятся результаты поиска корреляционных взаимосвязей между показателями деформационных свойств глинистых грунтов, полученных при статическом нагружении и ультразвуковом просвечивании. Исследования проводились на природных четвертичных и искусственных (приготовленных из паст) глинистых грунтах. Изучение деформационных свойств проводилось с помощью компрессионных испытаний, одноосного сжатия и лабораторных ультразвуковых исследований. На основе анализа экспериментальных данных получены уравнения взаимосвязи динамического модуля упругости с начальным модулем сжатия, относительным модулем деформации (по результатам одноосного сжатия) и модулем общей деформации (по компрессионным испытаниям), описываемые экспоненциальными законами как для модельных, так и для природных четвертичных грунтов.

Deformation characteristics of Quaternary clay soils on the results of engineering-geological and ultrasonic research

Vladov M.L., Nikolaeva S. K., Oshkin A.N., Pioro E.V.

Key words: clay soils, deformation properties, ultrasonic research, correlations

Abstract

The article is devoted to the search of correlations between the indices of deformation properties of clay soils, obtained under static loading and ultrasonic scanning. Research were conducted on natural Quaternary and artificial (made from pastes), clayey soils. The study of the deformation properties was carried out using a oedometer test, uniaxial compression and laboratory ultrasonic. According to the results of the tests obtained by equation correlation of the Young's modulus of with initial compression module and relative modulus of deformation (according to the results of uniaxial tests) module and oedometer modulus (compression tests), described by exponential laws for both model and natural Quaternary soils.

Введение

Деформационные характеристики – одни из наиболее важных показателей свойств грунтов, используемых при проектировании и строительстве зданий и инженерных сооружений. Традиционные виды испытаний длительны и трудоемки, поэтому надежное и быстрое определение показателей деформационных свойств глинистых грунтов является актуальным направлением исследований. Перспективной представляется возможность применения косвенных методов - геофизических сейсмоакустических исследований. Их преимущества заключаются в простоте эксперимента и малых временных затратах. Поэтому проведение исследований деформационных свойств глинистых грунтов

инженерно-геологическими и геофизическими методами и совместный анализ результатов является актуальным направлением науки и практики.

Данные экспериментальных исследований деформационных свойств глинистых грунтов с помощью классических лабораторных методов инженерной геологии в сопоставлении с динамическими характеристиками в опубликованной литературе немногочисленны. С одной стороны, это связано со сложностью исследования глинистых грунтов как объекта, с другой, – колоссальной изменчивостью их свойств. Вопрос о сравнении статических и динамических (упругих) модулей пород, связан с совершенно различным характером воздействия на образец в этих двух группах методов исследований. В такой ситуации, рабочим инструментом является поиск и проверка корреляционных связей между деформационными характеристиками глинистых грунтов и их динамическими модулями.

Наиболее близка исследуемой тематике работа Кригера Н.И., Минделя И.Г. и др. [5], в которой приведены полученные корреляционные зависимости показателей деформационных свойств лессовых грунтов. Авторам удалось установить устойчивые связи между компрессионным модулем деформации и динамическим модулем Юнга. Эти исследования относятся к 80-м годам прошлого века, после чего каких-либо значимых исследований, особенно в отношении глинистых грунтов, практически не проводилось.

В последнее время была значительно усовершенствована аппаратура для проведения ультразвуковых исследований, что позволило повысить точность измерений и возможность контроля параметров во время опыта.

Основной **целью** работы было установление корреляционных взаимосвязей между показателями деформационных свойств глинистых грунтов, полученных при статическом нагружении и ультразвуковом просвечивании, как обоснование способа предварительной экспресс-оценки этих свойств по результатам измерения скоростей упругих волн (причем полученным как в лаборатории, так и на керне или монолите в полевых условиях).

Характеристика объектов исследования

В качестве объектов исследования на первом этапе были взяты модельные глинистые грунты, приготовленные из моренного суглинка (gQ₁dn_s) нарушенной структуры, отобранного на территории г. Москвы, с песчаными добавками и без них (M1-M4). Глинистые пасты закладывались в разъемные формы и уплотнялись под действием статической нагрузки от 0,02 до 0,12 МПа в течение одних суток для получения модельных образцов, различающихся по плотности скелета и влажности. Выбор модельных глинистых грунтов был обоснован необходимостью получить образцы с фиксированными исходными состоянием и свойствами.

