



ВЛИЯНИЕ ТИПА СТРУКТУРЫ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ НА ИЗМЕНЕНИЯ ИХ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ДИАПАЗОНЕ МАЛЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

INFLUENCE OF THE STRUCTURE TYPES OF CLAY SOILS ON CHANGES OF THEIR DYNAMIC PROPERTIES IN THE RANGE OF SMALL DEFORMATIONS

ГОРБУНОВА А.С.

Магистрант кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, tamasago@gmail.com

ВОЗНЕСЕНСКИЙ Е.А.

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.г.-м.н., eugene@geol.msu.ru

GORBUNOVA A.S.

Graduate student of the department of engineering and ecological geology of the faculty of geology of the Lomonosov Moscow State University, tamasago@gmail.com

VOZNESENSKY E.A.

Professor of the department of engineering and ecological geology of the faculty of geology of the Lomonosov Moscow State University, PhD (doctor of science in Geology and Mineralogy), eugene@geol.msu.ru

Ключевые слова:

динамические свойства грунтов; малые деформации; резонансные колонки; поглощение (гистерезисное затухание); тип контактных взаимодействий.

Key words:

soil dynamic properties; small strains; resonant columns; hysteresis damping; interparticle contact type.

Аннотация

В статье рассмотрено влияние преобладающего типа контактных взаимодействий между частицами в глинистых грунтах на закономерности изменений их динамических свойств в диапазоне малых относительных деформаций сдвига (от 10^{-5} до 10^{-3}). Показаны различия пороговых уровней деформаций, при которых начинаются существенные изменения характеристик динамических свойств глинистых грунтов с разными типами структуры. Установлено, что в процессе деформирования наименьшим изменениям подвергаются динамические характеристики грунтов с коагуляционными структурами. При этом нелинейную упругость в диапазоне малых сдвиговых деформаций проявляют глинистые грунты с любым типом структуры.

Введение

Динамические свойства грунта характеризуют его, с одной стороны, как среду распространения колебаний (упругие, демпфирующие, фильтрующие свойства), а с другой — определяют его динамическую неустойчивость. Необходимость изучения характеристик динамической неустойчивости грунтов достаточно очевидна при решении всех практических задач, связанных со снижением их жесткости и прочности при динамических нагрузках разного происхождения. Землетрясения, движущийся транспорт, взрывы при экскавациях, работа тяжелых машин, ветровые и волновые нагрузки часто приводят к повреждениям зданий и других инженерных сооружений в результате значительных и неравномерных осадок, смещений пород на склонах, разрушения насыпей. Показатели динамических свойств грунтов, описывающие условия распространения в массиве сейсмических волн — волн напряжений, также практически востребованы для расчета колебаний сооружений и определения переменных нагрузок в их конструктивных элементах. Экспериментальное определение этих показателей предусматривается и действующими нормативными документами [12].

Для количественной характеристики динамических свойств грунта как среды распространения волн напряжений используются следующие основные величины:

- ряд динамических модулей грунта — модуль Юнга, динамический модуль сдвига, динамический модуль общей деформации;
- коэффициент Пуассона;
- характеристики затухания волн напряжений.

Энергия динамических воздействий переносится от их источников волнами напряжений разного типа. Передача энергии волны от точки к точке происходит за счет упругих свойств среды, характеризующихся динамическими модулями деформации, но по мере распространения волны часть ее энергии теряется, что приводит к снижению интенсивности динамической на-

Abstract

The paper discusses influence of the prevailing interparticle contact type in clay soils on the regularities of their dynamic properties variations in small shear strain range (10^{-5} – 10^{-3}), demonstrates differences between the threshold strains at which considerable changes of dynamic characteristics of clay soils with different structure types appear. It is revealed that the lowest alterations of the dynamic properties resulting from straining occur in clay soils with coagulative structures. Nonlinear elasticity in the small-strain range is common for clay soils with any structure type.



грузки с удалением от ее источника и называется затуханием (демпфированием). Причины его существования различны и связаны главным образом с неидеальной упругостью, дискретностью и неоднородностью строения любого массива грунтов, представляющего собой многокомпонентную систему и не являющегося однородной упругой средой.

В соответствии с различными механизмами потерь энергии волны различаются следующие виды затухания:

- расхождение (или геометрическое затухание), обусловленное уменьшением удельной энергии на единицу площади фронта волны в связи с ее увеличением по мере удаления от источника;
- рассеяние на неоднородностях среды, имеющих другую сжимаемость или плотность по сравнению с остальной средой;
- поглощение (или гистерезисное затухание), обусловленное затратами энергии на пластические и нелинейно-упругие деформации.

В реальном массиве грунтов все три вида затухания проявляются одновременно, но в зависимости от состава и свойств самого грунта, а также вида и частоты бегущей волны соотношение между ними может существенно варьировать. Различна их роль и на разном удалении от источника. Однако лишь поглощение является собственно динамическим свойством грунта как материала среды, в которой распространяются волны напряжений. Остальные компоненты затухания определяются строением грунтовых толщ и удаленностью источника колебаний.

С позиций энергетике процесса динамического нагружения грунта мерой его динамической устойчивости является суммарная величина энергии, рассеянная (т.е. необратимо потерянная) единицей объема грунта во всех циклах воздействия к моменту заданного уровня деформирования или моменту разрушения. И чем выше эта величина, тем более динамически устойчив грунт [1]. Эта суммарная энергия на единицу объема грунта (удельная рассеянная энергия), следовательно, зависит от диссипативных свойств грунта и может быть рассчитана по площади петель гистерезиса на кривой зависимости между напряжением и деформацией в лабораторном эксперименте.

При расчете колебаний сооружений на деформируемых грунтовых основаниях в рамках моделей вязкоупругой среды основными характеристиками жесткости и затухания грунта выступают динамический модуль сдвига (G , МПа) и коэффициент поглощения (D , %), имеющий физический смысл доли критического затухания. Оба эти показателя существенным образом зависят от уровня сдвиговых деформаций, возникающих при распространении волны [2]. Эта зависимость достаточно подробно исследована многими авторами. Анализ опубликованных на эту тему сведений позволяет указать на следующие установленные на сегодняшний день закономерности.

При амплитудах деформаций сдвига¹ порядка 10^{-5} и ниже поведение большинства грунтов можно считать упругим, а деформации — полностью обратимыми. В этом наиболее простом случае максимальный модуль

¹ Здесь и далее имеется в виду относительная величина сдвиговой деформации.

сдвига G_{max} является ключевым параметром, позволяющим моделировать поведение грунта [17]. Этот показатель связан со скоростью сдвиговой волны в грунте выражением:

$$G_{max} = \rho \cdot V_s^2,$$

где ρ — плотность грунта.

В диапазоне амплитуд деформаций γ_a порядка 10^{-5} – 10^{-3} поведение грунтов становится упругопластическим и модуль сдвига имеет тенденцию к снижению по мере роста деформации сдвига (рис. 1). В то же время в каждом цикле нагружения рассеивается часть энергии. Поскольку поглощение энергии в грунтах имеет гистерезисную природу, коэффициент D может быть использован как показатель поглощения энергии грунтом [17].

Так как в рассматриваемом диапазоне амплитуды деформации достаточно малы и не вызывают прогрессирующих изменений показателей физико-механических свойств грунтов, модель поведения грунта может быть описана двумя параметрами — модулем сдвига

$$G = \frac{\tau_a}{\gamma_a},$$

где τ_a — амплитудное значение касательного напряжения в цикле, и эквивалентным коэффициентом вязкого поглощения

$$D = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{G \cdot \gamma_a^2},$$

где ΔW — энергия, рассеянная в грунте в каждом цикле нагружения (см. рис. 1).

