

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»

А.С. Александров, Н.П. Александрова, Г.В. Долгих

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ. Земляное полотно

Учебное пособие

Омск 2017

УДК 625.731.1
ББК 3.38
А46

Согласно 436-ФЗ от 29.12.2010 «О защите детей от информации, причиняющей вред их здоровью и развитию» данная продукция маркировке не подлежит.

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. В.В. Сиротюк (СибАДИ);
О.В. Вагин (Казенное учреждение Омской области «Управление дорожного хозяйства Омской области»)

Работа утверждена редакционно-издательским советом СибАДИ в качестве учебного пособия.

Александров, Анатолий Сергеевич.

А46 Контроль качества строительства автомобильных дорог. Земляное полотно [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.С. Александров, Н.П. Александрова, Г.В. Долгих. – Электрон. дан. – Омск : СибАДИ, 2017. – URL: http://bek.sibadi.org/cgi-bin/irbis64r_plus/cgiirbis_64_ft.exe. – Режим доступа: для авторизованных пользователей. ISBN 978-5-00113-044-4

Рассмотрены вопросы классификации грунтов, применяемые в России, Евросоюзе и США, и приведен их сопоставительный анализ для гармонизации требований стандартов разных стран. Приведены методики испытания грунтов по стандартам России и США, которые применяются для определения влажностей на границах раскатывания и текучести, зернового состава грунтов, плотности и влажности грунта. Рассмотрены методики, выполняемые в лаборатории и в полевых условиях с использованием оборудования экспресс-оценки качества уплотнения. Приведены сведения по статистической обработке данных экспериментов.

Имеет интерактивное оглавление в виде закладок.

Предназначено для обучающихся всех форм направления «Строительство» дорожно-строительных профилей бакалавриата и магистерских программ дорожной отрасли магистратуры, а также для специальности «Строительство уникальных зданий и сооружений» дорожной специализации.

Подготовлено на кафедре «Строительство и эксплуатация дорог».

Текстовое (символьное) издание (12 МБ).

Системные требования: Intel, 3,4 GHz; 150 Мб; Windows XP/Vista/7;
DVD-ROM; 1 Гб свободного места на жестком диске; программа для чтения pdf-файлов: Adobe Acrobat Reader Foxit Reader

Редактор Н.И. Косенкова

Техническая подготовка Н.В. Кенжалинова

Издание первое. Дата подписания к использованию 23.10.17

Издательско-полиграфический комплекс СибАДИ. 644080, г. Омск, пр. Мира, 5
РИО ИПК СибАДИ. 644080, г. Омск, ул. 2-я Поселковая, 1

© ФГБОУ ВО «СибАДИ», 2017

Введение

Грунты земляного полотна имеют наименьшие показатели прочности и деформируемости по сравнению с материалами дорожной одежды. Поэтому, несмотря на то, что земляное полотно воспринимает сравнительно небольшие давление, его грунты вносят существенный вклад в пластические деформации, накапливаемые дорожными конструкциями. Специалисты дорожной отрасли единодушны во мнении о том, что пластические деформации грунтов могут составлять 50 – 70% от глубины неровностей, формирующихся на поверхности покрытий нежестких дорожных одежд.

В свою очередь ровность покрытий обуславливает важнейшие потребительские свойства автомобильных дорог. С ухудшением ровности снижается скорость движения, а в определенном диапазоне сравнительно малых скоростей существенно возрастает расход топлива и объем вредных выбросов в атмосферу и оседающих на придорожной полосе. Таким образом, ухудшение ровности покрытия негативно влияет на экологическую безопасность. В период дождя в неровностях, например колее, скапливается вода. Это приводит к тому, что для движения с высокой скоростью водитель выбирает траекторию, при которой колеса размещаются в межколеинном пространстве. В момент разезда со встречным автомобилем водитель на высокой скорости вынужден возвращать колеса в колею, наполненную водой. Величина коэффициента сцепления шины с покрытием зависит от свойств, скорости движения, глубины потока в колею, стекающего вниз по уклону, параметров шероховатости покрытия. При неблагоприятном количественном сочетании этих факторов возникает эффект динамического аквапланирования, который практически всегда заканчивается дорожно-транспортным происшествием (ДТП). Следовательно, ухудшение ровности приводит к снижению безопасности движения. Таким образом, земляное полотно является важным элементом дорожной конструкции, а от качества его строительства зависит динамическая картина изменения показателей потребительских свойств и транспортно-эксплуатационных показателей автомобильной дороги в период ее эксплуатации. В пособии нами рассматриваются правила проведения строительного контроля, включающего в себя: отбор проб, их испытание в лаборатории, полевые испытания грунтов и измерения геометрических параметров земляного полотна. Приводятся дополнительные сведения о статистической обработке.

1. ГРУНТЫ: ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Грунты являются одним из самых распространенных строительных материалов и изучаются давно. Страны с развитой и развивающейся строительной индустрией имеют свои стандарты, регламентирующие классификацию грунтов по таксономическим единицам¹. В РФ таким стандартом является ГОСТ 25100 в актуальной редакции от 2011 г.[1], которая содержит гармонизацию требований со стандартами США [2, 3] и стран Евросоюза [4, 5]. В табл. 1.1 приведены таксоны и группы их признаков, применяемые для классификации грунтов в РФ [1, п. 4.1].

Таблица 1.1. Таксономические единицы грунтов и группы признаков

Иерархия	Таксон	Группы признаков
1	Класс (подкласс)	По природе структурных связей
2	Тип (подтип)	По генезису
3	Вид (подвид)	По вещественному, петрографическому или литологическому составу
4	Разновидность	По количественным показателям состава, строения, состояния и свойств

1.1. Классификация грунтов, термины и определения

Грунты подразделяют на три класса: скальные, дисперсные и мерзлые [1, п. 5.1], каждый из которых включает в себя как природные, так и техногенные грунты [1, табл. 1 – 3].

Класс скальных грунтов объединяет грунты с жёсткими структурными связями кристаллизационного и (или) цементационного типа [1, п. 3.38].

Класс дисперсных грунтов включает в себя грунты, состоящие из твердых частиц, между которыми есть структурные связи (физические, физико-химические или механические) [1, п. 3.9].

Класс мерзлых грунтов формируют грунты с нулевой или отрицательной температурой по шкале Цельсия, состав которых содержит ледяные включения и (или) лед-цемент, а их структура характеризуется криогенными связями [1, п. 3.19].

¹ Таксономическая единица, или, как еще говорят, таксон (происходит от латинского *taxon* и древнегреческого *τάξις* – порядок, устройство, организация) представляет собой группу в классификации, которая состоит из дискретных объектов, объединяемых на основании общих свойств и признаков. Классификации, построенные на таксонах, обычно носят иерархический характер.

1.1.1. Скальные грунты

Общепринятая классификация скальных грунтов в качестве таксономических единиц включает: типы и подтипы, виды, подвиды и разновидности, которые разделены в соответствии с группами признаков, указанными в табл. 1.1.

Типы и подтипы скальных грунтов приведены в табл. 1.2, а их определения даны по стандарту [1] или энциклопедии [6].

Таблица 1.2. Деление скальных грунтов на типы и подтипы

Типы	Подтипы	Определение
1	2	3
Магматические	Интрузивные	Горные породы, образовавшиеся в результате кристаллизации магмы в глубинах земной коры ²
	Эффузивные	Горные породы, образовавшиеся в результате кристаллизации магмы, излившейся на поверхность земли или в приповерхностных условиях ³
Метаморфические	Не подразделяются	Горные породы, образованные в результате изменений (метаморфизма) магматических и осадочных пород, вследствие изменения физико-химических условий, к которым относят движение земной коры и связанное с ним воздействие высоких температур и больших давлений, также газовых и водных растворов ⁴
Осадочные	Не подразделяются	Горные породы, образованные в результате осаждения продукта на поверхности суши, в морских и океанических бассейнах при воздействии водной среды, воздуха и ледников. Осаждение может происходить механическим путём (под влиянием силы тяжести и изменения динамики среды), химическим (из водных растворов при достижении ими концентраций насыщения и в результате обменных реакций), а также биогенным (под влиянием жизнедеятельности организмов) ⁵

² Интрузивные горные породы [Электронный ресурс] // Горная энциклопедия. — URL: <http://www.mining-enc.ru/i/intruzivnye-gornye-porody/> (дата обращения к ресурсу: 01.07.2015).

³ Эффузивные горные породы [Электронный ресурс] // Горная энциклопедия. — URL: <http://www.mining-enc.ru/e1/effuzivnye-gornye-porody/> (дата обращения к ресурсу: 01.07.2015).

⁴ Метаморфические горные породы [Электронный ресурс] // Горная энциклопедия. — URL: <http://www.mining-enc.ru/m/metamorficheskie-gornye-porody/> (дата обращения к ресурсу: 01.07.2015).

⁵ Осадочные горные породы [Электронный ресурс] // Горная энциклопедия. — URL: <http://www.mining-enc.ru/o/osadochnye-gornye-porody/> (дата обращения к ресурсу: 01.07.2015).

Окончание табл. 1.2

1	2	3
Вулканогенно-осадочные	Не подразделяются	Горные породы, образованные из вулканического или осадочного материала, основным компонентом является пирокластический материал эксплозивных извержений при дроблении жидкой лавы и слагающих вулкан горных пород взрывами ⁶
Элювиальные	Не подразделяются	Горные породы, часто называемые элювием, образующиеся в результате выветривания и постепенно накапливающиеся на месте своего образования, как правило, на горизонтальных плоскостях или на склонах со слабо протекающей денудацией ⁷
Техногенные	Не подразделяются	Грунт, измененный, перемещенный или образованный в результате инженерно-хозяйственной деятельности человека [1, п. 3.44]

Примечания: 1. Кристаллизация – процесс фазового перехода вещества из жидкого состояния в твёрдое кристаллическое с образованием кристаллов. 2. Магма (от древнегреческого μάγμα — месиво, густая мазь) – расплавленная огненно-жидкая масса, преимущественно силикатного состава, возникающая в земной коре или верхней части мантии, расположенной непосредственно под корой. 3. Пирокластический материал – обобщающее название обломочных отложений, образующихся при извержении вулканов, введено в геологическую терминологию в 1915 г. Льюисом Валентином Пирсоном (1860 – 1919). 4. Эксплозивное или взрывное извержение вулканов (от латинского explosio – «взрыв») – один из трех типов извержений, происходящее в результате быстрого выделения газов, которое приводит к вскипанию магматического расплава и его разрыву расширяющимися газовыми пузырьками. 5. Денудация (от лат. denudatio – обнажение) – совокупность процессов сноса и переноса (водой, ветром, льдом) продуктов разрушения горных пород в пониженные участки земной поверхности, где происходит их накопление.

Типы и подтипы скальных грунтов объединяют соответствующие виды, подвиды и разновидности по признакам, представленным в табл. 1.1.

Таблица 1.3. Деление скальных грунтов на виды и подвиды и разновидности

Виды		Подвиды	Разновидность
1		2	3
Магматические интрузивные			
Силикатные	Ультраосновные	Перидотиты, дуниты, пироксениты и др.	Выделяется в соответствии с регламентацией [1, табл. Б.1 – Б7; табл. В.1 – В3]
	Основные	Габбро, нориты, анортозиты, диабазы, долериты и др.	
	Средние	Диориты, сиениты и др.	
	Кислые	Граниты, гранодиориты и др.	

⁶ Вулканогенно-осадочные породы [Электронный ресурс] // Горная энциклопедия. — URL: <http://www.mining-enc.ru/v/vulkanogenno-osadochnye-porody> (дата обращения к ресурсу: 01.07.2015).

⁷ Элювий [Электронный ресурс] // Горная энциклопедия. — URL: <http://www.mining-enc.ru/e1/elyuvij/> (дата обращения к ресурсу: 01.07.2015).

Окончание табл. 1.3

1		2	3
Магматические эффузивные			
Силикат- ные	Ультраос- новные	Пикриты, коматииты и др.	То же
	Основные	Базальты, долериты, порфириты и др.	
	Средние	Андезиты, трахиты и др.	
	Кислые	Риолиты, дациты и др.	
Метаморфические			
Силикатные		Гнейсы, сланцы, кварциты, роговики, скар- ны, грейзены, березиты, пропилиты, втори- чные кварциты, гидротермально измененные грунты и др.	То же
Карбонатные		Мраморы и др.	
Железистые		Железные руды, джеспилиты и др.	
Органо- минеральные		Горючие сланцы, антрациты и др.	
Осадочные			
Силикатные		Песчаники, конгломераты, аргиллиты, алев- ролиты, сцементированные глины и др.	То же
Карбонатные		Известняки, доломиты, мел, мергели и др.	
Кремнистые		Опоки, диатомиты и др.	
Сульфатные		Гипсы, ангидриты и др.	
Галоидные		Галиты и др.	
Органо- минеральные		Бурые угли, битуминозные известняки и др.	
Вулканогенно-осадочные			
Силикатные		Туфопесчаники, туфоалевролиты, туфоар- гиллиты, туффиты, вулканические туфы, кластолавы, лавовые брекчии и др.	То же
Хемогенно- силикатные		Туфопесчаники, туфоалевролиты, туфоар- гиллиты, туффиты, вулканические туфы, кластолавы, лавовые брекчии и др.	
Элювиальные			
Минеральные		Скальные грунты трещинных зон коры вы- ветривания	То же
Все виды техногенно измененных природ- ных и антропогенно образованных скаль- ных грунтов и преоб- разованных дисперс- ных грунтов с приоб- ретенными цемента- ционными связями		Все подвиды техногенно измененных при- родных и антропогенно образованных скаль- ных грунтов и преобразованных дисперсных грунтов с приобретенными цементационны- ми связями	То же

Классификацию скальных грунтов можно несколько расширить, приведя наименование горных пород, образующих подвиды, представленные в табл. 1.3 и регламентируемые стандартом [1, табл. 1]. Характерные для подвидов скальных грунтов горные породы приведены в соответствующих разделах энциклопедии [6]. Некоторые используемые в дорожном строительстве горные породы показаны на рис. 1.1.

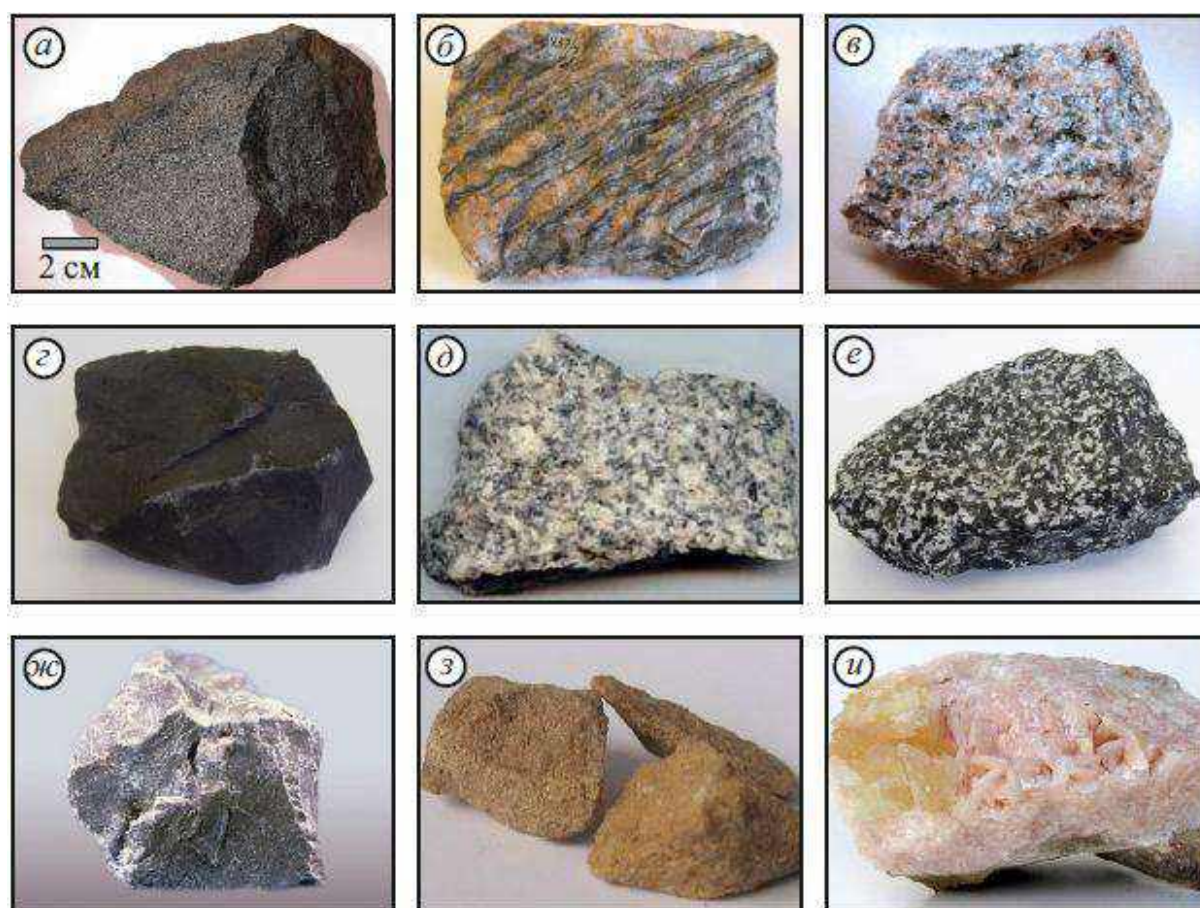


Рис. 1.1. Общий вид некоторых горных пород, применяемых для нужд дорожного строительства:

a – габбро; *б* – гнейс; *в* – гранит; *г* – базальт; *д* – гранодиорит; *е* – диорит;
ж – известняк; *з* – песчаник; *и* – доломит

Дроблением горных пород с последующим рассевом готовят щебень, область применения которого зависит от вида и подвида грунта. Вид грунта, из которого приготовлен щебень, обуславливает технологические правила обращения с ним. Например, щебень из кислых пород имеет плохое сцепление с битумом, вследствие чего при их обработке органическими вяжущими требуют применения поверхностно-

активных веществ. Количественные показатели, по которым выделяются разновидности скальных грунтов, приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4. Разновидности скальных грунтов по характеристикам физических свойств

Показатель	Разновидности		Величина
Предел прочности на одноосное сжатие R_c , МПа	Скальные	очень прочные	$R_c \geq 120$
		прочные	$120 > R_c \geq 50$
		средней прочности	$50 > R_c \geq 15$
		малопрочные	$15 > R_c \geq 5$
	Полускальные	пониженной прочности	$5 > R_c \geq 3$
		низкой прочности	$3 > R_c \geq 1$
		очень низкой прочности	$R_c < 1$
Плотность сухого (скелета) грунта ρ_d , г/см ³	Очень плотный		$\rho_d \geq 2,5$
	Плотный		$2,5 > \rho_d \geq 2,1$
	Средней плотности		$2,1 > \rho_d \geq 1,2$
	Низкой плотности		$\rho_d < 1$
Пористость n , %	Непористый		$n \leq 3$
	Слабопористый		$3 < n \leq 10$
	Среднепористый		$10 < n \leq 30$
	Сильнопористый		$n > 30$
Коэффициент выветренности K_{wr} , д.е.	Слабовыветрелый		$0,9 \leq K_{wr} < 1$
	Средневыветрелый		$0,8 \leq K_{wr} < 0,9$
	Сильновыветрелый		$K_{wr} < 0,8$
Коэффициент размягчаемости в воде K_{sof} , д.е.	Неразмягчаемый		$K_{sof} \geq 0,75$
	Размягчаемый		$K_{sof} < 0,75$
Степень растворимости в воде q_{sr} , г/л	Нерастворимый		$q_{sr} \geq 0,01$
	Труднорастворимый		$0,01 < q_{sr} \geq 1$
	Среднерастворимый		$1 < q_{sr} \geq 10$
	Легкорастворимый		$10 < q_{sr} \geq 100$
	Сильно растворимый		$q_{sr} > 100$
Коэффициент фильтрации (водопроницаемость) K_ϕ , м/сут	Водонепроницаемый		$K_\phi \leq 0,005$
	Слабоводопроницаемый		$0,005 < K_\phi \leq 0,3$
	Водопроницаемый		$0,3 < K_\phi \leq 3$
	Сильноводопроницаемый		$3 < K_\phi \leq 30$
	Очень сильноводопроницаемый		$K_\phi > 30$

Скальные грунты подразделяются на разновидности по минералогическому составу, количественные показатели этих признаков приведены в стандарте [1, табл. В.1 – В.3].

1.1.2. Дисперсные грунты

Дисперсные грунты получили широкое применение при сооружении земляного полотна автомобильных дорог. Поэтому специалисты дорожной отрасли в общепринятое определение дисперсных грунтов по [1] вводят некоторые уточнения. Так В.В. Сиротюк предлагает следующее определение [7]:

– дисперсные грунты состоят из отдельных минеральных частиц (зерен) разного размера, слабосвязанных друг с другом водно-коллоидными и механическими связями [7, с. 5].

Это определение наилучшим образом соответствует представлением о структуре грунта, в соответствии с которой дисперсные грунты состоят из минеральных частиц, между которыми имеются поры, заполненные воздухом и водой. Поэтому грунты называют трехфазной дисперсной системой (рис. 1.2, а), которую для наглядности и вывода формул для определения показателей физических свойств представляют упрощенной, но эквивалентной системой (рис. 1.2, б).

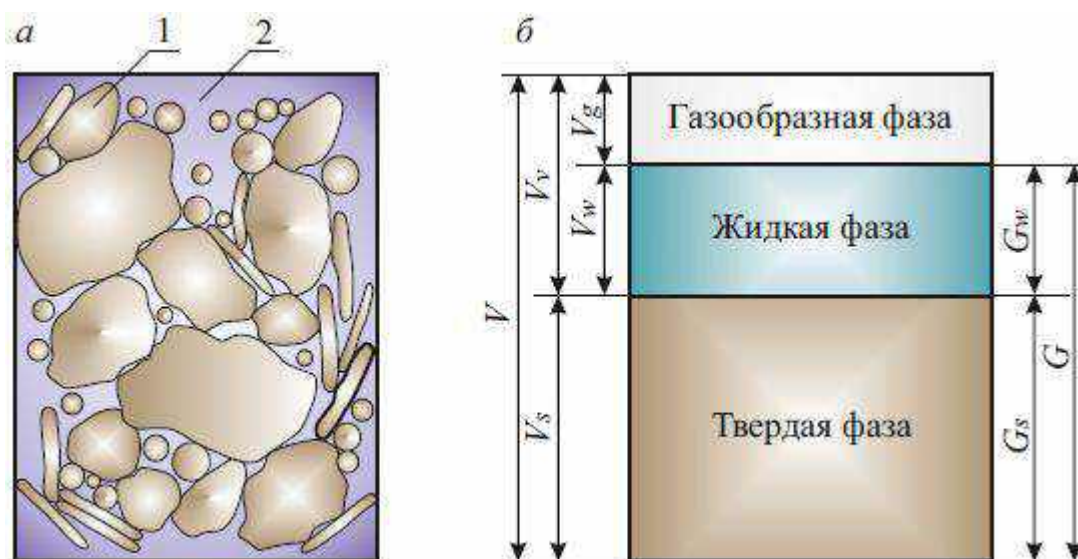


Рис. 1.2. Общепринятые представления о строении дисперсного грунта:

а – модель, отображающая реальное строение грунта; б – упрощенная модель, характеризующая объем и массу каждой фазы в грунте;

1 – минеральные частицы (зерна), представляющие собой твердую фазу;

2 – поры, в которых размещены жидкая и газообразная фазы.

Н.А. Цытович, обсуждая вопрос строения грунта, пишет [8, с. 32, 33]: «В общем случае грунт можно представить состоящим из трех компонентов: твердых минеральных частиц, как правило, занимающих большую часть объема, жидких, частично или полностью

заполняющих промежутки между твердыми частицами грунта (поры), и газообразных – различного рода газов и паров, также занимающих ту или иную часть объема пор грунта и содержащихся в растворенном состоянии в грунтовой воде».

Обращаем внимание, что процитированное нами представление Н.А. Цытовича о дисперсном строении грунта в полной мере соответствует модели, отображающей реальное строение грунтов (рис.1.1, *а*). Эта реальная модель для наглядного изображения трех фаз и их влияния на объем V , занимаемый грунтом, и его вес в этом объеме G иллюстрируется упрощенной моделью (рис. 1.2, *б*).

Эта упрощенная модель является классической и приводится в учебниках и учебных пособиях, изданных в разное время как в РФ [8, с. 61; 9, с. 21], так и за рубежом [10, с. 31]. Обращаясь к модели (см. рис. 1.2, *б*) несложно заметить, что вес и объем грунта определяются по формулам

$$G = G_s + G_w, \quad (1.1)$$

где G_s – вес твердых частиц грунта (минеральной части), Н; G_w – вес воды, Н.

$$V = V_s + V_w + V_g, \quad (1.2)$$

где V_s , V_w и V_g – объемы, занимаемые твердой, жидкой и газообразной составляющими грунта (минеральной части), см³.

Объем, занимаемый порами, определяется суммой

$$V_u = V_w + V_g. \quad (1.3)$$

Используя зависимости (1.1) – (1.3), выводят формулы для определения показателей физических свойств. Процедуру вывода этих формул мы рассмотрим в следующем подразделе. Сейчас отметим, что изменение соотношений объемов и весовых характеристик твердой, жидкой и газообразной составляющих (фаз) влияет на численные значения показателей физических свойств. От физического состояния грунта зависят показатели механических свойств, что можно объяснить влиянием плотности, влажности на количество механических и водно-коллоидных структурных связей в грунте, а также прочность самих связей.

В общепринятой классификации дисперсные грунты включают в себя два подкласса: несвязные и связные грунты [1, табл. 2]. Под термином «несвязный грунт» понимают дисперсный грунт, который имеет механические структурные связи и обладает сыпучестью в сухом состоянии [1, п. 3.23]. Связным грунтом называется дисперсный грунт, который имеет физические и физико-химические структурные связи [1, п. 3.37]. Пространственную организацию, которая опреде-

ляется формой, размером, характером поверхности, количественным соотношением структурных элементов грунта и характером связи между ними, называют структурой грунта [1, п. 3.39]. Строение, обусловленное пространственной организацией и ориентацией структурных элементов, называют текстурой грунта [1, п. 3.39].

Подклассы связных и несвязных грунтов объединяют типы и подтипы, которые подразделяются на виды и подвида. Такая классификация дисперсных грунтов приведена в табл. 1.5 [1, табл. 2].

Таблица 1.5. Типы, подтипы, виды и подвиды дисперсных грунтов

Типы	Подтипы	Виды	Подвиды
1	2	3	4
Дисперсные несвязные грунты			
Осадочные	Флювиальные, ледниковые, эоловые, склоновые и др.	Минеральные	Крупнообломочные грунты, пески
		Органо-минеральные	Заторфованные пески
Вулканогенно-осадочные	Вулканогенно-осадочные, осадочно-вулканогенные, пиропластические	Минеральные	Вулканогенно-обломочные грунты. Вулканические пески, пеплы
Элювиальные	Образованные в результате выветривания: физического, физико-химического, химического, биологического	Минеральные и органо-минеральные	Крупнообломочные грунты и пески обломочных и дисперсных зон коры выветривания и почвы
Техногенные	Техногенно измененные в условиях естественного залегания природные грунты	Все виды техногенно измененных природных несвязных грунтов	Все подвиды техногенно измененных природных несвязных грунтов
	Техногенно перемещенные природные грунты	Все виды техногенно измененных природных несвязных грунтов	Все подвиды техногенно измененных природных несвязных грунтов
	Антропогенно образованные грунты	Различные виды антропогенных грунтов	Различные подвиды антропогенных грунтов

Окончание табл. 1.5

1	2	3	4
Дисперсные связные грунты			
Осадочные	Флювиальные, ледниковые, эоловые, склоновые и др.	Минеральные	Глинистые грунты
		Органо-минеральные	Илы. Сапропели. Заторфованные глинистые грунты и др.
	Озерно-болотные, болотные, аллювиально-болотные и др.	Органические	Илы. Сапропели. Заторфованные глинистые грунты и др.
Элювиальные	Образованные в результате выветривания: физического, физико-химического, химического, биологического	Минеральные и органо-минеральные	Глинистые грунты дисперсных зон коры выветривания и почвы
Техногенные	Техногенно измененные в условиях естественного залегания природные грунты	Все виды техногенно измененных природных связных грунтов	Все подвиды техногенно измененных природных связных грунтов
	Техногенно перемещенные природные грунты	Все виды техногенно измененных природных связных грунтов	Все подвиды техногенно измененных природных связных грунтов
	Антропогенно образованные грунты	Различные виды антропогенных грунтов	Различные подвиды антропогенных грунтов

Следуя действующему стандарту, глинистым грунтом является [1, п. 3.6] связный грунт, состоящий в основном из пылеватых и глинистых (не менее 3%) частиц, имеющий число пластичности $I_p \geq 1\%$.

Песчаный грунт или песок представляет собой [1, п. 3.28] несвязный минеральный грунт с массой частиц размером 0,05–2 мм более 50% и числом пластичности $I_p < 1\%$.

Число пластичности является фундаментальной характеристикой дисперсных грунтов и определяется по формуле

$$I_p = w_T - w_p, \quad (1.4)$$

где w_T и w_p – границы текучести и раскатывания, также называемые верхним и нижним пределами пластичности или пределами Аттерберга, %.

В соответствии с ГОСТ 5180–84 под границей текучести понимают влажность грунта, при которой грунт находится на границе пластичного и текучего состояний, а под раскатыванием – грунт находится на границе твердого и пластичного состояний [11, прил. 1].