На втором этапе изучение деформационных свойств проводилось на образцах природных глинистых грунтов (суглинках донской морены (gQ₁dn_s), отобранных на территории Москвы и Московской области.

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что с учетом гранулометрического состава и показателей пластичности по [3] модельные грунты соответствовали суглинкам тяжелым пылеватым (M1), суглинкам легким песчанистым (M2), супесям песчанистым (M3, M4). Четвертичные грунты представлены в основном легкими пылеватыми и песчанистыми суглинками и песчанистыми супесями.

Диапазоны изменения показателей физических свойств исследуемых глинистых грунтов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Диапазоны изменения показателей физических свойств грунтов

Образцы	Плотность ρ , г/см ³	Плотность скелета ρ_d , г/см ³	Плотность твердых частиц ρ_s	Пористость n , %	Коэффициент пористости e	Влажность w , %	Степень влажности и S_r , д.ед.	Показатель консолидации C_u
Суглинки М1	$\frac{1,54-2,30}{2,01}$	$\frac{1,42-2,14}{1,86}$	2,69	$\frac{20-47}{31}$	$\frac{0,25-0,88}{0,46}$	$\frac{8-15}{10}$	$\frac{0,24-0,90}{0,67}$	<0
Суглинки М2	$\frac{1,77-2,23}{2,05}$	$\frac{1,63-2,04}{1,86}$	2,68	$\frac{24-39}{31}$	$\frac{0,32-0,65}{0,45}$	$\frac{7-15}{10}$	$\frac{0,32-0,82}{0,63}$	<0
Супеси М3	$\frac{1,88-2,28}{2,16}$	$\frac{1,77-2,09}{2,00}$	2,67	$\frac{20-33}{25}$	$\frac{0,25-0,50}{0,33}$	$\frac{5-12}{8}$	$\frac{0,29-0,91}{0,67}$	<0
Супеси М4	$\frac{1,76-2,30}{2,16}$	$\frac{1,69-2,13}{2,00}$	2,66	$\frac{21-37}{25}$	$\frac{0,26-0,58}{0,34}$	$\frac{4-11}{8}$	$\frac{0,19-0,90}{0,66}$	<0
Четвертичные суглинки и супеси (gQids)	$\frac{2,02-2,21}{2,14}$	$\frac{1,80-1,98}{1,91}$	$\frac{2,69-2,87}{2,80}$	$\frac{29-37}{32}$	$\frac{0,42-0,58}{0,47}$	$\frac{11-14}{12}$	$\frac{0,60-0,82}{0,74}$	$\frac{-0,56-0,63}{0,17}$

Примечание: в числителе дроби приведены минимальные-максимальные значения, в знаменателе – среднее.

Методика исследований

Для оценки деформационных свойств в лабораторных условиях проводились автоматизированные компрессионные испытания и одноосное сжатие на приборах производства ООО «НПП «Геотек»» и ультразвуковые исследования.

Модули общей деформации по результатам компрессионных испытаний рассчитывались по стандартной методике [2] на ступенях нагружения 0,1-0,3 МПа и 0,3-0,5 МПа. Поскольку исследуемые грунты очень разнообразны по своей сжимаемости на разных ступенях, их сравнение между собой было затруднительно, поэтому расчет модулей общей деформации проводился также по участку нагружения от природного давления $P_{пр}$ до давления предела пропорциональности $P_{пп}$ (по аналогии со штамповыми испытаниями, согласно стандарту МОСГОРГЕОТРЕСТ (2009) и работе Р.С.Зиангирова и А.Г. Кошелева [4]). Для образцов моренных суглинков диапазон нагрузок $P_{пр}$ - $P_{пп}$ составил 0,15 – 0,35 МПа. По результатам испытаний на одноосное сжатие производился расчет начального модуля сжатия E_n и модуля относительной деформации $E_{отн}$. Расчет E_n проводился по начальному линейному участку графика $\sigma(\epsilon)E_n = \Delta\sigma/\Delta\epsilon$ (по М.Н.Гольдштейну, 1952). Диапазон нагрузок менялся от 0 до 0,1 МПа. Согласно [1], для расчета модуля относительной деформации глинистых грунтов $E_{отн}$ принимается спрямленный участок кривой $\sigma(\epsilon)$ от нуля до значения $\sigma = \frac{R_c}{3}$, причем, считается, что при этих напряжениях в глинистых грунтах еще не возникает пластическое течение (R_c – временное сопротивление грунта одноосному сжатию). Коэффициент поперечного расширения μ_0 определялся по линейному участку

графика соотношения поперечных и продольных относительных деформаций в пределах значений вертикальной (продольной) деформации 0,5-1%.