При амплитудах же деформации порядка 10^{-3} и выше свойства грунтов существенно меняются с изменением сдвиговой деформации, зависящей, в свою очередь, от числа циклов нагружения [2, 16, 17]. Также

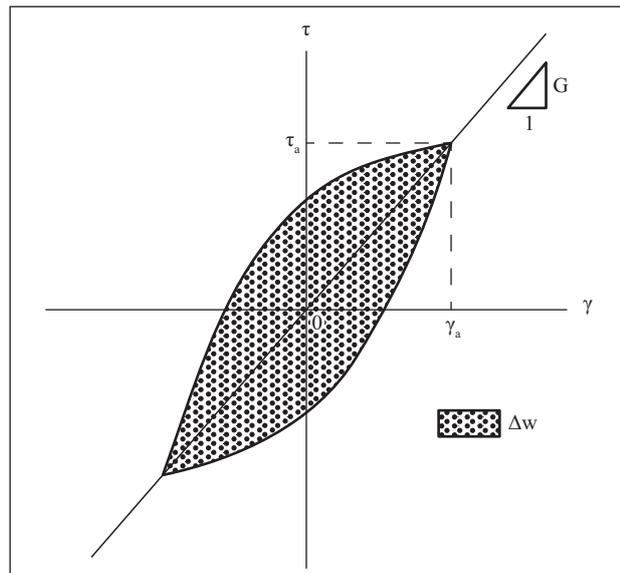
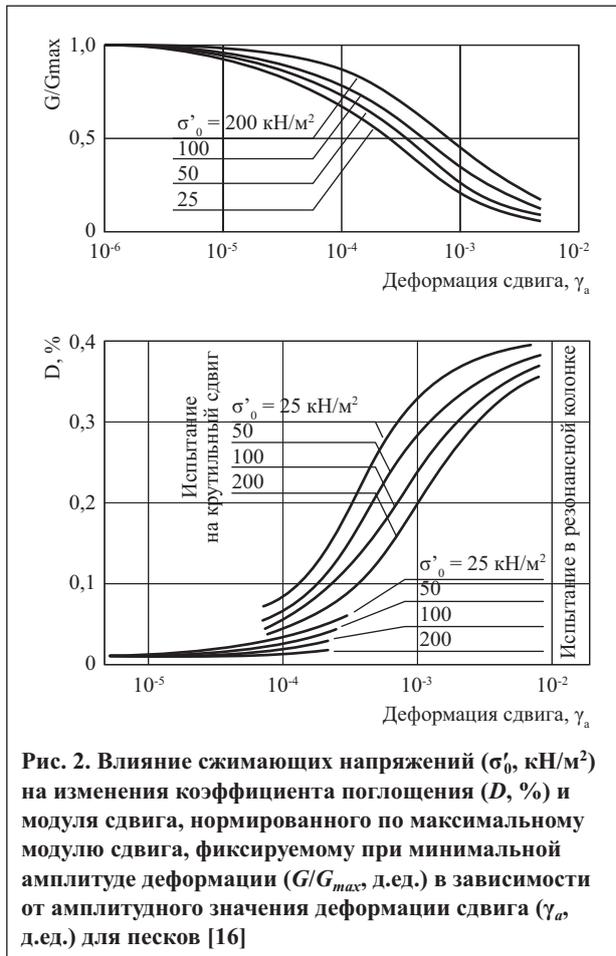
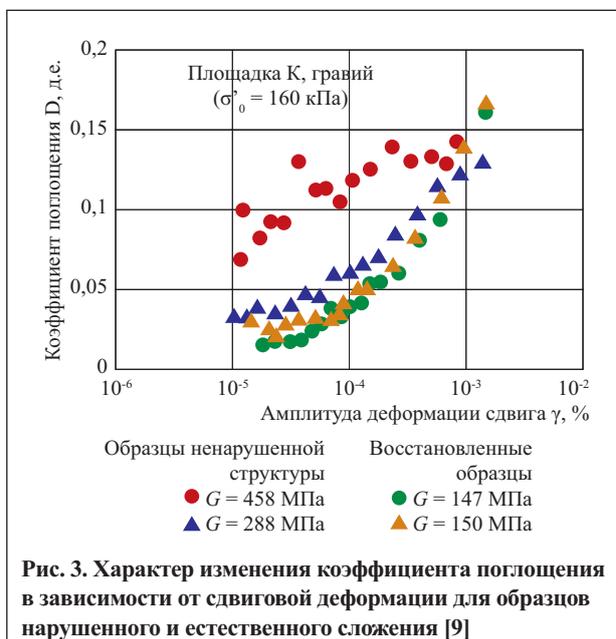


Рис. 1. Петля гистерезиса [17]: γ — относительная сдвиговая деформация; γ_a — амплитудное значение относительной сдвиговой деформации в цикле; τ — касательное напряжение; τ_a — амплитудное значение касательного напряжения в цикле; ΔW — энергия, рассеянная в грунте в каждом цикле нагружения; G — динамический модуль сдвига



можно считать установленной зависимость динамического модуля сдвига и коэффициента поглощения грунтов от величины действующих эффективных напряжений (контролирующих трение в системе) (рис. 2), что определяет и наблюдаемое закономерное снижение поглощения грунтов с увеличением глубины их залегания [11].

Данные, приводимые разными авторами, указывают в целом на более высокие характеристики поглощения у связных грунтов по сравнению с несвязными.



Увеличение крупности частиц приводит к повышению динамического модуля сдвига песков, однако закономерного влияния гранулометрического состава на их поглощение не выявлено, при этом оно слабо меняется и с увеличением сжимающих напряжений [3]. Основными параметрами, контролирующими динамические свойства связных грунтов помимо уровня деформаций и нормальных напряжений, многие авторы считают пористость и пластичность, представляя максимальный модуль сдвига G_{max} при минимальной амплитуде деформации как функцию коэффициента пористости e [14, 19].

Очевидно, между тем, что пластичность — характеристика грунта в нарушенном состоянии, отражающая прежде всего дисперсность и минеральный состав грунта, а значит, опосредованно влияющая и на пористость. С другой стороны, грунты с одинаковым числом пластичности, но при разной влажности могут иметь совершенно различные характеристики динамических свойств даже при одном уровне сжимающих напряжений. Таким образом, предлагаемые некоторыми авторами эмпирические зависимости, связывающие динамические характеристики грунтов с числом пластичности и коэффициентом пористости могут иметь лишь ограниченное применение исключительно в рамках той выборки грунтов, для которой они получены.

Кроме того, установлено [17], что пороговый уровень деформаций, с которого начинается снижение динамического модуля сдвига, в связных грунтах выше, чем в несвязных, при этом он находится в прямой зависимости от числа пластичности грунта.

В соответствии с современными представлениями грунтоведения динамические свойства грунтов, как и другие их физико-механические свойства, определяются прежде всего природой преобладающих в них структурных связей — типом контактных взаимодействий между структурными элементами грунтов, их удельной прочностью, а также общей площадью этих межчастичных контактов. Другие же перечисленные выше характеристики (пористость, размер зерна, пластичность) лишь опосредованно отражают какие-то из аспектов этого главного фактора.

Между тем исследованию влияния типа структуры взаимодействий на жесткость и поглощение в грунтах при деформациях разного уровня в опубликованных работах уделено немного внимания. Причина этого заключается, вероятно, в методической сложности такого исследования. Анализ отдельных публикаций, посвященных этому вопросу, показывает, кроме того, и неоднозначность трактовки полученных данных.

Так, исследования К. Ишихары [9] указывают на более чем двукратное различие между коэффициентами поглощения образцов естественного сложения и искусственно сформированных образцов с тем же коэффициентом пористости (рис. 3).

Еще ряд авторов продемонстрировал влияние природной цементации грунтов как на абсолютные значения их динамических характеристик, так и на особенности изменения последних по мере деградации цементационных контактов [13, 18]. Вместе с тем другие экспериментальные исследования образцов нарушенного и естественного сложения [15] показали, что



нарушение сложения не оказывает заметного влияния на коэффициент поглощения в малом диапазоне деформаций.