Введением в инженерную практику пределов пластичности мы обязаны Альберту Аттербергу, Карлу Терцаги и Артуру Казагранде

Альберт Аттеберг был химиком, получившим докторскую степень в университете г. Упсала (Швеция) в 1872 г. До 1877 г. А. Аттерберг преподавал в этом университете аналитическую химию, а затем переехал в г. Калмар, где стал проводить исследования в области сельского хозяйства. Работая в этом направлении, А. Аттерберг заинтересовался классификацией и пластичностью почв. Он предложил классифицировать глинистые частицы как частицы грунта, имеющие размер меньше 0,002 мм, а также ввел пределы консистенции грунтов, которые до сих пор носят его имя [5]. Пределы Аттерберга получили признание в 1913 г., но в области сельскохозяйственных наук в полной мере оценены не были. Введение этих пределов в геологии и геотехнике связывают с именами Карла Терцаги и его ученика Артура Казагранде. А. Казагранде разработал тесты для определения пределов Аттерберга, основные процедуры которых соблюдаются до сих пор [5, 12].

Наглядное представление о структуре и текстуре грунта дают фотоснимки, выполненные под микроскопом, на которых наглядно видны отличия связных грунтов и несвязных, например глинистых и песчаных. На рис. 1.4 приведены иллюстрации минеральных частиц связных грунтов.

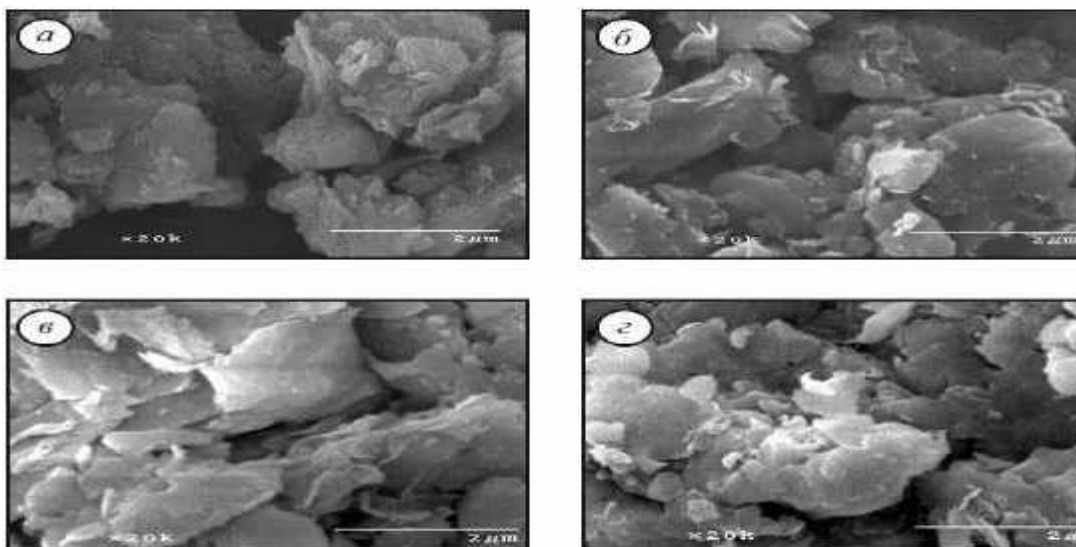


Рис. 1.4. Изображения минеральных частиц в связных грунтах⁸:

а –лессовидный грунт; *б* –аллювиальный грунт;

в – ледниковый грунт; *г* – грунт палеогеновой системы

Поясняя терминологию, использованную нами на рис. 1.4, отметим, что:

1. Лессовые грунты относят к особым грунтам, структура которых неустойчива. Структура лессовых грунтов нарушается при их замачивании под нагрузкой [13]. Особенностью лессовых грунтов является сравнительно небольшое содержание глинистых частиц, они преимущественно состоят из пылеватых частиц и имеют крупные поры, в десятки раз превышающие размеры частиц [13, с. 54]. Лессовидные грунты отличаются от лесса меньшим числом макропор (см. рис. 1.4, *а*). Лесс (нем. Löss, англ. loess)- термин, введенный в геолого-минералогическое описание грунтов Карлом Цезарем фон Леонгардом⁹. Лесс представляет собой неслоистую или скрытослоистую, однородную известковистую осадочную горную породу. Доминирующий цвет – светло-жёлтый или палевый. В зерновом составе лесса преобладают частицы размером 0,01–0,05 мм, частично представленные агрегатами, образовавшимися при коагуляции коллоидных и глинистых частиц (менее 0,002 мм)¹⁰. Глинистые частицы лесса состоят из гидрослюда, каолинита, монтмориллонита. Лесс пронизан тонкими канальцами (макропорами, следами корней растений). Пористость лесса 40–55%. Вопрос происхождения лесса являет-

⁸ White DJ, Harrington D, Thomas Z. Fly ash soil stabilization for non-uniform subgrade soils, Volume I: Engineering properties and construction guidelines. Iowa State University, Ames, IA: Center for Transportation Research and Education, Iowa State University; 2005. – 158 p.

⁹ Leonhard K. C. von. Charakteristik der Felsarten. // J. Engelmann Verlag Heidelberg. – 1823-1824. – 3 vol. – P. 772.

¹⁰ Лесс [Электронный ресурс] // Горная энциклопедия. URL: <http://www.mining-enc.ru/l/less> (дата обращения к ресурсу: 05.07.2015).

ся дискуссионным и в настоящее время объясняется тремя основными гипотезами¹¹:

- ветровая, или эоловая, выдвинутая Ф. Рахтгофен в 1877 г., предполагает, что лесс образовался как осадок атмосферной пыли;
- делювиальная, объясняющая происхождение лесса смывом, дождевыми струйками продуктов выветривания горных пород и их отложением на склонах и у подножия возвышенностей;
- ледниковая, рассматривающая лесс как продукт отложения ледниковой мути, вынесенной талыми водами ледника.

Аллювий и аллювиальные отложения (от лат. *alluvio* — нанос, намыв) представляют собой отложения водных потоков (рек или ручьёв). Термин введен в 1823 г. Вильямом Баклендом, а в России использован В.В. Докучаевым в 1878 г. Аллювиальные грунты слагают русла, поймы и террасы речных долин. Аллювиальные грунты подразделяют¹²:

- на русловой аллювий, отлагающийся в смещающемся русле потока, представленный гравием, песками и супесями;
- пойменный аллювий, который во время половодий отлагается и накапливается поверх руслового аллювия, наиболее часто представленный супесями и суглинками;
- старинный аллювий, осаживающийся в старицах и содержащий большое количество органического вещества, наибольшее распространение получили супеси, суглинки и глины.

В зарубежной терминологии под аллювием понимают большой диапазон грунтов, относя к нему пролювий и делювий:

Пролувий¹³ (от лат. *proluo* — уношу течением) — является продуктом разрушения и выноса горных пород временными водными потоками к подножию возвышенностей. Пролувий часто залегает в виде конусов, которые сливаются, образуя пролювиальные шлейфы. По высоте конуса зерновой состав пролювия изменяется. В верхней части залегают галька и щебень, содержащие песчано-глинистый цемент, а у подножия более тонкие и отсортированные осадки, зачастую лёссовидные отложения. Этот термин введен в геолого-минералогическую лексику в 1914 г. А.П. Павловым. Пролувий используют как нерудный строительный материал.

¹¹ Берг Л.С. Климат и жизнь. /Л.С. Берг. — М.: Госиздат, 1922. — 181 с.

¹² Аллювий [Электронный ресурс] // Горная энциклопедия. URL: <http://www.mining-enc.ru/a/alluvij/> (дата обращения к ресурсу: 05.07.2015).

¹³ Пролувий [Электронный ресурс] // Горная энциклопедия. URL: <http://www.mining-enc.ru/p/prolyuvij/> (дата обращения к ресурсу: 05.07.2015).

Делювий¹⁴ (от лат. deluo — смываю) – представляет наносы разрушенных горных у подножия склонов возвышенностей и в их нижних частях, образующиеся в результате смыывания пород с верхних частей этих склонов дождевыми потоками и талыми снеговыми водами, а также под влиянием силы тяжести, морозного сдвига и текучести грунта. Зерновой состав делювия разнообразен и меняется от глин и песков до крупных валунов. Делювиальные суглинки применяются для изготовления кирпича. Как генетический тип делювий выделен в 1888 г. А.П. Павловым.

Грунты ледникового происхождения относятся к грунтам четвертичного возраста, то есть самым молодым современным грунтам. Ледниковые грунты включают в себя моренные, водно-ледниковые и озерно-ледниковые.

Под грунтами палеогеновой системы понимают геологические отложения, соответствующие по возрасту палеогеновому периоду (палеогену). Палеоген является первым периодом кайнозоя, он начался 66 млн лет назад и окончился 23 млн лет назад.

На рис. 1.7 приведены снимки минеральных частиц песков.

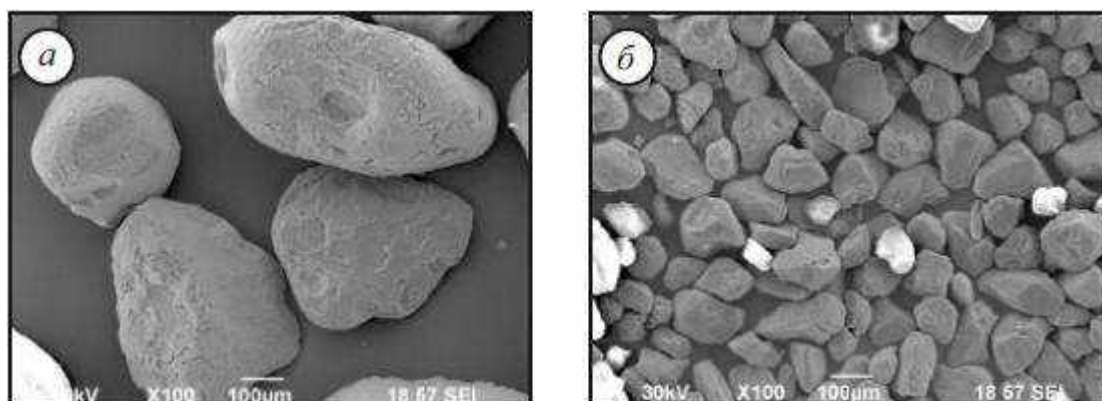


Рис. 1.7. Минеральные частицы песка:
а – средний; б – мелкий

Из сопоставления рис. 1.4 и 1.7 следует, что структура и текстура песчаных и глинистых грунтов имеют кардинальные отличия. Эти отличия оказывают влияние на показатели физических и механических свойств, вследствие чего подвиды песчаных и глинистых грунтов включают в себя разновидности.

Количественные показатели, по которым выделяются разновидности дисперсных грунтов, приведены в табл. 1.6.

¹⁴ Делювий [Электронный ресурс] // Горная энциклопедия. URL: <http://www.mining-enc.ru/p/prolyuvij/> (дата обращения к ресурсу: 05.07.2015).

Таблица 1.6. Разновидности дисперсных грунтов

Показатель	Разновидности		Величина
1	2		3
Размер слагающих грунт элементов и их фракций, мм	Валуны (глыбы)	Крупные	>800
		Средние	400 – 800
		Мелкие	200 – 400
	Галька (щебень)	Крупные	100 – 200
		Средние	60 – 100
		Мелкие	10 – 60
	Гравий (дресва)	Крупные	5 – 10
		Мелкие	2 – 5
	Песчаные частицы	Грубые	1 – 2
		Крупные	0,5 – 1
		Средние	0,25 – 0,5
		Мелкие	0,10 – 0,25
		Тонкие	0,05 – 0,10
	Пылеватые частицы	Трупные	0,01 – 0,05
		Мелкие	0,002 – 0,01
	Глинистые	Не подразделяются	<0,002
Гранулометрический состав крупнообломочных грунтов	Валунный или глыбовый ¹⁵	Размер частиц, мм	>200
		Содержание по массе, %	>50
	Галечниковый или щебенистый ¹⁶	Размер частиц, мм	>10
		Содержание по массе, %	>50
	Гравийный или дресвяной ¹⁷	Размер частиц, мм	>2
		Содержание по массе, %	>50
Гранулометрический состав песчаных грунтов	Гравелистый	Размер частиц, мм	>2
		Содержание по массе, %	>25
	Крупный	Размер частиц, мм	>0,5
		Содержание по массе, %	>50
Гранулометрический состав песчаных грунтов	Средний	Размер частиц, мм	>0,25
		Содержание по массе, %	>50
	Мелкий	Размер частиц, мм	>0,10
		Содержание по массе, %	≥75
	Тонкий	Размер частиц, мм	>0,10
		Содержание по массе, %	<75
Коэффициент водонасыщения S_r , д.е.	Малой степени водонасыщения (маловлажные)		$0 < S_r \leq 0,5$
	Средней степени водонасыщения (влажные)		$0,5 < S_r \leq 0,8$
	Водонасыщенные		$0,8 < S_r \leq 1,0$

¹⁵ При преобладании неокатанных частиц грунт называют «глыбовый».

¹⁶ При преобладании неокатанных частиц грунт называют «щебенистый».

¹⁷ При преобладании неокатанных частиц грунт называют «дресвяной».

Продолжение табл. 1.6

1	2			3
Коэффициент пористости e , д.е.	Пески гравелистые, крупные и средней крупности	Плотный		$e \leq 0,55$
		Средней плотности		$0,55 < e \leq 0,7$
		Рыхлый		$e > 0,7$
	Пески мелкие	Плотный		$e \leq 0,60$
		Средней плотности		$0,60 < e \leq 0,75$
		Рыхлый		$e > 0,75$
	Пески пылеватые	Плотный		$e \leq 0,60$
		Средней плотности		$0,60 < e \leq 0,80$
		Рыхлый		$e > 0,80$
Степень плотности I_D , д.е.	Песок	Слабоуплотненный		$0 < I_D \leq 0,33$
		Среднеуплотненный		$0,33 < I_D \leq 0,66$
		Сильноуплотненный		$0,66 < I_D \leq 1$
Коэффициент выветрелости K_{wrt} , д.е.	Крупнообломочный	Слабовыветрелый		$0 < K_{wrt} \leq 0,5$
		Средневыветрелый		$0,5 < K_{wrt} \leq 0,75$
		Сильновыветрелый		$0,75 < K_{wrt} \leq 1$
Коэффициент истираемости K_{fr} , д.е.	Очень прочный			$K_{fr} \leq 0,05$
	Прочный			$0,05 < K_{fr} \leq 0,2$
	Средней прочности			$0,2 < K_{fr} \leq 0,3$
	Малой прочности			$0,3 < K_{fr} \leq 0,4$
	Пониженной прочности			$K_{fr} > 0,4$
Число пластичности I_p , %	Супесь			$1 \leq I_p \leq 7$
	Суглинок			$7 < I_p \leq 17$
	Глина			$I_p > 17$
Число пластичности I_p и содержание песчаных частиц (2 – 0,05) мм, % по массе	Супесь	Песчанистая	I_p , %	$1 \leq I_p \leq 7$
			Содержание п.ч., %	≥ 50
		Пылеватая	I_p , %	$1 \leq I_p \leq 7$
			Содержание п.ч., %	< 50
	Суглинок	Легкий песчанистый	I_p , %	$7 < I_p \leq 12$
			Содержание п.ч., %	≥ 40
Число пластичности I_p и содержание песчаных частиц (2 – 0,05) мм, % по массе	Суглинок	Легкий пылеватый	I_p , %	$7 < I_p \leq 12$
			Содержание п.ч., %	< 40
		Тяжелый песчанистый	I_p , %	$12 < I_p \leq 17$
			Содержание п.ч., %	≥ 40
		Тяжелый пылеватый	I_p , %	$12 < I_p \leq 17$
			Содержание п.ч., %	< 40
	Глина	Легкая песчанистая	I_p , %	$17 < I_p \leq 27$
			Содержание п.ч., %	≥ 40
		Легкая пылеватая	I_p , %	$17 < I_p \leq 27$
			Содержание п.ч., %	< 40
		Тяжелая	I_p , %	$I_p > 27$
			Содержание п.ч., %	Нет

Продолжение табл. 1.6

1	2		3
Содержание частиц размером более 2 мм, % по массе	Супесь, суглинок, глина с галькой (щебнем), с гравием (дресвой) или с ракушкой		От 15 до 25 включ.
	Супесь, суглинок, глина галечниковые (щебнистые), гравелистые (дресвяные) или ракушечные		Св. 25 до 50 включ.
Показатель текучести I_L , д.е.	Супесь	Твердая	$I_L < 0$
		Пластичная	$0 < I_L \leq 1$
		Текучая	$I_L > 1$
	Суглинки и глины	Твердые	$I_L < 0$
		Полутвердые	$0 < I_L \leq 0,25$
		Тугопластичные	$0,25 < I_L \leq 0,5$
		Мягкопластичные	$0,5 < I_L \leq 0,75$
		Текучепластичные	$0,75 < I_L \leq 1$
		Текучие	$I_L > 1$
Относительная деформация набухания без нагрузки ε_{sw} , д.е.	Глинистые грунты	Ненабухающий	$\varepsilon_{sw} < 0,04$
		Слабонабухающий	$0,04 \leq \varepsilon_{sw} \leq 0,08$
		Средненабухающий	$0,08 \leq \varepsilon_{sw} \leq 0,12$
		Сильнонабухающий	$\varepsilon_{sw} > 0,12$
Относительная деформация просадочности ε_{sl} , д.е.	Глинистые грунты	Непросадочный	$\varepsilon_{sl} < 0,01$
		Слабопросадочный	$0,01 \leq \varepsilon_{sl} \leq 0,03$
		Среднепросадочный	$0,03 < \varepsilon_{sl} \leq 0,07$
		Сильнопросадочный	$0,07 < \varepsilon_{sl} \leq 0,12$
		Чрезвычайно просадочный	$\varepsilon_{sl} > 0,12$
Относительное содержание органического вещества I_r , д.е.	Минеральные		$I_r \leq 0,03$
	Органо-минеральные:	С примесью органического вещества (ОВ)	$0,03 < I_r \leq 0,1$
		С низким содержанием ОВ	$0,1 < I_r \leq 0,3$
		С высоким содержанием ОВ	$0,3 < I_r \leq 0,5$
	Органические		$I_r > 0,5$
Относительное содержание органического вещества I_r , д.е.	Торфосодержащие пески	С примесью торфа	$0,03 \leq I_r \leq 0,10$
		Слаботорфованный	$0,10 < I_r \leq 0,25$
		Среднеторфованный	$0,25 < I_r \leq 0,40$
		Сильноторфованный	$0,40 < I_r < 0,50$
		Торф	$I_r \geq 0,50$
	Торфосодержащие глинистые грунты	С примесью торфа	$0,05 \leq I_r \leq 0,10$
		Слаботорфованный	$0,10 < I_r \leq 0,25$
		Среднеторфованный	$0,25 < I_r \leq 0,40$
		Сильноторфованный	$0,40 < I_r < 0,50$
		Торф	$I_r \geq 0,50$
Степень морозной пучинистости ε_{fh} , д.е.	Непучинистый		$\varepsilon_{fh} < 1,0$
	Слабопучинистый		$1,01 \leq \varepsilon_{fh} \leq 3,5$
	Среднепучинистый		$3,5 < \varepsilon_{fh} \leq 7,0$
	Сильнопучинистый		$7,0 < \varepsilon_{fh} \leq 10,0$
	Чрезмерно пучинистый		$\varepsilon_{fh} > 10,0$

Продолжение табл. 1.6

1	2		3
Степень засоленности грунтов легкорастворимыми солями D_{sal} , %	Хлоридное, сульфатно-хлоридное засоление	Незасоленный	$D_{sal} < 0,5$
		Слабозасоленный	$0,5 \leq D_{sal} < 2,0$
		Среднезасоленный	$2,0 \leq D_{sal} < 5,0$
		Сильнозасоленный	$2,0 \leq D_{sal} \leq 10,0$
		Избыточно засоленный	$D_{sal} > 10,0$
	Сульфатное, хлоридно-сульфатное засоление	Незасоленный	$D_{sal} < 0,5$
		Слабозасоленный	$0,5 \leq D_{sal} < 1,0$
		Среднезасоленный	$1,0 \leq D_{sal} < 3,0$
		Сильнозасоленный	$3,0 \leq D_{sal} \leq 8,0$
		Избыточно засоленный	$D_{sal} > 8,0$
Степень засоленности грунтов среднерастворимыми (гипс, ангидрит) солями D_{sal} , %	Суглинок	Незасоленный	$D_{sal} < 5$
		Слабозасоленный	$5 \leq D_{sal} < 10$
		Среднезасоленный	$10 \leq D_{sal} < 20$
		Сильнозасоленный	$20 \leq D_{sal} < 35$
		Избыточно засоленный	$D_{sal} > 35$
	Супесь	Незасоленный	$D_{sal} < 5$
		Слабозасоленный	$5 \leq D_{sal} < 10$
		Среднезасоленный	$10 \leq D_{sal} < 20$
		Сильнозасоленный	$20 \leq D_{sal} < 30$
		Избыточно засоленный	$D_{sal} > 30$
	Песок	Незасоленный	$D_{sal} < 3$
		Слабозасоленный	$3 \leq D_{sal} < 7$
		Среднезасоленный	$7 \leq D_{sal} < 10$
		Сильнозасоленный	$10 \leq D_{sal} < 15$
		Избыточно засоленный	$D_{sal} > 15$
Степень разложения D_{dp} , %	Торф	Слаборазложившийся	$D_{dp} \leq 20$
		Среднеразложившийся	$20 < D_{dp} \leq 45$
		Сильноразложившийся	$D_{dp} > 45$
Модуль деформации E_d , МПа	Очень сильнодеформируемые		$E_d \leq 5$
	Сильнодеформируемые		$5 < E_d \leq 10$
	Среднедеформируемые		$10 < E_d \leq 50$
	Слабodeформируемые		$E_d > 50$
Сопротивление недренированному сдвигу c_u , кПа	Чрезвычайно низкой прочности		$c_u \leq 10$
	Очень низкой прочности		$10 < c_u \leq 20$
	Низкой прочности		$20 < c_u \leq 40$
	Средней прочности		$40 < c_u \leq 75$
	Высокой прочности		$75 < c_u \leq 150$
	Очень высокой прочности		$150 < c_u \leq 300$
	Чрезвычайно высокой прочности		$c_u > 300$

Окончание табл. 1.6

Показатель чувствительности S_t , д.е.	Глинистые грунты	Нечувствительные	$S_t \sim 1$
		Низкочувствительные	$1 < S_t \leq 2$
		Среднечувствительные	$2 < S_t \leq 4$
		Очень чувствительные	$4 < S_t \leq 8$
		Текучие глины	$S_t > 8$
Липкость (прилипаемость) L , кПа	Глинистые грунты	Неприлипаемые	$L \leq 5$
		Слабоприлипаемые	$5 < L \leq 10$
		Среднеприлипаемые	$10 < L \leq 25$
		Сильноприлипаемые	$L > 25$
Относительное содержание органического вещества I_r , д.е.	Илы	Высокоминеральные	$0,03 < I_r \leq 0,07$
		Среднеминеральные	$0,07 < I_r \leq 0,10$
		Низкоминеральные	$I_r > 0,10$
	Сапропели	Высокоминеральные	$0,10 < I_r \leq 0,30$
		Среднеминеральные	$0,30 < I_r \leq 0,50$
		Низкоминеральные	$I_r > 0,50$
Высота капиллярного поднятия h_c , м	С малой высотой		$h_c \leq 1,0$
	Со средней высотой		$1,0 < h_c \leq 2,5$
	С большой высотой		$h_c > 2,5$

Примечание. Водонасыщенные песчаные грунты подразделяют по потенциалу разжижения при сейсмических воздействиях F_L на разжижаемые ($F_L \leq 1,15$) и неразжижаемые ($F_L > 1,15$).

1.1.3. Мерзлые грунты

Класс мерзлых грунтов объединяет многолетнемерзлые и сезонно-мерзлые грунты. Под многолетнемерзлыми грунтами понимают грунты, которые находятся в мерзлом состоянии постоянно в течение трех и более лет [1, п. 3.19]. Сезонно-мерзлый грунт представляет собой грунт, который находится в мерзлом состоянии периодически в течение холодного сезона [1, п. 3.19].

Мерзлые грунты подразделяются на три подкласса:

- скальные мерзлые грунты, для которых характерны три типа структурных связей: криогенные, кристаллизационные и цементационные;
- дисперсные мерзлые грунты, в которых тоже имеют место три типа структурных связей: криогенные, физические и физико-химические;
- ледяные, которые обладают только криогенными связями.

Необходимость деления мерзлых грунтов на подклассы с характерными для них структурными связями обусловлено различным

распределением льда, которое сказывается на их строении, то есть структуре и текстуре. Особенности структуры скальных грунтов обуславливают то, что при промерзании лед образуется только в трещинах и пустотах. Поэтому структура скального грунта не изменяется, а лед является самостоятельным элементом горной породы [14].

Мерзлым дисперсным грунтам, таким как крупнообломочные, песчаные и глинистые, свойственны те же структуры, то есть пелитовая, алевроитовая, псаммитовая, псефитовая и др. [15], которые дополняют характеристикой «лед-цемент». Под термином «лед-цемент» понимают лед, который образуется при промерзании увлажненной горной породы и располагается между ее минеральными частицами. К льду-цементу также относят сегрегационные льды, представляющие собой гнезда и линзообразные прослойки льда. Сегрегационный или миграционный лед образуется при промерзании грунта и миграции воды к фронту промерзания.

Лед-цемент создает криогенные структурные связи, цементирующие между собой минеральные частицы, зерна, обломки и т.п. Классификацию льда-цемента связывают с именем Петра Александровича Шумского.

Согласно этой классификации лед-цемент подразделяют на 6 классов:

- контактный, который расположен в местах контакта скелетных частиц;
- пленочный, покрывающий только поверхность частиц, но не заполняющий весь объем пор;
- поровый, расположенный в порах и заполняющий их целиком;
- базальный, разобщающий минеральные частицы и их агрегаты;
- корковый лед, обволакивающий крупные элементы породы (в крупнообломочных грунтах).

При промерзании трещиноватых горных пород в них образуются жильные льды. Для образования жильного льда необходимы три условия, к которым относят наличие:

- трещин, нарушающих монолитность породы;
- воды, заполняющей трещины;
- отрицательной температуры, необходимой для замерзания воды.



Рис. 1.8. Выход жильного льда

Процесс образования жильных льдов является динамическим, то есть изменяющимся с течением времени и характеризующимся появлением в породе новых трещин, которые заполняются льдом. Это связано с тем, что при колебаниях температуры горные породы испытывают знакопеременные напряжения, то есть поочередно подвергаются сжатию и растяжению. При понижении температуры в горной породе возникают растягивающие температурные напряжения, в результате действия которых появляются морозобойные трещины. В таких трещинах образуется глубинная изморозь, а в теплый период в них с поверхности стекает вода, кото-

рая замерзает. Так появляются новые жилы льда.

Подразделение мерзлых грунтов на типы, подтипы, виды и подвиды выполнено по генезису и вещественному составу. Разновидности мерзлых грунтов выделены по количественным показателям их вещественного состава, строения, состояния и свойств [1, прил. Б.3].

В табл. 1.7 приведены типы, подтипы, виды и подвиды мерзлых грунтов.

Таблица 1.7. Типы, подтипы, виды и подвиды класса мерзлых грунтов

Типы	Подтипы	Виды	Подвиды
1	2	3	4
Скальные мерзлые грунты			
Природные промерзшие	Интрузивные, эффузивные, метаморфические, осадочные, вулканогенно-осадочные, элювиальные	Все виды скальных грунтов	Все подвиды скальных грунтов
Техногенные замороженные и мерзлые	Природные грунты, техногенно измененные в условиях естественного залегания	Все виды техногенно измененных природных скальных грунтов	Все подвиды техногенно измененных природных скальных грунтов

Окончание таблицы 1.7.

1	2	3	4
Дисперсные мерзлые грунты			
Природные промерзшие	Осадочные, вулканогенно-осадочные, элювиальные	Все виды дисперсных грунтов	Все подвиды дисперсных грунтов
Техногенные замороженные и мерзлые	Природные грунты, техногенно измененные в условиях естественного залегания	Все виды техногенно измененных природных дисперсных грунтов	Все подвиды техногенно измененных природных дисперсных грунтов
	Техногенно перемещенные природные мерзлые грунты		
	Антропогенные замороженные и мерзлые грунты		
Ледяные грунты			
Льды конституционные: внутригрунтовые, погребенные, пещерно-жильные	Сегрегационные, инъекционные, ледниковые, наледные, речные, озерные, морские, донные, инфильтрационные, жильные, повторно-жильные, пещерные	Льды	Льды разного состава
		Ледогрунты	Ледогрунты разного состава
Техногенные ледяные искусственные	Антропогенные замороженные льды	Все виды замороженных льдов	Все подвиды искусственных льдов разного состава

Деление мерзлых грунтов на разновидности приведено в табл.1.8.

