



ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ КРУПНООБЛОМОЧНЫХ ГРУНТОВ

THEORETICAL AND METHODOLOGICAL EXPERIMENTAL RESEARCH ASPECTS OF SANDY-CLAYEY FILLING AGGREGATE COMPOSITION AND PROPERTIES OF COARSE-GRAINED SOILS

БАБЕНКО В.А.

Аспирант кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, vababenko@bk.ru

НИКИФОРОВ Н.В.

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

BABENKO V.A.

Department of engineering and ecological geology, faculty of the geology of Lomonosov Moscow State University, postgraduate student, vababenko@bkl.ru

NIKIFOROV N.V.

Department of engineering and ecological geology, faculty of the geology of Lomonosov Moscow State University, graduate student, nikiforovnv@gmail.com

VOZNESENSKY E.A.

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

Ключевые слова:

крупнообломочный грунт; заполнитель; мелкозём; плотность; динамическое уплотнение; оптимальная влажность; прочностные свойства; деформационные свойства.

Key words:

coarse-grained soil; filling aggregate; fine earth; density; dynamic compaction; optimum moisture content; strength properties; deformation properties.

Аннотация

В статье обобщены имеющиеся сведения об исследовании состава и свойств крупнообломочных грунтов и их классифицирования. Приводятся результаты лабораторных исследований щебнистых грунтов с песчано-пылеватым заполнителем оползневых и делювиально-оползневых отложений Черноморского побережья Северо-Западного Кавказа. Предлагается методика определения физико-механических свойств заполнителя как составной части крупнообломочного грунта в целом на основе расчетного значения плотности заполнителя для приготовления образцов с заданными плотностью и влажностью.

Введение

На протяжении последних 40 лет крупнообломочные породы были объектом тщательного инженерно-геологического изучения. Надежное определение свойств этих грунтов имеет большое значение, в частности, при строительстве и реконструкции автомобильных дорог и удерживающих сооружений на них в пределах горных территорий, где они имеют широкое распространение среди склоновых гравитационных отложений, непосредственно взаимодействующих с сооружениями. Осуществление экономически эффективных и надежных проектных решений сооружений автомобильных дорог в таких районах невозможно без глубокого изучения физических и физико-механических свойств крупнообломочных грунтов, которые, в частности, во многом определяют давление склоновых отложений на подпорные сооружения и их устойчивость, что в конечном счете сказывается на работоспособности дороги и сроке ее службы.

С другой стороны, использование крупнообломочных грунтов при строительстве земляных сооружений также требует комплексного изучения этого материала. Присутствие в таких грунтах песчано-глинистого заполнителя, как показано рядом авторов (В.И. Федоровым, А.А. Васильевой, Г.Л. Ткаченко, В.Л. Лебедевым, Ю.К. Зарецким, Э.И. Воронцовым, В.И. Вуцелем, М.П. Павничем, С.Б. Уховым, А.В. Конвизом, В.В. Семеновым и др.), резко сказывается на свойствах породы, а при значительном содержании заполнителя его физико-механические свойства определяют и свойства грунта в

Abstract

The paper summarizes the available information on research of composition and properties of coarse-grained soils and their classification. Laboratory test results of crushed-stone soils with sand-silt filling aggregates of landslide and diluvium and landslide deposits of the Northwest Caucasian Black Sea Coast are presented. A determination technique of physical-mechanical properties of the filling aggregate as a constituent part of the coarse-grained soil in whole on the base of the calculated filling aggregate density value to prepare soil samples having specified density and moisture is proposed.



целом. При этом наблюдается зависимость соответствующих показателей от степени уплотнения и консолидации заполнителя.

Это ставит конкретные методические задачи определения физико-механических свойств заполнителя для выявления основных факторов, влияющих на свойства грунтов в целом. Нормативные документы, регламентирующие методы экспериментального определения свойств грунтов, в большинстве случаев (особенно для лабораторных методов) либо не распространяются на такие грунты, либо имеют существенные ограничения по размеру и содержанию крупных обломков.

В связи с этим разработка корректной методики определения физических и физико-механических свойств заполнителя крупнообломочных грунтов в лабораторных условиях является актуальной задачей грунтоведения и имеет существенное практическое значение для строительства автомобильных дорог в горных районах.

Целью данной работы являлось изучение состава и свойств песчано-глинистого заполнителя крупнообломочных грунтов. Для реализации указанной цели были поставлены следующие задачи:

- обзор современного состояния вопроса исследования крупнообломочных грунтов как двухкомпонентной системы;
- изучение основных физических и физико-химических свойств песчано-глинистого заполнителя;
- теоретическое обоснование разработанной методики получения искомой плотности заполнителя крупнообломочного грунта в зависимости от влажности и затрачиваемой работы на уплотнение.

В настоящей статье обобщен опыт исследований состава и свойств крупнообломочных грунтов и их классифицирования, а также описывается разработанная авторами методика определения физико-механических свойств заполнителя как составной части крупнообломочного грунта в целом. Эта методика основана, во-первых, на расчете плотности заполнителя в условиях природного залегания грунта по ряду экспериментально определяемых (в полевых и лабораторных условиях) показателей, а во-вторых, на создании образцов с расчетной плотностью при известной естественной влажности заполнителя для последующего определения его прочностных и деформационных характеристик при стандартных лабораторных испытаниях.

Опыт изучения крупнообломочных грунтов как двухкомпонентных систем

Изученность вопроса

Крупнообломочные грунты имеют различный генезис и, как правило, обладают достаточно высокой прочностью и малой деформируемостью при внешних нагрузках, в связи с чем являются обычно надежными основаниями инженерных сооружений. Они также с успехом используются как строительный материал в различных элементах земляных сооружений.

Под крупнообломочными принято понимать грунты, состоящие из окатанных или угловатых обломков горных пород размером более 2 мм, имеющих преимущественно полиминеральный состав и составляющих более 50% массы воздушно-сухого грунта [9]. Их наиболее

подробное определение дано в методическом руководстве [15]: «Крупнообломочные грунты, представляющие собой несцементированные продукты искусственного или естественного смешения исходных горных пород различного генезиса и минералогического состава и отличающиеся повышенным (более 10%) содержанием обломочных (скелетных) частиц крупнее 2 мм, делятся на три класса в соответствии с классификацией СоюзДорНИИ».

Заполнитель представляет собой продукт разрушения исходных пород, в том числе самих обломков. Поэтому представление о дисперсном заполнителе крупнообломочных пород формировалось по мере изучения подобных грунтов как сложных двухкомпонентных систем — обломков и заполнителя.

Изучение связи физико-механических свойств крупнообломочных грунтов с их гранулометрическим составом начиная с 30-х гг. прошлого века велось в Дорожном научно-исследовательском институте (ДорНИИ). В отличие от подобных работ других исследователей того же времени как в нашей стране, так и за рубежом, исследования ДорНИИ были ориентированы на испытания не естественных весьма различных по гранулометрическому составу грунтов, а искусственных смесей разных фракций. В результате этих работ были получены зависимости физико-механических свойств грунтов от крупности частиц и отчасти от петрографического состава крупных фракций.

С середины XX века начались систематические научные исследования инженерно-геологических особенностей крупнообломочных грунтов. Впервые такая задача была поставлена Н.В. Коломенским. В 1964–1969 гг. в связи с комплексной селевой съемкой масштаба 1:10 000 районов Туапсе и Новороссийска на Лазаревской геотехстанции Днепропетровского института инженеров транспорта (ДИИТ) велось изучение крупнообломочных пород под научным руководством М.Н. Гольдштейна и Е.А. Толстых. С начала 1950-х гг. большие исследования крупнообломочных грунтов как части элювия проводились уральской группой исследователей (Л.И. Корженко, Н.А. Цилюриком, В.Б. Швецем, Г.Б. Кульчицким и др.). В 1955–1956 гг. А.И. Шеко на примере Гурзуфского оползневой массива было проведено изучение крупнообломочных пород, результаты которого стали одними из основополагающих для современных представлений об особенностях таких грунтов.

Физико-механические свойства естественных образований и искусственных смесей с крупнообломочным материалом и заполнителем изучались в институтах ВОДГЕО, ГИДРОПРОЕКТ, ТНИСГЭИ, ВНИИГ, ДальНИИС (А.А. Ничипоровичем, Я. Журеком, С.М. Атайя, А.И. Тейтельбаумом, Л.А. Авакяном, Г.Н. Петровым, В.А. Дубняком, В.Г. Радченко, В.И. Федоровым и др.). Влияние природных факторов на механические свойства крупнообломочных грунтов изучалось многими исследователями на модельных смесях (Р.Г. Тулиновым, Л.Н. Рассказовым, О.А. Пахомовым, Р.Г. Кальберговым и др.).

Для щебнисто-глинистых и галечно-глинистых пород Черноморского побережья Кавказа В.П. Вихаревым на разработанной им стендовой срезной установке были выполнены методические опыты по оценке влия-

Таблица 1

Классификация крупнообломочных грунтов по гранулометрическому составу (по Г.Н. Петрову [17])			
Вид грунта	Соответствующий вид грунта при преобладании неокатанных частиц	Более 50% частиц крупнее, мм	Примечание
Валунный	Глыбовый	200	При содержании песчаного заполнителя более 40% или пылеватого и глинистого заполнителя более 30% в наименовании крупнообломочного грунта должно содержаться наименование заполнителя
Галечниковый	Щебнистый	10	
Гравийный	Дресвяный	2	

ния содержания обломков на сопротивление грунтов сдвигу. Наиболее детальные исследования поведения крупнообломочных грунтов с различными видами заполнителей и различным содержанием крупных обломков были выполнены Д.П. Прочухеном, А.Н. Лужецким, В.Г. Мельником, Н.Я. Холитовым, Э.М. Добровым и др. Изучению различных свойств крупнообломочных грунтов посвящены также работы А.К. Ларионова, А.А. Васильева и ряда других авторов.

С.Б. Уховым с соавторами [24] был предложен новый метод определения механических свойств неоднородных крупнообломочных грунтов, основанный на математическом моделировании эксперимента.

Сегодня особое внимание уделяется изучению крупнообломочных грунтов при гидротехническом строительстве, а также для совершенствования геотехконтроля при работе с ними [1–3].