Нам представляется, что отмеченные противоречия обусловлены исключительно особенностями структуры тех конкретных грунтов, с которыми работали разные авторы. Ведь за понятиями «нарушенное» и «ненарушенное» сложение для грунтов с различной структурой (например, с коагуляционной и смешанной), а тем более в разных диапазонах деформаций могут стоять колоссальные различия в степени изменений (между этими двумя типами сложения) физико-механических характеристик сравниваемых грунтов.

В связи с этим мы предприняли попытку экспериментально исследовать различия показателей динамических свойств (динамического модуля сдвига и коэффициента поглощения) серии природных глинистых грунтов с разными типами структуры с позиций как их абсолютных значений, так и особенностей их изменений в диапазоне сдвиговых деформаций, не превышающих 10^{-3} . Рассмотрению методики этого исследования и полученных результатов и посвящена предлагаемая вниманию читателей статья.

Методика экспериментальных исследований

Динамические свойства глинистых грунтов исследовались методом малоамплитудных крутильных колебаний в резонансной колонке. Этот метод предназначен для определения динамического модуля сдвига G и коэффициента поглощения D цилиндрических образцов грунта ненарушенного или нарушенного сложения и основан на теории распространения упругих волн сдвига в стержне.

При исследованиях в резонансной колонке образец помещается в камеру трехосного сжатия и после завершения стадии предварительной консолидации испытывается в режиме вынужденных крутильных колебаний в определенном диапазоне частот при постепенном увеличении крутящего момента, приложенного к верхнему — свободному — торцу образца. Грунт при этом испытывает деформацию простого сдвига. Нижний торец закреплен, и деформации сдвига на нем полагаются равными нулю. Измеряется амплитуда деформации сдвига на каждой частоте, что позволяет построить резонансную кривую и определить первую собственную частоту крутильных колебаний образца, которая дает возможность рассчитать скорость распро-

Таблица 1

Инженерно-геологическая классификация глинистых пород по типу структурных связей (по [10])							
Группа	Тип контакта	Прочность контакта P_1 , Н	Петрографические типы глинистых пород, их состояние	Показатели, характеризующие тип контакта			
				Характер деформации	Прочность на раздавливание σ_p , МПа	Пластическая прочность P_m , МПа	Поведение при взаимодействии с водой
А	Дальний коагуляционный	$<10^{-10}$	Современные илы, а также глины и суглинки слабой степени уплотнения, водонасыщенные, скрытотекучей консистенции	Эластичновязкий	-	0,002–0,050	Не набухают
Б	Ближний коагуляционный	$\approx 10^{-10} - 10^{-9}$	Глины и суглинки слабой и средней степени уплотнения, водонасыщенные, мягкопластичные и пластичные	Упругоэластично вязкий с вязкопластичным разрушением	0,03–0,50	0,03–0,50	Проявляют слабое и среднее набухание
В	Переходный	$\approx 10^{-8} - 10^{-7}$	Глины и суглинки высокой степени уплотнения, различного водонасыщения, полутвердой и твердой консистенции; а также слабой и средней степени уплотнения, среднего и слабого водонасыщения, полутвердой и твердой консистенции	Упруговязкий с хрупким разрушением	1,3–5,0	1,3–15,0	Проявляют очень сильное набухание
Г	Фазовый	$>10^{-7}$	Аргиллиты, а также цементированные глины и суглинки различной степени уплотнения и водонасыщения, твердой консистенции	Упругий с хрупким разрушением	2–60	-	Не набухают
Д	Коагуляционный и фазовый	-	Глины и суглинки слабой и средней степени уплотнения, частично цементированные, водонасыщенные, тугопластичной и полутвердой консистенции	Упруговязкий и упругодилатантовязкий с хрупким разрушением	0,3–2,5	0,3–3,0	Проявляют слабое набухание
Е	Переходный и фазовый	-	Глины и суглинки различной степени уплотнения, частично цементированные, среднего и слабого водонасыщения, твердой консистенции	Упруговязкий с хрупким разрушением	1,5–5,5	-	Проявляют среднее набухание

странения в нем горизонтально поляризованных поперечных волн V_s . Модуль сдвига G рассчитывается по полученной скорости поперечных волн и объемному весу грунта. Коэффициент поглощения D определяется в режиме свободных затухающих колебаний образца и оценивается в процентах от критического затухания. Подробно методика испытаний изложена в работе [3].

Испытания проводились на резонансной колонке TSH-100 производства компании GCTS при сжимающих напряжениях 600 и 300 кПа, в отдельных случаях 150 кПа. Все образцы испытывались при этих стандартных условиях, чтобы исключить влияние условий проведения эксперимента на исследуемые характеристики грунтов.

Преобладающие типы контактов в грунте определялись на основании частной литогенетической и фи-

зико-механической инженерно-геологической классификации глинистых пород по типу структурных связей, предложенной В.И. Осиповым [10] (табл. 1). Она основана на представлении о том, что структурные связи «аккумулируют» в себе все особенности состава, строения и состояния глинистых пород, являясь индикаторами условий их образования и истории последующих стадийных преобразований в процессе литогенеза. По этой классификации все глинистые образования подразделяются на шесть групп. Первые четыре из них (А, Б, В, Г) характеризуются преобладанием одного определенного типа контакта — дальнего или ближнего коагуляционного, переходного, фазового. Также выделяются группы Д и Е, у которых одновременно развиты два типа контактов, а именно коагуляционный и фазовый для Д, переходный и фазовый для Е.

Таблица 2

Подразделение исследованных глинистых грунтов по типу структуры									
Обозначение образца	Место отбора	Глубина отбора, м	Геологический индекс	Разновидность грунта (по [7])	Показатели, характеризующие тип контакта				Группа глинистых пород
					Характер деформации	Прочность на раздавливание σ_p , МПа	Поведение при взаимодействии с водой		
							Относит. деф. набухания, д.ед.	Категория грунта по набуханию (по [7])	
Б1	Таманский п-ов	2,4–2,7	N ₂ kl	Глина тяжелая пылеватая тугопластичная	Упруговязкий с вязкопластичным разрушением	0,15	0,06	Слабонабухающий	Б
Б2	Таманский п-ов	3,3–3,6	N ₂ kl	Глина тяжелая пылеватая тугопластичная			0,06	Слабонабухающий	Б
В1	г. Тобольск	39,2–39,4	aP ₃	Супесь пылеватая твердая	Упруговязкий с хрупким разрушением	2,11	0,13	Сильнонабухающий	В
В2	г. Москва, Бережковская наб.	16,5–16,6	C ₃ vs	Суглинок тяжелый песчанистый твердый	-	-	0,14	Сильнонабухающий	В
Д1	г. Москва, Дмитровское ш.	9,0–9,2	gIIms	Суглинок легкий песчанистый тугопластичный	Упруговязкий с хрупким разрушением	0,67	0,05	Слабонабухающий	Д
Д2	г. Москва, Бережковская наб.	18,7	C ₃ vs	Суглинок тяжелый песчанистый полутвердый	Упруговязкий с хрупким разрушением	0,40	0,06	Слабонабухающий	Д
Д3	г. Москва, Бережковская наб.	16,6	C ₃ vs	Суглинок тяжелый песчанистый полутвердый	Упруговязкий с хрупким разрушением	0,17	0,03	Ненабухающий	Д
Д4	г. Тобольск	9,5–9,7	aQ _{II}	Суглинок тяжелый пылеватый полутвердый	Упруговязкий с хрупкопластичным разрушением	0,54	0,04	Слабонабухающий	Д
Д5	Московская обл., г. Электроугли	16,3–16,5	C ₃	Глина тяжелая пылеватая полутвердая	Упруговязкий с хрупким разрушением	0,30	0,06	Слабонабухающий	Д
Е1	г. Санкт-Петербург, р-н Охта	47,7–48,0	V ₁ kt	Суглинок тяжелый пылеватый цементированный твердый	-	-	0,08	Средненабухающий	Е
Е2	г. Санкт-Петербург, р-н Охта	57,5–57,9	V ₁ kt	Суглинок тяжелый пылеватый цементированный твердый					Е
Е3	г. Санкт-Петербург, р-н Лахта	57,6–57,8	V ₁ kt	Суглинок тяжелый пылеватый цементированный твердый			-	-	0,02



Установление типа контакта и подразделение грунтов по выделенным группам основываются на трех основных показателях [10]:

- характере деформации, определяемом по кривой «деформация — напряжение», получаемой при испытании на одноосное раздавливание или сдвиг;
- прочности на одноосное раздавливание σ_p ;
- характере поведения при взаимодействии с водой.