Таблица 1.8. **Разновидности мерзлых грунтов**

Показатель	Разновидности	Величина
1	2	3
Температура грунта T , °C	Немерзлый (талый)	$T \geq 0$
	Охлажденный	$0 > T \geq T_{bf}$
	Мерзлый	$T < T_{bf}$
	Морозный	$T < 0$
	Супучемерзлый (грунтов с суммарной влажностью $w_{tot} \leq 3\%$)	

Окончание табл. 1.8

1	2		3
Льдистость за счет видимых ледяных включений i_i , д.е.	Скальные и полускальные мерзлые грунты	Слабольшедистый	$i_i \leq 0,01$
		Льдистый	$0,01 < i_i \leq 0,05$
		Сильнольдистый	$i_i > 0,05$
	Дисперсные мерзлые грунты	Нельдистый	$i_i \leq 0,03$
		Слабольшедистый	$0,03 < i_i \leq 0,20$
		Льдистый	$0,20 < i_i \leq 0,40$
		Сильнольдистый	$0,40 < i_i \leq 0,60$
		Очень сильнольдистый	$0,60 < i_i \leq 0,90$
Суммарная льдистость i_{tot} , д.е.	Песчаные мерзлые грунты	Слабольшедистые	$i_{tot} \leq 0,40$
		Льдистые	$0,40 < i_{tot} \leq 0,60$
		Сильнольдистые	$i_{tot} > 0,60$
Степень засоленности грунтов легкорастворимыми солями D_{sal} , %	Пески	Незасоленные	$D_{sal} < 0,05$
		Слабозасоленные	$0,05 \leq D_{sal} < 0,15$
		Среднезасоленные	$0,15 \leq D_{sal} < 0,30$
		Сильнозасоленные	$D_{sal} \geq 0,30$
	Супеси	Незасоленные	$D_{sal} < 0,15$
		Слабозасоленные	$0,15 \leq D_{sal} < 0,35$
		Среднезасоленные	$0,35 \leq D_{sal} < 0,60$
		Сильнозасоленные	$D_{sal} \geq 0,60$
	Суглинки и глины	Незасоленные	$D_{sal} < 0,20$
		Слабозасоленные	$0,20 \leq D_{sal} < 0,40$
		Среднезасоленные	$0,40 \leq D_{sal} < 0,80$
		Сильнозасоленные	$D_{sal} \geq 0,80$
Тип криогенной текстуры	Скальные и полускальные	Трещинная	—
		Пластовая	—
		Полостная	—
		Жильная	—
		Массивная	—
	Крупнообломочные	Массивная	—
		Порфировидная	—
		Корковая	—
		Базальная	—
	Песчаные	Массивная	—
		Слоистая	—
Тип криогенной текстуры	Песчаные	Порфировидная	—
		Сетчатая	—
		Базальная	—

1.2. Свойства грунтов и их показатели

В данном подразделе приводятся традиционные термины и их определения, раскрывающие суть свойств грунтов и их показателей, а также даются формулы для расчета показателей свойств грунта в общепринятых обозначениях [1, 11].

Рассматривая рис. 1.2 и формулы (1.1) и (1.2), несложно заметить, что объемный вес грунта можно определить отношением веса всего грунта (веса твердых частиц и воды) к занимаемому им объему [8, с. 61], то есть по формуле

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{G_s + G_w}{V_s + V_w + V_g} = \rho \cdot g, \quad (1.5)$$

где ρ – плотность грунта, кг/м^3 ; g – ускорение силы тяжести (свободного падения), м/с^2 .

Ускорение силы тяжести принимается равным $g=9,81^{18} \text{ м/с}^2$.

Под плотностью грунта понимают массу единицы его объема [11, прил. 1] и определяют по формуле

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1.6)$$

где m – масса грунта, г.

Массу грунта и занимаемый ей объем определяют в лаборатории, выполняя соответствующие измерения и вычисления.

Под объёмным весом сухого (скелета) грунта понимают вес минеральных частиц грунта во всем его объеме [9, с. 32] и определяют отношением [9, с. 32]

$$\gamma_d = \frac{G_s}{V} = \frac{G_s}{V_s + V_w + V_g} = \rho_d \cdot g, \quad (1.7)$$

где ρ_d – плотность сухого¹⁹ (скелета) грунта, кг/м^3 .

¹⁸ В действительности ускорение свободного падения в различных точках земной поверхности неодинаково, например у экватора $g=9,78 \text{ м/с}^2$, а на полюсах $g=9,832 \text{ м/с}^2$. Таким образом, ускорение силы тяжести зависит от географической широты ϕ , а также от высоты над поверхностью Земли h_m , которую принято отсчитывать от уровня моря. Приблизительные вычисления ускорения силы тяжести можно выполнить по эмпирической формуле $g=9,780327 \cdot (1+0,0053024 \cdot \sin^2 \phi - 0,0000058 \cdot \sin^2 2\phi) - 3,086 \cdot h_m$

Поэтому в системе единиц принято стандартное (нормальное) $g=9,80665 \text{ м/с}^2$, которое является средним для всей земли, оно практически соответствует ускорению силы тяжести на широте $45,5^\circ$ над уровнем моря. В инженерных расчетах принимают $g \approx 9,81 \text{ м/с}^2$.

¹⁹ На английском *dry density*, отсюда происхождение нижнего индекса d и, как следствие, обозначение ρ_d .

Плотность сухого грунта ρ_d представляет собой отношение массы грунта за вычетом массы воды и льда в его порах к его первоначальному объему [11, прил. 1]. Математически это определение записывается формулой

$$\rho_d = \frac{m - m_w}{V} = \frac{m_d}{V}, \quad (1.8)$$

где m_w – масса воды в грунте, г; m_d – масса сухого грунта, г.

Под удельным весом грунта понимают отношение веса частиц грунта к их объему, его определяют по формуле [8, с. 61]

$$\gamma_s = \frac{G_s}{V_s} = \rho_s \cdot g, \quad (1.9)$$

где ρ_s – плотность частиц грунта, кг/м³.

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}, \quad (1.10)$$

где m_s – масса частиц грунта, г.

Плотность частиц грунта – это масса единицы объема твердых (скелетных) частиц грунта [11, прил. 1].

Влажность грунта определяется отношением веса воды к весу сухого грунта [8, с. 61]

$$w = \frac{G_w}{G - G_w} = \frac{G - G_s}{G_s} = \frac{G_w}{G_s}. \quad (1.11)$$

Согласно общепринятой терминологии влажность грунта – это отношение массы воды в объеме грунта к массе этого грунта, высушенного до постоянной массы [11, прил. 1].

При необходимости вычисления влажности грунта в процентах результат, найденный по формуле (1.11), необходимо умножить на 100%. Если объем исследуемого грунта принять за единицу, то влажность грунта можно выразить отношением веса воды γ_w , определяемой разностью веса всего грунта и сухого грунта ($\gamma - \gamma_d$) к весу сухого грунта [8, с. 62]. Следовательно, влажность определяется по формуле

$$w = \frac{\gamma - \gamma_d}{\gamma_d}. \quad (1.12)$$

Тогда удельный вес сухого грунта определяется отношением [8, с. 62]

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w}. \quad (1.13)$$

Представив в зависимости (1.13) вес грунта и вес сухого грунта произведениями соответствующих плотностей и ускорения силы тяжести, получим

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w}; \quad \rho = \rho_d \cdot (1+w); \quad w = \frac{\rho}{\rho_d} - 1. \quad (1.14)$$

Формулы (1.14) устанавливают связь плотности грунта, плотности сухого грунта и его влажности.

Принимая объем грунта, равный единице, запишем тождества

$$V = V_s + V_w + V_g = V_s + V_u = 1. \quad (1.15)$$

Из зависимости (1.14) следует, что

$$V_s = 1 - V_u; \quad V_u = 1 - V_s. \quad (1.16)$$

Объем твердых частиц выражается отношением веса сухого грунта к весу частиц грунта, что записывается выражением

$$V_s = \frac{\gamma_d}{\gamma_s}. \quad (1.17)$$

Тогда

$$V_u = n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}, \quad (1.18)$$

где n – общепринятое обозначение пористости [1, прил. А, п. А. 20], д.е.

Пористость грунта при его высыхании, увлажнении, а также при приложении к грунту уплотняющей нагрузки изменяется. Поэтому в практических расчетах используют более удобную характеристику, называемую «коэффициент пористости». Он представляет собой отношение объема пор к объему твердых частиц грунта и определяется по формуле [8, с. 63]

$$e = \frac{V_u}{V_s} = \frac{n}{1-n}. \quad (1.19)$$

Подставив в зависимость (1.19) выражение (1.18), получим формулу

$$e = 1 - \frac{\gamma_s}{\gamma_d}. \quad (1.20)$$

Представив в выражениях (1.18) и (1.20) вес частиц грунта и вес сухого грунта произведениями соответствующих плотностей и ускорения силы тяжести, получим

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}, \quad (1.21)$$

$$e = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_d}. \quad (1.22)$$

Зависимости (1.19), (1.21) и (1.22), так же как формулы (1.14), представляют собой взаимосвязь фундаментальных показателей физических свойств грунта, определяющих его состояние по плотности, пористости и влажности. Используя эти фундаментальные зависимости, можно получить формулы, связывающие один показатель с двумя или тремя другими характеристиками физического состояния грунта. Эти формулы приведены нами в табл. 1.9.

Таблица 1.9. Математические формулы, связывающие ρ , ρ_d , ρ_s , n , e , и w

Показатель	ρ	ρ_d	ρ_s	n	e	w
ρ	ρ	$\rho_d(1+w)$	$\rho_s(1-n)(1+w)$		$\frac{\rho_s(1+w)}{1+e}$	$\rho_d(1+w)$
ρ_d	$\frac{\rho}{1+w}$	ρ_d	$\rho_s(1-n)$		$\frac{\rho_s}{1+e}$	$\frac{\rho}{1+w}$
ρ_s	$\frac{\rho}{(1-n)(1+w)}$	$\frac{\rho_d}{1-n}$	ρ_s	$\frac{\rho_d}{1-n}$	$\rho_d(1+e)$	$\frac{\rho}{(1-n)(1+w)}$
n	$1 - \frac{\rho}{\rho_s(1+w)}$	$1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}$	$\frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s}$	n	$\frac{e}{1+e}$	$1 - \frac{\rho}{\rho_s(1+w)}$
e	$\frac{\rho_s(1+w)}{\rho}$	$\frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}$		$\frac{n}{1-n}$	e	$\frac{\rho_s(1+w)}{\rho} - 1$
w	$\frac{\rho}{\rho_d} - 1$		$\frac{\rho}{\rho_s(1-n)} - 1$		$\frac{\rho(1+e)}{\rho_s} - 1$	w

Примечание. Все формулы табл. 1.9, так же как зависимости (1.14), (1.18), (1.21) и (1.22), выводятся из анализа модели, представленной на рис. 1.2, поэтому эта схема является фундаментальной моделью геологии и механики грунтов.

Кроме представленных нами формул, для определения показателей фундаментальных физических свойств грунта в представленной нами классификации используются и другие характеристики, определяемые в соответствии с требованиями стандарта [1, прил. А].

Формулы для определения этих показателей и их физическая суть приведены в табл. 1.10.

Таблица 1.10. **Формулы для определения показателей, применяемых в классификации грунтов**

Показатель	Определение	Расчет
1	2	3
Коэффициент водонасыщения S_r , д.е.	Характеризует степень заполнения пор водой	$S_r = \frac{w \cdot \rho_s}{e \cdot \rho_w}$
Коэффициент выветренности K_{wr} , д.е.	Характеризует степень выветривания ²⁰	$K_{wr} = \frac{\rho_B}{\rho_{HB}}$
Коэффициент выветренности крупнообломочного грунта K_{wrt} , д.е.		$K_{wrt} = \frac{K_1 - K_0}{K_1}$
Коэффициент истираемости крупнообломочных грунтов K_{fr} , д.е.	Характеризует степень истирания	$K_{fr} = \frac{q_1}{q_0}$
Коэффициент размягчаемости в воде K_{sof} , д.е.	Показатель размягчаемости ²¹ (водоустойчивости) горных пород	$K_{sof} = \frac{R_c}{R_{c, \text{вс}}}$
Льдистость грунта за счет видимых ледяных включений i_l , д.е.	Характеризует объем содержащегося в грунте льда в объеме мерзлого грунта	$i_l = \frac{\rho_s \cdot (w_{tot} - w_m)}{\rho_i + \rho_s \cdot (w_{tot} - 0,1 \cdot w_w)}$
Показатель текучести грунта I_L , д.е.	Характеризует консистенцию грунта	$I_L = \frac{w - w_p}{I_p}$
Показатель чувствительности грунта S_t , д.е.	Характеризует различие в сопротивлении недренированному сдвигу глинистого грунта ненарушенного и нарушенного сложения	$R_t = \frac{c_u}{c_{ur}} = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\min}}$
Степень заполнения пор льдом и незамерзшей водой S_r , д.е.	Характеризует степень заполнения пор льдом и водой	$S_r = \frac{(1,1 \cdot w_{ic} + w_w) \cdot \rho_s}{e_f \cdot \rho_w};$ $w_{ic} = w_m - w_w$
Суммарная льдистость мерзлого грунта i_{tot} , д.е.	Характеризует содержание льда в грунте	$i_{tot} = i_l + i_c$

²⁰ Выветривание – это процесс взаимодействия пород приповерхностной области литосферы с атмосферой, биосферой, гидросферой и техносферой, в результате которого изменяются состав, строение, свойства и внешний облик этих пород. Различают биохимическое, криогенное, латеритное, подводное, термическое, физическое и химическое выветривания.

²¹ Размягчаемость – это способность пород с твердыми кристаллизационными или конденсационными связями снижать свою прочность под действием воды вследствие ослабления связей между частицами пород при проникновении в промежутки между ними молекул воды.

Окончание табл. 1.10

1	2	3
Степень неоднородности гранулометрического состава C_u , д.е.	Характеризует неоднородность грунта по гранулометрическому составу	$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$
Степень морозной пучинистости ε_{fh} , д.е.	Характеризует деформируемость грунта при воздействии отрицательных температур	$\varepsilon_{fh} = \frac{h_0 f - h_0}{h_0}$
Степень плотности песков, I_D , д.е.	Характеризует состояние сыпучих грунтов по плотности	$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$

Примечание. ρ_w – плотность воды, принимаемая равной единице²², г/см³; ρ_v и ρ_{nv} – плотность выветрелого и неветрелого грунта, г/см³; K_1 – отношение массы частиц размером менее 2 мм к массе частиц размером более 2 мм после испытания грунта на истирание в полочном барабане; K_0 – отношение массы частиц размером менее 2 мм к массе частиц размером более 2 мм грунта в природном состоянии; q_1 – масса частиц размером менее 2 мм после испытания крупнообломочных фракций грунта (частицы размером более 2 мм) на истирание в полочном барабане, г; q_0 – начальная масса пробы крупнообломочных фракций (до испытания на истирание), г; R_c и $R_{c, \text{вс}}$ – соответственно пределы прочности грунта на одноосное сжатие в водонасыщенном и воздушно-сухом состояниях, Па; w_{tot} – суммарная влажность мерзлого грунта, д.е.; w_m – влажность мерзлого грунта, расположенного между ледяными включениями, д.е.; w_w – влажность мерзлого грунта за счет содержащейся в нем при данной отрицательной температуре незамерзшей воды, д.е.; ρ_i – плотность льда, принимаемая равной 0,9 г/см³; c_u и c_{ur} – соответственно сопротивления недренированному сдвигу глинистого грунта ненарушенного и нарушенного сложений, Па; $\tau_{\max}$ – сопротивление грунта вращательному срезу, Па; $\tau_{\min}$ – остаточное сопротивление грунта, Па; w_{ic} – влажность мерзлого грунта, рассчитанная по содержанию порового льда, цементирующего минеральные частицы (лед-цемент), д.е.; e_f – коэффициент пористости мерзлого грунта, д.е.; i_{ic} – льдистость грунта за счет льда-цемента (порового льда), д.е.; d_{60} и d_{10} – диаметры частиц, меньше которых в грунте содержится соответственно 60 и 10% (по массе) частиц, мм; h_{of} – высота образца промерзшего грунта, см; h_0 – начальная высота образца грунта, см; $e_{\max}$ – коэффициент пористости в предельно рыхлом сложении, д.е.; и $e_{\min}$ – коэффициент пористости в предельно плотном сложении, д.е.

²² Плотность воды зависит от ее температуры, например при $t=0$ °С плотность воды равна $\rho_w=999,87$ кг/м³, а при температуре воды $t=99$ °С ее плотность составляет $\rho_w=959,09$ кг/м³. Из этих значений следует, что с ростом температуры плотность воды вначале возрастает, а затем снова уменьшается. Максимальная плотность воды имеет место при ее температуре $t=3,98$ °С и составляет $\rho_w=1000$ кг/м³, или $\rho_w=1$ г/см³. Поэтому в инженерных расчетах плотность воды, принимаемая равной $\rho_w=1$ г/см³, соответствует ее температуре $t \approx 4$ °С.

Ниже нами приведены показатели свойств грунтов и их определения с указаниями стандартов РФ, в соответствии с требованиями которых необходимо выполнять испытания.

Высота капиллярного поднятия h_c , м, – наибольшая (равновесная) высота подъема воды по порам грунта, отсчитываемая от зеркала грунтовых вод (равная мощности капиллярной каймы) [1, прил. А, п. А.1].

Липкость (прилипаемость) – адгезионная прочность глинистых грунтов, определяемая усилием, необходимым для отрыва плоского штампа из заданного материала от грунта после их контакта в течение заданного времени при заданном давлении.

Относительная деформация набухания без нагрузки определяется экспериментально в соответствии с требованиями стандарта [16] и рассчитывается отношением увеличения высоты образца глинистого грунта при замачивании после свободного набухания в условиях невозможности бокового расширения к начальной высоте образца природной влажности.

Предел прочности грунта на одноосное сжатие определяется экспериментально в соответствии с требованиями стандарта [16] и рассчитывается отношением нагрузки, при которой происходит разрушение образца, к площади его первоначального поперечного сечения.

Сопротивление недренированному сдвигу представляет собой прочность глинистых грунтов, определяемую экспериментально по результатам трехосных неконсолидированных недренированных лабораторных испытаний или полевых испытаний вращательным срезом, выполненных согласно указаниям [16, 17] соответственно.

Относительное содержание органического вещества, определяемое экспериментально в соответствии с требованиями стандартов [18, 19], вычисляется отношением массы органического вещества к массе абсолютно сухого грунта.

Показатель качества породы определяется отношением суммарной длины сохранных (неразрушившихся) кусков керна длиной более 10 см к длине пробуренного интервала в скважине.

Степень растворимости в воде – величина, отражающая способность грунта растворяться в воде при нормальных условиях за счет растворения неорганических и органических веществ, определяемая при соотношении грунта и воды 1:5 и равная концентрации образующегося равновесного раствора.

1.3. Гармонизация требований стандартов РФ, США и Евросоюза

Гармонизация требований стандартов РФ, США и Евросоюза выполнена в действующей редакции ГОСТ 25100 [1], который приводит основные термины международных стандартов в [1, прил. Д] и соответствие наименований дисперсных грунтов по классификациям [1], [2] и [4] в [1, прил. Е].

1.3.1. Термины и определения международных стандартов ASTM D 2487-2000 и ISO 14688-2:2004

По зерновому составу грунты подразделяются:

- на крупнообломочные (*Very coarse soils*), к которым относят грунты с основной фракцией крупнее 63 мм;
- крупнозернистые и песчаные (*Coarse-grained soils*), к которым относят грунты, содержащие в своем составе менее 50% частиц, прошедших сквозь сита 0,075 и 0,063 мм по стандартам [2] и [4] соответственно;
- тонкодисперсные (*Fine-grained soils*), к которым относят грунты, содержащие в своем составе более 50% частиц, прошедших сквозь сита 0,075 и 0,063 мм по стандартам [2] и [4] соответственно.

В стандартах [3] и [5] выделяют три границы текучести грунта. Первая из них (*Liquid limit*) в некотором смысле подобна границе текучести стандарта РФ [1] и обозначается LL в стандарте [3], а в стандарте [5] w_L . Определяется эта граница разными методами. Для определения границы текучести LL применяют метод А. Казагранде, соблюдая требования [3], а границу текучести w_L определяют методом падающего конуса, следуя указаниям [5].

Двумя другими границами текучести называют границу текучести после высушивания (*Liquid limit oven dried*), она обозначается LL_O , а вторая граница текучести до высушивания – LL_N . Обе границы текучести определяют методом А. Казагранде с той разницей, что LL_O определяется после высушивания грунта в сушильном шкафу при температуре 105 °С, а для определения LL_N используют грунт естественной влажности.

Граница пластичности или граница раскатывания (*Plastic limit*) в стандартах [3] и [5] обозначается PL и w_p соответственно, а определяется раскатыванием жгутов грунта аналогично ГОСТ 5180–84 [11].

Число (индекс) пластичности (*Plasticity index*) в стандартах [3] и [5] PI и I_p соответственно вычисляют по формулам:

– в стандарте ASTM D 4318-2000 [3]:

$$PI = LL - PL; \quad (1.23)$$

– в стандарте ISO/TS 17892-12:2004 [5]:

$$I_p = w_T - w_p. \quad (1.24)$$

Таким образом, в стандартах [1] и [5] формула для определения числа пластичности одинакова (1.4) и (1.24) соответственно и аналогична зависимости (1.23) с той разницей, что LL или ее аналог w_L определяют методом А. Казагранде, а не методами конуса.

Стандарт ISO/TS 17892-12:2004 [5] содержит термины «показатель текучести» (*Liquidity index*) и «показатель консистенции» (*Consistency index*), определяемые по формулам:

– показатель текучести

$$I_L = \frac{w - w_p}{I_p}; \quad (1.25)$$

– показатель консистенции

$$I_c = \frac{w_L - w}{I_p}. \quad (1.26)$$

Таким образом, показатели текучести, определяемые по тождественным формулам (1.25) стандарта [5] и [1, п. А.18] (см. табл. 1.10), являются аналогичными.

Степень фракционированности (*Uniformity coefficient*) – параметр, аналогичный степени неоднородности гранулометрического состава C_u и определяется по формуле, тождественной [1, п. А.25] (см. табл. 1.10).

Коэффициент кривизны (*Coefficient of curvature*) – параметр, характеризующий форму кривой зернового состава, определяемый по формуле

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}}, \quad (1.27)$$

где d_{10} , d_{30} и d_{60} – диаметры частиц, меньше которых в грунте содержится соответственно 10, 30 и 60% (по массе) частиц, мм.

В международных стандартах [2, 4] степень фракционированности и коэффициент кривизны применяют для классификации грунтов по фракционированности и однородности зернового состава. При этом выделяют:

- хорошо фракционированный (неоднородный) грунт (*Well graded soil*);
- плохо фракционированный (однородный) грунт (*Poorly graded soil*).

Для классификации применяется карта классификации грунтов (*Flow chart*), представляющая собой блок-схему, при помощи которой по размеру фракций классифицируют грунт.

Для классификации тонкодисперсных грунтов и тонкой фракции в крупнообломочных, крупнозернистых и песчаных грунтах применяется карта пластичности грунтов (*Plasticity chart*), представляющая собой график, построенный в координатах $PL - LL$.

Карты классификации и пластичности грунтов приведены в [1, прил. Е].

1.3.2. Сопоставительный анализ классификаций грунтов по стандартам ГОСТ 25100–2011, ASTM D 2487-2000 и ISO 14688-2:2004

Крупнообломочные, крупнозернистые грунты по стандарту [2] классифицируют по блок-схемам, приведенным в этом стандарте, а по стандарту [4] вид грунта определяют на основании определения гранулометрического состава. Вид грунта в стандартах [2, 4] обозначают индексом. Сопоставление грунтов по стандартам [1, 2, 4] приведено в табл. 1.11.

Таблица 1.11. Соответствие наименований грунтов по стандартам [1, 2, 4]

ГОСТ 25100–2011 [1]	ASTM D 2487-2000 [2]		ISO 14688-2:2004 [4]	
Наименование грунта	Наименование грунта	Индекс	Наименование грунта	Индекс
1	2	3	4	5
Валунный (глыбовый) грунт	Boulders (cobbles); boulders (cobbles) with sand	G	Boulders, sandy boulders, silty boulders, clayey boulders	Bo, saBo, siBo, clBo
	Boulders (cobbles) with silt; boulders (cobbles) with silt and sand	G-GM		
	Boulders (cobbles) with clay; boulders (cobbles) with clay and sand	G-GC		
	Silty boulders (cobbles); silty boulders (cobbles) with sand	GM		
	Clayey boulders (cobbles); clayey boulders (cobbles) with sand	GC		

Продолжение табл. 1.11

1	2	3	4	5
Валунный (глыбовый) грунт с песчаным заполнителем	Boulders (cobbles) with silt; boulders (cobbles) with silt and sand	G-GM	Sandy boulders, silty sandy boulders, clayey sandy boulders	saBo, sisaBo, clsaBo
	Boulders (cobbles) with clay; boulders (cobbles) with clay and sand	G-GC		
	Silty boulders (cobbles); silty boulders (cobbles) with sand	GM		
	Clayey boulders (cobbles); clayey boulders (cobbles) with sand	GC		
Валунный (глыбовый) грунт с глинистым (суглинистым, супесчаным) заполнителем	Silty boulders (cobbles); silty boulders (cobbles) with sand	GM	Silty boulders, clayey boulders, sandy silty boulders, sandy clayey boulders	siBo, clBo, sisiBo, sacIBo
	Clayey boulders (cobbles); clayey boulders (cobbles) with sand	GC		
Галечниковый (щебенистый) грунт	Cobbles (coarse, fine gravel); cobbles (coarse, fine gravel) with sand	G	Cobbles, sandy cobbles, silty cobbles, clayey cobbles; Coarse (medium) gravel, sandy coarse (medium) gravel, silty coarse (medium) gravel, clayey coarse (medium) gravel	siCo, clCo, sisiCo, sacICo; siCGr (MGr), clCGr (MGr), sisiCGr (MGr), sacICGr (MGr)
	Cobbles (coarse, fine gravel) with silt; cobbles (coarse, fine gravel) with silt and sand	G-GM		
	Cobbles (coarse, fine gravel) with clay; cobbles (coarse, fine gravel) with clay and sand	G-GC		
	Silty cobbles (coarse, fine gravel); silty cobbles (coarse, fine gravel) with sand	GM		
	Clayey cobbles (coarse, fine gravel); clayey cobbles (coarse, fine gravel) with sand	GC		

Продолжение табл. 1.11

1	2	3	4	5
Галечниковый (щебенистый) грунт с песчаным заполнителем	Cobbles (coarse, fine gravel) with silt; cobbles (coarse, fine gravel) with silt and sand	G-GM	Sandy cobbles, silty sandy cobbles, clayey sandy cobbles; Sandy coarse (medium) gravel, silty sandy coarse (medium) gravel, clayey sandy coarse (medium) gravel	saCo, sisaCo, clsaCo; saCGr (MGr), sisaCGr (MGr), clsaCGr (MGr)
	Cobbles (coarse, fine gravel) with clay; Cobbles (coarse, fine gravel) with clay;	G-GC		
	Silty cobbles (coarse, fine gravel); silty cobbles (coarse, fine gravel) with sand	GM		
	Clayey cobbles (coarse, fine gravel); clayey cobbles (coarse, fine gravel) with sand	GC		
Галечниковый (щебенистый) грунт с глинистым (суглинистым, супесчаным) заполнителем	Silty cobbles (coarse, fine gravel); silty cobbles (coarse, fine gravel) with sand	GM	Silty cobbles, clayey cobbles, sandy silty cobbles, sandy clayey cobbles; Silty coarse (medium) gravel, clayey coarse (medium) gravel, sandy silty coarse (medium) gravel, sandy clayey coarse (medium) gravel	siCo, clCo, sisiCo, sacCo; siCGr (MGr), clCGr (MGr), sisiCGr (MGr), sacCGr (MGr)
	Clayey cobbles (coarse, fine gravel); clayey cobbles (coarse, fine gravel) with sand	GC		
Гравийный (дресвяный) грунт	Fine gravel (coarse sand); fine gravel (coarse sand) with sand	G	Medium (fine) gravel, sandy medium (fine) gravel, silty medium (fine) gravel, clayey medium (fine) gravel	MGr(FGr), saMGr (FGr), siMGr(FGr), clMGr (FGr)
	Fine gravel (coarse sand) with silt; fine gravel (coarse sand) with silt and sand	G - GM		
	Fine gravel (coarse sand) with clay; fine gravel (coarse sand) with clay and sand	G - GC		

Окончание табл. 1.11

1	2	3	4	5
Гравийный (дресвяный) грунт	Silty fine gravel (coarse sand); silty fine gravel (coarse sand) with sand	GM	Medium (fine) gravel, sandy medium (fine) gravel, silty medium (fine) gravel, clayey medium (fine) gravel	MGr(FGr), saMGr (FGr), siMGr(FGr), clMGr (FGr)
	Clayey fine gravel (coarse sand); clayey fine gravel (coarse sand) with sand	GC		
Гравийный (дресвяный) грунт с песчаным заполнителем	Fine gravel (coarse sand) with silt; fine gravel (coarse sand) with silt and sand	G - GM	Sandy medium (fine) gravel, silty sandy medium (fine) gravel, clayey sandy medium (fine) gravel	saMGr (FGr), sisaMGr (FGr), clsaMGr (FGr)
	Fine gravel (coarse sand) with clay; fine gravel (coarse sand) with clay and sand	G - GC		
	Silty fine gravel (coarse sand); silty fine gravel (coarse sand) with sand	GM		
	Clayey fine gravel (coarse sand); clayey fine gravel (coarse sand) with sand	GC		
Гравийный (дресвяный) грунт с глинистым (суглинистым, супесчаным) заполнителем	Silty fine gravel (coarse sand); silty fine gravel (coarse sand) with sand	GM	Silty medium (fine) gravel, clayey medium (fine) gravel, sandy silty medium (fine) gravel, sandy clayey medium (fine) gravel	siMGr (FGr), clMGr (FGr), sasiMGr (FGr), sacMGr (FGr)
	Clayey fine gravel; clayey fine gravel with sand	GC		

Сопоставление песчаных грунтов по стандартам [1, 2, 4] приведено в табл. 1.12.