Исследования крупнообломочных пород как материала для строительства грунтовых плотин является одним из направлений работы Научно-исследовательского института энергетических сооружений (ОАО «НИИЭС»). Их основная задача — изучение свойств двухкомпонентных смесей, крупнообломочных грунтов и глинистого заполнителя. С.В. Борткевичем была разработана методика проектирования параметров уплотнения и оперативные методы контроля качества уплотнения таких смесей [3].

Все эти исследования позволили существенно расширить представления об инженерно-геологических особенностях крупнообломочных грунтов.

Классифицирование крупнообломочных грунтов

К сегодняшнему дню в нашей стране разработан целый ряд классификаций крупнообломочных грунтов, например:

- 1) по размеру частиц (классификации Н.В. Логвиненко, Московского нефтяного института, Г.И. Ершовой, Л.Б. Рухина, П.Л. Безрукова и А.П. Лисицына);
- 2) инженерно-геологических (классификации В.В. Охотина, Е.М. Сергеева и др., ЦНИИ автодорожного транспорта, В.А. Приклонского, П.Н. Панюкова, Г.Л. Фисенко, Н.Н. Маслова)¹;
- 3) представляющих исторический интерес (классификации В.Р. Вильямса, А.Н. Сабанина).

Зарубежные классификации также достаточно разнообразны, например классификации Й. Грубецкого и Й. Сысака (Польша, 1960), К. Кайля (Германия, 1951), К.К. Вентворта (США, 1929), Р.В. Симонсона (США, 1989), К.П. Леонарда и К.В. Фишера (Великобритания, 1969).

В практике инженерно-геологических исследований известно несколько классификаций крупнообломочных грунтов по гранулометрическому составу. Проектно-изыскательскими организациями широко применяется классификация ГОСТ 25100-95 [6] и Иванова Н.Н. — СП 35.13330.2011 [20]. Согласно последней при подразделении элювиальных крупнообломочных грунтов по гранулометрическому составу на разновидности необходимо дополнительно указывать содержание частиц заполнителя размером менее 0,1 мм, а также выделять щебенисто-дресвяные грунты при содержании частиц мельче 0,1 мм до 10% по массе, а крупнее 10 мм — более 25%.

В свою очередь, структурные элементы грунтов подразделяют по размеру на четыре группы [13]:

- 1) крупнообломочные (обломки крупнее 2 мм);
- 2) среднеобломочные (зерна от 2 до 1 мм);
- 3) мелкообломочные (зерна от 1,00 до 0,01 мм);
- 4) тонкообломочные (частицы менее 0,01 мм).

В классификации грунтов земляного полотна крупнообломочные грунты подразделяют на три группы (табл. 1):

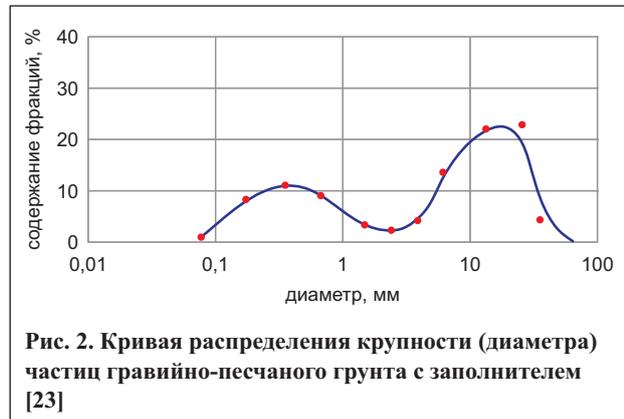
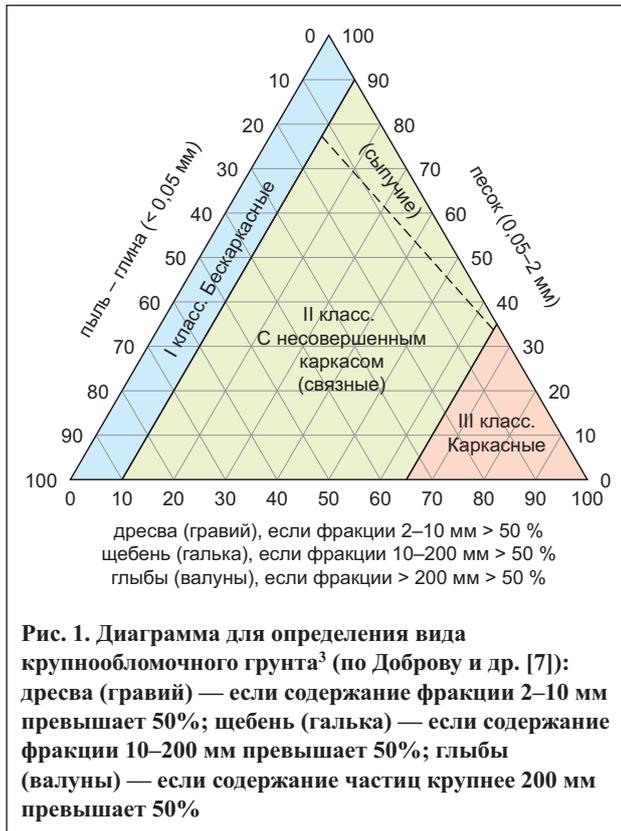
- 2) глыбовые или валунные;
- 3) щебнистые или галечниковые;
- 4) дресвяные или гравийные.

В общей классификации грунтов Е.М. Сергеева, В.П. Приклонского, П.Н. Панюкова и Н.Д. Белого [19] крупнообломочные грунты подразделяются на следующие группы:

- 1) каменистые и валунные (преобладают обломки крупнее 200 мм);
- 2) щебнистые и галечниковые (преобладают обломки величиной от 40 до 200 мм);
- 3) дресвяные и гравийные (преобладают обломки размером 20–40 мм).

Важнейшей структурной характеристикой крупнообломочных грунтов, от которой зависят как их физические, так и физико-механические свойства, является

¹ Эти классификации разрабатывались в инженерно-геологических целях, они также составлены на основе подразделения частиц, однако критерии выделения соответствующих фракций здесь по сравнению с первой группой другие (например, классификация В.В. Охотина основана на изменениях свойств грунтов в зависимости от размера частиц) [23].



наличие или отсутствие песчано-глинистого заполнителя. В общей классификации грунтов [19] выделены две подгруппы крупнообломочных грунтов — без заполнителя и с заполнителем. В зависимости от состава и количества заполнителя эти грунты относятся к несвязным или связным.

В соответствии с ГОСТ 25100-95 [6] крупнообломочные грунты относятся к дисперсным осадочным минеральным. Согласно СП 22.13330.2011 [21] при содержании песчаного или глинистого заполнителя в количестве более 40 или 30% соответственно в названии такого грунта необходимо давать наименование вида и характеристику состава заполнителя.

Наиболее подробную классификацию по гранулометрическому составу, первоначально составленную в 1957 г. для щебнисто-глинистых грунтов Южного Крыма и впоследствии дополненную разработал А.И. Шеко [26]. В соответствии с ней крупнообломочные грунты состоят из «мелкозема»² и частиц крупнее 2 мм. Построение данной классификации основано на принципе иерархии (группы, подгруппы, классы). По соотношению количеств щебня и дресвы эти грунты подразделяются на две большие группы: (1) с содержанием щебня, превышающим содержание дресвы; (2) с содержанием дресвы, превышающим содержание щебня. Каждая из этих групп состоит из двух подгрупп, которые характеризуются определенным соотношением песчаной и пылеватой фракций: в первой подгруппе песчаные частицы преобладают над пылеватыми, а во второй на-

оборот. Далее грунты подразделяются на пять гранулометрических классов по процентному содержанию крупных обломков (размером более 2 мм): I — менее 10%; II — 10÷35%; III — 35÷65%; IV — 65÷90%; V — более 90%. Каждый из этих классов состоит из трех групп — дресвяных (гравийных), щебнистых (галечниковых) и каменных (валунных) грунтов. В зависимости от наличия заполнителя и его качества в этой классификации также выделено несколько подгрупп.

Дальнейшее развитие эта классификация получила в работах Э.М. Доброва и др. [7, 8] для целей дорожного строительства. Эти авторы на основе введенного ими понятия «степень каркасности» (рис. 1) выделили три класса грунтов, различающихся по своей структуре, деформационным и прочностным свойствам.

I класс — грунты бескаркасные, содержащие менее 10% крупных обломков. Их свойства определяются свойствами «мелкоземной» части (песка, глины, пыли).

II класс — грунты с несовершенным каркасом, содержащие от 10 до 65% крупнообломочных частиц. Их свойства определяются характеристиками как содержащегося в них «мелкозема», так и крупнообломочных частиц. Влияние последних на свойства грунта тем больше, чем выше их содержание. При небольшом количестве крупных обломков они не соприкасаются и разобщены в «мелкоземе», а при увеличении их содержания соприкасаются друг с другом и образуют «структуры зацепления».

III класс — каркасные грунты, содержащие более 65% крупнообломочных частиц. Они характеризуются наличием непосредственных контактов между крупными частицами, что предопределяет доминирующее влияние последних на физико-механические свойства этих грунтов. Каркасность структуры грунтов этого класса в значительной степени зависит от состояния глинистой части мелкозема [15].

Крупнообломочные грунты II класса подразделяют на две категории: (1) связные, если заполнитель (с частицами размером менее 2 мм) представляет собой глинистую или суглинистую массу; (2) сыпучие, если заполнитель песчаный [15]. Следует подчеркнуть, что

² Данное наименование в качестве термина представляется неудачным, поскольку в инженерно-геологической литературе отсутствуют четкие границы между такими частицами по размеру. Однако оно может использоваться в научных текстах там, где смысл понятен из контекста. Например, в данном случае граница проводится по верхней границе размера песчаной фракции.

³ Представленный график-треугольник без подписи горизонтальной оси приведен в оригинальной статье автором Э.М. Добровым стр. 108 [7].

Таблица 2

Нормированные значения плотности крупнообломочных грунтов, г/см ³ [14]							
Показатель текучести заполнителя I_L , безразм.	Содержание крупных обломков (диаметром более 2 мм), %						
	20	30	40	50	60	73	100
$0,00 \leq I_L \leq 0,25$	2,03	2,08	2,13	2,17	2,21	2,27	1,70
$0,25 < I_L \leq 0,50$	2,02	2,07	2,11	2,15	2,19	2,26	1,70
$0,50 < I_L \leq 0,75$	2,00	2,05	2,09	2,13	2,17	2,25	1,70

для гравийно-галечных грунтов с песчаным или глинистым заполнителем дифференциальные кривые распределения гранулометрических элементов являются двухмодальными (рис. 2). Максимумы кривой распределения отвечают определенным размерам частиц крупнообломочной фракции и заполнителя [17].