Все эти свойства являются структурно-чувствительными и зависят в основном от преобладающего типа контактов в породе.

Глинистые породы внутри указанных групп объединяются не только по вышеприведенным показателям, но и по плотности, влажности, консистенции, поскольку образование того или иного типа контактов тесно связано со степенью литификации породы и ее современным состоянием.

В связи с этим для определения преобладающих типов контактов для исследованных грунтов также определялись набухаемость (в приборе ПНГ по [6]), прочность и характер деформации (методом одноосного сжатия по [4]). Дополнительную информацию о характере межчастичных взаимодействий в грунтах дали характеристики агрегированности тонкопылеватых и глинистых частиц, а также значения числа текучести. Соответственно, были выполнены гранулометрический и микроагрегатный анализы (по [5]) и определение пластичности грунтов (по [8]).

Сопутствующие определения, необходимые для интерпретации данных и получения других расчетных характеристик грунтов, включали установление плотности грунтов (путем непосредственных измерений), влажности (весовым способом), плотности твердых частиц гидрофильных грунтов (пикнометрическим методом по [8]).

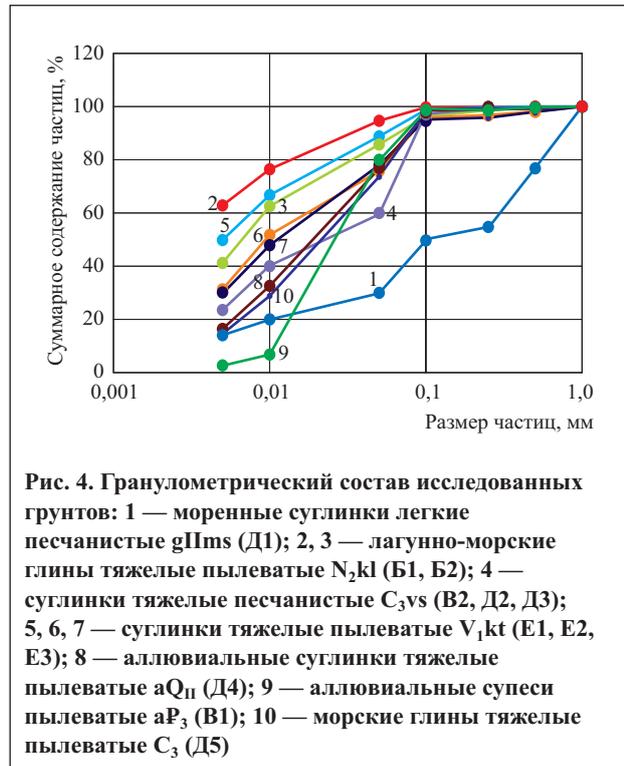
Характеристика исследованных грунтов

Исследованная выборка была представлена 12 разновидностями глинистых грунтов различного возраста морского, лагунно-морского, ледникового и аллювиального генезиса (табл. 2). Она включала:

- среднечетвертичные моренные суглинки (г. Москва, образец Д1²);
- плиоценовые лагунно-морские глины (п-ов Тамань, обр. Б1, Б2);
- верхнекаменноугольные морские алевриты (суглинки) (г. Москва, обр. В2, Д2, Д3);
- нижневендские морские глины (алеериты) (г. Санкт-Петербург, обр. Е1, Е2, Е3);
- среднечетвертичные аллювиальные суглинки (г. Тольск, обр. Д4);
- олигоценые аллювиальные алевриты (супеси) (г. Тольск, обр. В1);
- верхнекаменноугольные морские глины (г. Электроугли, обр. Д5).

По данным гранулометрического анализа (см. табл. 2, рис. 4) в составе большей части изученных грунтов суммарно преобладают (составляют 36–75%) фракции крупной и средней пыли.

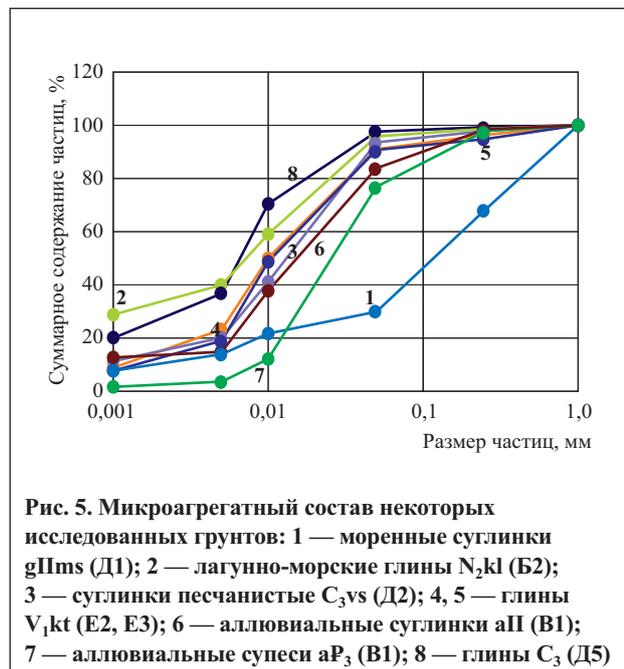
² Приведенные в списке обозначения образцов использованы далее во всем тексте и подрисуночных подписях.



глинки и плиоценовые тяжелые глины отличаются высоким (50–63%) объединенным содержанием частиц мельче 0,005 мм. Наименьшим (5–14%) содержанием частиц размером менее 0,005 мм характеризуются олигоценые аллювиальные супеси и среднечетвертичные моренные суглинки.

Пониженное содержание частиц мельче 0,005 мм у большинства изученных грунтов по данным микроагрегатного анализа по сравнению с гранулометрическим свидетельствует о наличии неводостойких связей между их первичными частицами.

Наиболее низким — близким к 1 — коэффициентом агрегированности для частиц размером менее 0,005 мм $K_{a<0,005}$ (по И.М. Горьковой) характеризуются плиоце-



новые лагунно-морские глины (Б1, Б2, $K_{a<0,005}=1,04$) и среднечетвертичные моренные суглинки (В2, $K_{a<0,005}=1,03$), что косвенно указывает на преобладание в них коагуляционных контактов (рис. 5). Наибольший же коэффициент агрегированности ($K_{a<0,005}=1,40\div 1,58$) зафиксирован в нижневендских суглинках, что говорит о наличии в них жестких, вероятнее всего цементационных, контактов, не разрушающихся при взаимодействии с водой. Но и в них в агрегированном состоянии находятся не все частицы, и содержание глинистой фракции составляет 8–9%. Связь между глинистыми частицами, вероятно, осуществляется через контактные взаимодействия другого рода — скорее всего, переходные либо коагуляционные.

Подразделение исследованных грунтов по типу структуры на основе комплекса выполненных определений приведено в табл. 2, а характеристика влаго содержания, физических и физико-химических свойств — в табл. 3.

Проведенный анализ позволил выделить в изученной выборке 4 группы грунтов с разными типами структуры.

1. Ближние коагуляционные структуры (группа Б) характерны для плиоценовых глин Таманского полуострова (обр. Б1 и Б2).