Таблица 1.12. Соответствие наименований песчаных грунтов по стандартам [1, 2, 4]

ГОСТ 25100–2011 [1]	ASTM D 2487-2000 [2]		ISO 14688-2:2004 [4]	
Наименование грунта	Наименование грунта	Индекс	Наименование грунта	Индекс
1	2	3	4	5
Гравелистый песок	Gravel, gravel with sand	G	Gravel; bouldery, cobble, sandy, silty, clayey gravel	Gr, boGr, coCg, saGr, siGr, clGr
	Gravel with silt, gravel with silt and sand	G - GM		
	Gravel with clay, gravel with clay and sand	GM		
	Silty gravel, silty gravel with sand	GC		
	Sand, sand with gravel	S		
	Sand with silt, sand with silt and gravel	S - SM		
	Sand with clay, sand with clay and gravel	S - SC		
	Silty sand, silty sand with gravel	MS		
	Clayey sand, clayey sand with gravel	CS		
Крупный песок	Medium sand, medium sand with gravel	S	Coarse (medium) sand; bouldery, cobble, gravely, silty, clayey coarse (medium) sand	coCSa (MSa), grCSa (MSa), siCSa (MSa), clCSa (MSa)
	Medium sand with silt, medium sand with silt and gravel	S - SM		
	Medium sand with clay, medium sand with clay and gravel	S - SC		
	Silty medium sand, silty medium sand with gravel	MS		
	Clayey medium sand, clayey medium sand with gravel	CS		
Песок средней крупности	Medium (fine) sand, medium (fine) sand with gravel	S	Medium sand; bouldery, cobble, gravely, silty, clayey medium sand	MSa, boMSa, coMSa, grMSa, siMSa, clMSa
	Medium (fine) sand with silt, medium (fine) sand with silt and gravel	S - SM		
	Medium (fine) sand with clay, medium (fine) sand with clay and gravel	S - SC		

Окончание табл. 1.12

1	2	3	4	5
Песок средней крупности	Silty medium (fine) sand, silty medium (fine) sand with gravel	MS	Medium sand; bouldery, cobble, gravelly, silty, clayey medium sand	MSa, boMSa, coMSa, grMSa, siMSa, clMSa
	Clayey medium (fine) sand, clayey medium (fine) sand with gravel	CS		
Мелкий песок	Fine sand, fine sand with gravel	S	Medium (fine) sand; bouldery, cobble, gravelly, silty, clayey medium (fine) sand	MSa (FSa), boMSa (FSa), coMSa (FSa), grMSa (FSa), siMSa (FSa), clMSa (FSa)
	Fine sand with silt, fine sand with silt and gravel	S - SM		
	Fine sand with clay, fine sand with clay and gravel	S - SC		
	Silty fine sand, silty fine sand with gravel	MS		
	Clayey fine sand, clayey fine sand with gravel	CS		
Пылеватый песок	Fine sand, fine sand with gravel	S	Fine sand; bouldery, cobble, gravelly, silty, clayey fine sand; coarse silt	FSa, boFSa, coFSa, grFSa, siFSa, clFSa, CSi
	Fine sand with silt, fine sand with silt and gravel	S - SM		
	Fine sand with clay, fine sand with clay and gravel	S - SC		
	Silty fine sand, silty fine sand with gravel	MS		
	Clayey fine sand, clayey fine sand with gravel	CS		
	Silt	ML		

Классификация глинистых и тонкодисперсных грунтов основана на использовании показателей пластичности Pl , I_p , I_L , I_c . Для установления соответствия в наименовании грунтов по стандартам [1, 2, 4] проводят пересчет значений границы текучести w_L и LL на основе корреляционных зависимостей. Расчет необходимо выполнять по региональным корреляционным зависимостям, полученным на основе результатов параллельных опытных определений w_L и LL . Значения границы раскатывания w_p и PL принимают равными друг другу. При отсутствии региональных данных допускается выполнять расчет по формулам [1, п. Е.3.2]

$$LL = 1,48 \cdot w_L - 8,3; \quad w_L = (LL + 8,3)/1,48. \quad (1.28)$$

Таблица 1.13. Соответствие наименований глинистых и тонкодисперсных грунтов по числу пластичности и показателю текучести

Наименование грунта [1]	Классификация и показатели свойств грунта по стандартам ASTM D 2487-2000 [2] и ISO 14688-2:2004 [4]			
	Наименование грунта	Индекс	Число пластич- ности <i>PI</i> , %	Показатель текучести <i>LL</i> , %
Минеральные грунты				
Глина тяжелая	Fat clay	<i>CH</i>	>45	> 5
Глина легкая			28-45	45-76
Суглинок тяжелый			19-28	50-53
Суглинок легкий	Lean clay	<i>CL</i>	19-28	36-50
Супесь			11-19	22-45
	Silty clay	<i>CL-ML</i>	4-7	<30
Глина тяжелая ли- титифицированная	Elastic silt	<i>MH</i>	>53	>92
Глина легкая ли- титифицированная			35-53	68-114
Суглинок тяжелый литифицированный			24-35	52-102
Суглинок легкий литифицированный			<24	50-68
Супесь литифици- рованная	Silt	<i>ML</i>	15-24	41-50
			<15	<41
Органо-минеральные и органические грунты				
Глина тяжелая	Organic clay with high plas- ticity	<i>OH</i>	>47	>68
Глина легкая			29-47	44-98
Суглинок тяжелый			19-29	50-62
Суглинок легкий			13-19	50-51
Суглинок тяжелый	Organic clay with low plas- ticity	<i>OL</i>	19-29	36-50
Суглинок легкий			13-19	25-50
Супесь			<13	<41
Торф	Peat	Peat	—	—

Таблица 1.14. Соответствие наименований глинистых и тонкодисперсных грунтов по показателям текучести и консистенции

Классификация грунта по ГОСТ 25100–2011 [1]			Наименование грунта по ISO 14688-2:2004 [4]
Наименование грунта	I_L , д.е.	Консистенция	
1	2	3	4
Супесь	$I_L < 0$	Твердая	very stiff
	$0 \leq I_L \leq 1$	Пластичная	very soft-stiff
	$I_L > 1$	Текучая	very soft

Окончание табл. 1.14

1	2	3	4
Суглинок	$I_L < 0$	Твердый	very stiff
	$0 \leq I_L \leq 0,25$	Полутвердый	stiff
	$0,25 < I_L \leq 0,50$	Тугопластичный	firm-stiff
	$0,50 < I_L \leq 0,75$	Мягкопластичный	soft-firm
	$0,75 < I_L \leq 1$	Текучепластичный	very soft-firm
	$I_L > 1$	Текучий	very soft-soft
Глина	$I_L < 0$	Твердая	very stiff
	$0 \leq I_L \leq 0,25$	Полутвердая	stiff
	$0,25 < I_L \leq 0,50$	Тугопластичная	firm-stiff
	$0,50 < I_L \leq 0,75$	Мягкопластичная	firm
	$0,75 < I_L \leq 1$	Текучепластичная	soft-soft
	$I_L > 1$	Текучая	very soft-soft

Задания для самооценки приобретенных знаний

- 1. Назовите таксономические единицы и группы признаков, по которым выполняют классификацию грунтов по ГОСТ 25100–2011.*
- 2. Перечислите классы грунтов.*
- 3. Назовите типы, подтипы, виды и подвиды скальных грунтов.*
- 4. Назовите показатели, по которым выделяются разновидности скальных грунтов.*
- 5. Перечислите типы, подтипы, виды и подвиды дисперсных грунтов.*
- 6. Назовите показатели, которые применяют для выделения разновидности дисперсных грунтов.*
- 7. Перечислите подклассы мерзлых грунтов.*
- 8. Назовите типы, подтипы, виды и подвиды мерзлых грунтов.*
- 9. Назовите показатели, которые применяют для выделения разновидности мерзлых грунтов.*
- 10. Дайте определения показателям свойств грунтов и запишите формулы для их определения.*

2. СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ: ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Контроль— это процесс, направленный на достижение поставленной цели, осуществляемый путем наблюдения за управляемой системой, в ходе которого обеспечивается ее оптимальное функционирование за счет своевременного обнаружения и разрешения возникающих проблем до того как они станут трудно устранимыми.

Строительный контроль выполняют непосредственно в процессе строительства, реконструкции, капитального ремонта, ремонта и содержания сооружения для оценки соответствия качества выполненных работ требованиям нормативных документов, данным проектной документации, а также результатам инженерных изысканий [20].

Особое место в деятельности производства занимает контроль качества продукции. Терминология контроля качества стандартизирована ГОСТ 16504-81 [21]. Эти термины являются обязательными и должны применяться в документации всех видов, они должны соответствовать требованиям ГОСТ 32731-2014 [22], регламентирующим правила выполнения строительного контроля. Для каждого понятия установлен один стандартизованный термин, а применение синонимов запрещено [21]. Поэтому мы будем применять терминологию ГОСТ 16504-81 [21] в необходимом нам объеме.

При планировании контроля определяют и устанавливают [20, 22]:

1. Объекты технического контроля, к которым относят подвергаемую контролю продукцию, процессы ее создания, применения, транспортирования, хранения, технического обслуживания и ремонта, а также соответствующую техническую документацию [21]. Таким образом, к объектам технического контроля качества земляного полотна относят: его конструкцию, технологические операции по его сооружению и всю документацию, включая акты отбора проб и протокола испытаний грунтов [22].

2. Объем контроля, согласно [21], определяющийся количеством объектов и совокупностью контролируемых признаков, устанавливаемых для проведения контроля. Под термином «контролируемый признак» понимается характеристика объекта, подвергаемая контролю [21].

3. Систему контроля, представляющую собой совокупность средств контроля, исполнителей и определенных объектов контроля, взаимодействующих по правилам, установленным соответствующей нормативной документацией, определяя необходимые оборудование и приборы [21].

4. Методику испытаний, являющуюся организационно-методическим документом, обязательным к выполнению, и включающим [21]:

- метод испытаний;
- средства и условия испытаний;
- отбор проб;
- алгоритмы выполнения операций по определению одной или нескольких взаимосвязанных характеристик свойств объекта;
- формы представления данных и оценивания точности, достоверности результатов;
- требования техники безопасности и охраны окружающей среды.

5. Методы контроля, под которыми понимают применение определенных принципов и средств контроля [21], подразделяющихся:

- на метод разрушающего контроля, применение которого может нарушить пригодность объекта к использованию [21];
- метод неразрушающего контроля, применение которого не должно нарушить пригодность объекта к использованию [21].

Строительные правила СП 78.13330.2012 [23] регламентирует требуемые значения проверяемых параметров и их предельные отклонения, а также сроки проведения контроля.

2.1. Виды контроля качества, термины и определения

Виды контроля качества и их определения приведены в табл. 2.1 [21].

Таблица 2.1. Классификация видов контроля по основным признакам [21]

Признак контроля	Вид контроля	Определение
1	2	3
1. Стадия создания и существования продукции	Производственный	Выполняется на стадии производства
	Эксплуатационный	Выполняется на стадии эксплуатации продукции
2. Этап процесса производства	Входной	Контроль продукции поставщика, поступившей к потребителю или заказчику и предназначенной для использования при изготовлении, ремонте или эксплуатации продукции

Окончание табл. 2.1

1	2	3
2. Этап процесса производства	Операционный	Контроль продукции или процесса во время выполнения или после завершения технологической операции
	Приемочный	Контроль продукции, по результатам которого принимается решение о ее пригодности к поставкам и (или) использованию
	Инспекционный	Контроль, осуществляемый специально уполномоченными лицами с целью проверки эффективности ранее выполненного контроля
3. Полнота охвата	Сплошной	Контроль каждой единицы продукции в партии
	Выборочный	Проверка продукции с использованием выборки [24]
	Летучий	Контроль, проводимый в случайное время
	Непрерывный	Контроль, при котором поступление информации о контролируемых параметрах происходит непрерывно
	Периодический	Контроль, при котором поступление информации о контролируемых параметрах происходит через установленные интервалы времени
4. Влияние на объект	Разрушающий	Контроль, который может нарушить пригодность объекта к применению
	Неразрушающий	Контроль, который не нарушает пригодность объекта к применению
5. Применение средств	Измерительный	Контроль, осуществляемый с применением средств измерений
	Регистрационный	Контроль, осуществляемый регистрацией значений контролируемых параметров продукции или процессов
	Органолептический	Контроль, при котором первичная информация воспринимается органами чувств
	Визуальный	Органолептический контроль, осуществляемый органами зрения
	Технический осмотр	Контроль, осуществляемый в основном при помощи органов чувств и, в случае необходимости, средств контроля, номенклатура которых установлена соответствующей документацией

Испытания подразделяются на виды, которым даны соответствующие определения, представленные в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Классификация, виды испытаний по основным признакам [21]

Признаки испытаний	Виды испытаний	Определения
1	2	3
1. Условия и место проведения испытаний	Лабораторные	Испытания объекта, проводимые в лабораторных условиях
	Стендовые	Испытания объекта, проводимые на испытательном оборудовании
	Полигонные	Испытания объекта, проводимые на испытательном полигоне
	Натурные	Испытания объекта в условиях, соответствующих условиям его использования по прямому назначению с непосредственным оцениванием или контролем определяемых характеристик свойств объекта
	С использованием моделей	Испытания, выполняемые на модели объекта
	Эксплуатационные	Испытания объекта, проводимые при эксплуатации
2. Продолжительность испытаний	Нормальные	Испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимого объема информации о характеристиках свойств объекта в такой же интервал времени, как и в предусмотренных условиях эксплуатации
	Ускоренные	Испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимой информации о характеристиках свойств объекта в более короткий срок, чем при нормальных испытаниях
	Сокращенные	Испытания, проводимые по сокращенной программе
3. Вид воздействия	Механические	Испытания на воздействие механических факторов
	Климатические	Испытания на воздействие климатических факторов
	Термические	Испытания на воздействие термических факторов
	Радиационные	Испытания на воздействие радиационных факторов

Продолжение табл. 2.2

1	2	3
3. Вид воздействия	Радиационные	Испытания на воздействие радиационных факторов
	Электромагнитные	Испытания на воздействие электромагнитных полей
	Электрические	Испытания на воздействие электрического напряжения, тока или поля
	Магнитные	Испытания на воздействие магнитного поля
	Химические	Испытания на воздействие специальных сред
	Биологические	Испытания на воздействие биологических факторов
4. Результат воздействия	Неразрушающие	Испытания с применением неразрушающих методов контроля
	Разрушающие	Испытания с применением разрушающих методов контроля
	Испытания на прочность	Испытания, проводимые для определения значений воздействующих факторов, вызывающих выход значений характеристик свойств объекта за установленные пределы или его разрушение
	Испытания на устойчивость	Испытания, проводимые для контроля способности изделия выполнять свои функции и сохранять значения параметров в пределах установленных норм во время действия на него определенных факторов
5. Определяемые характеристики объекта	Функциональные	Испытания, проводимые с целью определения значений показателей назначения объекта
	Испытания на надежность	Испытания, проводимые для определения показателей надежности в заданных условиях
	Испытания на транспортабельность	Испытания, проводимые для определения показателей транспортабельности
	Граничные	Испытания, проводимые для определения зависимостей между предельно допустимыми значениями параметров объекта и режимом эксплуатации

Окончание табл. 2.2

1	2	3
5. Определяемые характеристики объекта	На безопасность	Испытания, проводимые для определения показателей безопасности
	Технологические	Испытания, проводимые при изготовлении продукции с целью оценки ее технологичности

Контроль качества строительства, реконструкции, капитального ремонта земляного полотна всегда связан с измерительным контролем, который могут выполнять аттестованные организации и подразделения. Аттестация испытательных организаций и подразделений представляет собой удостоверение компетентности испытательных организаций и подразделений и их оснащенности, обеспечивающих проведение на должном техническом уровне всех предусмотренных нормативно-технической документацией испытаний закрепленных видов продукции и (или) видов испытаний [21]. Аттестованные лаборатории применяют аттестованное испытательное оборудование. Термин «аттестация испытательного оборудования» означает определение нормированных характеристик точности испытательного оборудования, их соответствия требованиям нормативно-технической документации и установление пригодности этого оборудования к эксплуатации [21].

2.2. Контролируемые параметры земляного полотна, их предельные отклонения и правила оценки качества земляных работ

В соответствии с определением СП 34.13330.2012 [25, п. 3.64] под термином «земляное полотно» понимают геотехническую конструкцию, выполняемую в виде насыпей, выемок или полунасыпей-полувыемок, служащую для обеспечения проектного пространственного расположения проезжей части дороги и в качестве грунтового основания (подстилающего грунта) конструкции дорожной одежды.

Насыпь представляет собой земляное сооружение из насыпного грунта, в пределах которого вся поверхность земляного полотна расположена выше уровня земли [25, п. 3.56]. Земляное сооружение, которое выполнено путем срезки естественного грунта по заданному профилю, так что вся поверхность земляного полотна расположена ниже поверхности земли, называется «выемка» [25, п. 3.57].

Земляное полотно в насыпи включает в себя:

- рабочий слой, являющийся верхней частью полотна, расположенной в пределах от низа дорожной одежды до уровня, соответствующего $2/3$ глубины промерзания конструкции, но не менее 1,5 м, считая от поверхности покрытия [25, п. 3.65];

- откосы, каждый из которых представляет собой боковую наклонную поверхность, ограничивающую искусственное земляное сооружение (в данном случае насыпь) [25, п. 3.58];

- основание насыпи – это массив грунта, располагающийся ниже насыпного слоя и находящийся в условиях естественного залегания [25, п. 3.69].

Земляное полотно в выемке состоит из откосов, рабочего слоя и основания выемки. Под основанием выемки понимают массив грунта, расположенный ниже границы рабочего слоя [25, п. 3.70].

Контролируемые параметры грунтов и земляного полотна при его сооружении регламентируются СП 78.13330.2012 [23, п. 7.12].

Согласно указаниям этого документа:

1. До начала работ необходимо проверить соответствие принятых в проекте и действительных показателей состава и состояния грунтов в карьерах, резервах, выемках, естественных основаниях:

- крупность частиц;
- пластичность глинистых грунтов;
- влажность и плотность грунтов.

2. При операционном контроле качества необходимо проверить:

- толщину снимаемого плодородного слоя грунта;
- плотность грунта в основании земляного полотна;
- влажность используемого грунта;
- толщину отсыпаемых слоев;
- однородность грунта в слоях насыпи;
- плотность грунта в слоях насыпи;
- ровность поверхности;
- поперечный профиль земляного полотна (расстояние между осью и бровкой, поперечный уклон, крутизну откосов);
- правильность выполнения водоотводных и дренажных сооружений, прослоек, укрепления откосов и обочин;
- качество укладки геосинтетических материалов и размер нахлеста полотен в соответствии с технологическим регламентом.

Допускаемые отклонения контролируемых геометрических параметров и плотности грунта регламентируются СП 78.13330.2012 [23, прил. А] и приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3. Регламент оценки качества работ по сооружению земляного полотна и предельные отклонения контролируемых параметров [23, табл. А.1]

Отдельный вид работ по [23, п. А.1.1]	Контролируемые параметр	Значения нормативных требований
1	2	3
1. Подготовка основания земляного полотна	1.1. Толщина снимаемого плодородного слоя грунта	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах до $\pm 40\%$, остальные – до $\pm 20\%$
	1.2. Снижение плотности естественного основания	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах не более 4%, остальные должны быть не ниже проектных значений
2. Возведение насыпей и разработка выемок	2.1. Снижение плотности слоя земляного полотна ²³	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах не более 4%, а остальные должны быть не ниже проектных значений
	2.2. Высотные отметки продольного профиля	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах до ± 20 мм; остальные – до ± 10 мм (± 50 мм) ²⁴
	2.3. Расстояния между осью и бровкой земляного полотна	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах до ± 20 см, остальные ± 10 см
	2.4. Поперечные уклоны	Не более 1% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах от минус 0,010 до 0,015, остальные – до $\pm 0,005$ ($\pm 0,010$)

²³ При отсыпке земляного полотна из скальных (крупнообломочных) грунтов этот показатель для оценки качества не используется.

²⁴ Значения, приведенные в скобках, относятся к видам работ, выполняемым без автоматических систем поддержания заданных высотных отметок и уклона для дорог категорий IV и V общего пользования и ведомственных.

Окончание табл. 2.3

1	2	3
2. Возведение насыпей и разработка выемок	2.5. Уменьшение крутизны откосов	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах до 20%, остальные – до 10%
3. Устройство водоотвода	3.1. Увеличение поперечных размеров кюветов, нагорных и других канав (по дну)	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах не более 10 см, остальные – не более 5 см
	3.2. Глубина кюветов, нагорных и других канав (при условии обеспечения стока)	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах не более ± 10 см, остальные – до ± 5 см
	3.3. Поперечные размеры дренажей	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах не более ± 10 см, остальные – до ± 5 см
	3.4. Продольные уклоны дренажей	Не более 1% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах не более $\pm 0,002$, остальные – до $\pm 0,001$
	3.5. Ширина насыпных берм	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах не более ± 30 см, остальные – до ± 15 см
4. Устройство присыпных обочин	4.1. Снижение плотности грунта в обочинах	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах не более 4 %, остальные должны быть не ниже проектных значений
	4.2. Толщина укрепления	Не более 1% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах от минус 22 до плюс 30 мм, остальные – до ± 15 мм
	4.3. Поперечные уклоны обочин	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах от минус 0,010 до 0,015, остальные – до $\pm 0,005$ ($\pm 0,010$)

Из анализа данных табл. 2.3 следует, что определение геометрических параметров земляного полотна выполняются в условиях, соответствующих условиям его использования по прямому назначению с непосредственным оцениванием и контролем характеристик. Следовательно, работы по определению геометрических параметров земляного полотна необходимо отнести к натурным испытаниям. Показатели свойств грунтов, как правило, определяют в лаборатории, поэтому их следует классифицировать как лабораторные испытания.

Степень уплотнения земляного полотна определяется величиной коэффициента уплотнения грунта, который рассчитывается отношением фактической плотности сухого грунта в конструкции к максимальной плотности того же сухого грунта, определяемой в лаборатории при испытании методом стандартного уплотнения [25, п. 3.71].

Отметим, что уплотнить грунт до определенной величины коэффициента уплотнения возможно только в случае, если его влажность находится в определенном диапазоне. Пригодность грунта для уплотнения определяется интервалом варьирования коэффициента увлажнения, значение которого рассчитывают отношением влажности грунта к его оптимальной влажности. Под оптимальной влажностью понимается влажность грунта, при которой он уплотняется до максимальной плотности при испытании методом стандартного уплотнения.

Наименьшие значения коэффициента уплотнения регламентируются СП 34.13330.2012 [25, табл. 7.3], их значения приведены нами в табл. 24.

Таблица 2.4. **Наименьшие значения коэффициентов уплотнения**

Элементы земляного полотна	Глубина расположения от поверхности покрытия, м	Тип дорожной одежды	Дорожно-климатическая зона	Наименьший коэффициент уплотнения
1	2	3	4	5
Рабочий слой	$z \leq 1,5$	Капитальный	I	0,96 – 0,98
			II и III	0,98 – 1,00
			IV и V	0,95 – 0,98
		Облегченный	I	0,93 – 0,95
			II и III	0,95 – 0,98
			IV и V	0,95
Неподтопляемая часть насыпи	$1,5 < z \leq 6,0$	Капитальный	I	0,93 – 0,95
			II и III	0,95
			IV и V	0,95

Окончание табл. 2.4

1	2	3	4	5
Неподтопляемая часть насыпи	$1,5 < z \leq 6,0$	Облегченный	I	0,93
			II и III	0,95
			IV и V	0,90
	$z > 6,0$	Капитальный	I	0,95
			II и III	0,98
			IV и V	0,95
		Облегченный	I	0,93
			II и III	0,95
			IV и V	0,90
Подтопляемая часть насыпи	$1,5 < z \leq 6,0$	Капитальный	I	0,95 – 0,96
			II и III	0,95 – 0,98
			IV и V	0,95
		Облегченный	I	0,93 – 0,95
			II и III	0,95
			IV и V	0,95
	$z > 6,0$	Капитальный	I	0,96
			II и III	0,98
			IV и V	0,98
		Облегченный	I	0,95
			II и III	0,95
			IV и V	0,95
Рабочий слой выемки ниже зоны сезонного промерзания	$z \leq 1,2$	Капитальный	I	–
			II и III	0,95
			IV и V	–
		Облегченный	I	–
			II и III	0,92 – 0,95
			IV и V	–
	$z \leq 0,8$	Капитальный	I	–
			II и III	–
			IV и V	0,95
		Облегченный	I	–
			II и III	–
			IV и V	0,90 – 0,92

Примечание. Большие значения коэффициентов уплотнения следует принимать при цементобетонных покрытиях и цементогрунтовых основаниях, а также при дорожных одеждах облегченного типа, меньшие значения – во всех остальных случаях.

В табл. 2.5 приведены интервалы варьирования допускаемой величины коэффициента увлажнения грунта, регламентируемые СП 78.13330.2012 [23, п. 7.3.9, табл. 1].

Таблица 2.5. Допускаемые значения коэффициентов увлажнения

Вид грунтов	Коэффициент увлажнения при требуемом коэффициенте уплотнения		
	0,9	0,95	0,98 – 1,00
Пески пылеватые	Не нормируется	Не более 1,60	Не более 1,35
Супеси легкие	0,70 – 1,60	0,75 – 1,35	0,80 – 1,25
Супеси пылеватые, суглинки легкие	0,75 – 1,40	0,80 – 1,20	0,85 – 1,15
Суглинки тяжелые, глины	0,85 – 1,20	0,90 – 1,10	0,95 – 1,05

Объем и режим контроля регламентируются СП 78.13330.2012 [23]. В соответствии с требованиями [23, п. 7.12.3 – п. 7.12.8].

1. Проверка правильности размещения оси земляного полотна выполняется не реже чем через 100 м.

2. Проверка высотных отметок, поперечных профилей земляного полотна, обочин, водоотводных и дренажных сооружений и толщин слоев выполняется не реже чем через 100 м (в трех точках на поперечнике), как правило, в местах размещения знаков рабочей разбивки с помощью геодезических инструментов и шаблонов.

3. Плотность грунта контролируется в каждом технологическом слое по оси земляного полотна и на расстоянии 1,5–2,0 м от бровки, а при ширине слоя более 20 м – также в промежутках между ними. Контроль плотности грунта проводится на каждой сменной захватке работы уплотняющих машин, но не реже чем через 200 м при высоте насыпи до 3 м и не реже чем через 50 м при высоте насыпи более 3 м.

Контроль плотности верхнего слоя следует проводить не реже чем через 50 м. Дополнительный контроль плотности необходимо проводить в каждом слое засыпки пазух труб, над трубами, в конусах и в местах сопряжения с мостами. Контроль плотности следует проводить на глубине, равной $1/3$ толщины уплотняемого слоя, но не менее 8 см. Отклонения от требуемого значения коэффициента уплотнения в сторону уменьшения допускаются не более чем в 10% определений от их общего числа и не более чем на 0,04.

4. Контроль влажности используемого грунта следует проводить, как правило, в месте его получения (в резерве, карьере) не реже одного раза в смену и обязательно при выпадении осадков.

5. Плотность и влажность грунта определяют по ГОСТ 5180–84 [11], но при операционном контроле допускается использование ускоренных и полевых экспресс-методов и приборов.

6. Однородность грунта контролируется визуально, а при изменении однородности грунта проверяют его тип, вид и разновидность по ГОСТ 25100–2011 [1].

7. Ровность поверхности земляного полотна оценивают по соответствию высотных отметок требованиям проекта и визуальной оценкой его состояния. Высотные отметки определяют нивелированием с шагом не реже чем через 50 м по оси и бровкам. Поверхность основания земляного полотна и промежуточных слоев насыпи в период строительства не должна иметь местных углублений, в которых может застаиваться вода.

8. Соответствие состава песка, используемого для вертикальных дренажей, проектным требованиям определяют в карьере один раз в смену.

Исходя из требований к объему контроля, определяют общее число измерений N параметра грунта или земляного полотна, которое принимается за 100%. После выполнения измерений подсчитывают число исходов опыта n , превышающих допускаемое значение. Далее вычисляют это количество исходов x , выраженное в процентах. Расчет ведут по формуле

$$x = \frac{100 \cdot n}{N}. \quad (2.1)$$

Сопоставляя x с требованиями табл. 2.3, делают вывод о качестве.

2.3. Статистическая обработка результатов определения показателей свойств грунтов

В ряде случаев, как правило, при исследовательских работах или решения спорных вопросов помимо оценки качества работ возникает необходимость в определении статистик определяемого параметра или показателя свойств грунта. В этих случаях применяют правила статистической обработки результатов измерений и испытаний.

Методы математической статистики, применяемые для обработки результатов испытаний грунтов, устанавливает стандарт ГОСТ 20522–2012 [26]. Эти методы применяют для статистической обработки результатов определений физических и механических (прочностных и деформационных) характеристик всех грунтов, классифицируемых по ГОСТ 25100–2011, а также для выделения инженерно-геологических и расчетных грунтовых элементов.

Под термином «инженерно-геологический элемент» (ИГЭ) понимают основную грунтовую единицу, используемую при инженерно-

геологической схематизации грунтового объекта [26, п. 3.11]. В качестве ИГЭ принимают некоторый объем грунта одного и того же происхождения, подвида или разновидности при условии, что значения характеристик грунта изменяются в пределах элемента случайно (незакономерно) либо наблюдающаяся закономерность такова, что ею можно пренебречь [26, п. 4.6].