Измерение скоростей продольных и поперечных волн производилось по методике прямого просвечивания. Так как определение времени прихода S-волны часто бывает затруднено интерференцией с P-волнами, приходящими первыми, измерения проводились на различных базах: образец последовательно укорачивался, а на каждой итерации при одинаковом напряженном состоянии, выполнялись записи. Это позволяло контролировать как форму импульса поперечной волны, так и рассчитывать скорость по наклону годографа – относительному изменению времени прихода волны в зависимости от расстояния между датчиками.

Пример записей, полученных на одном образце в ходе трех итераций укорачивания показан на рис. 1. Красными метками отмечены времена прихода P-волн, зелеными – S-волн.

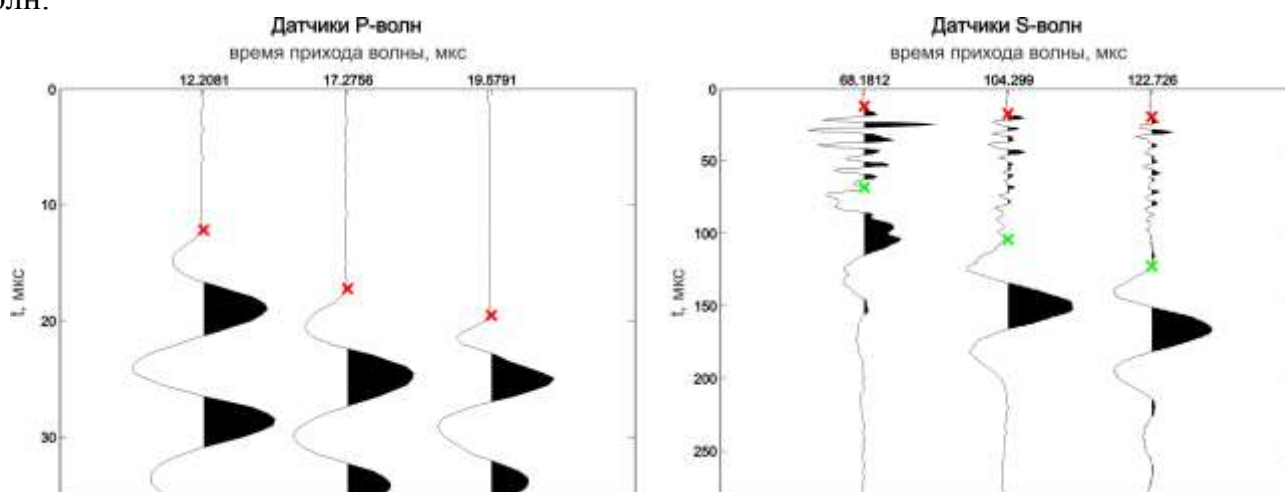


Рис. 1. Пример выделения времен вступления P-волн (красные метки) и S-волн (зеленые метки) на разных базах просвечивания. Временной масштаб различается.

В качестве источников и приемников сдвиговых колебаний использовались пьезодатчики сдвиговых колебаний Panasonic V1548 с центральной частотой 100 кГц. Для контроля правильности выделения продольной волны применялись пьезодатчики поршневого типа П-111 с той же центральной частотой. Запись и регистрация производились с помощью цифрового низкочастотного дефектоскопа УД2Н.

По результатам ультразвуковых исследований получены значения скоростей продольных (V_p), поперечных волн (V_s) и отношение скоростей (V_s/V_p), а также рассчитаны динамический модуль упругости (E_d) и коэффициент Пуассона (μ) в соответствии с общеизвестными формулами (табл. 2).