2. Переходные структуры с преобладанием точечных контактов (группа В) имеют грунты твердой консистенции — олигоценые аллювиальные супеси из г. Тобольска (обр. В1) и песчанистые воскресенские глины (г. Москва, обр. В2).

3. Смешанные коагуляционно-кристаллизационные структуры с преобладанием фазовых и коагуляционных контактов (группа Д) характерны для 5 образцов (Д1–Д5) разного возраста и генезиса, имеющих полутвердую (иногда тугопластичную) консистенцию.

4. Наконец, смешанная структура с сочетанием переходных и фазовых контактов (группа Е) присуща

твердым нижневендским глинам котлинского горизонта. Наиболее вероятен преимущественно конденсационный тип структуры с развитием цементационных контактов с опаловым цементом.

Грунты групп Д и Е характеризуются наименьшими показателями пористости и влажности, а группы Б — наибольшими. При этом практически все образцы на момент проведения испытаний являлись насыщенными водой.

Установленные закономерности и их обсуждение

Результаты динамических испытаний для 13 разновидностей глинистых грунтов (включая 1 модельный) представлены в табл. 4. Приведенные в ней значения динамических характеристик разбиты по трем разным диапазонам сдвиговых деформаций: (1) упругих деформаций не более 0,001%; (2) деформаций не выше 0,01%; (3) деформаций до 0,1%. В табл. 4 и далее по тексту используются следующие обозначения абсолютных и приведенных показателей динамических свойств:

- G_{max}, D_{min} — динамический модуль сдвига (МПа) и коэффициент поглощения (%) в области сдвиговых деформаций до 0,001%;
- $G_{\gamma=0,01\%}, D_{\gamma=0,01\%}$ — то же до 0,01%;
- $G_{\gamma=0,1\%}, D_{\gamma=0,1\%}$ — то же на уровне 0,1%;
- $G_{0,1\%}/G_{max}$ — отношение динамического модуля сдвига при сдвиговой деформации на уровне 0,1% к его величине при сдвиговой деформации порядка 0,001%;
- $D_{0,1\%}/D_{min}$ — отношение коэффициента поглощения при сдвиговой деформации на уровне 0,1% к его величине при сдвиговой деформации порядка 0,001%.

Анализ представленных данных демонстрирует прежде всего определяющее влияние возникающих при динамическом воздействии сдвиговых деформаций на динамические свойства грунтов (рис. 6). Для

Таблица 3

Характеристика состава, физических и физико-химических свойств исследованных глинистых грунтов													
Группа глинистых пород		Обозначение образца	Глубина отбора, м	Геологический индекс	Плотность грунта, ρ , г/см ³	Плотность твердых частиц грунта ρ_s , г/см ³	Естественная влажность W_e , %	Влажность нижнего предела пластичности W_p , %	Влажность верхнего предела пластичности W_L , %	Число пластичности I_p	Число текучести I_L	Коэффициент пористости e	Степень влажности S_r
Обозначение группы	Тип структуры												
Б	Ближняя коагуляционная	Б1	2,4–2,7	N ₂ kl	1,73	2,62	43,5	35,7	66,2	30,5	0,26	1,17	0,97
		Б2	3,3–3,6	N ₂ kl	1,75	2,80	40,0	25,9	62,4	36,5	0,39	1,24	0,90
В	Переходная	В1	39,2–39,4	aP ₃	1,92	2,72	29,5	35,9	41,2	5,3	-1,21	0,83	0,96
		В2	16,5–16,6	C ₃ vs	2,26	2,80	15,1	19,8	34,0	14,2	-0,54	0,42	0,96
Д	Смешанная коагуляционно-кристаллизационная	Д2	18,7	C ₃ vs	2,15	2,79	22,7	22,4	35,5	13,1	0,02	0,59	1,00
		Д3	16,6	C ₃ vs	2,20	2,84	23,2	22,5	36,1	13,6	0,06	0,54	1,00
		Д5	16,3–16,5	C ₃	1,99	2,79	28,4	26,6	64,8	38,2	0,05	0,80	0,99
		Д4	9,5–9,7	a _{II}	2,00	2,71	25,3	25,1	41,1	16,0	0,01	0,70	0,98
		Д1	9,0–9,2	gIIms	2,24	2,70	13,8	11,2	19,4	8,2	0,32	0,37	1,00
Е	Смешанная переходно-конденсационная	Е3	57,6–57,8	V ₁ kt	2,25	2,75	12,3	20,2	33,4	13,2	-0,60	0,37	0,91
		Е1	47,7–48,0	V ₁ kt	2,15	2,74	17,0	24,0	38,0	14,0	-0,50	0,49	0,95
		Е2	57,5–57,9	V ₁ kt	2,25	2,78	13,7	20,0	32,0	12,0	-0,52	0,40	0,94



всех разностей грунтов получено снижение динамического модуля и увеличение коэффициента поглощения с ростом деформации. Это обусловлено нелинейной упругостью грунтов, а затем и разрушением части структурных связей и появлением пластических деформаций. Отмеченная закономерность хорошо согласуется с опубликованными данными других исследователей. Вместе с тем грунты с разными типами структуры проявляют определенные особенности изменения динамических характеристик с ростом деформаций.

1. Так, наибольшей жесткостью при минимальных деформациях ($G_{max}=187\div 241$ МПа при сжимающих напряжениях $\sigma_m=300$ кПа) характеризуются грунты групп В и Е с преобладанием в них переходных и цементационных контактов, а наименьшие значения (35-48 МПа) отмечены у глинистых грунтов группы Б с близкими коагуляционными контактами (см. табл. 4, рис. 7). В целом промежуточное положение занимают грунты группы Д, в которых за счет присутствия существенной доли коагуляционных контактов величина G_{max} изменяется в диапазоне от 68 до 165 МПа, составляя в среднем около 100 МПа. Эти различия сохраняются и при наибольших достигнутых деформациях (около 0,1%), хотя и наблюдается некоторое сближение жесткости грунтов с разным типом структуры по мере их деформирования.

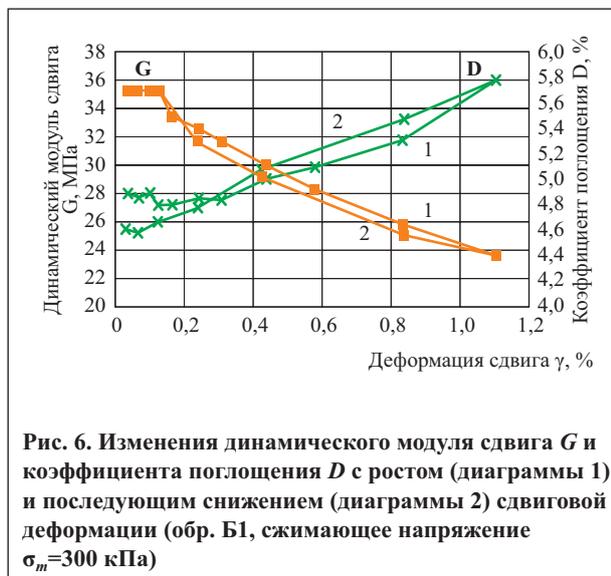


Рис. 6. Изменения динамического модуля сдвига G и коэффициента поглощения D с ростом (диаграммы 1) и последующим снижением (диаграммы 2) сдвиговой деформации (обр. Б1, сжимающее напряжение $\sigma_m=300$ кПа)

По мере увеличения деформации на диаграммах некоторых грунтов групп Е и иногда В отмечаются «ступени» (см. рис. 7) — участки с неизменным или незначительно изменяющимся динамическим модулем сдвига. По всей видимости, это обусловлено поэтапным деформированием контактов различной жесткости. Графики снижения модуля сдвига с ростом дефор-