По свойствам скелетных фракций рассматриваемые грунты также подразделяются на группы:

- с водостойкой скелетной частью (коэффициент размягчаемости выше 0,75), которая может быть представлена обломками изверженных и метаморфических пород (гранита, базальта, диорита и др.), почти не изменяющих свои прочностные свойства при увлажнении;
- с неводостойкой скелетной частью (коэффициент размягчаемости ниже 0,75), включающие обломки легко выветривающихся и размягчающихся при увлажнении пород (мела, опоки, мергеля, алевролита, аргиллита и др.) [15].

Согласно ГОСТ 25100-95 [6] по степени неоднородности гранулометрического состава C_u крупнообломочные грунты подразделяют на однородные ($C_u \leq 3$) и неоднородные ($C_u > 3$).

Обобщая вышесказанное, отметим, что граница 2 мм между мелкоземом (глинисто-пылевато-песчаными частицами) и гравийно-дресвяными частицами имеет хорошее физическое обоснование.

Все эти классификации схожи в главном: к крупнообломочным грунтам относятся породы, содержащие более 50% по массе крупнообломочного материала. Однако при 50%-ном весовом содержании обломков их объемное содержание в грунте составляет порядка 30–45%, т.е. обломки в мелкоземе разобщены и можно предположить, что многие инженерно-геологические особенности такого грунта в большей мере зависят от мелкозема, чем от крупнозернистых включений.

Современные представления о влиянии заполнителя на основные физические и физико-механические свойства крупнообломочных грунтов

Наличие или отсутствие песчано-глинистого заполнителя — важнейшая характеристика состава крупнообломочных грунтов. Его присутствие резко сказывается на инженерно-геологических особенностях всех типов таких грунтов. При отсутствии мелкоземного материала они обладают высокой водопроницаемостью, причем движение воды в них носит турбулентный характер. При наличии же заполнителя крупнообломочные грунты могут иметь небольшую водопроницаемость, величина которой определяется его

составом. Присутствие заполнителя, особенно глинистого, также снижает их физико-механические свойства. Поэтому при изучении крупнообломочных грунтов в первую очередь среди них выделяют валунные (каменистые), галечниковые (щебнистые) и гравийные (дресвяные) грунты с заполнителем и без него [22].

Естественная весовая влажность крупнообломочных грунтов согласно обобщенным данным изменяется от 1–2 до 20–30% (редко выше) [23]. При этом в подавляющем большинстве случаев влажность их скелетной части практически постоянна и ничтожна по величине. Поэтому валовая влажность крупнообломочных грунтов определяется главным образом степенью заполнения пор водой при отсутствии заполнителя или влажностью песчано-глинистого заполнителя при его наличии.

Для крупнообломочных грунтов выделяют три вида абсолютной влажности: (1) крупных зерен и обломков, (2) песчано-глинистого заполнителя, (3) валовую. Первая практически постоянна, не изменяется с глубиной и в течение года и зависит только от петрографического состава обломков, вторая оказывает существенное влияние на физико-механические свойства крупнообломочных пород, третья характеризует некоторое усредненное количество воды в грунте. При оценке консистенции заполнителя должна использоваться величина влажности мелкозема.

Плотность твердых частиц крупнообломочных пород обычно составляет 2,65–2,70 г/см³ [9]. По данным В.С. Соколова [20], для галечников плотность изменяется в пределах 2,50–2,83 г/см³. Для грунтов, содержащих значительное количество обломков основных и ультраосновных пород или целиком состоящих из них, она возрастает до 3,0–3,3 г/см³ [9].

Плотность скелета крупнообломочных грунтов изменяется в широком диапазоне. Для галечниковых и гравийных грунтов, не содержащих большого количества заполнителя, она чаще всего составляет 1,65–1,90 г/см³, при наличии песчаного или глинистого заполнителя нередко превышает 2,0 г/см³ и может достигать 2,15–2,20 г/см³ [9].

Плотность крупнообломочных грунтов повышается при содержании мелкозема в количестве, достаточном для заполнения пространств между более крупными обломками. В качестве материала для земляных сооружений оптимальным является использование грунта с содержанием крупнообломочной фракции 65–70%. Плотность крупнообломочных пород с различным соотношением заполнителя приведена в таблице 2.

Таблица 3

Прочностные свойства грунта (угол внутреннего трения ϕ , град., и удельное сцепление C , МПа) в зависимости от показателя текучести (консистенции) глинистого заполнителя I_L , безразм. [15]						
Состав грунта	I_L					
	0,0		0,3		0,6	
	ϕ	C	ϕ	C	ϕ	C
100% глины	11	1,11	2	0,03	0	0,02
75% глины, 25% щебня	17	0,10	14	0,04	14	0,00
50% глины, 50% щебня	31	0,09	30	0,00	28	0,00
25% глины, 75% щебня	43	0,04	42	0,03	41	0,03
50% глины, 25% песка, 25% щебня	28	0,08	18	0,01	21	0,00
25% глины, 25% песка, 50% щебня	41	0,02	37	0,03	36	0,03
25% глины, 50% песка, 25% щебня	31	0,00	34	0,02	38	0,02
33% глины, 33% песка, 33% щебня	34	0,05	33	0,05	31	0,05
50% глины, 50% песка	24	0,07	18	0,06	21	0,04
25% глины, 75% песка	30	0,02	27	0,03	25	0,01
75% глины, 25% песка	16	0,13	5	0,01	5	0,00

Пористость крупнообломочных грунтов чаще всего не превышает 40%, но в ряде регионов она может быть выше. Если присутствует заполнитель, она снижается до 25–30% [23].

Деформационные характеристики крупнообломочных грунтов существенным образом зависят от количества, вида и влажности содержащегося в них мелкозема, степени выветрелости обломков. Модуль упругости грунтов, содержащих более 25% глинистого заполнителя, практически не зависит от прочности обломочной составляющей и определяется гранулометрическим составом и консистенцией мелкозема, находящегося в контакте с крупными частицами [15]. Повышение содержания мелкозема в составе крупнообломочного грунта приводит к снижению его прочностных (табл. 3) и деформационных характеристик, что имеет большое значение, в частности, для оценки давления таких грунтов на подпорные сооружения на склонах.

Сжимаемость крупнообломочных грунтов реализуется в основном за счет песчано-глинистого заполнителя. По величине сжимаемости большая их часть относится к категории слабо- и среднесжимаемых. Наименьшей сжимаемостью характеризуются разности, лишенные заполнителя. Наличие заполнителя, особенно глинистого, увеличивает величину деформации таких грунтов под нагрузкой. Р.Г. Кальберген [10] установил, что в целом для крупнообломочных грунтов модуль деформации имеет следующие значения: 4080 МПа для аллювиальных галечников, 20–50 МПа для делювиально-пролювиальных щебнистых грунтов, 30–60 МПа для элювиальных рыхляков, 7–20 МПа для мерзлых озерно-аллювиальных галечников

при оттаивании. В.С. Соколовым [20] было установлено, что нормативный модуль общей деформации галечников в естественном залегании достигает 229,4 МПа, а расчетный при доверительной вероятности 0,99–183,7 МПа.

Сопротивление сдвигу рассматриваемых грунтов зависит как от крупности и выветрелости обломков, так и от количества, состава и свойств заполнителя [23]. В случае песчаного заполнителя сопротивление сдвигу выше, чем в случае более дисперсного. При наличии последнего его влажность имеет очень большое значение: если она превышает влажность нижнего предела пластичности (хотя бы на несколько процентов), то показатели сопротивления сдвигу снижаются почти на 20% [9]. Повышение степени плотности и неоднородности крупнообломочных грунтов обуславливает повышение угла внутреннего трения.

Крупнообломочные грунты обладают высокой водопоглощающей способностью, которая уменьшается с увеличением начальной влажности глинистого заполнителя. Так, для грунта, содержащего 50% глины и 50% дресвы, с изменением консистенции (показателя текучести) от 0,0 до 0,8 коэффициент водопоглощения при промачивании уменьшается приблизительно в 6 раз. Примерно такая же картина наблюдается и в смеси, состоящей из равного количества (по весу) песка и глины. Наибольшей скоростью водопоглощения обладают крупнообломочные грунты с каркасной структурой и с несовершенным каркасом (рис. 3), содержащие менее 40–50% дисперсного материала [15]. В данном случае под водопоглощением понимается количество поглощенной образцом влаги на данный момент времени.

⁴ Коэффициент водопоглощения крупнообломочных грунтов зависит от гранулометрического состава и влажности глинистого мелкозема [8], поэтому его целесообразно упомянуть именно в данном разделе.

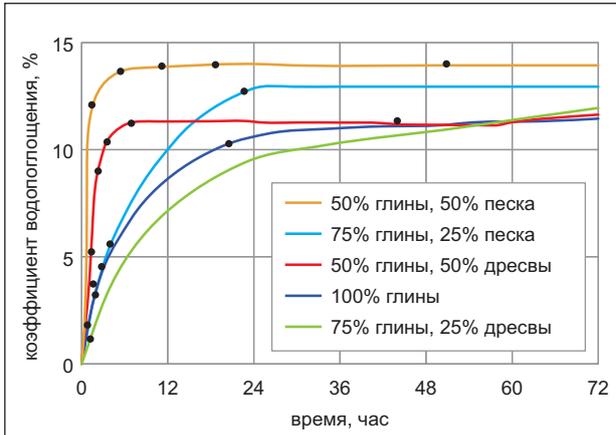


Рис. 3. Изменение коэффициента водопоглощения во времени в зависимости от гранулометрического состава крупнообломочного грунта: 1 — 50% глины, 50% песка; 2 — 75% глины, 25% песка; 3 — 50% глины, 50% дресвы; 4 — 100% глины; 5 — 75% глины, 25% дресвы [8]

В качестве показателя степени водопоглощения обычно используется коэффициент K^d , равный отношению максимального количества (массы) поглощенной воды ΔP к первоначальной массе образца P , выраженный в процентах [8]:

$$K = (\Delta P / P) \cdot 100\%. \quad (1)$$

Как показали исследования Э.М. Доброва и др. [8], значительной водопоглощающей способностью (способны удерживать 23% воды) обладают дресвяно-песчаные и дресвяные грунты. Эти же авторы отмечают, что изменения влажности глинистого заполнителя в составе крупнообломочного грунта могут происходить за весьма короткие промежутки времени, исчисляемые несколькими часами и даже минутами, в особенности если начальная влажность невысока. Это явление объ-

ясняется повышенной общей водопроницаемостью крупнообломочных грунтов по сравнению с другими дисперсными грунтами и возможностью увлажнения глинистого заполнителя по более развитой поверхности, образованной его отдельными агрегатами.