Таблица 2. Результаты ультразвуковых исследований

Образцы грунтов (количество)	V_p , м/с	V_s м/с	V_s/V_p	Динамический модуль упругости E_d , МПа	Коэффициент Пуассона μ
Суглинки М1 (20)	$\frac{400-2000}{1260}$	$\frac{200-550}{360}$	$\frac{0,20-0,54}{0,32}$	$\frac{170-1680}{830}$	$\frac{0,29-0,48}{0,43}$
Суглинки М2 (24)	$\frac{700-2000}{1440}$	$\frac{300-500}{380}$	$\frac{0,16-0,50}{0,28}$	$\frac{650-1620}{900}$	$\frac{0,33-0,49}{0,45}$
Супеси М3 (30)	$\frac{520-1700}{1180}$	$\frac{160-500}{360}$	$\frac{0,22-0,52}{0,31}$	$\frac{160-1600}{870}$	$\frac{0,31-0,48}{0,44}$
Супеси М4 (29)	$\frac{720-1500}{1130}$	$\frac{190-420}{320}$	$\frac{0,18-0,43}{0,29}$	$\frac{220-1050}{660}$	$\frac{0,39-0,48}{0,45}$
Суглинки и супеси (gQIdns) (25)	$\frac{1050-2000}{1700}$	$\frac{170-410}{310}$	$\frac{0,08-0,42}{0,19}$	$\frac{200-950}{635}$	$\frac{0,45-0,47}{0,48}$

Примечание: в числителе дроби приведены минимальные-максимальные значения, в знаменателе – среднее; в скобках – количество исследованных образцов

Результаты исследований

Для модельных суглинков и супесей компрессионных исследований не проводилось (в связи с несоответствием диаметра образцов размерам компрессионного кольца), поэтому поиск взаимосвязей проводился только по результатам определения прочности на одноосное сжатие. Как следует из полученных данных, коэффициенты корреляции начального модуля сжатия (E_n) и динамического модуля упругости (E_d) менялись от 0,82 до 0,93, что соответствует тесной и весьма тесной связи.

Также было замечено, что взаимосвязь для рассматриваемых модельных образцов (М1-М4) не зависит от дисперсности, поэтому было получено общее уравнение связи (рис. 2, а):

$$E_n = 13,71 \times e^{0,001 \times E_d} \text{ (коэффициент корреляции } r=0,85\text{).}$$

Для образцов природных суглинков и супесей было получено похожее уравнение связи (рис. 2, а):

$$E_n = 6,94 \times e^{0,001 \times E_d} \text{ (коэффициент корреляции } r=0,71\text{).}$$

При сопоставлении относительного модуля деформации и динамического модуля упругости полученные связи наилучшим образом описываются экспоненциальным законом (рис. 2, б):

$$E_{отн} = 20,95 \times e^{0,001 \times E_d}, r=0,75 \text{ для всех модельных грунтов;}$$

$$E_{отн} = 2,96 \times e^{0,002 \times E_d}, r=0,68 \text{ для природных четвертичных грунтов.}$$

Уравнения связи динамического модуля упругости с модулями, полученными по результатам одноосного сжатия, похожи, однако, коэффициенты корреляции с начальными модулями сжатия выше, чем с относительными модулями деформации для модельных грунтов. Для природных образцов в данном случае наблюдается обратное. По мнению авторов наиболее информативна взаимосвязь динамического модуля упругости с

начальным модулем сжатия, поскольку E_n наиболее полно отражает характер развития процесса деформирования для грунтов различной консистенции.

Также были получены корреляционные взаимосвязи динамического модуля упругости и модуля общей деформации для природных четвертичных грунтов, рассчитанного по данным компрессионного сжатия (рис. 3):