Таблица 4

Динамические характеристики глинистых грунтов при разной величине сжимающих напряжений*										
Группа глинистых пород		Название образца	Динамический модуль сдвига при разных уровнях деформации сдвига, МПа			$G_{0,1\%}/G_{max}$	Коэффициент поглощения при разном уровне деформации сдвига, %			$D_{0,1\%}/D_{min}$
Группа	Тип структуры		G_{max}	$G_{\gamma=0,01\%}$	$G_{\gamma=0,1\%}$		D_{min}	$D_{\gamma=0,01\%}$	$D_{\gamma=0,1\%}$	
Б	Ближняя коагуляционная	Б1	48	45	32	0,67	3,88	3,92	4,72	1,22
			54	54	40	0,74	3,30	3,33	4,08	1,24
		Б2	35	35	24	0,67	4,80	4,80	5,78	1,20
			43	41	30	0,70	4,12	4,12	5,17	1,35
		Б3 (модельный из Д4)	40	36	24	0,59	6,06	5,99	7,22	1,19
43	40	25	0,57	5,42	5,44	7,29	1,35			
В	Переходная	В1	119	102	58	0,49	2,34	2,71	5,52	2,36
			184	162	95	0,52	1,70	1,88	3,61	2,12
		В2	241	219	78	0,32	2,12	2,37	5,75	2,71
Д	Смешанная коагуляционно-кристаллизационная	Д2	84	78	33	0,40	4,69	5,34	7,40	1,58
			68	62	29	0,42	4,52	4,81	7,64	1,69
		Д5	69	66	35	0,50	3,31	3,34	5,39	1,63
			73	69	37	0,50	2,99	3,10	5,25	1,76
		Д4	97	93	67	0,69	3,36	3,57	5,27	1,57
			103	98	65	0,64	3,47	3,69	5,12	1,48
		Д1	165	157	69	0,42	6,05	6,76	14,01	2,32
258	144		36	0,14	6,99	7,68	23,75	3,40		
Е	Смешанная переходно-конденсационная	Е3	-	169	148	-	-	2,93	1,33	-
		Е1	215	197	141	0,66	2,85	3,15	5,44	1,91
		Е2	187	158	52	0,28	5,53	6,50	-	-
			305	273	130	0,42	3,73	4,46	7,90	2,12

* Простым шрифтом даны показатели при сжимающих напряжениях $\sigma_m=300$ кПа, полужирным — при $\sigma_m=600$ кПа.

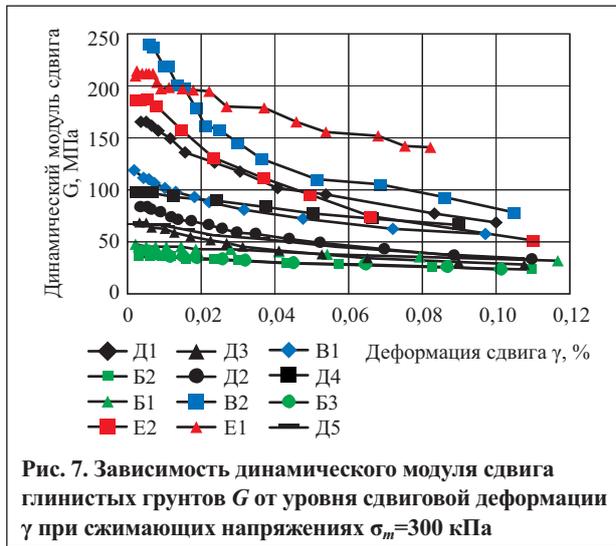


Рис. 7. Зависимость динамического модуля сдвига глинистых грунтов G от уровня сдвиговой деформации γ при сжимающих напряжениях $\sigma_m=300$ кПа

маций грунтов групп Б и Д имеют плавный вид, что связано с большей подвижностью частиц на коагуляционных контактах.

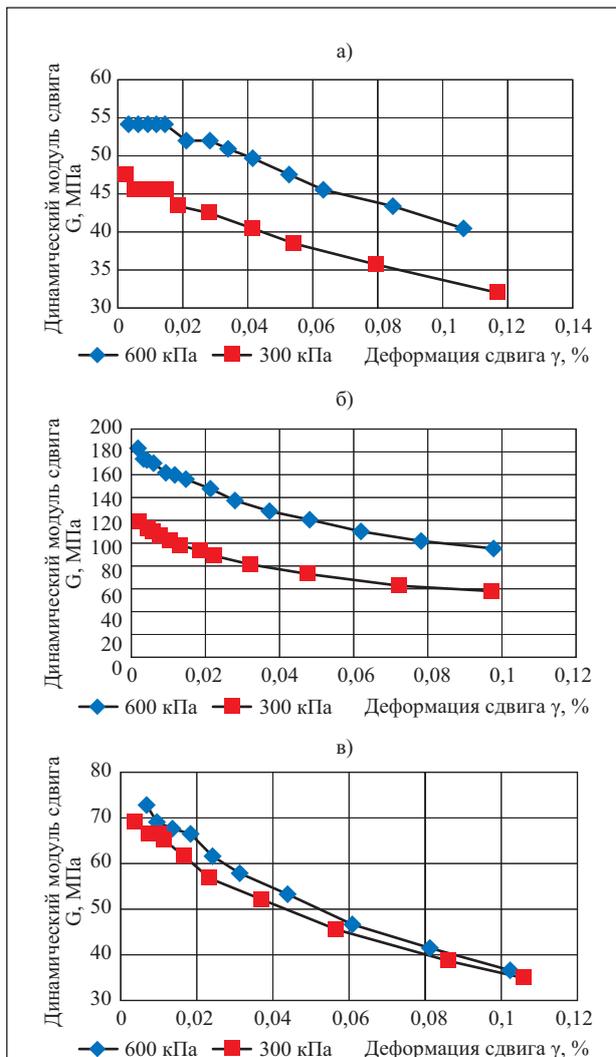


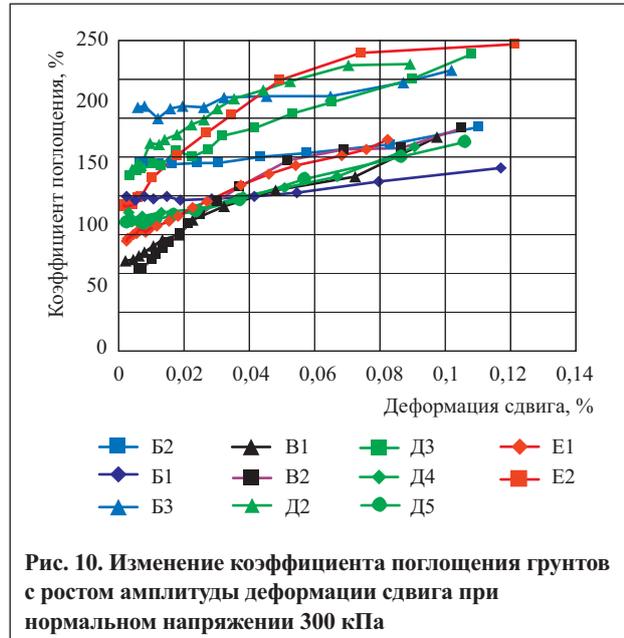
Рис. 8. Влияние величины сжимающих напряжений ($\sigma_m=600$ и $\sigma_m=300$ кПа) на зависимость динамического модуля сдвига G от уровня сдвиговой деформации γ для грунтов со структурой: а — коагуляционной (B1); б — переходной (B1); в — коагуляционно-кристаллизационной (D5)

2. С ростом сдвиговых деформаций во всех исследованных грунтах происходит снижение жесткости, но в зависимости от типа структуры в одних это происходит в большей мере, нежели в других. Это наглядно отражает величина отношения динамического модуля сдвига при сдвиговой деформации на уровне 0,1% к максимальному ($G_{0,1\%}/G_{max}$), которая является количественной мерой степени нелинейности упругих характеристик грунтов. Наименьшие изменения (см. табл. 4) отмечены для упругости грунтов группы Б: отношение $G_{0,1\%}/G_{max}$ составило для них 0,59–0,67, что объясняется высокой относительной подвижностью частиц на преобладающих в них коагуляционных контактах. Несколько большими изменениями упругого модуля в том же диапазоне деформаций характеризуются грунты с наиболее жесткими — фазовыми и цементационными — контактами. Отношение $G_{0,1\%}/G_{max}$ для грунтов групп Д и Е составляет в среднем 0,49 и 0,47 соответственно. В наибольшей мере динамический модуль сдвига снижается по мере увеличения деформаций у грунтов с переходными структурами группы В (в среднем $G_{0,1\%}/G_{max}=0,40$).