Степень снижения прочностных свойств крупнообломочных грунтов с повышением влажности оценивается коэффициентом сдвигоустойчивости, определяемым по соотношению сопротивляемости грунта сдвигу после увлажнения и его начальной (до увлажнения) сдвиговой прочности, которая оценивается величиной предельных напряжений при сдвиге:

$$S_{pw} = ptg\varphi_w + c_w, \quad (2)$$

где p — нормальное напряжение по площадке сдвига, МПа; φ_w , c_w — соответственно угол внутреннего трения, град., и силы общего сцепления, МПа, при текущей влажности глинистого заполнителя [8].

Крупнообломочные грунты, содержащие глинистый мелкозем в твердой или полутвердой консистенции, характеризуются наименьшим коэффициентом сдвигоустойчивости (рис. 4), причем его величина снижается в процессе водонасыщения по мере увеличения содержания в смеси глинистого мелкозема [15].

Рассмотрим основные свойства крупнообломочных пород, скелетная часть которых представлена неводостойкими породами, например алевролитами, аргиллитами⁵ и аргиллитоподобными глинами. Аргиллитовые грунты (с обломочной массой из фрагментов аргиллитов, аргиллитоподобных глин и часто алевролитов) являются типичными представителями четвертичных отложений складчатых областей, в частности северо-западной части побережья Черного моря, где с ними связаны широко развитые склоновые процессы. Они подвержены интенсивному разрушению при увлажнении, а также при циклически повторяющихся увлажнении и высыхании, промерзании и оттаивании.

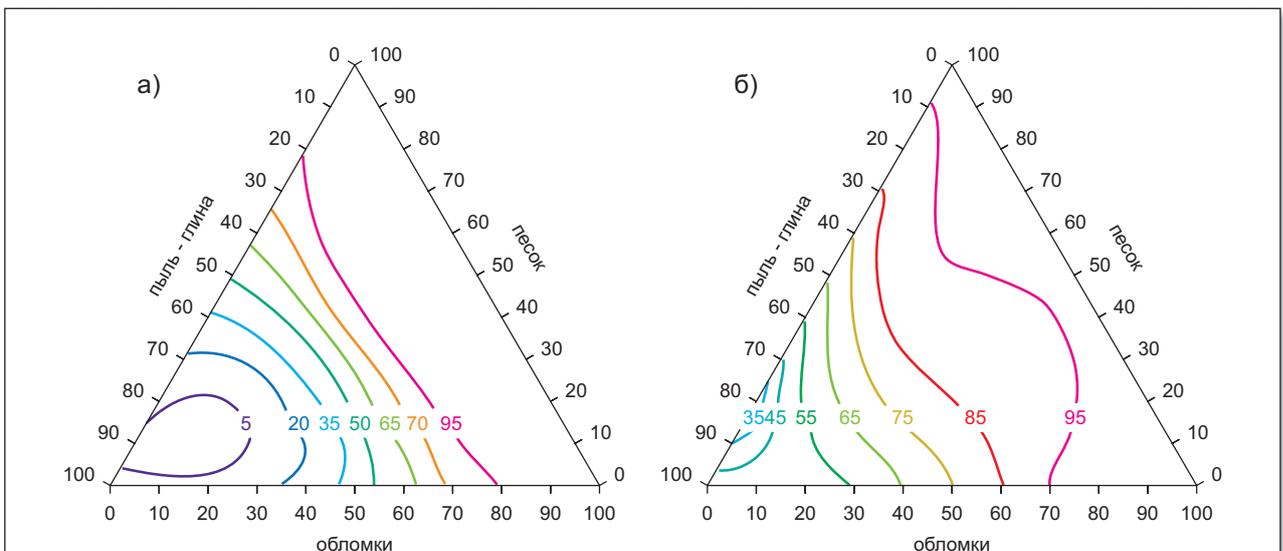


Рис. 4. Коэффициенты сдвигоустойчивости $K_{сдв}$, %, крупнообломочного грунта при различной консистенции глинистого заполнителя: а — полутвердой ($I_L = 0$); б — тугопластичной ($I_L = 0,3$) [14]

⁵ В приложении 1 к методике [14] приведен ход эксперимента, подтверждающий, что аргиллиты являются неводостойкими.



Максимальное снижение сдвигустойчивости при увлажнении происходит в обломочных аргиллитовых грунтах, не содержащих заполнителя. Сдвигустойчивость аргиллитовых грунтов повышается при содержании в них 25–30% глинистого мелкозема тугопластичной консистенции [14].

Крупнообломочные грунты, содержащие более 50% обломочных частиц, представленных аргиллитами, при увлажнении обнаруживают под действием нагрузок значительные просадочные деформации. Величина просадочной деформации в аргиллитовых грунтах, не содержащих глинистого или суглинистого материала, достигает максимального значения (220–250 мм/м) [15]. Снижение просадочности крупнообломочных грунтов, содержащих обломки аргиллита, достигается их уплотнением при повышенной влажности. Наиболее оптимальной для этой цели является влажность, при которой мелкозернистая фракция приобретает тугопластичную консистенцию [15]. Так, Э.М. Добровым и др. [8] было установлено, что просадочность грунта повышается с увеличением содержания в нем скелетного крупнообломочного материала. Причем скорость просадки также возрастает с уменьшением содержания в смеси глинистого грунта. Согласно методическим рекомендациям [15] наибольшей просадочностью характеризуются крупнообломочные грунты, содержащие от 15 до 40% глинистого мелкозема в твердой или полутвердой консистенции. Просадочность крупнообломочного грунта выражается через модуль просадки l_{np} (мм/м), который характеризует просадку (мм) метрового пласта породы под действием на него дополнительной нагрузки.

Для наиболее устойчивых к внешним нагрузкам уплотненных крупнообломочных аргиллитовых грунтов характерно наличие равномерно распределенных мелких пор. Пустоты, образующиеся в грунте вследствие недостаточного количества мелких фракций, неправильных отсыпки и режима уплотнения, при заполнении водой становятся очагами быстрого размокания грунта⁶, что может привести к неравномерным осадкам и потере устойчивости насыпи.

Все вышесказанное подтверждает, что физико-механические свойства крупнообломочных грунтов во многом определяются составом и свойствами заполнителя.

Для экспериментальных исследований состава и свойств песчано-глинистого заполнителя авторами настоящей статьи были выбраны аргиллитово-алевролитовые грунты, представляющие интерес как с точки зрения их недостаточной изученности, так и в практическом отношении. Исследовавшиеся грунты определяют устойчивость склоновых отложений вдоль трассы участка Сочи — Адлер автодороги М-27.

Характеристика состава и свойств песчано-глинистого заполнителя щебнистых грунтов Черноморского побережья Краснодарского края

Экспериментальные исследования были выполнены на щебнистых грунтах с дисперсным заполните-

лем из оползневых и делювиально-оползневых отложений Черноморского побережья Северо-Западного Кавказа (участка Сочи — Адлер). По гранулометрическому составу рассматриваемые грунты представлены обломками размером от 2 до 63 мм с преобладанием щебня и дресвы различной степени нарушенности и выветрелости — преимущественно аргиллитизированной глиной при незначительном содержании (2–3%) песчаника и алевролита с песчано-пылевато-глинистым заполнителем, составляющим 20–30% грунта по массе (табл. 4). Выбор этих трех предположительно близких по составу грунтов обусловлен стремлением показать сходимость результатов независимых лабораторных опытов по получению природной плотности заполнителя при естественной влажности на приборе стандартного уплотнения в пределах доверительного интервала плотности песчано-глинистого заполнителя, полученной путем расчета согласно приведенной ниже формуле.

Коренные породы на склонах исследуемого участка представлены отложениями сочинской и хостинской свит олигоцена — это аргиллитизированные глины с подчиненными прослоями тонко- и мелкозернистых кварцевых песчаников с глинисто-карбонатным цементом, а также с редкими прослоями алевролитов. Мощность прослоев — не более 0,6 м.

Результаты количественного анализа минерального состава валовых проб (выполненного В.В. Крупской в лаборатории рентгеноструктурного анализа кафедры инженерной и экологической геологии МГУ) показали, что все образцы идентичны, различия составляют первые проценты (табл. 5). Пороодообразующая составляющая мелкозема представлена следующими группами минералов:

- главными: кварцем (до 71,5%), альбитом (8,5–13,6%), кальцитом (10,8–11,9%);
- второстепенными: глинистыми (7–10%) — иллитом, каолинитом; группы смектита; хлоритом;
- аксессуарными: микроклином (1,1%), гипсом (1,1%).

Результаты валового ситового анализа грунтов показали следующее:

- 1) содержание крупнообломочного компонента грунтов не превышает 74–78%, содержание заполнителя варьирует от 22 до 26%;
- 2) размер обломков колеблется в диапазоне от 2 до 70 мм (рис. 5);
- 3) обломки преимущественно угловатые, редко встречаются слабоокатанные (см. табл. 4);
- 4) преобладающей по массе фракцией являются частицы размером 2–10 мм и крупнее, что хорошо прослеживается на гистограмме, представленной на рисунке 6а, на которой четко видны два пика.

Таким образом, среди крупных обломков преобладает щебенисто-дресвяный материал (см. рис. 6а). Результаты гранулометрического анализа заполнителя представлены в таблице 6.

Заполнитель представляет собой, таким образом, полидисперсный грунт, состоящий преимущественно из крупного песка и пылевато-глинистых частиц (рис. 6б).