Под термином «расчетный грунтовый элемент» (РГЭ) понимают основную грунтовую единицу, выделяемую с учетом применяемого при проектировании грунтового объекта расчетного или экспериментального метода [26, п. 3.12]. В качестве РГЭ принимают некоторый объем грунта необязательно одного и того же происхождения, подвида или разновидности, в пределах которого нормативные и расчетные значения характеристик по условиям применяемого расчетного или экспериментального метода проектирования объекта могут быть постоянными или закономерно изменяющимися по направлению (чаще всего по глубине). РГЭ может включать в себя один или несколько ИГЭ. Комплекс РГЭ используют при создании расчетной геомеханической модели объекта [26, п. 4.6].

При наличии закономерного изменения характеристик грунтов в каком-либо направлении решают вопрос о необходимости разделения предварительно выделенного ИГЭ на два или несколько новых ИГЭ.

Для этого проверяют условие

$$V < V_{\text{доп}}, \quad (2.2)$$

где V – коэффициент вариации, д.е.; $V_{\text{доп}}$ – допустимое значение коэффициента вариации, принимаемое для физических характеристик грунта $V_{\text{доп}}=0,15$, а для механических характеристик грунта и для параметров зондирования $V_{\text{доп}}=0,30$.

В случае выполнения условия (2.2) дополнительное разделение ИГЭ не проводят, а если условие (2.2) не выполняется, ИГЭ делят на два или несколько новых ИГЭ. Это разделение ИГЭ проводят так, чтобы условие выполнялось (2.2) во вновь выделенных ИГЭ.

Коэффициентом вариации называют меру отклонения опытных данных от выборочного среднего значения, выражаемую в долях единицы или процентах [26, п. 3.7].

Для проверки необходимости разделения ИГЭ на два новых элемента применяют t -критерий (критерий Стьюдента²⁵). Для этого проверяют выполнение условия t -критерия, которое имеет вид [26, п. В.3]

²⁵ Стьюдент- псевдоним Уильяма Сили Госсета (William Sealy Gosset), работавшего два года (1906 – 1907) в биометрической лаборатории Карла Пирсона, а позднее под псевдонимом *Student* публиковал статьи в журнале К. Пирсона «Биометрика», в которых был предложен t -критерий и распределение Стьюдента.

$$t \geq t_{\alpha}, \quad (2.3)$$

где t_{α} – критическое значение распределения Стьюдента, которое также называют коэффициентом нормированного отклонения, принимаемое при двусторонней доверительной вероятности 0,95.

При выполнении условия (2.3) проверяемый ИГЭ разделяют на две новые выборки, а если условие (2.3) не выполняется, то разделение ИГЭ не производят.

Возможность объединения двух ИГЭ в один РГЭ вычисляют на основании проверки условий двух критериев t -критерия и F -критерия (критерий Фишера²⁶).

Проверяемые условия имеют вид [26, п. В.3]

$$t < t_{\alpha}; F < F_{\alpha}, \quad (2.4)$$

где F_{α} – критическое значение F -распределения.

При одновременном выполнении условий (2.4) два проверяемых ИГЭ объединяют в один РГЭ, а если хотя бы одно из условий (2.4) не выполняется, то объединение двух ИГЭ в один РГЭ не производят.

Расчет статистики t выполняется по формуле

$$t = \frac{|x_{1cp} - x_{2cp}|}{\sqrt{n_1 \cdot S_1^2 + n_2 \cdot S_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (2.5)$$

где x_1 и x_2 – средние значения характеристики в двух новых ИГЭ; S_1 и S_2 – среднеквадратические отклонения характеристики в двух выборках (новых ИГЭ); n_1 и n_2 – число определений характеристики в каждой выборке (ИГЭ).

Расчет статистики F ведут вычислением отношения наибольшей к наименьшей дисперсии или отношениям равных дисперсиям квадратов среднеквадратических отклонений по формуле

$$F = \frac{D_1}{D_2} = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad \text{или} \quad F = \frac{D_2}{D_1} = \frac{S_2^2}{S_1^2}, \quad (2.6)$$

где D_1 и D_2 – дисперсии двух выборок, которые равны квадратам соответствующих среднеквадратических отклонений.

При выполнении условия (2.3) проверяемый ИГЭ разделяют на две новые выборки, а если условие (2.3) не выполняется, то разделение ИГЭ не производят.

²⁶ Фишер, Рональд Эйлмер (*Fishe, Ronald Aylmer*)- выдающийся английский статистик, заложивший основы современной математической статистики, в частности z – распределение Фишера и F – распределение Фишера – Снедекора.

Среднеквадратическим отклонением называют меру отклонения опытных данных от выборочного среднего значения или функциональной зависимости [26, п. 3.6]. Среднеквадратическое отклонение имеет такую же размерность, как и определяемая характеристика, среднее значение которой характеризуется средним выборочным значением.

Дисперсией случайной величины называют меру разброса данной случайной величины, то есть её отклонение от математического ожидания (среднего выборочного значения). Размерность дисперсии определяется квадратом размерности выборочной характеристики, среднее значение которой является выборочным математическим ожиданием.

Среднее выборочное значение (среднее значение) представляет собой среднеарифметическое частных значений, образующих выборку величин, независимых друг от друга и от пространственных координат [26, п. 3.5].

Величину t_α находят по табл. 2.6 [26, табл. E.2], а значение F_α определяют по табл. 2.7 [26, табл. E.5].

Таблица 2.6. Значения коэффициента нормированного отклонения t_α

Число степеней свободы	Значения коэффициента t_α при доверительной вероятности					
	Односторонняя доверительная вероятность					
	0,85	0,90	0,95	0,975	0,98	0,99
	Двусторонняя доверительная вероятность					
	0,70	0,80	0,90	0,95	0,96	0,98
1	2	3	4	5	6	7
3	1,25	1,64	2,35	3,18	3,45	4,54
4	1,19	1,53	2,13	2,78	3,02	3,75
5	1,16	1,48	2,01	2,57	2,74	3,36
6	1,13	1,44	1,94	2,45	2,63	3,14
7	1,12	1,41	1,90	2,37	2,54	3,00
8	1,11	1,40	1,86	2,31	2,49	2,90
9	1,10	1,38	1,83	2,26	2,44	2,82
10	1,10	1,37	1,81	2,23	2,40	2,76
11	1,09	1,36	1,80	2,20	2,36	2,72
12	1,08	1,36	1,78	2,18	2,33	2,68
13	1,08	1,35	1,77	2,16	2,30	2,65
14	1,08	1,34	1,76	2,15	2,28	2,62
15	1,07	1,34	1,75	2,13	2,27	2,60
16	1,07	1,34	1,75	2,12	2,26	2,58
17	1,07	1,33	1,74	2,11	2,25	2,57

Окончание табл. 2.6.

1	2	3	4	5	6	7
18	1,07	1,33	1,73	2,10	2,24	2,55
19	1,07	1,33	1,73	2,09	2,23	2,54
20	1,06	1,32	1,72	2,09	2,22	2,53
25	1,06	1,32	1,71	2,06	2,19	2,49
30	1,05	1,31	1,70	2,04	2,17	2,46
40	1,05	1,30	1,68	2,02	2,14	2,42
60	1,05	1,30	1,67	2,00	2,12	2,39

Примечание. При проверке t -критерия, записанного условиями (2.3) и (2.4), значения коэффициента t_α принимают для двусторонней доверительной вероятности $\alpha=0,95$, то есть по столбцу 5.

Таблица 2.7. Значения коэффициента нормированного отклонения F_α

Число степеней свободы K_2	Значение критерия F_α при двусторонней доверительной вероятности $\alpha=0,95$ и числе степеней свободы K_1 , равном											
	5	6	7	8	10	12	14	16	20	30	40	60
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5	5,05	4,95	4,88	4,82	4,74	4,68	4,64	4,60	4,56	4,50	4,46	4,43
6	4,39	4,28	4,21	4,15	4,06	4,00	3,96	3,92	3,87	3,81	3,77	3,74
7	3,97	3,87	3,79	3,73	3,63	3,57	3,52	3,49	3,44	3,38	3,34	3,30
8	3,69	3,58	3,50	3,44	3,34	3,28	3,23	3,20	3,15	3,08	3,05	3,01
9	3,48	3,37	3,29	3,23	3,13	3,07	3,02	2,98	2,93	2,86	2,82	2,79
10	3,33	3,22	3,14	3,07	2,97	2,91	2,86	2,82	2,77	2,70	2,67	2,62
11	3,20	3,09	3,01	2,95	2,86	2,79	2,74	2,70	2,65	2,57	2,53	2,49
12	3,11	3,00	2,92	2,85	2,76	2,69	2,64	2,60	2,54	2,46	2,42	2,38
13	3,02	2,92	2,84	2,77	2,67	2,60	2,55	2,51	2,46	2,38	2,34	2,30
14	2,96	2,85	2,77	2,70	2,60	2,53	2,48	2,44	2,39	2,31	2,27	2,22
15	2,90	2,79	2,70	2,64	2,55	2,48	2,43	2,39	2,33	2,25	2,21	2,16
16	2,85	2,74	2,66	2,59	2,49	2,42	2,37	2,33	2,28	2,20	2,16	2,11
17	2,81	2,70	2,62	2,55	2,45	2,38	2,33	2,29	2,23	2,15	2,11	2,06
18	2,77	2,66	2,58	2,51	2,41	2,34	2,29	2,25	2,19	2,11	2,07	2,02
19	2,74	2,63	2,55	2,48	2,38	2,31	2,26	2,21	2,15	2,07	2,02	1,98
20	2,71	2,60	2,52	2,45	2,35	2,28	2,23	2,18	2,12	2,04	1,99	1,95
22	2,66	2,55	2,47	2,40	2,30	2,23	2,18	2,13	2,07	1,98	1,93	1,89
24	2,62	2,53	2,41	2,36	2,26	2,18	2,13	2,09	2,04	1,94	1,89	1,84
26	2,59	2,47	2,39	2,32	2,22	2,15	2,10	2,05	1,99	1,90	1,85	1,80
28	2,56	2,44	2,36	2,29	2,19	2,19	2,06	2,02	1,96	1,87	1,81	1,77
30	2,53	2,42	2,34	2,27	2,16	2,09	2,04	1,99	1,93	1,84	1,79	1,74
40	2,45	2,34	2,25	2,18	2,08	2,00	1,95	1,90	1,84	1,74	1,69	1,64
50	2,40	2,29	2,20	2,13	2,02	1,95	1,90	1,85	1,78	1,69	1,63	1,58
60	2,37	2,25	2,17	2,10	1,99	1,92	1,87	1,82	1,75	1,65	1,59	1,53

Примечание. Число степеней свободы K_1 и K_2 определяют разностью чисел определений n_1 и n_2 характеристик x_1 и x_2 и единицы, то есть $K_1 = n_1 - 1$ и $K_2 = n_2 - 1$.

Под термином «вероятность» понимают числовую характеристику возможности появления какого-либо события в тех или иных определенных условиях, которые могут повторяться неограниченное число раз. Вероятность измеряется в долях единицы или процентах. Вероятности, с которыми характеристики, являющиеся случайными величинами, принимают те или иные значения, образуют распределение вероятностей, для установления которого по выборочным данным оценивают один или несколько параметров распределения [26, п. 3.1].

Под доверительной вероятностью понимают вероятность того, что доверительный интервал накроет неизвестное истинное значение параметра, оцениваемого по выборочным данным [26, п. 3.3].

Доверительный интервал представляет собой интервал, вычисленный по выборочным данным, который с заданной вероятностью (доверительной) накрывает неизвестное истинное значение оцениваемого параметра распределения [26, п. 3.2].

Числом степеней свободы является число независимых наблюдений, равное числу определений характеристики за вычетом числа оцениваемых статистических параметров [26, п. 3.9].

Статистическая обработка результатов испытания грунтов выполняется набором последовательных действий.

1. Определение нормативного значения любой физической или механической характеристики производят как определение выборочного математического ожидания, то есть среднеарифметического

$$x_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2.7)$$

где i и n – номер и общее число определений; x_i – частное значение характеристики при i -м определении.

2. Вычисление среднеквадратического отклонения выполняют по формуле [26, п. 6.3]

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_{\text{ср}} - x_i)^2}. \quad (2.8)$$

3. Проверка наличия в выборке грубых ошибок, и при ее обнаружении исключается из выборочных данных. Исключению подлежит то частное значение характеристики x_i , для которого выполняется условие

$$|x_{\text{ср}} - x_i| > v \cdot S, \quad (2.9)$$

где v – статистический критерий, принимаемый в зависимости от числа определений по табл. 2.8 [26, табл. Е.1].

Таблица 2.8. Значения статистического критерия v

n	v	n	v	n	v
1	2	3	4	5	6
3	1,41	19	2,75	35	3,02
4	1,71	20	2,78	36	3,03
5	1,92	21	2,80	37	3,04
6	2,07	22	2,82	38	3,05
7	2,18	23	2,84	39	3,06
8	2,27	24	2,86	40	3,07
9	2,35	25	2,88	41	3,08
10	2,41	26	2,90	42	3,09
11	2,47	27	2,91	43	3,10
12	2,52	28	2,93	44	3,11
13	2,56	29	2,94	45	3,12
14	2,60	30	2,96	46	3,13
15	2,64	31	2,97	47	3,14
16	2,67	32	2,98	48	3,14
17	2,70	33	3,00	49	3,15
18	2,73	34	3,01	50	3,16

Обнаруженная грубая ошибка исключается из опытных данных, а вся процедура статистической обработки повторяется заново, то есть для новой выборки производится расчет статистик по формулам (2.7) – (2.9). Проверку выборки на наличие грубых ошибок ведут до тех пор, пока условие (2.9) не перестанет выполняться. После исключения грубых ошибок или при констатации факта их отсутствия последовательность действий статистической обработки продолжают.

4. Определение коэффициента вариации производят по формуле

$$V = \frac{S}{x_{\text{ср}}}. \quad (2.10)$$

5. Показатель точности среднего значения вычисляют по формуле

$$\rho_{\alpha} = \frac{t_{\alpha} \cdot V}{\sqrt{n}}. \quad (2.11)$$

В формуле (2.11) величину коэффициента t_{α} принимают по табл. 2.6, но для односторонней доверительной вероятности.

6. Коэффициент надежности по грунту определяют по формуле

$$\gamma_{\alpha} = \frac{1}{1 - \rho_{\alpha}}. \quad (2.12)$$

Для того чтобы обеспечивалась большая надежность основания или сооружения, в формуле (2.12) перед величиной ρ_{α} может быть принят знак «+».

7. Расчетное значение характеристики грунта определяют по формуле

$$x = \frac{x_{\text{ср}}}{\gamma_{\alpha}}. \quad (2.13)$$

Процедура статистической обработки данных, состоящая в последовательном вычислении статистик по формулам (2.7) – (2.13), может выполняться в том случае, если закон распределения случайной величины соответствует нормальному распределению, которое также называют распределением Гаусса (рис. 2.1, з). Для проверки нормальности закона распределения применяют критерии согласия. Эти критерии можно подразделить на приближенные (грубые), применяемые к малым выборкам, включающим относительно небольшой массив данных и более точные, используемые для проверки распределения случайной величины в больших выборках данных.

Приблизительную проверку нормальности распределения можно произвести по методу Лотера Закса (рис. 2.1, д) [27]. Метод заключается в сравнении отношения размаха варьирования к среднеквадратическому отклонению с критическими границами этой характеристики при принятом уровне значимости [27].

Процедура проверки и правила расчета статистик по этому методу приведена в табл. 2.9.

Таблица 2.9. Процедура проверки нормальности распределения по методу Л. Закса [27]

Характеристика	Формула для расчета
Размах варьирования	$L_x = x_{\text{max}} - x_{\text{min}}$
Среднеквадратическое отклонение	$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{ср}})^2}$
Оцениваемый параметр	$R = L_x / S$
Критерий нормальности распределения	$r_{\text{min}} \leq R \leq r_{\text{max}}$

Используя таблицу критических значений [27], для принятого уровня значимости от 0 до 10% определяют критические значения r_{min} и r_{max} . С установленными критическими значениями сравнивают оцениваемый параметр R , и если его величина попадает в диапазон от r_{min} до r_{max} , то гипотезу нормальности распределения принимают для выбранного уровня значимости.

Уровень значимости представляет собой вероятность возникновения ошибки первого рода при проверке нулевой гипотезы. В техни-

ке уровень значимости обычно принимается 0,02 – 0,1. Однако согласно рекомендациям [28] для метода Л. Закса важным является подтверждение гипотезы с уровнем значимости 0,1.

Другая приблизительная проверка нормальности закона распределения выполняется сравнением выборочного значения коэффициента вариации с его предельным значением, то есть проверяется условие (2.2). По данным статистической литературы предельное значение коэффициента вариации принимают 33%, или 0,33 [28]. Так как ГОСТ 20522–2012 [26] ограничивает предельное значение коэффициента вариации меньшими значениями, то при выполнении условия (2.2) гипотеза о нормальности распределения принимается. Это значит, что для выделенных по условию (2.2) ИГЭ процедура статистической обработки по формулам (2.7) – (2.13) применима.

Методы подбора теоретического распределения основаны на оценках эмпирического распределения [29]. Одним из таких методов является метод моментов [30]. При использовании этого метода определяют начальные и центральные моменты по выборке и сгруппированным данным. Вначале определяют смещенные оценки моментов, а потом переходят к несмещенным оценкам [30].

Формулы для определения оценок моментов даны в табл. 2.10.

Таблица 2.10. **Формулы для расчета оценок моментов [39]**

Оценка моментов	Формула для расчета оценки моментов
Смещенный крайовой момент первого порядка	$M_1 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$
Смещенные оценки центральных моментов порядка k по вариационному ряду	$M_k = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - M_1)^k$
Несмещенные оценки центральных моментов по вариационному ряду	$M_{\text{нс1}} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - M_1);$ $M_{\text{нс2}} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - M_1)^2;$ $M_{\text{нс3}} = \frac{n \cdot M_3}{(n-1) \cdot (n-2)} = \frac{n}{(n-1) \cdot (n-2)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - M_1)^3;$ $M_{\text{нс4}} = \frac{n \cdot (n^2 - 2 \cdot n + 3) \cdot M_4 - 3 \cdot n \cdot (2 \cdot n - 3) \cdot M_2}{(n-1) \cdot (n-2) \cdot (n-3)}$

Принятые оценки моментов эмпирического распределения сравнивают с оценками теоретического распределения. Число сравнивае-

мых оценок моментов принимается по количеству параметров в теоретической функции распределения. То есть для сравнения с двухпараметрическими теоретическими функциями используют первые две оценки моментов, а для сравнения с трехпараметрическими – три оценки моментов. Однако определение параметров асимметрии и эксцесса, на основе которых можно получить приблизительные представления о близости или отличии эмпирического к нормальному закону, требует использования третьего и четвертого моментов.

Отметим, что метод моментов позволяет получить эффективные оценки только для нормального распределения, а для других распределений эффективность метода моментов невысокая [39]. Поэтому в первую очередь проверяют гипотезу о нормальном распределении экспериментальных данных, что и требуется установить для рассматриваемой выборки.

Первый центральный момент эмпирического распределения приблизительно равен нулю, что справедливо для теоретического нормального распределения.

Приблизительные представления о близости эмпирического распределения к нормальному закону, но без установления нормальности распределения дает анализ показателей асимметрии и эксцесса [28], для вычисления которых используются второй, третий и четвертый моменты.

В табл. 2.11 приведены формулы и результаты расчета показателей асимметрии и эксцесса.

Таблица 2.11. Формулы для расчета показателей асимметрии и эксцесса эмпирического распределения

Характеристика	Формула
Показатель асимметрии	$g_1 = \frac{M_3}{\sqrt{M_2^3}}$
Показатель эксцесса	$g_2 = \frac{M_4}{M_2^2} - 3$

Для симметричных распределений $g_1=0$, а для нормального распределения $g_2=0$. Если показатель асимметрии эмпирического распределения имеет положительное значение, то правая часть графика длиннее левой. Если показатель эксцесса имеет отрицательное значение, то пик эмпирического графика вероятности распределения более низкий и пологий по сравнению с теоретическим нормальным распределением.

Проверку гипотезы нормальности распределения можно выполнить по несмещенным оценкам показателей асимметрии и эксцесса [28]. Для этого несмещенные оценки сравнивают со среднеквадратическими отклонениями показателей эксцесса и асимметрии.

В табл. 2.12 приведены критерии и формулы для вычисления несмещенных оценок и их среднеквадратических отклонений.

Таблица 2.12. Критерии нормальности распределения и формулы расчета несмещенных оценок и среднеквадратических отклонений показателей асимметрии и эксцесса

Статистика	Формула
Несмещенные оценки показателей асимметрии G_1 и эксцесса G_2	$G_1 = \frac{\sqrt{n \cdot (n-1)}}{n-2} \cdot g_1; \quad G_2 = \frac{(n-1) \cdot [(n+1) \cdot g_2 + 6]}{(n-2) \cdot (n-3)}$
Среднеквадратическое отклонение показателей асимметрии и эксцесса	$S_{G1} = \sqrt{\frac{6 \cdot n \cdot (n-1)}{(n-2) \cdot (n+1) \cdot (n+3)}};$ $S_{G2} = \sqrt{\frac{24 \cdot n \cdot (n-1)^2}{(n-3) \cdot (n-2) \cdot (n+3) \cdot (n+5)}}$
Критерии принятия гипотезы нормального распределения	$ G_1 \leq 3 \cdot S_{G1}; \quad G_2 \leq 5 \cdot S_{G2}$

В том случае, если гипотеза о нормальном распределении случайной величины отвергается, то процедура обработки данных, описываемая последовательным вычислением статистик по (2.7), не производится. Вместо этих формул применяют другие, соответствующие принятому закону распределения.

В этих целях ГОСТ 20522–2012 [26, прил. Б] рекомендует применять процедуру статистической обработки малых выборок с применением логарифмически нормального закона распределения. Эта процедура состоит в последовательном выполнении следующих действий.

1. Все значения случайной величины x_i , содержащиеся в обрабатываемой выборке, логарифмируются, то есть находятся величины $\lg x_i$, которые формируют новую выборку. При этом если в начальной выборке имеются частные значения x_i , величина которых варьируется в диапазоне $0 < x_i \leq 1$, то все частные значения x_i на 10 в соответствующей степени. Это позволяет избежать отрицательных значений в новой выборке, в которой все частные значения характеристики $\lg x_i$ не будут иметь отрицательных значений. Если этот способ применен, то полученные в результате статистической обработки нормативные и расчетные значения характеристики делятся на 10 в соответствующей степени.

2. Вычисляют математическое ожидание новой выборки. Математическое ожидание вычисляется как среднеарифметическое значение, то есть по формуле (2.7), но ввиду того, что частные значения x_i были прологарифмированы, эта зависимость примет вид

$$M(x) = (\lg x_i)_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \lg x_i. \quad (2.14)$$

3. Рассчитывают величину среднеквадратического отклонения, применяя формулу (2.8), которая с учетом выполненного логарифмирования для новой выборки значений $\lg x_i$ примет вид

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (M(x) - \lg x_i)^2}. \quad (2.15)$$

4. Определяют логарифм нормативного значения характеристики. Расчет ведут по формуле

$$\lg x_{\text{cp}} = M(x) + 1,151 \cdot S. \quad (2.16)$$

5. Вычисляют длину доверительного полуинтервала Δ . Для этого используют формулу

$$\Delta = u_{\alpha} + \frac{S}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{1 + 2,65 \cdot S^2}, \quad (2.17)$$

где u_{α} – значение, принимаемое в зависимости от односторонней доверительной вероятности, регламентируемое [26, табл. Б.1] и представленное нами в табл. 2.13.

Таблица 2.13. Значения параметра u_{α} для расчета полудлины доверительного интервала в формуле (2.17)

Односторонняя доверительная вероятность α	0,85	0,90	0,95	0,975	0,99
Величина u_{α}	1,03	1,28	1,65	1,96	2,33

6. Рассчитывают логарифм расчетного значения характеристики, применяя формулу

$$\lg x = \lg x_{\text{cp}} \pm \Delta. \quad (2.18)$$

7. Нормативное x_{cp} и расчетное x значение обрабатываемой характеристики вычисляют применяя операцию антилогарифмирования.

Таким образом, для обработки результатов эксперимента методами математической статистики необходимо установить закон распределения случайной величины. Для малых выборок данных это можно сделать с применением грубых способов.

Поэтому в некоторых случаях статистическую обработку выполняют по накопленным частотам, применяя правила построения кумулятивной кривой. Процедура такой обработки данных включает в себя:

1. По формуле (2.7) определяют среднее выборочное значение определяемой характеристики $x_{\text{ср}}$.

2. Для разбиения статистического ряда на разряды (интервалы) задаются значениями Δx , которые принимают равными ± 10 , ± 20 , $\pm 30\%$ и т.д. в зависимости от точности испытаний (разброса выборочных данных). Положительные значения принимают для характеристик, превышающих по величине среднеарифметическое значение, отрицательные – для характеристик, меньших среднеарифметического значения.

3. Вычисляют значение характеристики, соответствующее середине разряда. Расчет производят по формуле

$$\delta_x = x_{\text{ср}} \cdot \left(\frac{\Delta x}{100} + 1 \right). \quad (2.19)$$

4. Определяют интервалы границы разрядов, на которые разбивается статистический ряд. Границы интервалов устанавливают делением суммы смежных значений, вычисленных по (2.19) пополам.

5. Частные измеренные значения характеристики x_i распределяют по разрядам. Частные значения, попадающие на границу смежных интервалов, рекомендовано относить к интервалам меньших величин.

6. В каждом разряде определяют число попавших в него частных значений x_i . Делением этого числа на сумму всех частных значений x_i вычисляют частоту попадания в данный интервал.

7. Определяют накопленную частоту путем суммирования частоты характеристики x_i , попавших в рассматриваемый разряд с суммарным числом частот характеристики x_i , попавших во все предыдущие разряды.

8. По вычисленным накопленным частотам строят кумулятивную кривую, при помощи которой решают вопрос о расчетном значении характеристики x , соответствующей принятому уровню значимости, например $p=5\%$.

Для обработки больших массивов данных применяют более точные методы математической статистики. В больших выборках так же, как и в малых, выполняют отсев грубых ошибок. Рассмотренный нами способ, регламентированный ГОСТ 20522–2012 [26] отсев грубых ошибок, производится по условию (2.9) с применением статистики v ,

значения которой даны в табл. 2.8 для выборок, включающих до 50 элементов. Если в выборке число элементов больше 50, то табл. 2.8, регламентируемая ГОСТ 20522–2012 [26], становится неприменимой. Такие большие выборки требуют применения несколько иных методов отсеивания ошибок, представленных в литературе по обработке экспериментальных данных [28, 31].

Для проверки выборки используем метод, рекомендованный Л.З. Румшиским [31]. Этот метод аналогичен методу, регламентируемому ГОСТ 20522–2012, но с критическими значениями для выборок, содержащими элементы в количестве более 50. Критические значения приведены для $n=100$ и $n=\infty$, между которыми допускается интерполяция. Процедура этого метода проверки выборочных данных приведена в табл. 2.14.

Таблица 2.14. Последовательность проверки выборки с использованием метода [31]

Шаг	Действие словами	Формула
1	Расчет среднеарифметического значения в выборке	$x_{\text{ср}} = \frac{\sum n_x \cdot x_x}{n},$
2	Расчет среднеквадратического отклонения	$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum n_x \cdot (x_x - x_{\text{ср}})^2}$
3	Выделяют наблюдение с наибольшим по модулю отклонением	$\max x_x - x_{\text{ср}} $
4	Рассчитывают характеристику τ для выделения аномального значения	$\tau = \max x_x - x_{\text{ср}} / S$
5	При заданной надежности и числе определений рассчитывают критические значения t_n	Интерполяция табличных данных источника [31]
6	Проверка условия выбраковывания результатов	$\tau > t_n$

Примечание. n_x – количество совпадений измеренных характеристик x_x ; n – общее количество значений измерений (сумма всех n_x).

Если на шаге 6 условие выполнено, то значение отбрасывается, а для оставшихся элементов выборки вся процедура повторяется.

Аналогичный метод проверки выборочных данных на наличие аномальных значений рекомендован Е.Н. Львовским [30]. В этом методе оцениваемый параметр определяется так же, как и в табл. 2.14. То есть первые четыре шага в обоих методах одинаковые. Отличие состоит в том, что критические значения вычисляются с помощью

процентных точек распределения Стьюдента. Процедура этого представлена в табл. 2.15.

Таблица 2.15. Последовательность метода отсева грубых ошибок при расчете критических значений с помощью процентных точек распределения Стьюдента

Шаг	Действие словами	Формула
1	2	3
1	Расчет среднеарифметического значения угла рассеивания напряжений в выборке	Так же, как в табл. 2.14
2	Расчет среднеквадратического отклонения	Так же, как в табл. 2.14
3	Выделяют наблюдение с наибольшим по модулю отклонением	Так же, как в табл. 2.14
4	Рассчитывают характеристику τ для выделения аномального значения	Так же, как в табл. 2.14
5	Определение процентных точек распределения Стьюдента $\tau_{[p, n-2]}$ при числе степеней свободы $n-2$ и заданных p	Интерполяция табличных данных источника [30]
6	Расчет критического значения τ_p	$\tau_p = \frac{\tau_{[p, n-2]} \cdot \sqrt{n-1}}{\sqrt{n-2 + (\tau_{[p, n-2]})^2}}$
7	При соблюдении условия отсев не делают	$\tau \leq \tau_{p_1}$
	Отсев можно выполнить, если в пользу процедуры имеются и другие соображения. В противном случае от исключения ошибок рекомендуется воздержаться	$\tau_{p_1} \leq \tau \leq \tau_{p_2}$
	Отсев выполняют всегда	$\tau_{p_2} < \tau$

Примечание. τ_{p_1} и τ_{p_2} – критические значения рассчитанные в шаге 6 с использованием процентных точек распределения Стьюдента $\tau_{[p, n-2]}$ для $p_1=5\%$ и $p_2=0,1\%$.