$$E_0 = 5,8 \times e^{0,001 \times E_d}, (r=0,75).$$

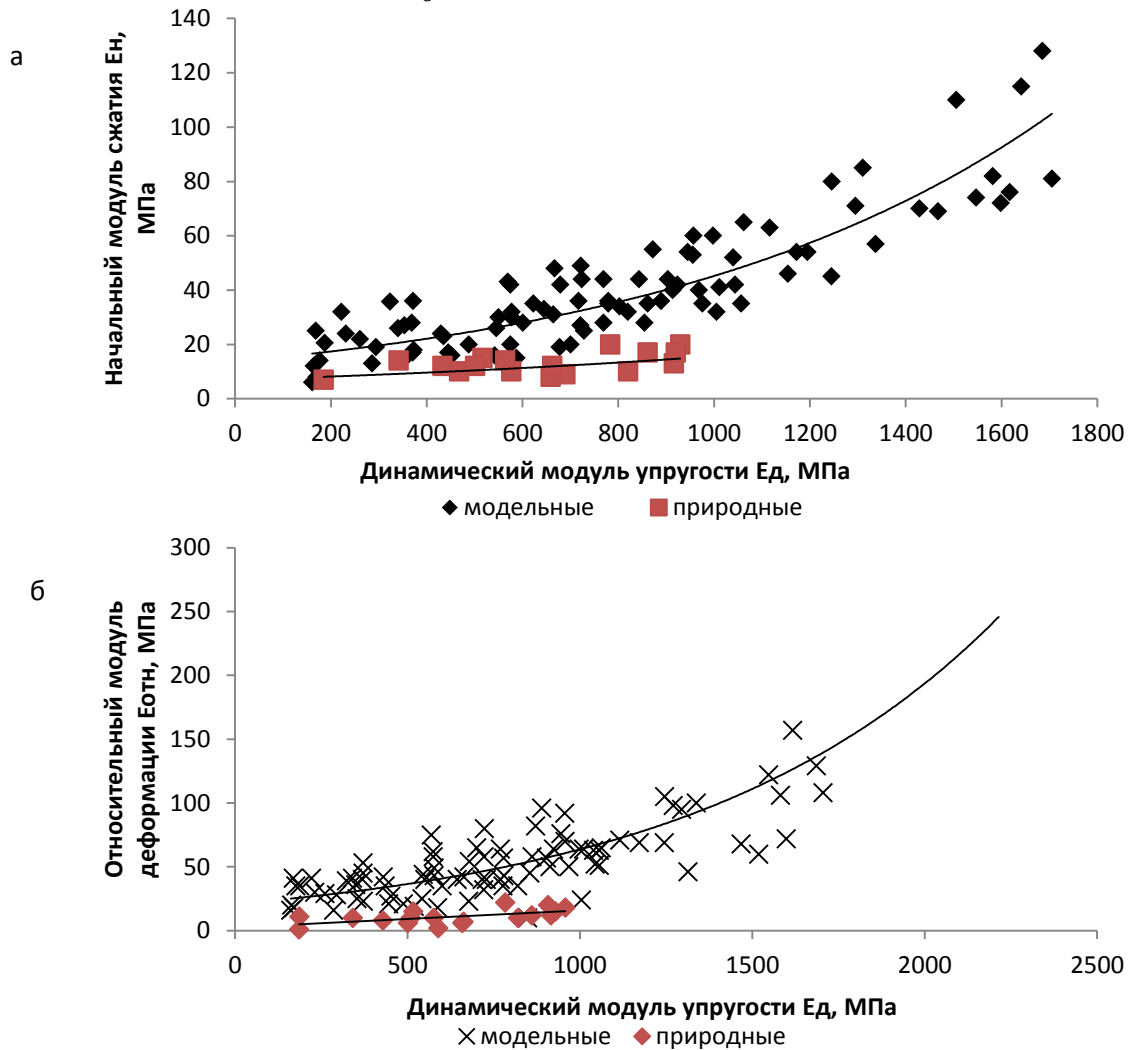


Рис. 2. Взаимосвязи динамического модуля упругости и начального модуля сжатия (а), относительного модуля сжатия (б) модельных и природных грунтов

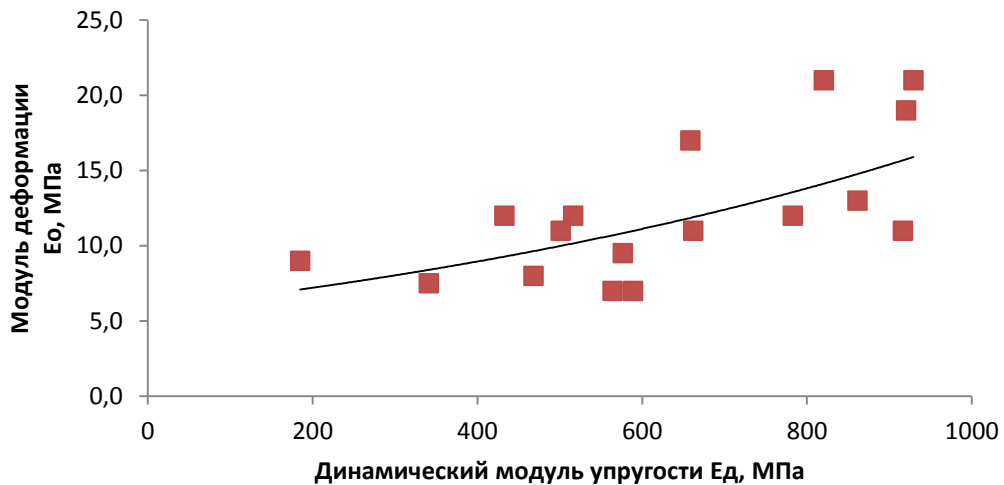


Рис. 3. Взаимосвязь динамического модуля упругости и модуля деформации, полученного по компрессионным испытаниям четвертичных грунтов

Нахождение парных коэффициентов корреляции между коэффициентами поперечного расширения μ_o (полученного в опытах по одноосному сжатию) и Пуассона (по данным прозвучивания) для модельных грунтов не позволили выявить каких-либо значимых связей. При сопоставлении этих показателей для природных четвертичных грунтов получено уравнение связи $\mu_o = 1,7\mu - 0,4$ (коэффициент корреляции $r=0,71$, рис. 4). Полученная зависимость построена отдельно для четвертичных моренных суглинков (без супесей).