⁶ Речь идет о размокании крупнообломочного грунта в целом, включая заполнитель, а не исключительно о крупнообломочном компоненте. К аргиллитовым грунтам, как пояснено выше, отнесены и широко распространенные образования, формирующиеся по флишевым или молассовым толщам с аргиллитоподобными глинами.

Таблица 4

Характеристика валовых проб щебнистых грунтов	
Фотография и № образца	Макроскопическое описание грунта
<p>Образец №1</p> 	<p>Грунт коричнево-серый, местами серовато-оливковый. Содержит крупные угловатые обломки размером от 2 до 60 мм с преобладанием дресвы и щебня. Местами встречаются слабоокатанные обломки величиной 50–60 мм. Обломки представлены аргиллитоподобными глинами, редко алевролитами, незначительным количеством песчаника (2–3%). Крупные обломки находятся в песчано-глинистой массе заполнителя, составляющего порядка 20–30% от объема грунта</p>
<p>Образец №2</p> 	<p>Грунт коричнево-серый, местами серовато-оливковый. Содержит крупные угловатые обломки размером от 2 до 50 мм с преобладанием дресвы и щебня. Обломки представлены глинами аргиллитоподобными, редко алевролитами, незначительным количеством песчаника (2–3%). Крупные обломки находятся в песчано-глинистой массе заполнителя, составляющего порядка 20–30% от объема грунта</p>
<p>Образец №3</p> 	<p>Грунт коричнево-серый, местами серовато-оливковый. Содержит крупные угловатые обломки размером от 2 до 60 мм с преобладанием дресвы и щебня. Обломки представлены глинами аргиллитоподобными, редко алевролитами, незначительным количеством песчаника (2–3%). Крупные обломки находятся в песчано-глинистой массе заполнителя, составляющего порядка 20–30% от объема грунта</p>

Таблица 5

Содержание минералов в исследованных образцах, %, по результатам рентгеноструктурного анализа			
Минерал	Образец		
	1	2	3
Смектит	1,8	2,0	1,7
Иллит	1,3	2,2	1,6
Каолинит	1,8	2,8	2,1
Хлорит	2,0	3,0	2,4
Кварц	71,5	68,0	67,8
Альбит	8,5	9,6	13,6
Кальцит	11,9	11,3	10,8
Микроклин	0,0	1,1	0,0
Гипс	1,1	0,0	0,0

На основании расчета квартильного коэффициента $K_{om} = d_{75}/d_{25} > 300$ диаметры частиц, меньше которых в грунте содержится 75 и 25 % указанных фракций, можно сделать вывод, что заполнитель (рис. 7) является неотсортированным.

На рисунке 6в представлена дифференциальная диаграмма численного соотношения фракций в исходном грунте в пересчете на общую массу каждого образца, отобранную для анализа. Таким образом, грунты в целом можно охарактеризовать как полидисперсные неоднородные.

Гигроскопическая влажность заполнителя в целом ниже на 0,4–0,7% таковой для крупных обломков (табл. 7), что, возможно, связано с присутствием в их ультрапорах связанной воды. Этот параметр для кварцевого песчаника составляет менее 1%, что определяется низкой гидрофильностью слагающих его минералов.

На основании данных определения верхнего и нижнего пределов пластичности мелкозема в образцах можно сделать вывод, что исследованный грунт относится к суглинкам (по ГОСТ 25100-95), что не противоречит данным гранулометрического анализа мелкозема.

Величина плотности обломков аргиллитизированной глины (порядка 2,27 г/см³) указывает на большую пористость глинистых обломков по сравнению с песчаными (плотность которых составляет порядка 2,38 г/см³) и на умеренный катагенез формирования материнских пород (по Л.Б. Рухину [18]). Характеристики физических свойств заполнителя показаны в таблице 8. По своим свойствам заполнители в ис-



Рис. 5. Сравнительные фотографии частиц крупнообломочных компонентов грунтов

следованных образцах практически идентичны, что согласуется с близостью их состава (см. табл. 8).

Так как содержание обломков песчаника и алевролитов в породе незначительно (меньше 2%), т.е. их свойства существенно не влияют на физические характеристики исследованных грунтов в целом, то в последующем при выводе расчетной формулы плотности заполнителя будет принято допущение о том, что плотность грунта в целом определяется исключительно соответствующими показателями обломков аргиллитоподобных глин и самого заполнителя.

Методика создания образцов заполнителя крупнообломочных грунтов с заданной плотностью для определения его физико-механических свойств

Из приведенного выше обзора опубликованной литературы следует, что во многих случаях поведение крупнообломочных грунтов под внешними нагрузками контролируется физико-механическими свойствами заполнителя и во всех случаях эти свойства влияют на реакцию грунта в целом. Поэтому при из-

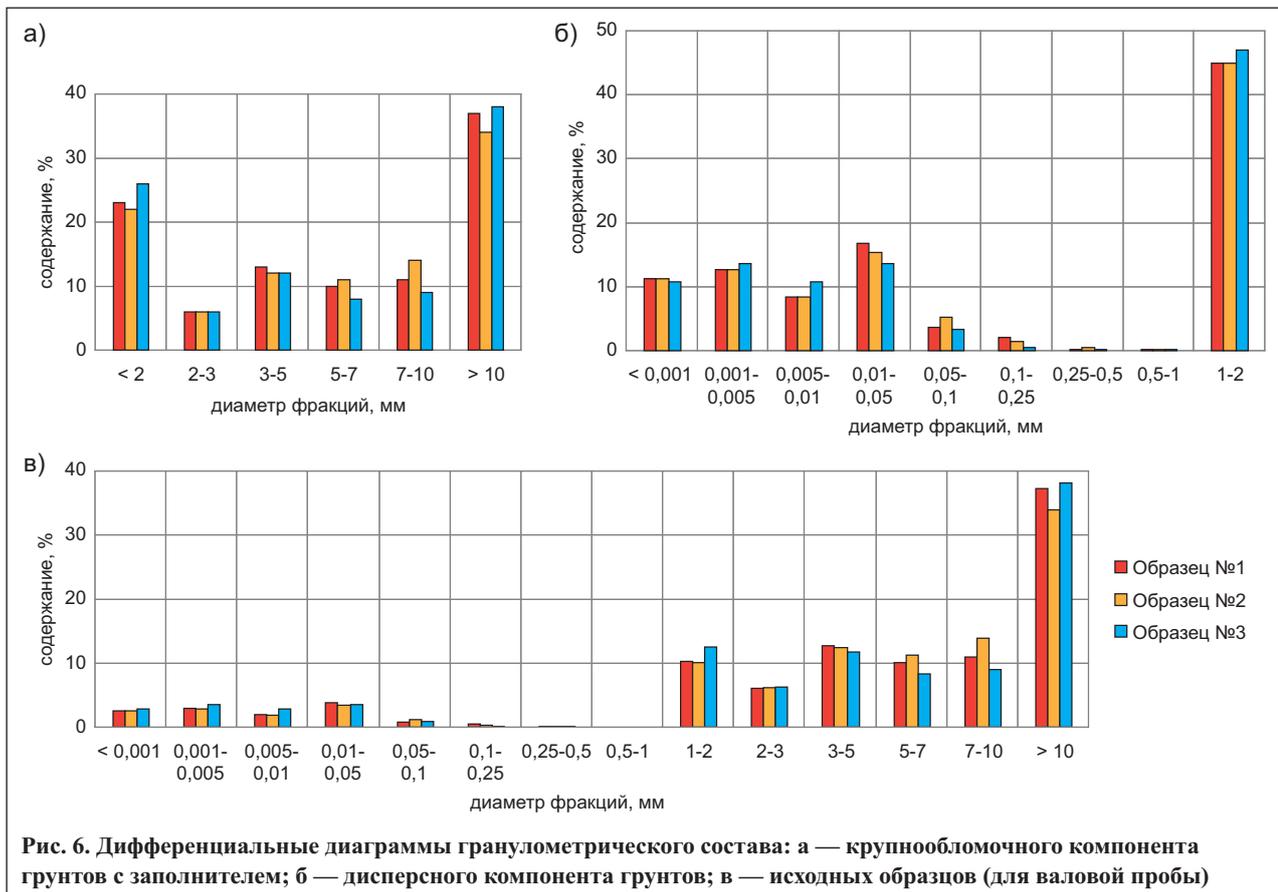


Рис. 6. Дифференциальные диаграммы гранулометрического состава: а — крупнообломочного компонента грунтов с заполнителем; б — дисперсного компонента грунтов; в — исходных образцов (для валовой пробы)

Таблица 6

Результаты гранулометрического анализа дисперсного заполнителя			
Размер частиц (фракция), мм	Содержание фракции, %, в образце №		
	1	2	3
2,0–1,0	45	45	47
1,0–0,5	0	0	0
0,50–0,25	0	1	0
0,25–0,10	2	2	1
0,10–0,05	4	5	3
0,05–0,01	17	15	14
0,010–0,005	8	8	11
0,005–0,001	13	13	14
<0,001	11	11	11

учении крупнообломочных грунтов встает задача экспериментальной оценки физико-механических характеристик отдельно дисперсного заполнителя⁷ при его плотности и влажности, соответствующих условиям естественного залегания.

Влажность заполнителя легко определяется в полевой лаборатории стандартным весовым методом, а вот его плотность в естественном сложении обычно недоступна прямому определению, но может быть получена аналитически путем решения обратной задачи по данным лабораторных анализов.