3. Наши исследования также подтвердили и хорошо известную закономерность возрастания динамического модуля сдвига глинистых грунтов с повышением сжимающих напряжений (см. табл. 4), связанную с увеличением межчастичного трения. Выяснено, что наиболее отчетливо этот эффект проявляется для грунтов групп Б и В с коагуляционными и переходными структурами (рис. 8, а, б) и менее контрастно выражен у грунтов групп Д и Е, жесткость которых в значительной мере определяется фазовыми и цементационными контактами (рис. 8, в).

4. Интересной особенностью грунтов, в структуре которых присутствуют жесткие контакты, является некоторый «гистерезис» упругих свойств, проявляющийся в более низких значениях модуля сдвига на ветви снижения деформации. То есть при уменьшении касательных напряжений и постепенном возвращении к уровню деформаций около 0,001% у ряда грунтов эта часть графика проходит ниже ветви увеличения деформаций (рис. 9). При этом начальное и конечное значения G_{max} совпадают, что свидетельствует о возможности отнесения метода использования резонансной колонки к категории неразрушающих. Следовательно, «гистерезис» упругих свойств связан не с разрушением части контактов и появлением микропластических деформаций, а с потерей энергии на работу упругих деформаций (т.е. в конечном итоге на внутреннее теплоизлучение). Этот эффект проявляется в грунтах со смешанными и переходными структурами (из групп В, Д и Е), но отсутствует в грунтах с коагуляционным типом структуры (из группы Б). Таким образом, его можно интерпретировать как временный термокинетический эффект — повышение подвижности частиц на жестких контактах за счет повышения их температуры.

5. Все исследованные грунты, как уже отмечалось выше, характеризуются постепенным увеличением поглощения с ростом амплитуды сдвиговой деформации. При этом в зависимости от типа структуры минимальные значения коэффициента поглощения D_{min} в изученном диапазоне сжимающих напряжений варьируют от 1,7 до

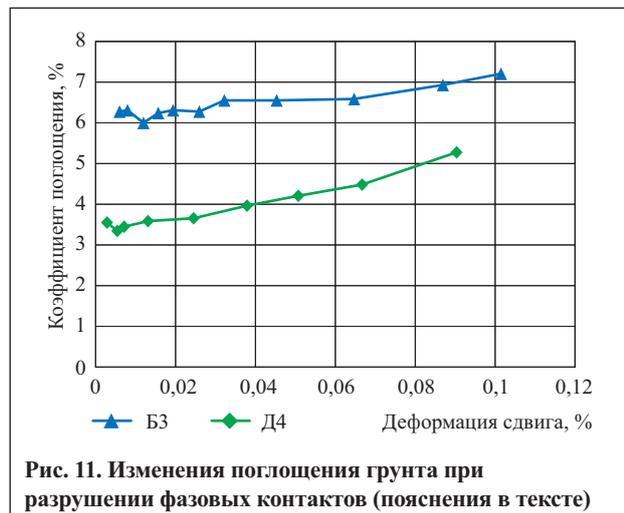


6,0%, а максимальные при деформациях порядка 0,1% достигают 8–14%, а иногда и более (см. табл. 4). При этом наибольшее начальное поглощение присуще грунтам групп Б и Д с наличием коагуляционных контактов ($D_{min}=3,3\div 6,0\%$), а наименьшее ($D_{min}=2,1\div 3,8\%$) — грунтам групп В и Е с более жесткими взаимодействиями между структурными элементами.

Вместе с тем для грунтов с переходными и переходно-конденсационными структурами (из групп В и Е) характерно наибольшее возрастание поглощения D с ростом деформаций (с 2–4 до 6–8%), тогда как у грунтов с коагуляционными структурами в том же диапазоне деформаций величина D изменяется от 4,0–6,3 до 4,8–7,2%. Грунты с коагуляционно-кристаллизационными структурами (из группы Д) занимают промежуточное положение (рис. 10). Все это, очевидно, обусловлено особой подвижностью частиц на коагуляционных контактах, существующих за счет дальнедействующих молекулярных связей, которая определяет меньшие изменения потерь энергии на работу нелинейно-упругих деформаций. Особенно наглядно это демонстрирует сравнение диаграмм для образцов Б3 и Д4 (рис. 11), которые имеют одинаковые влажность, пористость и состав, но при этом Б3 искусственно сформирован из Д4 и в отличие от последнего имеет коагуляционную структуру.

6. Так же как и для упругих свойств, при уменьшении амплитуды сдвиговых деформаций у всех грунтов наблюдается гистерезис поглощения — на ветви уменьшения деформации коэффициент поглощения оказывается немного выше (рис. 12). Присутствует и общая закономерность снижения этого коэффициента с ростом сжимающих напряжений (см. рис. 12, б), но она может быть не выражена у грунтов со значительной долей фазовых контактов (рис. 12, в). Кроме того, на приведенных графиках видно, что снижение динамического модуля сдвига, равно как и повышение коэффициента поглощения, у грунтов со смешанными структурами фиксируется лишь с некоторого порогового уровня сдвиговой деформации, ниже которого наблюдается некая «полочка», собственно, и соответствующая значениям G_{max} и D_{min} . Величина этой по-

роговой деформации составляет 0,004–0,012% для грунтов с коагуляционно-кристаллизационными структурами (из группы Д) и не превышает 0,004–0,007% для грунтов с переходно-конденсационными структурами (из группы Е). Для грунтов же с коагуляционными и переходными структурами эта предельная деформация на диаграммах не выделяется (возможно, составляет менее 0,001%, поэтому не была зафиксирована экспериментально). При этом изменения упругих и диссипативных характеристик у грунтов с коагуляционной структурой носят замедленный по сравнению с другими грунтами характер, а при переходной структуре — напротив, ускоренный до деформаций порядка 0,03% (выше которой темпы изменения соответствующих показателей снижаются) (см. рис. 7, 10). Такие особенности изменений динамических свойств глинистых грунтов групп Б и В являются, на наш взгляд, следствием большей подвижности структурной сетки частиц в целом — как за счет более дальнедействующих сил на коагуляционных контактах, так и за счет большей «эластичности», податливости каркаса при точечных взаимодействиях частиц, что отражается и на специфике преобразования энергии упругих деформаций.



Выводы

1. Тип структуры глинистого грунта оказывает определяющее влияние как на величины показателей его динамических свойств, так и на особенности их изменений с увеличением амплитуды сдвиговой деформации. При этом особенно велика роль коагуляционных контактов, присутствие которых существенно снижает величину динамического модуля сдвига и повышает значение коэффициента поглощения. Кроме того, степень изменения этих показателей с ростом деформации у грунтов с коагуляционной и коагуляционно-кристаллизационной структурой меньше, чем у грунтов с переходной и смешанной переходно-конденсационной структурой, что объясняется высокой относительной подвижностью частиц на коагуляционных контактах.

2. С ростом сдвиговых деформаций во всех глинистых грунтах происходит снижение жесткости, но в зависимости от типа структуры в одних это происходит в большей мере, нежели в других. Наименьшие изменения упругости отмечены для грунтов с коагуляционной структурой, несколько большими изменениями

упругого модуля в том же диапазоне деформаций характеризуются грунты с наиболее жесткими (фазовыми и цементационными) контактами, а в наибольшей мере он снижается у грунтов с переходными структурами.