Отметим, что наиболее достоверно определение коэффициента поперечного расширения по результатам одноосного сжатия грунтов получено для образцов твердой и полутвердой консистенции. Значения μ_o для исследуемых образцов тугопластичной и мягкопластичной консистенции часто превышают 0,5, при этом форма образцов становится характерной «бочкообразной».

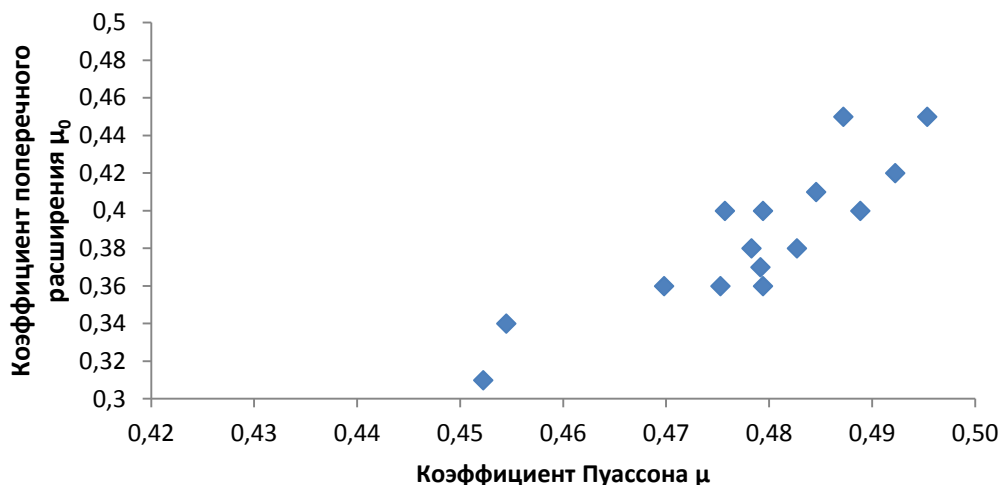


Рис. 4. Взаимосвязь коэффициента поперечного расширения и коэффициента Пуассона четвертичных моренных суглинков

По-видимому, именно с наличием большого количества методических сложностей в определении коэффициента поперечного расширения связаны в целом низкие значения коэффициентов корреляции с коэффициентом Пуассона. Тем не менее, использование

подобных взаимосвязей имеет безусловное практическое значение, например, при проведении инженерно-геологических расчетов напряженно-деформируемого состояния численными методами, когда выделенным элементам необходимо «назначить» трудно определяемый коэффициент μ_0 .

Выводы

1. Получены уравнения взаимосвязи начального модуля сжатия, относительного модуля деформации (по результатам одноосного сжатия) и модуля общей деформации (по компрессионным испытаниям) с динамическим модулем упругости, описываемые экспоненциальными законами как для модельных, так и для природных четвертичных грунтов. Предлагаемый методический подход и полученные корреляционные соотношения могут использоваться для предварительной оценки показателей деформационных свойств моренных суглинков на основании данных о скоростях упругих волн.
2. Для природных моренных суглинков выявлена взаимосвязь между коэффициентом поперечного расширения и коэффициентом Пуассона по линейному закону, позволяющая по данным ультразвукового просвечивания оценивать трудно определяемый для глинистых грунтов коэффициент поперечного расширения μ_0 .

Список литературы

1. *Гольдштейн М.Н.* Механические свойства грунтов. М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1952. 324 с.
2. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: МНТКС, 2011. 83 с.
3. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: МНТКС. 2012. 34 с.
4. *Зиангиров Р.С., Кошелев А.Г.* Определение модуля деформации грунтов методом нагружения штампа // Инженерные изыскания. Февраль 2010. С. 26-31.
5. *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. 104 с.
6. Определение модуля деформации грунтов методом нагружения штампа. М. СТП. МОСГОРГЕОТРЕСТ, 2009. 42 с.