Решение для расчета плотности заполнителя (ρ_3) может быть получено на основании следующих показателей грунта и его компонентов:

- средней плотности грунта в массиве (ρ , г/см³), которая определяется в массиве одним из возможных прямых методов, например мерного куба;
- влажности заполнителя в массиве (W_3 , %), определяемой в лаборатории весовым способом;

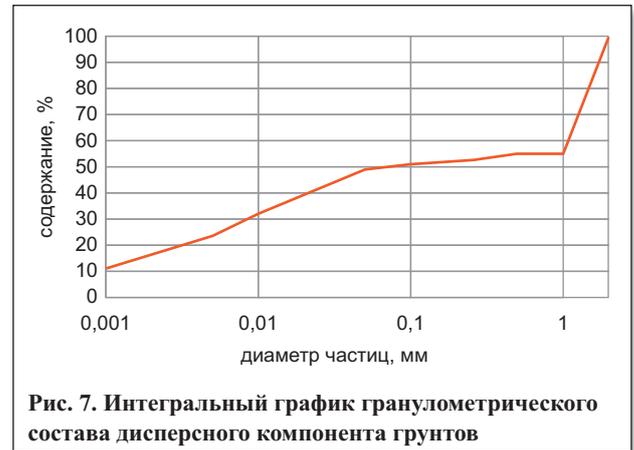


Рис. 7. Интегральный график гранулометрического состава дисперсного компонента грунтов

- влажности крупнообломочного компонента в массиве (W_o , %), устанавливаемой в лаборатории весовым способом;
- плотности обломков (ρ_o , г/см³), которая определяется в лаборатории методом гидростатического взвешивания;
- массовой доли заполнителя в сухом состоянии, определяемой из массы заполнителя (m_3 , г) и массы обломков (m_o , г) в представительной навеске грунта;
- гигроскопической влажности заполнителя (W_g^3 , %) и крупнообломочного компонента (W_g^k , %), определенных в лаборатории методом высушивания до постоянной массы.

Средняя плотность в массиве имеет следующее соотношение с плотностями его компонентов:

$$\rho = \frac{m_2}{V_2} = \frac{m_3 + m_o}{V_3 + V_o} = \frac{m_3 + m_o}{\frac{m_3 + m_o}{\rho_3} + \frac{m_o}{\rho_o}} \quad (3)$$

где m_2 — общая масса грунта; V_2 — суммарный объем грунта; V_3 — объем заполнителя; V_o — объем обломков.

Тогда:

$$\rho_3 = \frac{\rho \cdot m_3}{m_3 + m_o - m_o \cdot \frac{\rho}{\rho_o}} \quad (4)$$

Таблица 7

Гигроскопическая влажность образцов грунта и их компонентов				
Гигроскопическая влажность, %	Образец			Сред.
	1	2	3	
Грунта W_g	2,4	2,6	2,5	2,5
Заполнителя W_g^3	2,2	2,0	2,2	2,1
Крупных обломков (аргиллита) $W_g^{к-а}$	2,7	2,8	2,6	2,7
Крупных обломков (песчаника) $W_g^{к-п}$	0,8	0,8	1,0	0,9

⁷ Это необходимо для выяснения влияния свойств заполнителя на свойства грунта в целом, что не только представляет собой интересную грунтоведческую задачу, но и позволяет, в частности, прогнозировать свойства насыпного грунта.



Таблица 8

Показатели физических и физико-химических свойств компонентов грунта				
Показатель	Образец			Сред.
	1	2	3	
Нижний предел пластичности заполнителя $W_p, \%$	22	21	21	21
Верхний предел пластичности заполнителя $W_l, \%$	35	34	35	35
Число пластичности заполнителя $I_p, \%$	13	13	14	13
Плотность крупных обломков (аргиллита) $\rho_g^{k-a}, \text{г/см}^3$	2,27	2,27	2,28	2,27
Плотность крупных обломков (песчаника) $\rho_g^{k-n}, \text{г/см}^3$	2,39	2,38	2,36	2,38
Плотность твердой фазы заполнителя $\rho_s^3, \text{г/см}^3$	2,65	2,66	2,66	2,66
Плотность твердой фазы крупных обломков (аргиллита) $\rho_s^{k-a}, \text{г/см}^3$	2,68	2,68	2,69	2,67
Плотность твердой фазы крупных обломков (песчаника) $\rho_s^{k-n}, \text{г/см}^3$	2,62	2,62	2,61	2,62

Разделим числитель и знаменатель на m_o :

$$\rho_o = \frac{\rho \cdot \frac{m_s}{m_o}}{\frac{m_s}{m_o} + 1 - \frac{\rho}{\rho_o}} \quad (5)$$

Соотношение m_s / m_o при естественной влажности находим по формуле:

$$\frac{m_s}{m_o} = \frac{m_c^3 \cdot (1 + 0,01 \cdot W_s)}{m_c^o \cdot (1 + 0,01 \cdot W_o^o)},$$

но $\frac{m_g^3}{m_g^o} = \mu = \frac{m_c^3 \cdot (1 + 0,01 \cdot W_g^3)}{m_c^o \cdot (1 + 0,01 \cdot W_g^o)}$ (6)

где m^g и m^c — массы компонентов при гигроскопической влажности и в абсолютно сухом состоянии соответственно.

Следовательно:

$$\frac{m_s}{m_o} = \mu \cdot \frac{(1 + 0,01 \cdot W_g^k) \cdot (1 + 0,01 \cdot W_s)}{(1 + 0,01 \cdot W_g^3) \cdot (1 + 0,01 \cdot W_o^o)} \quad (7)$$

Выразим ρ_o через плотность обломков, полученную в лабораторных исследованиях при гигроскопической влажности:

$$\rho_o = \frac{m_o}{V_o} = \frac{m_c^o \cdot (1 + 0,01 \cdot W_o^o)}{V_o} \quad (8)$$

$$\rho_g^o = \frac{m_g^o}{V_o'} = \frac{m_c^o \cdot (1 + 0,01 \cdot W_g^k)}{V_o'} \quad (9)$$

Изменение объема крупнообломочного компонента при изменении его влажности пренебрежимо мало. Отсюда следует, что $V_o(W) = \text{const}, V_o = V_o'$. Тогда:

$$\rho_o = \rho_g^o \cdot \frac{(1 + 0,01 \cdot W_o^o)}{(1 + 0,01 \cdot W_g^k)} \quad (10)$$

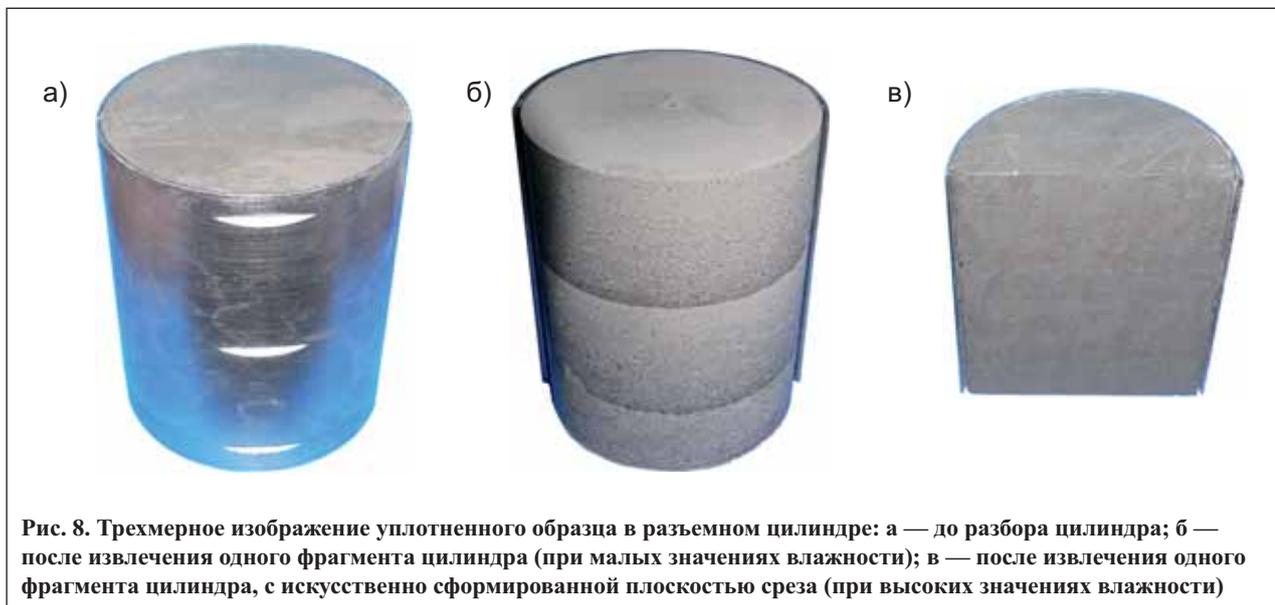


Рис. 8. Трехмерное изображение уплотненного образца в разъемном цилиндре: а — до разбора цилиндра; б — после извлечения одного фрагмента цилиндра (при малых значениях влажности); в — после извлечения одного фрагмента цилиндра, с искусственно сформированной плоскостью среза (при высоких значениях влажности)

Подставим уравнения (7) и (10) в уравнение (5), получим:

$$\rho_s = \frac{\rho \cdot \mu \cdot \frac{(1+0,01 \cdot W_g^k) \cdot (1+0,01 \cdot W_s)}{(1+0,01 \cdot W_g^s) \cdot (1+0,01 \cdot W_o)}}{\mu \cdot \frac{(1+0,01 \cdot W_g^k) \cdot (1+0,01 \cdot W_s)}{(1+0,01 \cdot W_g^s) \cdot (1+0,01 \cdot W_o)} + 1 - \frac{\rho \cdot (1+0,01 \cdot W_g^k)}{\rho_g^k \cdot (1+0,01 \cdot W_g^k)}} \quad (11)$$

Упрощая выражение (11), получаем конечную формулу для расчета плотности заполнителя в массиве:

$$\rho_s = \frac{\rho \cdot \mu}{\mu \cdot \frac{(1+0,01 \cdot W_g^s) \cdot (1+0,01 \cdot W_o)}{(1+0,01 \cdot W_g^k) \cdot (1+0,01 \cdot W_s)} - \frac{\rho \cdot (1+0,01 \cdot W_g^k)}{\rho_g^k \cdot (1+0,01 \cdot W_g^k)}} \quad (12)$$

Далее встает задача получения образцов заполнителя при влажности и плотности, соответствующих расчетным. Оптимальным вариантом авторам представляется способ ударного уплотнения, позволяющий варьировать энергию воздействия и получать объемы грунта, пригодные для последующей подготовки стандартных цилиндрических образцов для физико-механических испытаний (на компрессию, сдвиг, трехосное сжатие).

При прочих равных условиях, плотность грунта при ударном уплотнении зависит прежде всего от работы этого уплотнения. При этом плотность заполнителя в массиве, разумеется, не соответствует максимальной плотности при той же влажности, которую можно получить в соответствии с ГОСТ 22733-77. В связи с этим авторами предлагается методика получения образца заполнителя крупнообломочного грунта с заданными плотностью и влажностью путем определения оптимальной работы ударного уплотнения.