В том случае если на шаге 7 значение τ превышает максимальное критическое значение, то частное значение угла рассеивания напряжений исключается из выборки, а для оставшихся в выборке элементов вся процедура повторяется заново. Процентные точки распределения Стьюдента принимают при p , изменяющемся в диапазоне от 0,1 до 5%.

В теории вероятностей математическое описание случайных величин выполняется при помощи законов их распределения [32, 33, 34]. Под законом распределения случайной величины понимают любое соотношение, устанавливающее связь между значениями случайной величины и вероятностью их появления.

В табл. 2.16 приведены классические и наиболее распространенные функции непрерывных распределений и плотности вероятности случайной величины.

Таблица 2.16. **Функции распределения и плотности вероятности непрерывной случайной величины**

Тип	Функции распределения F и плотности вероятности f
1	2
Равномерное распределение [35, с. 178]	$F(x) = \frac{x-a}{b-a} \text{ при } a < x < b,$ где a и b – границы интервала, в пределах которого распределена непрерывная случайная величина x ($b > a$). $f(x) = \frac{1}{b-a}; \text{ при } a < x < b$
Нормальное распределение [32, 35]	$F(x) = \frac{1}{S \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \cdot \exp\left(-\frac{(x-M(x))^2}{2 \cdot S^2}\right) dx; \text{ при } -\infty < x < \infty.$ В функции $F(x)$ выполняется замена переменных $t = (x - Mx)/S$; $dx = Sdt$. После чего $F(x)$ дают в виде $F(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt;$ $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right);$ $f(x) = \frac{1}{S \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(x-M(x))^2}{2 \cdot S^2}\right)$
Логарифмическое нормальное распределение [35, с. 175]	$F(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{\ln(x) - M(x)}{S \cdot \sqrt{2}}\right);$ $f(x) = \frac{1}{x \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln x - M(x))^2}{2 \cdot S^2}\right) \text{ при } x > 0$
Распределение Уильяма Сйли Госсета (Стьюдента) [35, с. 193]	$F(x) = \frac{1}{2} + \frac{\Gamma((n+1)/2)}{\sqrt{n \cdot \pi} \cdot \Gamma(n/2)} \cdot \frac{F_1(0,5; (n+1)/2; 1,5; -x^2/n)}{\sqrt{n \cdot \pi} \cdot \Gamma(n/2)},$ где Γ – гамма-функция Эйлера; F_1 – гипергеометрическая функция $f(x) = \frac{\Gamma((n+1)/2)}{\sqrt{n \cdot \pi} \cdot \Gamma(n/2) \cdot (1 + x^2/n)^{(n+1)/2}}$
Распределение Парето [35, с. 185]	$F(x) = 1 - (a/x)^k; \text{ при } a \leq x \leq \infty; a > 0; k > 0,$ где a – коэффициент сдвига. $f(x) = k \cdot a^k \cdot x^{-(k+1)}$

Продолжение табл. 2.16

1	2
Распределение Коши [35, с. 186]	$F(x) = \frac{1}{\pi} \cdot \arctg\left(\frac{x-a}{\delta}\right) + \frac{1}{2}; \text{ при } -\infty < x < \infty; \delta > 0,$ где a – коэффициент сдвига; δ – коэффициент масштаба $f(x) = \frac{1}{\pi \cdot \delta \cdot \left(1 + \left(\frac{x-a}{\delta}\right)^2\right)}$
Экспоненциальное распределение [35, с. 186]	$F(x) = 1 - \exp(-a \cdot x),$ где a – параметр распределения ($a > 0$). $f(x) = a \cdot \exp(-a \cdot x); \text{ при } x \geq 0$
Распределение Лапласа [36]	$\begin{cases} F(x) = \frac{1}{2} \cdot \exp[\delta \cdot (x-a)]; & x \leq a \\ F(x) = 1 - \frac{1}{2} \cdot \exp[-\delta \cdot (x-a)]; & x > a, \end{cases}$ где a – коэффициент сдвига; δ – коэффициент масштаба $f(x) = \frac{\delta}{2} \cdot \exp(-\delta \cdot x-a)$
Распределение Максвелла [36]	$F(x) = 2\Phi \cdot \frac{x}{a} - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{x}{a} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot a^2}\right) /$ $f(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{x^2}{a^3} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot a^3}\right); \text{ при } x > 0$ $a = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot Mx = 0,6267 \cdot Mx$
Распределение Эрланга [36]	$F(x) = 1 - \exp(-a \cdot x) \cdot \sum_{n=1}^{k-1} \frac{(a \cdot x)^n}{n!} \cdot \exp(-a \cdot x); \text{ при } x \geq 0,$ где a и k – параметры распределения ($a \geq 0$), ($k=1, 2, 3 \dots$) $f(x) = \frac{a \cdot (a \cdot x)^{k-1}}{(k-1)!} \cdot \exp(-a \cdot x)$
Распределение Вейбулла (двух-параметрическое) [35, с. 183]	$F(x) = 1 - \exp\left(-\left[\frac{x}{\delta}\right]^\beta\right); \text{ при } x \geq 0,$ где β – параметр формы распределения $\beta > 0$; δ – параметр масштаба распределения $\delta > 0$. $f(x) = \frac{\beta}{\delta} \cdot \left(\frac{x}{\delta}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left(-\left[\frac{x}{\delta}\right]^\beta\right)$

Окончание табл. 2.16

1	2
Распределение Вейбулла (трехпараметрическое)	$F(x) = 1 - \exp\left(-\left[\frac{x - \Theta}{\delta}\right]^\beta\right); \text{ при } x \geq 0,$ где Θ – параметр местоположения распределения $\Theta < x$. $f(x) = \frac{\beta}{\delta} \cdot \left(\frac{x - \Theta}{\delta}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left(-\left[\frac{x - \Theta}{\delta}\right]^\beta\right)$
Гамма-распределение, или Г-распределение [35, с. 199]	$F(x) = \frac{\lambda(k, \delta/2)}{\int_0^\infty x^{k-1} \cdot \exp(-x) dx}; \text{ при } x > 0$ $f(x) = \frac{1}{\Gamma(k)} \cdot x^{k-1} \cdot \exp(-x/\delta),$ где k – коэффициент $k > 0$; δ – параметр масштаба распределения $\delta > 0$
Распределение Эрланга нормированное [36]	$F(x) = 1 - \exp(-k \cdot a \cdot x) \cdot \sum_{n=1}^{k-1} \frac{(k \cdot a \cdot x)^n}{n!} \cdot \exp(-a \cdot x);$ $f(x) = \frac{k \cdot a \cdot (k \cdot a \cdot x)^{k-1}}{(k-1)!} \cdot \exp(-k \cdot a \cdot x); \text{ при } x \geq 0,$ где a и k – параметры распределения ($a \geq 0$), ($k=1, 2, 3 \dots$)
Гиперэкспоненциальное распределение [36]	$f(x) = \sum_{i=1}^n q_i \cdot (1 - \exp(-a_i \cdot x)); \text{ при } x \geq 0,$ где i и n – номер и общее число генераторов экспоненциально распределенных случайных величин; q_i – вероятность выработки i-м генератором только одной случайной величины ($\sum q_i = 1$); a_i – параметр распределения, с которым вырабатывается случайная величина i-м генератором ($a_i > 0$). $f(x) = \sum_{i=1}^n q_i \cdot a_i \cdot \exp(-a_i \cdot x)$

На первом этапе статистической обработки результаты эксперимента представляются в виде вариационного ряда, в котором измеренные числовые характеристики представляются в порядке возрастания или убывания с характерной частотностью [33].

Частота числовой характеристики определяется по формуле

$$f_x = \frac{n_x}{n}, \quad (2.20)$$

где n_x и n – количество совпадений характеристики и общее число измерений.

Значение параметров, вычисленных по ограниченному объему экспериментальных данных, может изменяться от выборки к выборке. Поэтому при обработке данных необходимо получить статистическую оценку параметра распределения [28, 31]. В табл. 2.17 приведены формулы для определения параметров теоретических распределений математического ожидания, дисперсии и зависящего от нее среднеквадратического отклонения. Эти параметры используют для сравнения с первым и вторым моментами эмпирического распределения, а также даны формулы для расчета среднеквадратического отклонения.

Таблица 2.17. **Формулы для расчета математического ожидания, дисперсии и среднеквадратического отклонения некоторых теоретических распределений [35, 36, 37]**

Параметр распределения	Формула для оценки параметра
1	2
Равномерное распределение	
Математическое ожидание	$M(x) = \frac{a+b}{2}$
Дисперсия и среднеквадратическое отклонение	$D = \sigma^2 = \frac{(b-a)^2}{12}; S = \frac{b-a}{2 \cdot \sqrt{3}}$
Нормальное распределение	
Математическое ожидание	$M(x) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$
Дисперсия и среднеквадратическое отклонение	$D = S^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - M(x))^2; S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - M(x))^2}$
Логарифмическое нормальное распределение	
Математическое ожидание	$M(x) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \ln x_i$
Дисперсия и среднеквадратическое отклонение	$D = S^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\ln x_i - M(x))^2; S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\ln x_i - M(x))^2}$

Продолжение табл. 2.17

1	2
Распределение Максвелла	
Математическое ожидание	$M(x) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$
Дисперсия и сред- неквадратическое отклонение	$D = S^2 = \left(3 - \frac{8}{\pi}\right) \cdot a^2 = 0,454 \cdot a^2; \quad S = a \cdot \sqrt{\left(3 - \frac{8}{\pi}\right)}$
Экспоненциальное распределение	
Математическое ожидание	$M(x) = \frac{1}{a}$
Дисперсия и сред- неквадратическое отклонение	$D = S^2 = \frac{1}{a^2}; \quad S = \frac{1}{a}$
Гамма-распределение	
Математическое ожидание	$M(x) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$
Дисперсия и сред- неквадратическое отклонение	$D = S^2 = v/\lambda^2; \quad S = \sqrt{v}/\lambda$
Распределение Эрланга	
Математическое ожидание	$M(x) = \frac{k}{a}$
Дисперсия и сред- неквадратическое отклонение	$D = S^2 = \frac{k}{a^2}; \quad S = \frac{\sqrt{k}}{a}$
Распределение Эрланга нормированное	
Математическое ожидание	$M(x) = \frac{1}{a}$
Дисперсия и сред- неквадратическое отклонение	$D = S^2 = \frac{1}{k \cdot a^2}; \quad S = \frac{1}{a \cdot \sqrt{k}}$
Гиперэкспоненциальное распределение	
Математическое ожидание	$M(x) = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{a_i}$
Дисперсия и сред- неквадратическое отклонение	$D = S^2 = 2 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{a_i^2} - \left(\sum_{i=1}^n \frac{q_i}{a_i}\right)^2; \quad S = \sqrt{2 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{a_i^2} - \left(\sum_{i=1}^n \frac{q_i}{a_i}\right)^2}$
Распределение Парето	
Математическое ожидание	$M(x) = \frac{k \cdot a}{k-1}$

Окончание табл. 2.17

1	2
Дисперсия и среднеквадратическое отклонение	$D = S^2 = \frac{a^2 \cdot k}{(k-1)^2 \cdot (k-2)}; \quad S = \frac{a}{k-1} \cdot \sqrt{\frac{k}{(k-2)}}$
Распределение Лапласа	
Математическое ожидание	$M(x) = a$
Дисперсия и среднеквадратическое отклонение	$D = S^2 = \frac{2}{\delta^2}; \quad S = \frac{\sqrt{2}}{\delta}$
Распределение Уильяма Сили Госсета (Стьюдента)	
Математическое ожидание	$M(x) = 0, \text{ при } n > 1$
Дисперсия и среднеквадратическое отклонение	$D = \frac{n}{n-2}; \quad S = \sqrt{\frac{n}{n-2}}$
Распределение Вейбулла двухпараметрическое	
Математическое ожидание	$M(x) = \delta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$
Дисперсия и среднеквадратическое отклонение	$D = \delta^2 \cdot \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right];$ $S = \delta \cdot \sqrt{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]}$

Обработку экспериментальных данных выполняют по вариационному и статистическому рядам. В статистическом ряде экспериментальные данные группируются в разряды [32, 35]. Эмпирическую функцию распределения непрерывной случайной величины задают аналитически в виде математического выражения или графически в виде ломаной линии или гистограммы. По оси абсцисс откладывают частотные интервалы, охватывающие все возможные варианты, а по оси ординат откладывают накопленную частоту попадания случайной величины в частотные интервалы [32, 33, 34, 35]. Закон распределения задается следующим образом. Вначале определяется статистический интервал, в пределах которого варьируется измеренная случайная величина. Длина статистического интервала определяется разностью максимального и минимального значений. Затем подбирается количество разрядов, на которые разбивается этот интервал. При объеме выборки до 100 элементов (параметров) минимальное количество разрядов принимают 6 – 7, а если объем выборки составляет несколь-

ко сотен элементов, то количество интервалов назначают 10–20. Количество интервалов можно рассчитать по правилу Штюргеса, которое приводится в работах различных авторов [28]. Далее отношением длины интервала к количеству разрядов определяется размер разряда статистического интервала [28]. Для расчета длины интервала и разрядов рекомендуются простые формулы, представленные в табл. 2.18.

Таблица 2.18. Формулы для расчета длины интервалов и разрядов [28]

Характеристика	Формула для расчета
Длина статистического интервала (размах варьирования) L_x	$L_x = x_{\max} - x_{\min}$, где $x_{\max}$ и $x_{\min}$ – максимальное и минимальное измеренное значение характеристики
Ориентировочное количество разрядов n_x	$n_x = 1 + 1,441 \cdot \ln n = 1 + 3,32 \cdot \lg n$, где n – число измеренных характеристик x или число определений
Длина разряда l_x	$l_x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{n_x} = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{1 + 1,441 \cdot \ln n}$

Для проверки гипотезы нормальности распределения достаточно широко применяется критерий согласия Пирсона χ^2 (хи-квадрат). В соответствии с этим методом вычисляют значение χ^2 , которое сравнивается с табличным значением. В том случае если вычисленное значение меньше табличного, то гипотеза нормальности распределения принимается. Вычисление статистик производят по сгруппированным в разряды данным. Подробно применение статистики χ^2 для проверки гипотезы нормальности распределения рассматривается Е.Н. Львовским [28].

На основе критерия χ^2 разработан ряд критериев согласия, например в виде статистик В.И. Романовского или Б.С. Ястремского [28, 11], которые приведены в табл. 2.12.

Таблица 2.12. Статистики критериев согласия В.И. Романовского и Б.С. Ястремского

Статистика В.И. Романовского	Статистика Б.С. Ястремского
$K_P = \frac{ \chi^2 - K }{\sqrt{2 \cdot K}}$	$K_P = \frac{ \chi^2 - n }{\sqrt{2 \cdot n + 4 \cdot \Theta}}$

Из всех рассмотренных выше статистических критериев Лотара Закса, выборочного коэффициента вариации, несмещенных оценок показателей асимметрии и эксцесса Пирсона, В.И. Романовского и

Б.С. Ястремского критерии согласия с вычислением статистики χ^2 считаются наиболее основательными.

Доверительная оценка истинного значения определяется по формуле

$$\varepsilon = t \cdot \frac{3 \cdot S}{\sqrt{n}}, \quad (2.21)$$

где t – коэффициент, принимаемый по таблице распределения Стьюдента в зависимости от числа степеней свободы ($\kappa=n-1$) и двусторонней доверительной вероятности.

Задания для самооценки приобретенных знаний

1. *Дайте определение контроля качества продукции и строительного контроля.*
2. *Назовите основные элементы, которые необходимо определить при планировании контроля.*
3. *Дайте классификацию и определение каждому виду контроля и назовите его признаки.*
4. *Дайте классификацию каждому виду испытаний и назовите его признаки.*
5. *Назовите контролируемые параметры земляного полотна по каждому виду работ.*
6. *Дайте определения коэффициентов уплотнения и увлажнения.*
7. *Назовите наименьшие значения коэффициентов уплотнения грунта земляного полотна.*
8. *Перечислите факторы, от которых зависит наименьшее значение коэффициентов уплотнения грунта земляного полотна.*
9. *Укажите объем и режим контроля по каждому контролируемому параметру.*
10. *Дайте правила и методику статистической обработки результатов испытаний грунтов.*

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА ДОБЫВАЕМОГО ГРУНТА И ОЦЕНКА ЕГО ВЛАЖНОСТИ

Определение вида грунта и его влажности выполняется при входном контроле. Причем этот контроль является периодическим. Оценка влажности грунта выполняется 1 раз в смену, а определение вида грунта производится 1 раз на 2000 м³ грунта, поступающего из источника добычи.

3.1. Правила отбора, хранения и транспортирования проб грунта

Отбор проб грунта, их транспортирования и хранения должны осуществляться в соответствии с определенными правилами, регламентируемыми ГОСТ 12071–2000 [38].

Образцы грунта отбираются из зачищенных стенок забоя, горных выработок (шурфов, котлованов), естественных и искусственных обнажений.



Рис. 3.1. Отбор пробы из зачищенной стенки шурфа



Рис. 3.2. Отбор пробы из искусственных обнажений (дно корыта под дорожную одежду)

Для отбора проб применяют бороздовый или точечный метод. При бороздовом отборе в стенке выработки разрабатывают борозду глубиной 5 – 10 см и шириной 10 – 20 см. Такие размеры борозды позволяют отобрать образец грунта нарушенного сложения необходимой для последующих испытаний массы. При отборе пробы используют лопату, нож, зубило, молоток, лом и пр., а также пробоотборники различных конструкций [38, п. 5.1]. Точечный метод применяют

для отбора образца нарушенного или ненарушенного (монолита) сложения из точки массива грунта.

В образце грунта нарушенного сложения должны сохраняться содержание мелких частиц и природная влажность. Поэтому образец грунта необходимо упаковывать должным образом. Обеспечение сохранности мелких частиц достигается упаковкой грунта в мешочки из синтетической пленки, плотной ткани или водостойкой бумаги [38, п. 5.6]. Для сохранения природной влажности грунта его упаковывают в металлические коррозионно-стойкие или пластмассовые банки с герметически закрывающимися крышками [38, п. 5.6].



Рис. 3.3. Упаковка образца грунта в мешочки из полиэтиленовой пленки



Рис. 3.4. Упаковка образца грунта в пластмассовый стаканчик

Образец грунта маркируют, соблюдая требования [38], согласно которым внутрь тары с образцом грунта нарушенного сложения помещают этикетку, завернутую в кальку, покрытую слоем парафина с гудроном. Вторую этикетку наклеивают на тару. На этикетке указывают:

- наименование организации, проводящей изыскания;
- наименование объекта (участка);
- наименование выработки и ее номер;
- глубину отбора образца;
- краткое описание грунта (визуальное);
- должность и фамилию лица, производящего отбор образцов, и его подпись;
- дату отбора образца.

Надписи на этикетках должны быть разборчивыми (четкими). Во избежание обесцвечивания или расплывания записей их следует наносить простым графитовым карандашом [38].

При транспортировании и хранении образцов необходимо соблюдать требования, регламентируемые [38]:

- транспортировку образцов в лабораторию, расположенную вблизи места отбора, можно выполнять без их помещения в ящики, но с обязательным соблюдением мер защиты от повреждения изоляционного слоя образцов и подсыхания грунта;

- во время транспортировки образцы - монолиты не должны подвергаться резким динамическим и температурным воздействиям;

- образцы- монолиты немерзлых грунтов необходимо транспортировать при положительных температурах воздуха, а монолиты мерзлых грунтов - при отрицательной температуре воздуха или транспортом, оборудованным холодильными камерами;

- образцы грунта нарушенного сложения и образцы- монолиты, требующие сохранения природной влажности, должны быть упакованы и храниться в помещениях или камерах, в которых воздух имеет относительную влажность 70 – 80% и температуру плюс 2 – 10 °С;

- при хранении монолитов мерзлого грунта в помещениях или камерах следует обеспечивать относительную влажность 80 – 90% и отрицательную температуру;

- при хранении образцы - монолиты не должны подвергаться резким динамическим воздействиям, касаться друг друга и стоек полок, они должны размещаться на полках помещения (камеры) всей нижней поверхностью в один ярус таким образом, чтобы этикетки находились сверху;

- на образцах- монолитах, оставленных на хранение, нельзя размещать какие- либо предметы;

- срок хранения образцов не должен превышать указанных стандартом [38] пределов.

3.2. Лабораторные и полевые работы по определению влажности дисперсных грунтов

Для определения влажности грунтов применяются различные методы. Лабораторные методы, регламентируемые стандартами РФ, США и стран Евросоюза, применяются для точной оценки влажности. В дорожном строительстве точное определение влажности необходимо для последующего расчета плотности сухого грунта и коэффициента уплотнения или определения оптимальной влажности грунта и установления допускаемых пределов варьирования коэффициента увлажнения и т.п. Лабораторные эксперименты проводятся в течение определенного времени, зависящего от вида грунта, вследствие чего лаборатория не имеет возможности оперативно сообщить данные о влажности грунта. Полевые испытания грунтов выполняются с целью экспресс-оценки показателей физических свойств. Поэтому данные о влажности грунтов получают сразу после выполнения измерений. Такие данные обладают меньшей точностью, но быстрота определения влажности позволяет оперативно отреагировать на ситуацию и принять соответствующее решение о необходимости увлажнения или осушения грунтов при сооружении земляного полотна.

3.2.1. Определение влажности грунтов методом высушивания до постоянной массы по ГОСТ 5180–84 и стандартам ASTM D 2216

При реализации этого способа влажность грунта определяют отношением массы воды, удаленной из грунта высушиванием до постоянной массы, к массе высушенного грунта [11, 39].

Для испытания требуется по ГОСТ 5180–84 [11]:

- шкаф сушильный или вакуумный сушильный;
- термометр стеклянный, соответствующий требованиям ГОСТ 28498–90 [40];
- эксикатор стеклянный, соответствующий требованиям ГОСТ 23932–90 [41];
- стаканчики стеклянные или алюминиевые ВС-1 с крышками;
- хлористый кальций;
- нож с прямым лезвием, шпатель и щипцы тигельные;
- весы, соответствующие требованиям ГОСТ Р 53228–2008 [42].

При выполнении лабораторного теста по ГОСТ 5180–84 [11] выделяют три стадии:

1. Подготовка к испытанию.
2. Проведение испытания.
3. Обработка результатов испытаний.

Подготовка к испытанию состоит в том, что для определения влажности отбирают пробу грунта массой 15–50 г и помещают в заранее высушенный, взвешенный и пронумерованный стаканчик и плотно закрывают крышкой.



Рис. 3.5. Алюминиевые стаканчики для взвешивания (бюксы)



Рис. 3.6. Взвешивание пустого стаканчика и крышки для определения массы

Выполнение испытания начинают со взвешивания пробы грунта в закрытом стаканчике и определяют его массу. После этого стаканчик открывают и вместе с крышкой помещают в нагретый сушильный шкаф.



Рис. 3.7. Взвешивание стаканчика с грунтом и крышкой



Рис. 3.8. Стаканчики с грунтом и крышками в сушильном шкафу

Сушильный шкаф закрывают и производят сушку грунта, называемую первым высушиванием. Температура сушки грунта должна

составлять 105 ± 2 °С. Продолжительность этого высушивания зависит от подвида дисперсного грунта. Так песчаные грунты сушат в течение 3 ч, а остальные – 5 ч.



Рис. 3.9. Иллюстрация охлаждения образцов в эксикаторе с CaCl_2

После сушки образец грунта вместе со стаканчиком для взвешивания охлаждают до температуры помещения, используя эксикатор с хлористым кальцием (рис. 3.9).

Охлажденный образец в стаканчике, закрытом крышкой, взвешивают и, открыв крышку, помещают в сушильный шкаф для повторного высушивания. Температура повторного, а если

потребуется, то и всех остальных высушиваний такая же, как и при первом высушивании грунта, продолжительность повторных высушиваний должна составлять 1 ч для песчаных грунтов и 2 ч для всех остальных грунтов.



Рис. 3.10. Взвешивание образца после первого высушивания



Рис. 3.11. Образцы, подготовленные для повторного высушивания

После повторного высушивания образцы охлаждают и вновь взвешивают. Операции повторного высушивания, охлаждения и взвешивания повторяют до тех пор, пока разность масс грунта со стаканчиком и крышкой при двух последующих взвешиваниях не будет превышать 0,2 г.

В тех случаях, когда при повторном взвешивании грунта, содержащего органические вещества, наблюдается увеличение массы, то за результат взвешивания принимают наименьшую массу.

Завершив испытание, влажность грунта определяют по формуле

$$w = 100 \cdot \frac{m_1 - m_0}{m_0 - m}, \quad (3.1)$$

где m — масса пустого стаканчика с крышкой, г; m_1 — масса влажного грунта со стаканчиком и крышкой, г; m_0 — масса высушенного грунта со стаканчиком и крышкой, г.

Определение влажности по методу ASTM D 2216 [39] выполняется по аналогичной процедуре, имеющей некоторые количественные отличия.

Для выполнения этого теста необходимо располагать оборудованием, вспомогательными инструментами и средствами защиты лаборанта, представленными на рис. 3.12 и 3.13.

Применяемый сушильный шкаф должен соответствовать требованиям ASTM E 145 [43] и поддерживать температуру 110 ± 5 °C в течение всего времени, необходимого для сушки грунта. Весы должны соответствовать требованиям стандарта ASTM D 4753 [44] и иметь класс GP1 (точность до 0,01 г) или GP2 (точность до 0,1 г). Такая точность необходима для измерения массы образцов вместе с контейнером (стаканчиком для взвешивания) до и более 200 г соответственно. Стаканчики (контейнеры) для взвешивания грунта изготовлены из материала, устойчивого к коррозии и



Рис. 3.12. Сушильный шкаф



Рис. 3.13. Оборудование:
1 – весы класса GP1; 2 – бюкса;
3 – перчатка; 4 – щипцы;
5 – ложка; 6 – чашка с грунтом

изменению массы при повторном нагревании и охлаждении, а также к воздействию почв (материалов) различной кислотности (pH). При тестировании образцов массой менее 200 г контейнер должен быть снабжен крышкой, а для испытаний образцов массой более 200 г допускается применять контейнеры без крышки.

Испытание начинают с взвешивания пустого контейнера, в который помещают влажный грунт, масса которого должна быть не менее указанной в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Минимальная масса влажного грунта для выполнения теста по ASTM D 2216 [39]

Максимальный размер частиц грунта, которые в количестве 100% проходят сквозь сито	Размер стандартного сита	Рекомендуемая масса образца влажного грунта при определении содержания воды с точностью до	
		0,1%	1%
2 мм и меньше	№ 10	20 г	20 г
4,75 мм	№ 4	100 г	20 г
9,5 мм	3/8 дюйма	500 г	50 г
19,0 мм	3/4 дюйма	2,5 кг	250 г
37,5 мм	1,5 дюйма	10 кг	1 кг
75,0 мм	3 дюйма	50 кг	5 кг

После этого контейнер с грунтом и крышкой, если она используется, взвешивают, определяя их общую массу. Контейнер с грунтом и крышкой (бюкс должен быть не закрыт) ставят в сушильный шкаф, в котором выполняется сушка грунта при температуре 110 ± 5 °C.

Грунт сушат в течение ночи, что составляет 12 – 16 ч. Такого времени обычно достаточно для высушивания грунта до постоянной массы. В тех случаях, когда возникают сомнения относительно высушивания грунта, выполняют дополнительные последовательные сушки продолжительностью 1 ч. Критерием окончания дополнительных высушиваний является уменьшение массы не более чем на 0,1% при двух последовательных сушках.

После высушивания грунта до постоянной массы контейнер с грунтом и крышкой извлекают из сушильного шкафа и охлаждают до комнатной температуры. Затем производят взвешивание и определяют массу контейнера с сухим грунтом и крышкой.

Расчет влажности выполняют по формуле (3.1).

Основные процедуры тестов по ГОСТ 5180–84 [11] и ASTM D 2216 [39] совпадают имея количественные различия по массе пробы влажного грунта, температуре и продолжительности его сушки.

3.2.2. Определение влажности грунтов методами и приборами для экспресс - оценки

Для определения влажности грунта непосредственно на строительной площадке применяют методы и приборы экспресс- оценки. Приборы, позволяющие выполнять такую оценку, называют влагомерами грунта (рис. 3.14 и 3.15).



Рис. 3.14. Влагомер почв, песка и грунта TDR -100



Рис. 3.15. Влагомер грунта МГ- 44

В настоящее время производители предлагают такие приборы, снабженные зондами различной длины, что позволяет определять влажность грунта как на поверхности так и на разных глубинах отсыпанного технологического слоя земляного полотна. Влагомеры просты в использовании, но требуют калибровки.



Рис. 3.16. Клавиши управления прибором МГ- 44

Порядок работ по калибровке подробно описывается производителями в инструкциях по эксплуатации.

Так, влагомер МГ-44 позволяет создать и занести в память процессора любую калибровочную кривую для любого типа грунта [45].

При измерении электрод нужно погрузить в грунт и включить прибор

кнопкой, расположенной слева на корпусе (см. рис. 3.17). На дисплее в первой строке появится название продукта, первого в списке калибровок. Во второй строке слева будет указано значение влажности в процентах: «Н=%», а справа – индикатор заряда батареи. На рис. 3.18 представлены показания прибора, в соответствии с которыми первым продуктом является чернозем, а влажность вследствие того, что электрод не погружен в грунт, имеет нулевое значение (Н=0%).