3. Наибольшие начальные значения коэффициента поглощения присущи грунтам групп Б и Д с наличием коагуляционных контактов, а наименьшие — грунтам групп В и Е с более жесткими взаимодействиями между структурными элементами. Вместе с тем для грунтов с переходными и переходно-конденсационными структурами характерно наибольшее возрастание поглощения с деформацией, а для грунтов с коагуляционной структурой — наименьшее. Промежуточное положение занимают грунты с коагуляционно-кристаллизационными структурами. Следовательно, высокая подвижность частиц на коагуляционных контактах определяет меньшие изменения потерь энергии на работу нелинейно-упругих деформаций.

4. Существует по крайней мере два пороговых уровня сдвиговой деформации, при достижении которых происходят заметные изменения упругих и диссипативных свойств грунтов. Первый из них соответствует значениям G_{max} и D_{min} и знаменует собой начало деградации динамического модуля сдвига и роста поглощения. Величина этой первой пороговой деформации составляет не более 0,004–0,007% у грунтов с переходно-конденсационными структурами (из группы Е) и порядка 0,004–0,012% у грунтов с коагуляционно-кристаллизационными структурами (из группы Д). У грунтов с коагуляционным и переходным типами структуры этот порог не выявлен. Вторая пороговая деформация для всех грунтов близка к уровню 0,03%, выше которого темпы изменений показателей динамических свойств снижаются и с дальнейшим ростом деформации может происходить их сближение для грунтов с различными типами структуры.

5. В зависимости от типа структуры глинистого грунта неодинаково влияние сжимающих напряжений как на величину динамического модуля сдвига, так и на значение коэффициента поглощения. В частности, у некоторых грунтов со смешанными структурами это влияние может быть практически не выражено.

6. Исследования гистерезиса динамического деформирования глинистых грунтов с разными типами структуры показали, что до сдвиговых деформаций порядка 0,1% существенного нарушения структурных связей не происходит, а, следовательно, метод резонансной колонки может считаться неразрушающим.

7. Нелинейная упругость глинистых грунтов в диапазоне малых деформаций является следствием теплотер и некоторого увеличения подвижности частиц на контактах, в том числе и на жестких — фазовых и цементационных. В наибольшей степени этот эффект выражен для грунтов с переходными и переходно-конденсационными структурами, но отсутствует у грунтов с коагуляционным типом структуры и может интерпретироваться как временное термокинетическое повышение подвижности частиц на жестких контактах за счет повышения их температуры. 

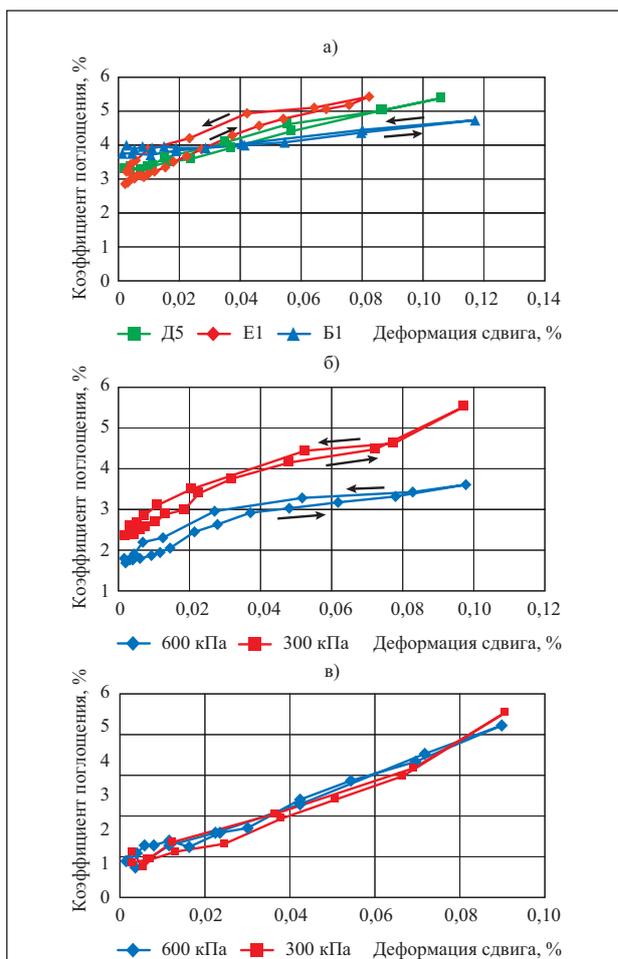


Рис. 12. Гистерезис поглощения в глинистых грунтах со структурами: а — коагуляционными, коагуляционно-кристаллизационными и переходно-конденсационными (Б1, Е1, Д5, при сжимающих напряжениях $\sigma_m=300$ кПа); б — переходными (В1, при $\sigma_m=300$ и 600 кПа); в — смешанными коагуляционно-кристаллизационными (Д4, при $\sigma_m=300$ и 600 кПа). Стрелками показаны ветви нарастания и убывания деформации



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вознесенский Е.А., Владов М.Л., Кулинарева Е.С., Коваленко В.Г. Использование данных сейсмоакустических исследований для оценки динамической неустойчивости грунтов в массиве // Разведка и охрана недр. 2005. № 12. С. 41–46.
2. Вознесенский Е.А., Кулинарева Е.С., Фуникова В.В. Природа и закономерности поглощения волн напряжений в грунтах // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2011. № 4. С. 39–47.
3. Вознесенский Е.А., Сидорова А.И. Оценка динамических свойств песчаных грунтов в разрезе оснований ответственных сооружений методами малоамплитудных испытаний на резонансной колонке и крутильного сдвига // Инженерная геология. 2009. № 2. С. 18–25.
4. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: МНТКС, 2010.
5. ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Госстрой СССР, 1979.
6. ГОСТ 24143-80. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик набухания и усадки. М.: Госстрой СССР, 1980.
7. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: МНТКС, 2011.
8. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Госстрой СССР, 1984.
9. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях. СПб.: Изд-во НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2006. 383 с.
10. Осипов В.И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
11. Пузырев Н.Н. Объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию. Новосибирск: Изд-во НИЦ ОИГГМ СО РАН, 1997. 301 с.
12. СП 26.13330.2012. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. М.: Минрегион России, 2012.
13. Dvorkin J., Mavko G., Nur A. The effect of cementation on the elastic properties of granular material // Mechanics of Materials. 1991. № 3-4. P. 207–217.
14. Hardin B.O., Black W.L. Vibration modulus of normally consolidated clay // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE, 1968. V. 94. № 2. P. 353–369.
15. Hatanaka M., Suzuki Y., Kawasaki T., Endo M. Cyclic undrained shear properties of high quality undisturbed Tokyo gravel // Soils and Foundations. 1988. V. 28. P. 57–68.
16. Iwasaki T., Tatsuoka F., Takagi Y. Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading. // Soils and Foundations. 1978. V. 18. № 1. P. 39–56.
17. Sagaseta C., Cuellar V., Pastor M. Cyclic loading // Proceedings of the 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Florence, 1991. V. 3. P. 981–999.
18. Trhliková J., Mašín D., Boháč J. Small-strain behavior of cemented soils // Géotechnique. 2012. V. 62. № 10. P. 943–947.
19. Vucetic M., Dobry R. Effects of the soil plasticity on cyclic response // Journal of Geotechnical Engineering. 1991. V. 117. P. 89–107.

ЖУРНАЛ

- о людях
- о землетрясениях
- о неустойчивых склонах и оползнях
- о вулканах
- о наводнениях и ураганах
- ...
- о прогнозировании и предупреждении ЧС
- о важности работы изыскателей

ЖУРНАЛ
GeoРиск

Тел./факс: +7 (495) 366-2684, 366-2095

e-mail: pr@geomark.ru