Для демонстрации возможности реализации такой схемы были проведены испытания с образцами заполнителя при влажности, соответствующей природной, на установке ударного уплотнения ГТ 1.4.1 конструкции НПП «Геотек».

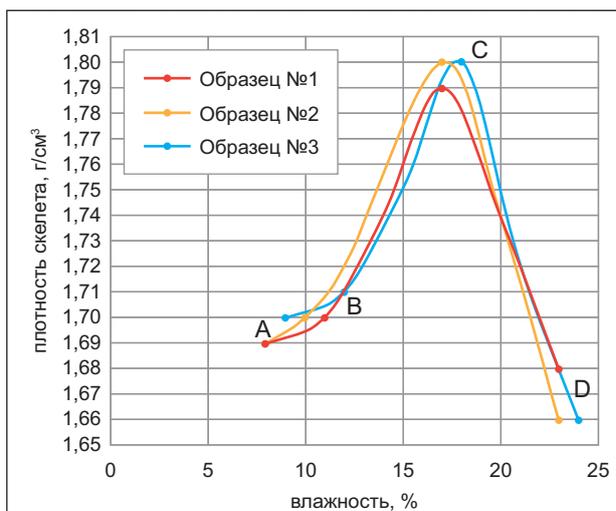


Рис. 9. Кривые стандартного⁸ уплотнения заполнителя

Навеска воздушно-сухого образца массой 0,6 кг доводилась до нужной влажности и помещалась в разъемный цилиндр (рис. 8). Начальная влажность в опытах составляла 8–9% и при каждом последующем испытании увеличивалась с шагом 2–3%. Испытания заключались в динамическом уплотнении грунта с разным количеством ударов. Величина затрачиваемой энергии при этом менялась от 7,5 до 300 Дж, что соответствует диапазону ударов от 1 до 40. Динамическая энергия уплотнения определяется совершаемой работой по перемещению снаряда от верхней точки к наковальне в поле силы тяжести. Потенциальная энергия снаряда в верхней точке определяется как $E_n = mgh$ (где h — высота падения груза, равная 0,3 м; $m = 2,5$ кг — масса груза; g — ускорение свободного падения, равное

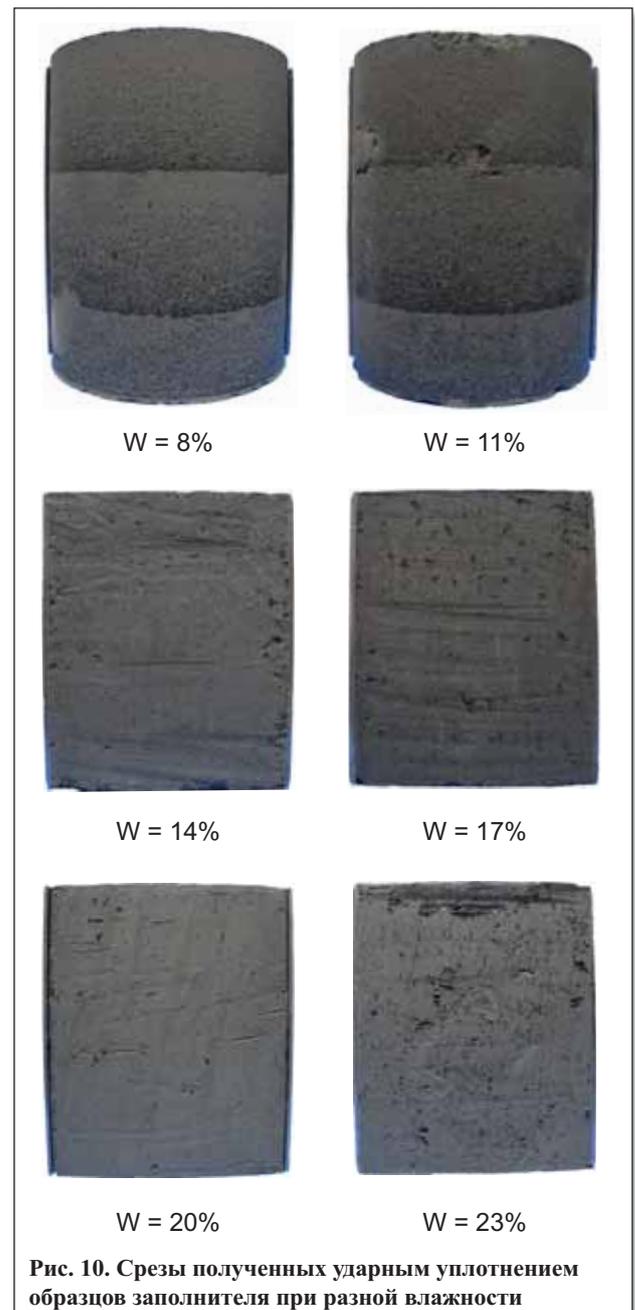


Рис. 10. Срезы полученных ударным уплотнением образцов заполнителя при разной влажности

⁸ Испытания, представленные в виде графической зависимости, выполнены в соответствии со стандартами (по ГОСТ 22733-20020) определения оптимальной влажности и максимальной плотности при числе ударов $N = 40$.



Таблица 9

Осредненные расчетные показатели* для глинистых пород (по Н.Н. Маслову [12])									
Консистенция образца грунта	Глины			Суглинки			Супеси		
	γ_w	ϕ	c	γ_w	ϕ	c	γ_w	ϕ	c
Твердая	2,15	22	0,100	2,15	25	0,060	2,05	28	0,020
Полутвердая	2,10	20	0,060	2,10	23	0,040	2,00	26	0,015
Тугопластичная	2,05	18	0,040	2,00	21	0,025	1,95	24	0,010
Мягкопластичная	1,95	14	0,020	1,90	17	0,015	1,90	20	0,005
Текучепластичная	1,90	8	0,010	1,85	13	0,010	1,85	18	0,002
Текучая	1,80	6	0,005	1,80	10	0,005	1,80	14	0,000

* γ_w — плотность грунта при влажности W , г/см³; ϕ — угол внутреннего трения, град.; c — удельное сцепление, МПа.

9,8 м/с²), причем общая работа E_o кратна результирующему количеству ударов: $E_o = E_n \cdot n$ (где n — количество ударов). Пренебрегая потерями энергии на трение боковой поверхности снаряда о штангу и нагреванием грунта и рабочей части прибора при ударе, из закона сохранения энергии получаем, что динамическая работа уплотнения равна $E_o = mghn$.

После завершения трамбования определялась плотность грунта, а по полученным данным строились и анализировались ее зависимости от количества ударов при разной влажности.

Полученные данные показали (рис. 9), что максимальная плотность скелета исследовавшегося заполнителя составляет 1,79–1,80 г/см³ при оптимальной влажности уплотнения 17–18%. При уплотнении образцов в диапазоне влажности 8–12% изменение плотности скелета грунта незначительно (участок АВ), т.к. после превышения максимальной гигроскопической влажности, которая для исследовавшихся образцов близка к 8%, на влагу переходного типа приходится не более 3–4%, что затрудняет перераспределение частиц под действием ударной нагрузки. При дальнейшем увеличении влажности вплоть до оптимальной происходит быстрое увеличение плотности скелета по следующим причинам (участок ВС).

- Формируются все новые порции осмотической⁹ влаги, которые снижают трение в системе, вследствие чего перераспределение частиц под действием ударной нагрузки происходит более эффективно. При переходе к более плотной упаковке структурных элементов отжимается воздух из порового пространства и система стремится перейти из трехфазной в двухфазную. В результате формирующийся грунт становится более однородным и содержит все меньше крупных пустот, что видно по изменению текстурных особенностей уплотненных образцов при различных значениях влажности (рис. 10).
- Максимальная плотность будет соответствовать состоянию, при котором объем порового пространства, занятый воздухом, будет минимален при минимально возможной влажности. Согласно выводам В.А. Приклонского, оптимальная влажность уплотнения очень близка к нижнему пределу пластичности и ниже последнего на 2–3% [11].

Дальнейшее увеличение влажности приводит к уменьшению плотности скелета грунта, т.к. в условиях опыта на уплотнение с применением динамической нагрузки отжатие влаги из глинистого грунта затрудняется его низкой водопроницаемостью (участок CD).

Для достижения рассчитанной плотности скелета заполнителя при его природной влажности 19% была проанализирована зависимость первой от числа ударов в условиях стандартного уплотнения (рис. 10). Оптимальное количество ударов для получения искомой плотности скелета грунта при заданной влажности $W = 19\%$ составило 7.

Определение прочностных характеристик заполнителя на полученных по описанной методике образцах проводились затем методом одноплоскостного среза в соответствии с ГОСТ 12248-96 по консолидировано-дренированной схеме из расчета 100 мин. на одно испытание (получение одной точки), с постоянной скоростью среза (0,05 мм/мин.). Для каждого образца проводилось 4 испытания по схеме приложения нормальной нагрузки 0,1–0,3 МПа и 0,2–0,4 МПа. В результате при влажности заполнителя 19% его прочностные характеристики в среднем составили: угол внутреннего трения $\phi = 21^\circ$; удельное сцепление $c = 0,050$ МПа, что согласуется с расчетными данными для рассматриваемого вида грунта по Н.Н. Маслову [12] (табл. 9).

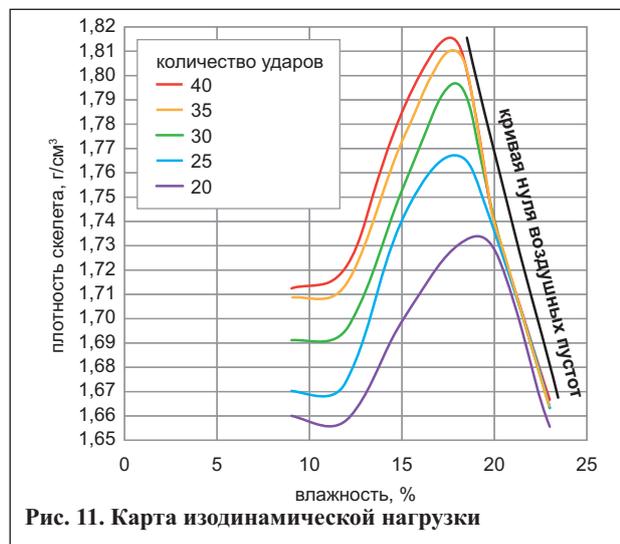


Рис. 11. Карта изодинамической нагрузки

⁹ Известно, что при влажности глинистых грунтов меньше нижнего предела пластичности и, следовательно, ниже влажности оптимального уплотнения преобладающим типом влаги в грунте является осмотическая вода (стр. 152 [23]).