Для выбора другого грунта нужно нажать кнопку со стрелкой «Влево» (рис. 3.19), при помощи которой выполняется переход к списку калибровок (продуктов), хранящихся в памяти прибора.

Нажатием кнопок «Влево» или «Вправо» выбирается нужная строка (рис. 3.20).



Рис. 3.17. Включение прибора МГ-44



Рис. 3.18. Название первого в списке калибровок продукта «Чернозем»



Рис. 3.19. Нажатие кнопки «Влево» для входа в список калибровок



Рис. 3.20. Выбор нужной строки «Песок»

После появления нужной строки (см. рис. 3.20) нажимается кнопка «Ввод» и на дисплее появляются название продукта и его влажность. На рис. 3.21 приведена измеренная влажность образца песка.



Рис. 3.21. Влажность песка, измеренная прибором МГ- 44

Если влажность грунта, измеренная в лаборатории методом высушивания до постоянной массы, отличается от показаний прибора МГ-44, то возможно внести поправки в показания влагомера. Возможная величина поправки находится в пределах $\pm 5\%$, а шаг составляет 0,1%.

Для этого выполняется следующая процедура:

1. Погружение электрода в грунт с известной влажностью.
2. Нажимается кнопка включения.
3. Выбирается в списке нужный грунт.
4. Нажимается «Ввод».
5. Нажимается и удерживается кнопка «Вверх» до тех пор, пока на дисплее во второй строке между показаниями влажности и символом заряда батареи не появится значение поправки в процентах. Например, - 0,5%.
6. Кнопка «Вверх» отпускается, а управляя кнопками «Влево» или «Вправо», устанавливается желаемая поправка.

Одновременно с внесением поправки слева внизу меняется и значение влажности, уже скорректированное. Установив желаемое значение и нажимая «Ввод», поправку удаляют с дисплея. Форма калибровочной кривой при внесении поправки не изменяется. Происходит только параллельный перенос характеристики «вниз» или «вверх» в пределах $\pm 5\%$. Поправка для каждого из 99 каналов своя и независима.

3.3. Лабораторные работы по определению влажностей на границах раскатывания и текучести

Пределы пластичности (влажность на границах раскатывания и текучести) применяются для определения разновидности дисперсных грунтов (см. табл. 1.6) по числу пластичности (1.24).

Первую такую классификацию предложил Альберт Аттеберг. В соответствии с этой классификацией по числу пластичности почвы подразделяли на следующие разновидности [46]:

- непластичные $I_p=0$;
- слабопластичные $0<I_p\leq 7$;
- пластичные $7<I_p\leq 17$;
- высокопластичные $I_p>17$.

В современной классификации грунтов такие пределы варьирования числа пластичности соответствуют песку, супеси, суглинку и глине.

Первые методы экспериментального определения пределов пластичности были разработаны А. Аттебергом.

Согласно этим методом вначале определяют верхний предел пластичности (влажность на границе текучести). Для этого в фарфоровую чашку диаметром 12 см помещают пробу грунта массой 20 – 30 г. Затем грунт увлажняют и тщательно перемешивают, доводя до состояния густой пасты [46]. Для однородного распределения влаги и полного смачивания пасту в чашке помещают в эксикатор и выдерживают в течение суток. После этого гуртовую пасту еще раз перемешивают и разравнивают слоем толщиной 1 см по центру чашки. Пробу грунта разрезают на две равные части так, чтобы между ними образовалась щель шириной по дну чашки 1–1,5 мм, а на поверхности грунта – 2 – 3 мм [46]. После этого по дну чашки 3 раза ударяют рукой или трижды сбрасывают с высоты 6 см [46]. Выполнив эти действия, оценивают слияние двух частей грунтового образца, которое происходит после механического воздействия. В том случае, если в результате слияния двух частей образца щель между ними заполняется грунтом, считают, что данная влажность грунта соответствует верхнему пределу пластичности. При избыточном увлажнении грунта обе части образца сливаются после первого или второго удара. В этом случае добавкой некоторого количества сухого грунта пробу грунта подсушивают и повторяют опыт. При недостаточном увлажнении грунта слияния двух частей пробы не происходит. Для дальнейшего

определения влажности на границе текучести пробу увлажняют и повторяют опыт [46]. Когда влажность пробы соответствует верхнему пределу пластичности, из грунтовой пасты в стаканчик для взвешивания отбирают пробу грунта и выполняют лабораторный тест по определению влажности.

Для определения нижнего предела пластичности используется грунт, оставшийся после определения верхнего предела пластичности. Оставшуюся часть пробы подсушивают перемешиванием или добавляют к ней сухой грунт [46]. После этого из подсушенного грунта скатывают шарик диаметром 1 см. Затем на листе бумаги шарик раскатывают в шнур толщиной 3 мм. Эти операции повторяют до тех пор, пока шнур диаметром 3 мм начнет распадаться на кусочки длиной 8 – 9 мм [46]. Влажность грунта, при которой наблюдается ломка шнура на кусочки такой длины, считается нижним пределом пластичности, для определения которого кусочки помещают в бюкс и выполняют тест по определению влажности.

Кроме этих двух тестов А. Аттеберг разработал метод по определению вида грунта. Этот тест применяют при полевых испытаниях в период изысканий, он в чем-то аналогичен методу определения нижнего предела пластичности. При выполнении этого теста образец грунта увлажняют до тестообразного состояния [46]. Далее из грунтовой пасты пытаются скатать шарик, который пробуют раскатать в шнур толщиной 3 см, а затем предпринимают попытку свернуть шнур в кольцо диаметром 2–3 см [46]. Результат этого опыта зависит от гранулометрического состава грунта. Песок не скатывается в шарик и не образует шнура. Супесь скатывается в шарик, который не удается раскатать в шнур, а получают только зачатки шнура. Суглинок легкий скатывается в шарик и раскатывается в шнур, но шнур имеет малую прочность, вследствие чего распадается на части при раскатывании или при взятии с ладони и не сворачивается в кольцо [46]. Суглинок тяжелый легко скатывается в шнур, который сворачивается в кольцо, но кольцо имеет заметные трещины. Глина образует шнур и кольцо без трещин.

Экспериментальные методы А. Аттеберга были проанализированы Артуром Казагранде. Основным недостатком оригинальных методов А. Аттеберга является то, что исход опыта зависит от испытателя [47]. Поэтому А. Казагранде модифицировал метод А. Аттеберга, а для определения верхнего предела пластичности разработал

прибор [47], который применяется при выполнении теста по стандарту ASTM D 4318 [48].

3.3.1. Определение влажности на нижней и верхней границах пластичности по стандарту ASTM D 4318

Для выполнения работы по определению верхнего предела пластичности²⁷ необходимо подготовить механический прибор А. Казагранде [48].

Этот прибор состоит из латунной чашки, подвешенной на каретке, предназначенной для управления падением чашки на твердое резиновое (каучуковое) основание.



Рис. 3.22. Прибор А. Казагранде с ручным управлением



Рис. 3.23. Прибор А. Казагранде с электрическим двигателем

падения чашки, обеспечивая требуемые 10 мм.

Устройство управляется либо вручную при помощи кривошипной передачи (рис. 3.22) либо электрическим двигателем (рис. 3.23). Основание прибора должно быть выполнено из твердой резины, обеспечивающей отскок чашки на величину не менее чем 77% и не более 90%. Основание прибора должно быть снабжено резиновыми ножками, обеспечивающими изоляцию прибора от поверхности, на которую устанавливают прибор. Масса латунной чашки вместе с устройством ее подвеса должна составлять от 185 до 215 г. Кулачковый упор, вращаемый ручкой, обеспечивает подъем и падение чашки на каучуковую поверхность. Каретка устроена так, чтобы имелась возможность регулировать высоту

²⁷ В терминологии стандартов США верхний и нижний пределы пластичности называют пределами текучести и пластичности (Liquid limit и Plastic limit) и, соответственно, обозначают аббревиатурой LL и PL.

Перед выполнением теста необходимо убедиться в том, что прибор находится в исправном состоянии, а чашка чистая и не содержит частиц грунта от предыдущих опытов. Далее оценивают пятно контакта чашки и резинового основания, которое в диаметре не должно превышать 10 мм. Затем следует осмотреть чашку на предмет отсутствия в ней канавок глубиной более 0,1 мм и оценить толщину стенки, которая не должна быть тоньше половины первоначального размера. Вращением ручки проверяют исправность связи чашки с кареткой и кулачковым упором. Чашка не должна раскачиваться из стороны в сторону на величину более 3 мм.

После осмотра и оценки исправности механизмов прибора выполняется калибровка высоты падения чашки, которая должна составлять $10 \pm 0,2$ мм. Высоту падения чашки устанавливают при помощи мерного приспособления, входящего в комплект прибора, оно приведено на рис. 3.24. Фиксацию чашки на установленной высоте обеспечивают при помощи двух зажимных винтов, расположенных на верхней и нижней частях каретки. Эта операция приведена на рис. 3.25.

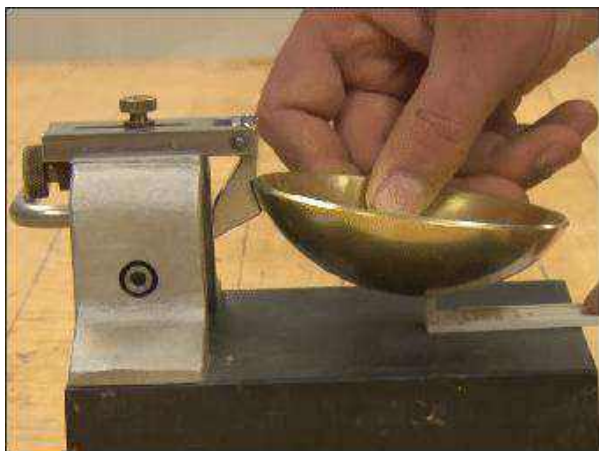


Рис. 3.24. Установка латунной чашки на высоте 10 мм



Рис. 3.25. Фиксация чашки зажимными винтами на высоте 10 мм

После выверки высоты падения чашки готовят грунтовую пасту. Для этого применяют грунт, прошедший сквозь сито № 40, имеющее ячейки размером 425 мкм. Такого грунта берут 150 – 200 г (рис. 3.26) и смешивают с дистиллированной или деминерализованной водой в стандартной грунтовой чашке или на специальной стеклянной пластине (рис. 3.27). Грунтовую пасту укладывают в латунную чашку. Для удобства выполнения этой операции чашку снимают, вынув удерживающую ее втулку (рис. 3.28). Грунтовую пасту укладывают в

чашку при помощи ножа слоем толщиной 1 см. Иллюстрация этой операции приведена на рис. 3.29. При помощи специального шпателя, снабженного V-образным ножом выступом (рис. 3.30), в грунтовой пасте наносят борозду (рис. 3.31).



Рис. 3.26. Сухой грунт, прошедший сквозь сито № 40



Рис. 3.27. Приготовление грунтовой пасты на стеклянной пластине

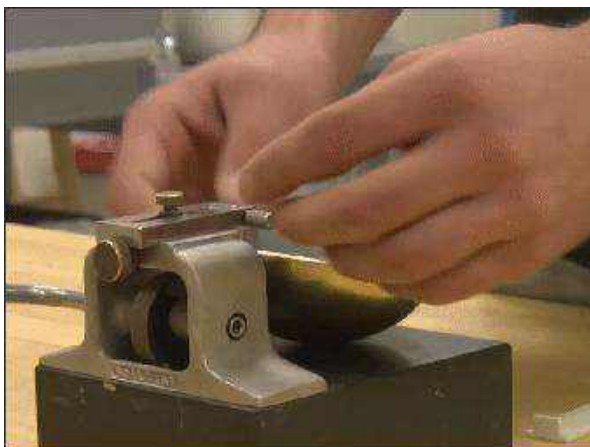


Рис. 3.28. Иллюстрация выемки втулки при съеме чашки с прибора



Рис. 3.29. Иллюстрация укладки грунтовой пасты в чашку



Рис. 3.30. Иллюстрация размещения шпателя с V-образным выступом



Рис. 3.31. Устройство борозды V-образным шпателем

При устройстве борозды V-образный выступ шпателя размещают в центре латунной чашки (см. рис. 3.30). Далее заглубив шпатель на 10 мм, перемещая его вперед в грунтовой пасте, вырезают борозду (рис. 3.31). Общий вид вырезанной борозды представлен на рис. 3.32, а на рис. 3.33 приведена форма борозды (канавки) со скошенными краями.



Рис. 3.32. Общий вид борозды

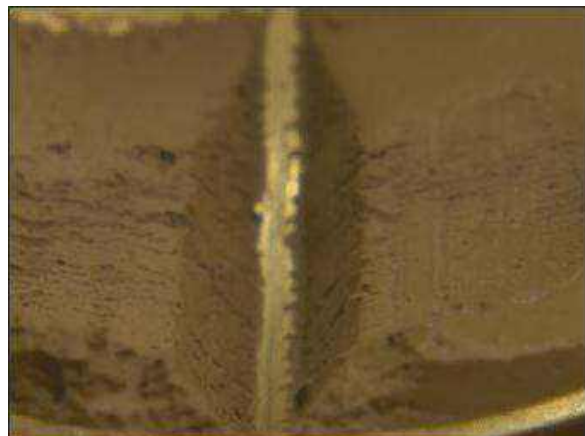


Рис. 3.33. Форма канавки (борозды)

Далее начинают вращать рукоятъ со скоростью 2 оборота в секунду (рис. 3.34). Вращение повторяют до тех пор, пока два края борозды не сольются вместе на длину контакта 13 мм.



Рис. 3.34. Вращение рукояти прибора для слияния краев борозды

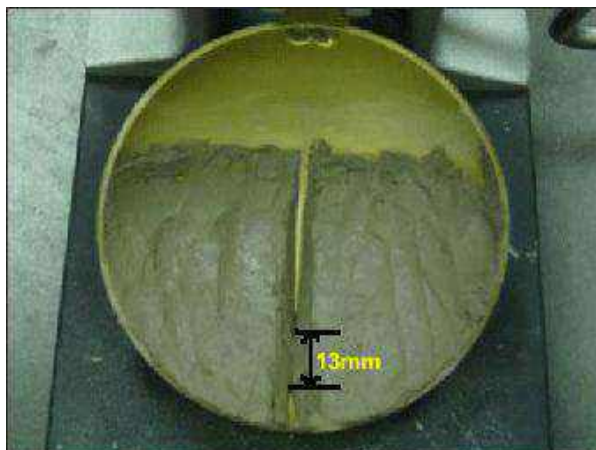


Рис. 3.35. Окончание теста при слиянии краев борозды на длину 13 мм

Для измерения длины контакта слившихся краев борозды используют мерное приспособление, располагая его так, как это показано на рис. 3.36. Убедившись, что длина контакта слившихся краев борозды составляет 13 мм из грунтовой пасты, находящейся в латунной

чашке, отбирают пробу грунта для определения его влажности (см. рис. 3.37).



Рис. 3.36. Измерение длины контакта слившихся краев борозды



Рис. 3.37. Отбор пробы для определения влажности грунта

При определении предела текучести по методу *A* необходимо выполнить еще как минимум 3 испытания. После выполнения 1-го теста, описанного нами, проводят еще 2 испытания. Для этого грунтовую пасту помещают в лабораторную чашку и добавляют к ней дистиллированную воду. Пасту смешивают с водой так, чтобы получить пробу более жидкой консистенции, у которой при повторном опыте края борозды сольются на длину 13 мм за меньшее число ударов. В одном из опытов слияние краев борозды должно происходить за 25 – 35 ударов, а в двух других края канавки должны сливаться после 20 – 30 и 15 – 25 падений чашки.

При обработке результатов необходимо построить графическую зависимость влажности, при которой края канавки сливаются на величину 13 мм от необходимого для этого слияния количества ударов чашки об основание прибора. Для спрямления графика он может быть построен в полулогарифмических координатах (логарифмируется число ударов). Число ударов откладывают на оси абсцисс, а влажность грунта – на оси ординат.

Для определения предела текучести из точки, расположенной на оси абсцисс и соответствующей 25 ударам, проводят прямую, нормальную к этой оси. После этого находят точку пересечения прямой с графиком «влажность – число ударов». Из найденной точки пересечения проводят нормаль к оси ординат. Точка пересечения второй построенной прямой с осью ординат указывает предел текучести *LL*. Пример определения предела текучести показан на рис. 3.38.

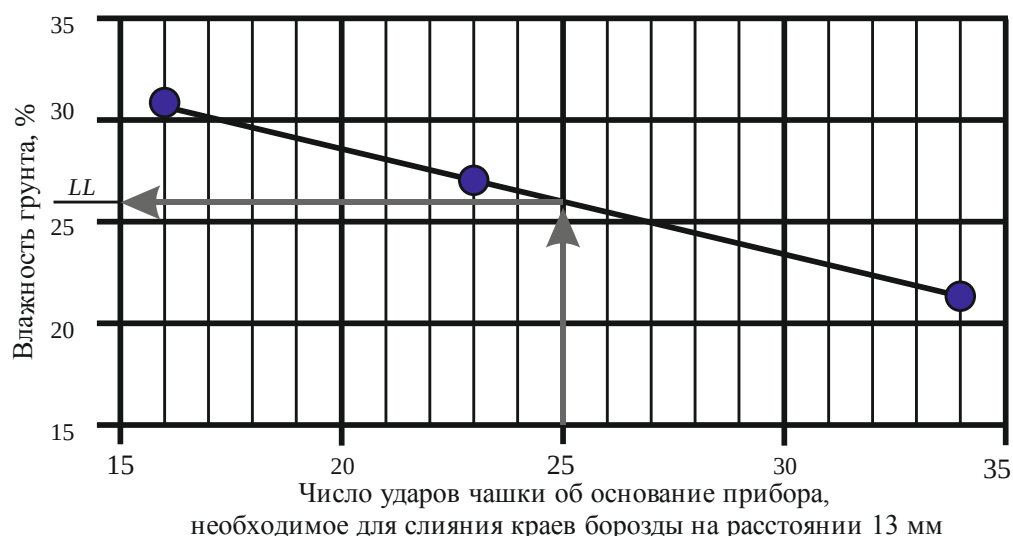


Рис. 3.38. Пример определения предела текучести по результатам теста, выполненного по методу *A*

При определении предела текучести по методу *B* испытание выполняют так, чтобы число ударов, необходимое для закрытия паза борозды, находилось в пределах от 20 до 30. Если число ударов меньше 20, то грунт увлажняют, а если количество ударов превышает 30, то грунт подсушивают. После проведения испытаний к грунту добавляют небольшое количество воды и повторяют опыт.

Расчет предела текучести *LL* выполняют по формуле

$$LL = W \cdot \left(\frac{N}{25} \right)^{0,121} = k \cdot W, \quad (3.2)$$

где *W* – влажность грунта в одном из опытов, %; *N* – количество ударов чашки об основание прибора, после выполнения которых в данном опыте произошло слияние краев борозды на длину 13 мм; *k* – корректирующий коэффициент, принимаемый по табл. 3.2.

Таблица 3.2. Величина корректирующего коэффициента

Число ударов	Значение коэффициента <i>k</i>	Число ударов	Значение коэффициента <i>k</i>
20	0,973	26	1,005
21	0,979	27	1,009
22	0,985	28	1,014
23	0,990	29	1,018
24	0,995	30	1,022
25	1,000	31	—

По формуле (3.2) вычисляются пределы текучести для каждого из двух испытаний. Причем разница между вычисленными значениями

не должна превышать 1%. В противном случае оба опыта необходимо повторить. Предел текучести определяют как среднее из двух, вычисленных по (3.2) значений.

Для определения предела пластичности PL применяют способ ручного раскатывания грунта в жгут диаметром 3,2 мм. Для выполнения этого теста подготавливают комплект оборудования, необходимый для определения влажности грунта, а также инвентарь, иллюстрация которого приведена на рис.3.39.



Рис. 3.39. Инвентарь, необходимый для определения предела пластичности грунта по стандарту ASTM D 4318 [48]

– нож, фарфоровую чашку и стаканчики для взвешивания грунта.

В комплект инвентаря входит:

– стеклянная квадратная или прямоугольная пластина толщиной 1 см и имеющая длину наименьшей стороны как минимум 30 см;

– стальной стержень диаметром 3 мм, который в процессе опыта используют для оценки диаметра раскатываемого из грунта жгута;



Рис. 3.40. Рабочий момент приготовления грунтового образца

Для выполнения опыта готовят грунтовый образец массой 20 г или более. Для образца может быть использован грунт, оставшийся после испытания по определению предела текучести, но влажность этого грунта должна быть понижена. Образец грунта можно приготовить заново, взяв сухой грунт, прошедший сито № 40, и смешав его с во-

дой. Независимо от способа приготовления образца его консистенция должна быть такой, чтобы грунт можно было раскатывать, но при этом он не должен прилипать к рукам. Для подсушивания переувлаж-

ненного грунта стандарт [48] рекомендует применять промокательную бумагу или полотенца, которые не оставляют на грунте волокон.

Для раскатывания из подготовленного образца берут порцию грунта массой не менее 1,5 – 2 г (рис. 3.41). Этот грунт для удобства последующего раскатывания зажимают между ладонями и скатывают вначале в шарик (рис. 3.42), а затем в цилиндр высотой, равной ширине ладони, и диаметром существенно больше 3,2 мм.



Рис. 3.41. Отбор порции грунта, необходимой для раскатывания



Рис. 3.42. Скатывание взятого грунта в шарик

Цилиндрическую заготовку укладывают на стеклянную пластину и начинают ладонью раскатывать в жгут, прикладывая давление так, чтобы в течение 2 мин раскатать заготовку до диаметра 3,2 мм (рис. 3.43). Оценку диаметра жгута производят визуально. Для этого рядом со жгутом укладывают стандартный стальной стержень диаметром 3 мм (рис. 3.44).



Рис. 3.43. Иллюстрация раскатывания грунта в жгут диаметром 3,2 мм

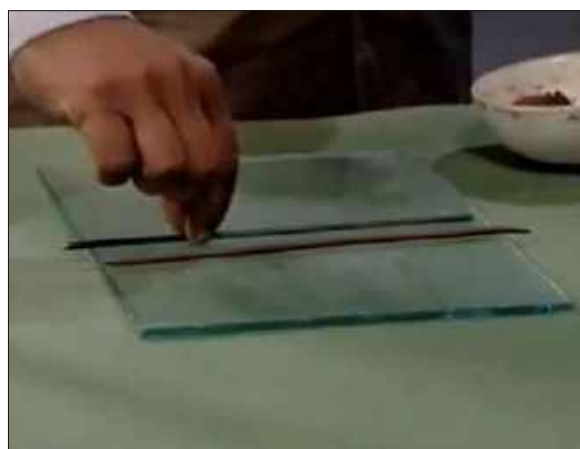


Рис. 3.44. Сравнение диаметров жгута и стандартного стального стержня

Величина требуемого при раскатке давления, оказываемого ладонью на грунт, варьируется в зависимости от его разновидности. Хрупкие грунты рекомендуется раскатывать внешней стороной ладони или основанием большого пальца. Нормальной считается такая скорость раскатывания, при которой выполняется 80 – 90 полных прокаток грунта. За одну полную прокатку считают движение руки вперед и назад в исходное положение. Для хрупких грунтов скорость прокатки уменьшают. Когда диаметр жгута достигает 3,2 мм, а образец не рассыпается на отдельные кусочки (рис. 3.45), то это свидетельствует о том, что влажность грунта больше предела пластичности. В этом случае опыт необходимо повторить. Для выполнения повторного опыта жгут из раскатанного грунта ломают (рис. 3.46) и вновь повторяют все операции.

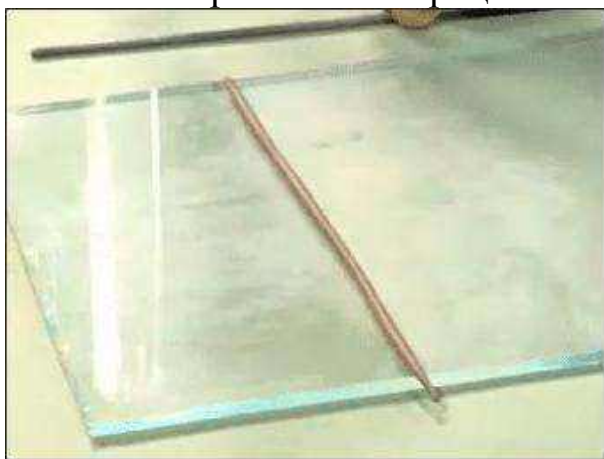


Рис. 3.45. Жгут из грунта с влажностью выше предела пластичности

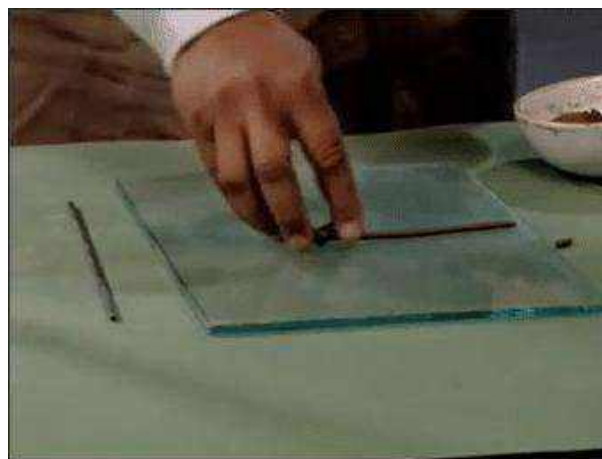


Рис. 3.46. Ломка жгута для выполнения повторного испытания

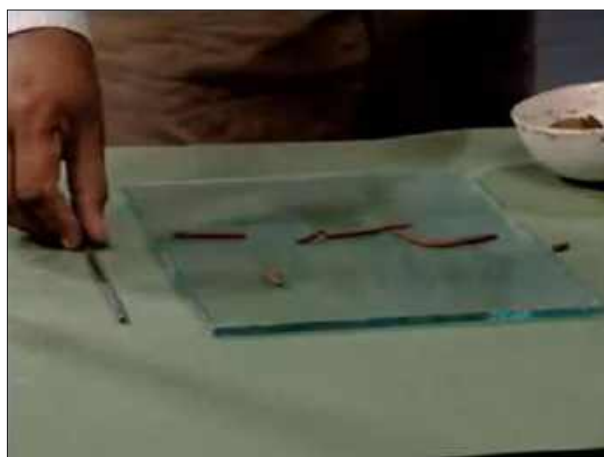


Рис. 3.47. Распад грунта на отдельные кусочки различной длины

Повторные испытания повторяют до тех пор, пока раскатываемый жгут при диаметре 3,2 мм не начнет распадаться на отдельные кусочки (рис. 3.47). Следует обратить внимание, что длина кусочков, на которые распадается жгут, стандартом [48] не регламентируется. В том случае, если при раскатке жгута он начинает распадаться при диаметре больше

3,2 мм, то это считается удовлетворительным условием окончания теста, но лишь в том случае если этот грунт был ранее раскатан в

жгут диаметром 3,2 мм. Характер разрушения жгута зависит от разновидности грунта, из которого он раскатан.

3.3.2. Определение влажности на границе текучести и раскатывания по ГОСТ 5180–84

Методы определения влажности на границах текучести и раскатывания по ГОСТ 5180–84 [11] являются основными и применяются во всех дорожных лабораториях. Лабораторную работу выполняют в три этапа [11]. Вначале производится подготовка к испытанию, включающая в себя изготовление образца.

При определении влажности на границы текучести могут использоваться монолиты или образцы нарушенного сложения, для которых требуется сохранение природной влажности. Границу текучести грунтов, содержащих органические вещества, определяют сразу после вскрытия образца, а при определении этой характеристики грунтов, не содержащих органических веществ, допускается использовать образцы грунтов в воздушно-сухом состоянии.



Рис. 3.48. Измельчение грунта растиранием в фарфоровой чашке



Рис. 3.49. Отбор пробы квартованием



Рис. 3.50. Взвешивание грунта для отбора пробы массой 300 г

При изготовлении образца грунт природной влажности разминают шпателем в фарфоровой чашке (рис. 3.48) или нарезают ножом тонкой стружкой. После этого из грунта удаляют растительные остатки крупнее 1 мм. Затем из измельченного грунта методом квартования (рис. 3.49) отбирают пробу массой 300 г (рис. 3.50), которую протирают сквозь сито № 1.

Грунты в воздушно-сухом состоянии тоже растирают в фарфоровой чашке, а после удаления растительных остатков крупнее 1 мм просеивают сквозь сито с сеткой № 1 (рис. 3.51). Затем грунт увлажняется дистиллированной водой до состояния густой пасты (рис. 3.52), после чего перемешивается шпателем до однородного состояния (рис. 3.53).



Рис. 3.51. Просеивание грунта
сквозь сито № 1



Рис. 3.52. Состояние грунта после
увлажнения



Рис. 3.53. Перемешивание грунто-
вой пасты

При необходимости удаления избытка влаги из илов применяют хлопчатобумажную ткань и листы фильтровальной бумаги, между которыми размешают пробу грунта, а удаление воды производят обжатием грунтовой пасты. Грунтовую пасту из илов не допускается вы-

держивать в закрытом стеклянном сосуде. Для уменьшения влажности добавлять в грунтовую пасту сухой грунт не допускается.

Дополнительно к оборудованию и инвентарю, применяемому для определения влажности грунта, необходимо подготовить балансный конус Васильева, состоящий из конуса с балансирами, цилиндрической чашки и подставки (рис. 3.54).