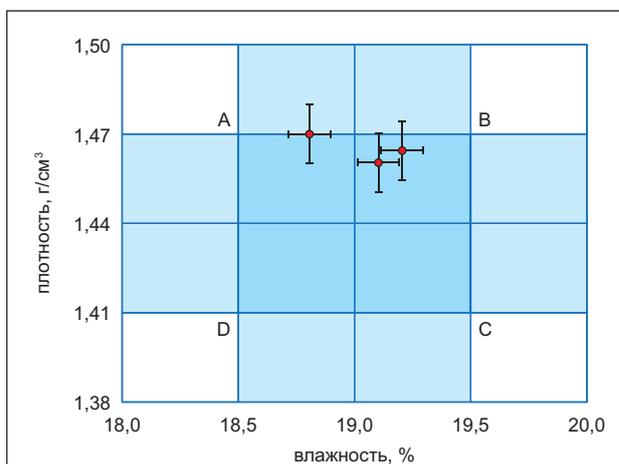


Рис. 12. Сопоставление экспериментальных значений плотности заполнителя при естественной влажности с доверительными интервалами рассчитанной плотности заполнителя при естественной влажности

Сопоставляя результаты уплотнения для одинакового количества ударов, можно получить графическое представление численных соотношений в виде карты¹⁰ изодинамического нагружения (рис. 11). Общий вид кривых соответствует графикам, полученным в результате стандартного уплотнения трех образцов. По диаграммам видно, что при увеличении нагрузки кривые сгущаются, т.е. плотность скелета грунта подчиняется критерию сходимости (при нагрузке выше критической изменение плотности грунта не будет иметь места). Применение более интенсивного уплотнения уменьшает оптимальную влажность с одновременным увеличением соответствующей ей максимальной плотности скелета уплотненного грунта.

Кроме экспериментальных кривых на рисунке 11 представлена теоретическая «кривая нуля» воздушных пустот, которая показывает, какую максимальную плотность скелета при данной влажности может приобрести грунт, если его поры будут полностью заполнены водой. Однако при любом уплотнении образцов в них остается некоторый объем заземленного воздуха. Графически это количество отображено отрезком, параллельным оси абсцисс, заключенным между экспериментальной и теоретической кривыми.

Указанная теоретическая кривая была получена с использованием следующей формулы¹¹ [11]:

$$W = (\rho_s - \rho_d) / \rho_s \rho_d, \quad (13)$$

где W — влажность грунта, %; ρ_s — плотность твердых частиц грунта; ρ_d — плотность скелета грунта.

Описанная методика получения требуемой плотности скелета заполнителя крупнообломочных грунтов при данной влажности позволила определить оптимальную работу ударного уплотнения заполнителя для приготовления его образцов с заданными значениями плотности и влажности. Для плотностных и влажностных показателей свойств заполнителя, полученных по этой методике, были рассчитаны ошибки косвенных измерений в соответствии с классической теорией ошибок [27]. По полученным ошибкам были построены доверительные интервалы данных показателей (рис. 12). Полученные значения плотности и влажности лежат в пределах пересечения доверительных интервалов. Таким образом, данные лабораторных исследований не выходят за рамки пределов погрешности экспериментальных определений и могут рассматриваться как истинные значения.

Выводы

1. Исследованные склоновые отложения Черноморского побережья Краснодарского края представлены крупнообломочными щебнисто-древянными грунтами с неоднородным песчано-глинистым заполнителем. Содержание в них крупнообломочного компонента не превышает 74–78%, содержание заполнителя колеблется от 22 до 26%.

2. Физические, физико-химические и физико-механические свойства заполнителя характеризуются следующими показателями: плотность твердых частиц — 2,65–2,66 г/см³; нижний предел пластичности — 21–22%; верхний предел пластичности — 34–35%; максимальная плотность скелета в результате стандартного уплотнения — 1,79–1,80 г/см³; оптимальная влажность уплотнения — 17–18%; угол внутреннего трения — 21°, сцепление — 0,048–0,053 МПа при естественной плотности и влажности. Расчетная плотность скелета заполнителя в естественных условиях составила (с учетом ошибки для косвенных измерений) $1,44 \pm 0,03$ г/см³.

3. Разработанная методика¹² получения требуемой плотности скелета заполнителя крупнообломочных грунтов при данной влажности позволила определить работу ударного уплотнения заполнителя для приготовления его образцов с заданными значениями плотности и влажности, а его характеристики, установленные таким образом, не выходят за рамки пределов погрешности экспериментальных лабораторных определений. Следовательно, предложенная методика может использоваться для оценки физико-механических свойств дисперсного заполнителя крупнообломочных грунтов при решении научных и практических инженерных задач.

¹⁰ Использование термина «карта» обусловлено изображением трехмерной зависимости на плоскости по аналогии с представлением информации в картографии.

¹¹ Эта методика описана Н.В. Коломенским и взята из его работы [11], кривая получена согласно формуле (12) путем подставления в нее значений плотности скелета и плотности твердых частиц — в итоге получается серия точек, по которым строится кривая «влажность — плотность».

¹² В отношении ее отличий от уже имеющейся методики ударного уплотнения можно сказать следующее. Ближайшим аналогом стандартного уплотнения является модернизированный метод Проктора, который широко применяют во многих странах для определения максимальной плотности грунта. Однако авторами она была принята в другом ключе, а именно использовалась в целях получения природной плотности заполнителя при естественной влажности на приборе стандартного уплотнения в пределах доверительного интервала плотности песчано-глинистого заполнителя, полученной расчетом согласно выведенной формуле (11).



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Балыков Б.И., Ефремов А.В., Никитин Н.И., Сазонов А.В.* Исследования крупнообломочных грунтов и грунтовых материалов, используемых при строительстве плотины Сангтудинской ГЭС-1 // Гидротехническое строительство. 2008. № 5. С. 75–80.
2. *Балыков Б.И.* Способ оценки представительности проб крупнообломочного грунта при инженерно-геологических изысканиях и геотехконтроле качества уплотнения // Инженерная геология. 2007. № 2. С. 21–25.
3. *Борткевич С.В.* Роль технологических исследований в научном обосновании плотин из грунтовых материалов // Гидротехническое строительство. 2009. № 8. С. 31–35.
4. ГОСТ 12248-96. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: МНТКС, 1997.
5. ГОСТ 22733-77. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. М.: Госстрой СССР, 1977.
6. ГОСТ 25100-95. Грунты. Классификация. М.: МНТКС, 1995.
7. *Добров Э.М. и др.* Крупнообломочные грунты в дорожном строительстве. М.: Транспорт. 1981. 180 с.
8. *Добров Э.М.* Влияние состава крупнообломочных грунтов на их физико-механические свойства // Труды СОЮЗДОРНИИ. 1972. Вып. 80. С. 107–128.
9. Инженерная геология России. Том 1. Грунты России: монография / под ред. В.Т. Трофимова, Е.А. Вознесенского, В.А. Королева. М.: КДУ, 2011. 672 с.
10. *Кальбергенов Р.Г.* Методика определения физико-механических свойств крупнообломочных грунтов: автореф. дис... канд. геол.-мин. наук. М.: Изд-во ПНИИС, 1987. 25 с.
11. *Коломенский Н.В.* Инженерная геология Ч. I. М.: Гос. изд-во геологической литературы, 1951. 283 с.
12. *Маслов Н.Н.* Условия устойчивости склонов и откосов в гидроэнергетическом строительстве. М.: Госэнергоиздат. 1956. С. 99.
13. *Массух М.* Исследования закономерностей деформирования крупнообломочных грунтов при циклических нагрузках для целей автодорожного строительства: автореф. дис... канд. геол.-минер. наук. М.: МГУ им. Ломоносова. 1986. 198 с.
14. Методика оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и пылеватых и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями. М.: Стройиздат, ДальНИИС Госстроя СССР. 1989. 24 с.
15. Методические рекомендации по сооружению насыпей земляного полотна автомобильных дорог из крупнообломочных грунтов. М.: Изд-во СОЮЗДОРНИИ, 1977. 33 с.
16. *Петров Г.Н., Радченко В.Г.* О стандартизации крупнообломочных грунтов // Гидротехническое строительство. 2009. № 2. С. 4–12.
17. *Петров Г.Н., Радченко В.Г., Дубняк В.А.* Крупнообломочные грунты в гидротехническом строительстве. СПб.: АО ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1994. 236 с.
18. *Рухин Л.Б.* Основы литологии. Л.: Гостоптехиздат, 1969. 780 с.
19. *Сергеев Е.М., Приклонский В.А., Панюков П.Н., Белый Л.Д.* Общая инженерно-геологическая классификация горных пород и почв // Труды совещания по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения. Т. II. М.: Изд-во АН СССР, 1957. С. 18–44.
20. *Соколов В.С.* Методика и результаты исследований инженерно-геологических свойств галечниковых пород при повышенных требованиях к основанию: автореф. дисс... канд. геол.-мин. наук. М.: Изд-во МГРИ им. С. Орджоникидзе, 1975. 19 с.
21. СП 22.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*). Основания зданий и сооружений. М.: Минрегион России, 2011. 161 с.
22. СП 35.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*). Мосты и трубы. М.: Минрегион России, 2010. 346 с.
23. *Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров Р.С.* Грунтоведение // под ред. В.Т. Трофимова. М.: МГУ, Наука, 2005. 1024 с.
24. *Ухов С.Б., Конвиз А.В., Семенов В.В.* Механические свойства крупнообломочных грунтов с заполнителем // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1993. № 1. С. 2–7.
25. *Федоров В.И.* Прогноз прочности и сжимаемости оснований из обломочно-глинистых грунтов. М.: Стройиздат, 1988. 136 с.
26. *Шеко А.И.* Методика изучения и прогноза экзогенных геологических процессов. М.: Недра, 1988. 215 с.
27. *Taylor J.R.* Introduction to error analysis. Herndon, VA, USA: University Science Books, 1997. 327 с.