Рис. 3.54. Балансный конус Васильева

При выполнении испытания подготовленную пробу укладывают в цилиндрическую чашку. Укладку пасты производят небольшими порциями (рис. 3.55), а поверхность пасты заглаживают заподлицо с краями чашки (рис. 3.56).



Рис. 3.55. Укладка пасты в форму



Рис. 3.56. Разравнивание пасты

Балансный конус смазывают тонким слоем вазелина (рис. 3.57) и подводят к поверхности грунтовой пасты так, чтобы его острое касалось пасты (рис. 3.58). Затем конус плавно отпускают, позволяя ему погружаться в пасту под действием собственного веса (рис. 3.59). Влажностью на границе текучести считается такая влажность, при которой конус в течение 5 с погружается на глубину 10 мм. Контроль времени погружения конуса в пасту можно выполнить по секундомеру (рис. 3.60).

Если в течение 5 с происходит погружение конуса на величину 10 мм, то тест завершают.



Рис. 3.57. Смазка конуса вазелином



Рис. 3.58. Подводка конуса к пасте



Рис. 3.59. Погружение конуса в пасту под действием собственного веса



Рис. 3.60. Контроль времени погружения по секундомеру

В тех случаях, когда в течение 5 с погружение конуса составляет менее или более 10 мм, то выполнение теста продолжают.



Рис. 3.61. Добавление воды для увеличения влажности грунтовой пасты

ции, описанные нами выше.

Если за время, равное 5 с, конус погружается в грунт на глубину меньше 10 мм, то это означает, что влажность грунта меньше влажности на границе текучести. В этом случае в грунтовую пасту добавляют дистиллированную воду и тщательно перемешивают пасту до однородного состояния. После этого опыт с балансирным конусом повторяют, выполняя все опера-

В том случае если в течение 5 с конус погружается в грунт на глубину более 10 мм, то это свидетельствует о том, что влажность грунта выше влажности на границе текучести. Для выполнения повторного теста грунт необходимо подсушить. Подсушивание грунта выполняют интенсивным непрерывным перемешиванием пасты в фарфоровой чашке (рис. 3.62), в которую перекладывают грунтовую массу из цилиндрической формы. Выполнив перемешивание и подсушив грунт, пасту вновь укладывают в цилиндрическую форму и повторяют опыт с балансирным конусом.

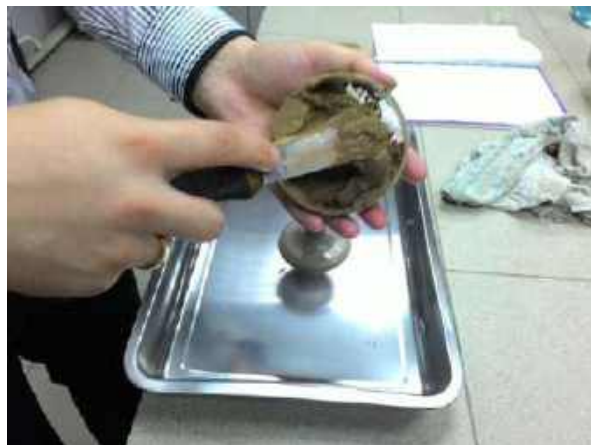


Рис. 3.62. Перемешивание пасты при подсушивании грунта

По достижении границы текучести из пасты отбирают пробы грунта массой 15–20 г, которые укладывают в стаканчики для взвешивания (бюксы) (рис. 3.63).



Рис. 3.63. Отбор проб пасты для определения влажности

Определение влажности грунта выполняется на границе текучести методом высушивания до постоянной массы, а ее расчет производят по формуле (3.1).

В соответствии с требованиями ГОСТ 5180–84 [11] влажность на границе раскатывания (текучести) определяется как влажность грунтовой пасты, при которой изготовленный из нее раскатыванием жгут диаметром 3 мм начинает распадаться на кусочки длиной 3 – 10 мм.

Лабораторная работа выполняется в три этапа, которые подразделяют на подготовку к испытанию, проведение испытания и обработку результатов испытания. Для выполнения опыта подготавливают оборудование и инвентарь, необходимые для определения влажности методом высушивания до постоянной массы, а также стеклянную или пластмассовую пластину, фарфоровую чашку для грунта, шпатель и нож.

Для изготовления пасты можно использовать часть грунта, оставшегося от опыта по определению влажности на границе текучести. Изготовление пасты выполняют так же, как в предыдущем опыте.

Из тщательно перемешенной пасты отбирают небольшой кусочек и раскатывают ладонью на стеклянной или пластмассовой пластинке (рис. 3.64) до образования жгута диаметром 3 мм, который измеряют металлической линейкой (рис. 3.65), соответствующей требованиям ГОСТ 427 – 75 [49].



Рис. 3.64. Раскатывание пасты в жгут



Рис. 3.65. Измерение диаметра жгута

Если при толщине 3 мм жгут сохраняет связность и пластичность, то это означает, что влажность грунта больше предела раскатывания. В этом случае жгут собирают в комок (рис. 3.66), который раскатывают вновь (рис. 3.67) до образования жгута диаметром 3 мм.



Рис. 3.66. Сбор жгута в комок



Рис. 3.67. Повторное раскатывание
(вид снизу)

При раскатывании на жгут слегка нажимают и следят за тем, чтобы его длина не превышала ширину ладони. Раскатывание продол-

жают до тех пор, пока по поперечным трещинам, возникающим в жгуте, он не начнет распадаться на кусочки длиной 3 – 10 мм. Длину кусочков можно измерить металлической линейкой (рис. 3.68). Кусочки распавшегося жгута собирают в стаканчик (рис. 3.69).



Рис. 3.68. Измерения длины кусочков распавшегося жгута



Рис. 3.69. Сбор кусочков в стаканчик для взвешивания (бюкс)

Когда масса грунта в каждом из трех стаканчиков достигает 10 – 15 г, его накрывают крышкой и готовят к определению влажности высушиванием до постоянной массы.

3.3.3. Определение влажности на нижней и верхней границах пластичности методом конуса конструкции П.О. Бойченко

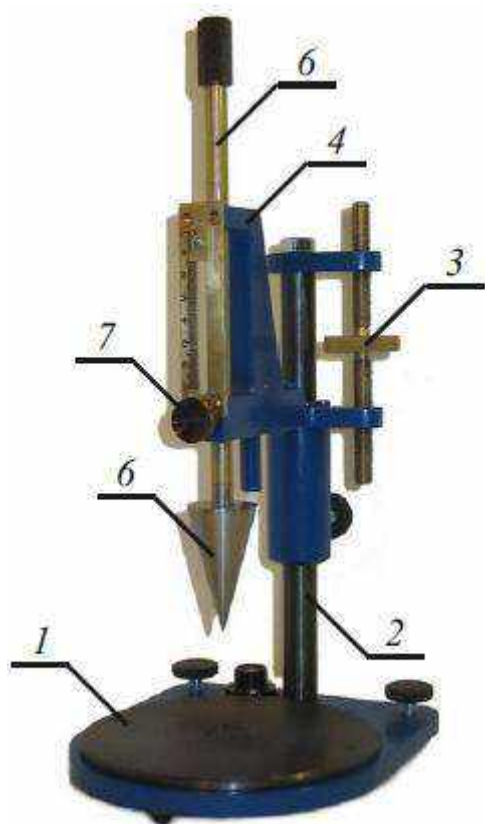


Рис. 3.70. Пенетрометр ПБ-1Ф конструкции П.О. Бойченко

В рассмотренных нами способах определения влажностей на границах текучести и раскатывания в качестве образца используется грунтовая паста, то есть грунт нарушенного сложения. Вследствие этого данные способы не дают правильного представления о пределах пластичности и текучести для грунтов естественного (ненарушенного сложения). Замечание справедливо и для рассчитываемого по этим характеристикам предела текучести (см. табл. 1.10 и формулу (1.25)).

Отмеченные нами недостатки побудили Павла Онуфриевича Бойченко к разработке пенетрометра, представленного на рис. 3.70, и методам определения пределов пластичности и текучести [50]. Кроме того, в 1964 г. П.О. Бойченко обосновал и ввел в инженерную практику характеристику, называемую «показатель консолидации грунта ненарушенной структуры» [51].

Пенетрометр П.О. Бойченко (рис. 3.70) состоит [50]:

- из основания прибора 1;
- колонки 2, прикрепленной к основанию прибора 1;
- винта 3;
- кронштейна 4, перемещающегося по колонке 2 при помощи винта 3;
- стержня 5, помещающегося в отверстиях кронштейна 4;
- конуса 6, установленного на стержне 5;
- защелки с кнопкой 7, предназначенными для удерживания конуса в исходном положении.

При нажатии кнопки 7 конус 6 со стержнем 5 падают без трения о стенки отверстия в кронштейне 4. Угол при вершине конуса составляет 30° , то есть такой же, как и у балансного конуса Васильева. Масса всей подвижной системы, которую составляют все детали, со-

единенные со стержнем и конусом, 300 г. Пенетромтр комплектуется грунтовыми кольцами с внутренним диаметром 50 мм, но разной высоты 20, 30, 40 и 50 мм. Кроме грунтовых колец в комплект входят диск и предохранительное кольцо. Кольцо с грунтом размещается на основании прибора, а конус падает и погружается в грунт. Глубина погружения конуса фиксируется по основной шкале и нониусу²⁸ с точностью до 0,1 мм.

По методу П.О. Бойченко нижним пределом пластичности $w_{\text{пн}}$ считается влажность грунта, при которой конус погружается в грунт на глубину 4 мм, а верхним пределом пластичности $w_{\text{пв}}$ является влажность грунта, при которой глубина погружения конуса составляет 32 мм.

Непосредственно перед выполнением опыта проверяют исправность пенетромтра. У исправного прибора между кронштейном и колонкой не должно быть зазора, а при нажатии на кнопку защелки (до отказа) стержень должен свободно падать без трения. Кроме того, в начальном положении отсчет по шкале должен быть равен нулю (рис. 3.71).

Перед началом испытания конус вытирают насухо. Это же делают после каждого измерения глубины проникновения конуса в грунт, а после выполнения теста конус смазывают вазелином.

Подготовка грунта к испытанию такая же, как в методах по ГОСТ 5180–84 [11] и ASTM D 4318 [48], но все же отличается тем, что образец формуется в кольцах при помощи прессы для уплотнения грунта нарушенной структуры [50].

При определении нижнего предела пластичности кольцо высотой 20 или 30 мм смазывают вазелином и устанавливают на стекле. Грунт, имеющий влажность, близкую к пределу раскатывания, порциями ук-



Рис. 3.71. Начальное положение конуса (отсчет по шкале ноль)

²⁸ Нониус (шкала Нониуса, верньер) – вспомогательная шкала, устанавливаемая на различных измерительных приборах и инструментах, служащая для более точного определения количества долей делений основной шкалы.

ладывают в грунтовое кольцо, уплотняя деревянным стержнем диаметром 25 – 30 мм. Кольцо должно быть заполнено грунтом почти на всю высоту так, чтобы расстояние от поверхности грунта до верхнего края составляло 1 – 2 мм. Затем при помощи винтового пресса производят уплотнение грунта. Для этого на основание пресса укладывают лист бумаги, поверх которого устанавливают кольцо. Затем вращением рукояток винта опускают штамп пресса, вводя его в соприкосновение с грунтом. Убедившись в том, что штамп пресса проник внутрь кольца, вращением рукояток пресса выполняют уплотнение грунта. Уплотнение производят до момента выдавливания грунта через зазоры между кольцом и штампом или между кольцом и основанием пресса. После этого выступивший с нижней стороны кольца грунт срезают ножом и вставляют в эту часть кольца стальной диск, проталкивая грунт вверх на высоту выступа диска 5 мм. Выступивший из верхней части кольца грунт срезают ножом. Если при обрезке грунта происходит его выкрашивание, то образовавшиеся пустоты допускается заполнять грунтом, уплотняя его концом ножа [50].

Подготовленный образец грунта в кольце вместе с диском устанавливают на основание пенетromетра и вращением установочного винта 3 конус подводят к поверхности грунта так, чтобы острие конуса слегка касалось поверхности грунта. Правильность установки можно проверить, передвигая кольцо по основанию пенетromетра. При правильной установке острие конуса вычерчивает тонкую линию на грунтовой поверхности [50]. Затем резко нажимают на кнопку защелки 7 и дают возможность конусу внедриться в грунт. После этого по шкале снимают отсчет с точностью до 0,1 мм.

На одном и том же образце производят 3 – 5 опытов, а за окончательный результат принимают их среднее значение. Далее слегка меняют влажность грунта и готовят новый образец, который испытывают по описанному нами регламенту. Обычно для определения нижнего предела пластичности достаточно испытаний 2 – 3 образцов. Эти испытания необходимо провести так, чтобы глубина погружения конуса в один образец была несколько меньше 4 мм, а во второй или третий образец, наоборот немного больше 4 мм. Поэтому первый испытываемый образец является контрольным, по результатам его испытаний судят о том, в какую сторону следует изменять влажность во втором образце. Если при испытании первого образца средняя глубина проникновения конуса получилась меньше 4 мм, то при изготовлении второго образца грунт слегка увлажняют. И наоборот, если сред-

ная глубина внедрения конуса в первый образец составила более 4 мм, то перед изготовлением второго образца грунт слегка подсушивают.

Для определения верхнего предела пластичности грунт укладывают в кольцо высотой 40 или 50 мм. При заполнении кольца следят за тем, чтобы в грунте не попадались крупные пузырьки воздуха. С целью предохранения острия конуса от повреждений диск не используют, а под кольцо подкладывают плотный картон или пластмассовую пластину. В связи с этим перед уплотнением грунта рекомендуется накладывать его в обойму с некоторым излишком, а выступающую после уплотнения часть срезать ножом. Дальнейший опыт производится аналогично методике, описанной нами выше, с той разницей, что результаты испытаний 2 – 3 колец с грунтом должны быть близки к глубине проникновения конуса 32 мм. Так как при определении верхнего предела пластичности глубина проникновения конуса в кольцо достаточно большая, то с одним кольцом выполняют только один опыт. После испытаний из каждого кольца отбирают пробу грунта для определения влажности.

Определение нижнего и верхнего пределов пластичности $w_{\text{пн}}$ и $w_{\text{пв}}$ выполняют графическим методом, представленным на рис. 3.72.

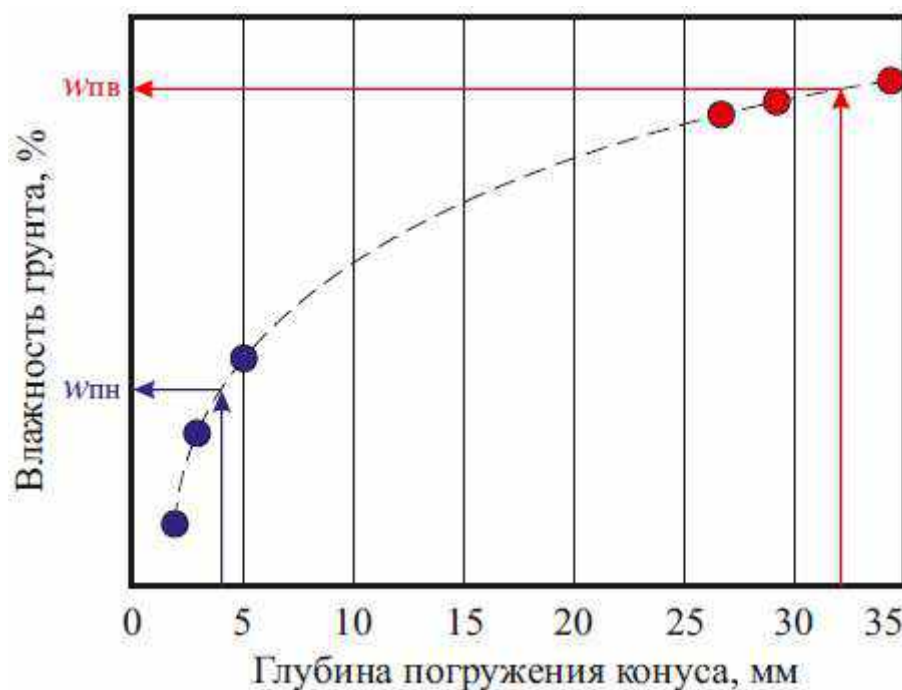


Рис. 3.72. Графический метод определения нижнего и верхнего пределов пластичности по результатам тестирования пенетрометром П.О. Бойченко

При использовании этого метода строят график, на котором по оси абсцисс откладывают глубину проникновения конуса пенетрометра в каждый образец, а по оси ординат соответствующие ей влажности грунта в испытанных образцах. Через полученные 4 – 6 точек проводят кривую. Далее на оси абсцисс находят точки, соответствующие глубине проникновения конуса 4 и 32 мм, из которых перпендикулярно этой оси проводят прямые отрезки до пересечения с кривой, а из полученных точек пересечения проводят нормали к оси ординат. Точки пересечения нормалей с осью ординат являются искомыми пределами пластичности $w_{пн}$ и $w_{пв}$.

3.4. Лабораторные работы по определению гранулометрического (зернового) состава грунтов

Суть определения гранулометрического (зернового) состава грунтов заключается в их разделении на отдельные фракции и последующего вычисления процентного содержания каждой фракции [52, 53]. Согласно требованиям ГОСТ 12536–2014 [52] для определения гранулометрического состава грунтов применяют три основных метода: ситовой, ареометрический и пипеточный. Область применения этих методов регламентируется стандартом [52, табл. 1] и приведена нами в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Область применения методов определения зернового и микроагрегатного состава грунтов

Грунты	Размер фракции грунта, мм	Метод определения	Разновидность метода определения
Песчаные, при выделении зерен песка крупностью	От 10 до 0,5 мм	Гранулометрический (зерновой) состав	Ситовой без промывки
	От 10 до 0,1 мм		Ситовой с промывкой
Глинистые	Менее 0,1	Гранулометрический (зерновой) состав	Ареометрический
	Менее 0,1	Гранулометрический (зерновой) и микроагрегатный составы	Пипеточный (применяется только для специальных целей)

Лабораторные работы, выполняемые каждым методом, включают в себя этапы: отбора и подготовки пробы, проведения испытания и обработку результатов с заполнением исполнительной документации.

3.4.1. Определение гранулометрического зернового состава песчаных грунтов ситовым методом по ГОСТ 12536 –79

Для выполнения работы подготавливают приборы и оборудование, к которым относят:

- Набор сит с отверстиями диаметром 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,25 и 0,1 мм, снабженных поддоном.
- Весы лабораторные и весы технические с относительной погрешностью взвешивания не более 0,1%.
- Сушильный шкаф.
- Песчаную баню.
- Чашку и ступку фарфоровые, пестик с резиновым наконечником, кисточку и резиновую грушу.

Для выполнения испытания необходимо отобрать пробу, минимальная масса которой приведена в табл. 3.4.

Таблица 3.4. Минимальная масса образца, необходимая для просеивания

Диаметр частиц D_{90} , мм	Вид грунта	Минимальная масса образца, г
Свыше 10	Гравий (дресва)	2000
5		
Свыше 2		
1	С содержанием песчаных частиц	100
Свыше 0,5		
0,25	С содержанием пылеватых и глинистых частиц	50
До 0,1		

Отбор пробы выполняют методом квартования, соблюдая требования ГОСТ 8735–88 [54, п. 2.5]. При отборе пробы методом квартования грунт, взятый для испытания, ставят конусом и разравнивают так, чтобы получился квадрат толщиной слоя приблизительно 2 см. Полученный квадрат делят на четыре части, проводя взаимно перпендикулярные линии через его центр. После этого любые две противоположные четверти отбрасывают, а оставшиеся две четверти берут в пробу или выполняют дальнейшее квартование для сокращения про-

бы. Процесс отбора пробы методом квартования проиллюстрирован на рис. 3.73.

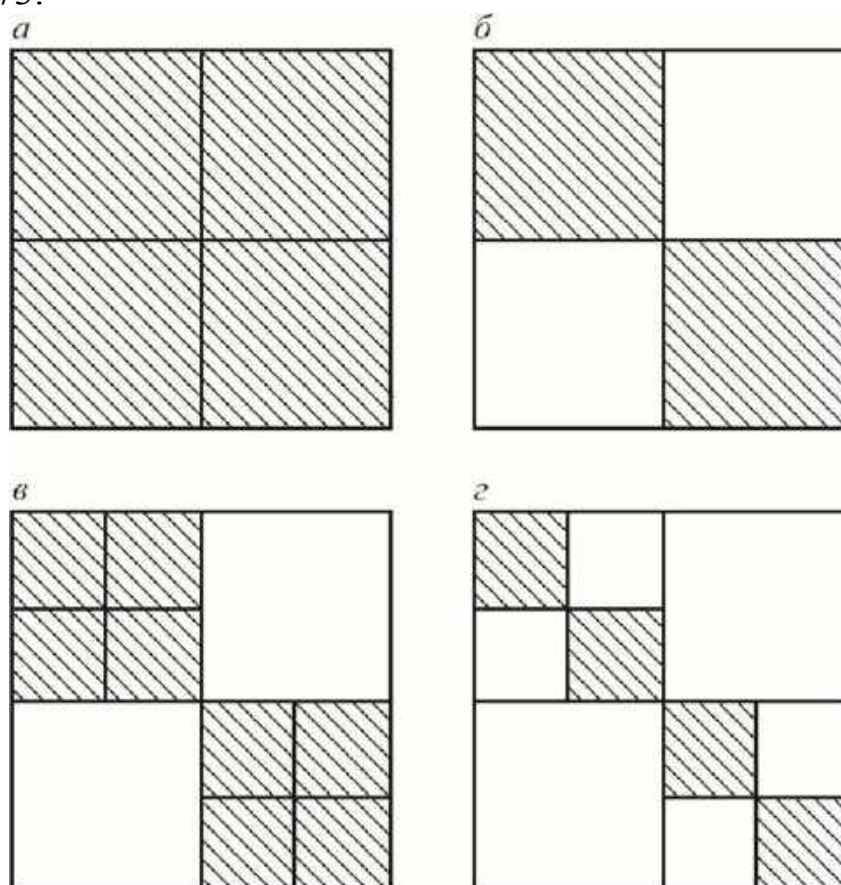


Рис. 3.73. Иллюстрация отбора пробы методом квартования по ГОСТ 8735–88:

- а* – деление пробы взаимно перпендикулярными линиями на четыре четверти; *б* – сокращение пробы;
в – деление оставшихся двух четвертей пробы;
г – последующее сокращение пробы

На практике используют и иной способ отбора средней пробы грунта для определения гранулометрического состава [53]. При реализации этого способа конус грунта разравнивают в квадрат размером 20×20 см и толщиной 2 см [53, с. 9]. Полученный квадрат делят взаимными перпендикулярными линиями вначале на четыре четверти, а затем каждую из этих четвертей делят еще на четыре части, получая в конечном итоге 16 одинаковых частей. После такого деления из каждой части при помощи ложки отбирают грунт для дальнейшего просеивания и определения гранулометрического состава. Пробу для просеивания набирают, последовательно обходя все 16 частей. Грунт, изъятый из каждой части, укладывают на весы, постепенно доводя пробу до массы, регламентируемой табл. 3.4. Обычно для набора про-

бы 100–200 г достаточно два или три раза последовательно обойти все 16 ячеек [53]. Такой метод отбора называют «метод квадратов» [53], а его иллюстрация приведена на рис. 3.74.

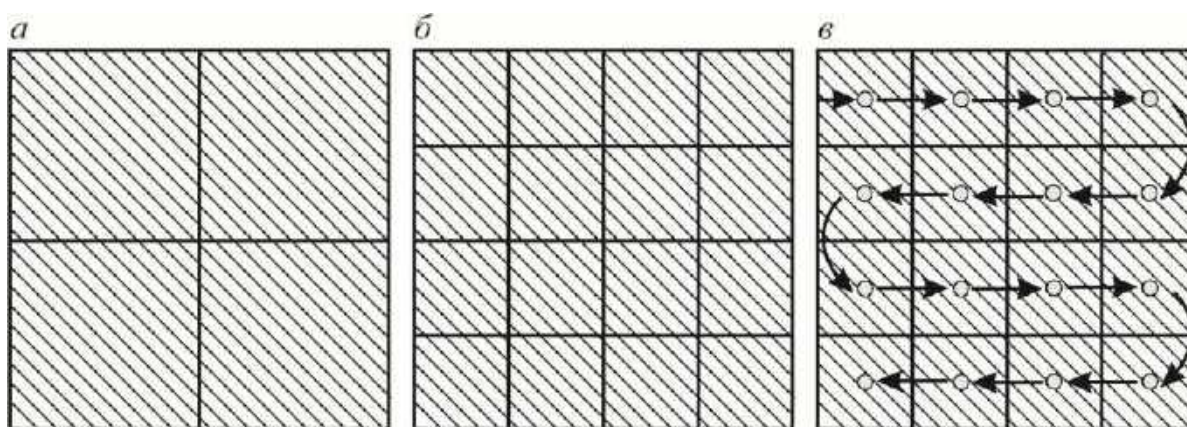


Рис. 3.74. Иллюстрация отбора пробы методом квадратов [53]:

а – деление пробы на четыре четверти;

б – последующее деление пробы на 16 одинаковых частей; *в* – направление обхода при отборе грунта из каждой части пробы для просеивания

Для отсева берут семь стандартных сит, из которых 4 сита должны иметь круглые отверстия диаметром 10; 5; 2 и 1 мм, а 3 сита должны быть снабжены квадратными ячейками размером 0,5; 0,25 и 0,1 мм, сформированными плетением медной или латунной проволоки. В зависимости от крупности выделяемых частиц грунта испытание производят рассевом без промывки и рассевом с промывкой.

Для просеивания без промывки берут грунт в воздушно-сухом состоянии и помещают его в ступку. Пестиком с резиновым наконечником растирают комки грунта. Отбирают пробу для просеивания, которую взвешивают и определяют ее массу m_1 (рис. 3.75 – 3.78).



Рис. 3.75. Конус грунта, подготовленный для квартования



Рис. 3.76. Грунт, выровненный слоем в квадрат для разделения на четверти



Рис. 3.77. Четверти грунта, подготовленные для сокращения пробы



Рис. 3.78. Взвешивание грунта для определения массы пробы m_1

Из четырех сит, снабженных круглыми отверстиями диаметром 10; 5; 2 и 1 мм, монтируют первую колонку сит, в которой на поддон устанавливают сита, начиная с сита с наименьшим размером ячейки 1 мм. Далее последовательно устанавливают сита с размерами отверстий 2; 5 и 10 мм. В верхнее сито, снабженное отверстиями 10 мм, высыпают пробу грунта. После этого колонку сит закрывают крышкой, а грунт просеивают, нанося по колонке сит ладонями легкие боковые удары. При массе пробы грунта, превышающей 1 кг, рассев выполняют в два приема, подавая грунт в верхнее сито двумя порциями. После просеивания грунт, оставшийся на верхнем сите, высыпают в ступку и растирают резиновым наконечником пестика (рис. 3.79 и 3.80).



Рис. 3.79. Остаток грунта на сите с отверстиями 5 мм



Рис. 3.80. Растирание грунта, оставшегося на сите с отверстиями 5 мм

Растиртый грунт вновь высыпают в верхнее сито и повторяют рассев. О полноте отсева судят при помощи контрольного просева, который производят над листом бумаги. Выпавшие из сита на лист

бумаги частицы собирают и переносят в следующее сито, с отверстиями меньшего размера. Эту операцию выполняют до тех пор, пока частицы грунта не перестанут выпадать из контролируемого сита. Процедуру повторяют на всех ситах. Убедившись в полноте просева грунта на каждом сите, фракции, задержавшиеся на каждом сите и прошедшие в поддон, взвешивают на весах, определяя массу каждой фракции m_{ϕ} . После определения масс всех фракций их суммируют и сравнивают с массой пробы, взятой для отсева. Если суммарная масса всех фракций превышает массу взятой пробы более чем на 1%, то опыт необходимо повторить. В большинстве случаев при просеивании грунта происходит его потеря, вследствие чего суммарная масса всех фракций получается меньше массы пробы, взятой для испытания. В этом случае невязку, равную потери грунта, следует разнести по всем фракциям пропорционально их массе.

При применении метода разделения грунта на фракции с промывкой водой навеску грунта помещают в фарфоровую ступку и смачивают водой, после чего растирают резиновым наконечником пестика. После измельчения грунт помещают на сито с размером ячейки 0,1 мм и отмучивают под струей воды. Эту операцию продолжают выполнять до тех пор, пока из сита не станет вытекать прозрачная вода. Частицы грунта, которые остались на сите с ячейкой 0,1 мм, переносят в чашку, у которой заранее определена масса. Частицы вместе с чашкой выпаривают на песчаной бане и высушивают в сушильном шкафу. Сушку грунта выполняют при температуре 105 ± 5 °С, а органико-минеральные грунты высушивают при температуре 70 ± 5 °С. После высушивания чашку с грунтом взвешивают и определяют их суммарную массу. По разности масс сухой пробы, приготовленной для анализа и высушенной после промывки и отсева, определяют содержание частиц размером менее 0,1 мм. Высушенный грунт просеивают через колонку из семи сит, контролируя полноту отсева на каждом сите, отсеивая его над листом бумаги. Каждая фракция грунта, оставшаяся после отсева на ситах, взвешивается отдельно, при помощи чего определяют массу фракции m_{ϕ} . Потерю грунта разносят по фракциям пропорционально их массе.

Содержание в грунте любой фракции, выраженное в процентах, вычисляется по формуле

$$A = 100 \cdot \frac{m_{\phi}}{m_1}, \quad (3.2)$$

где m_{ϕ} – масса фракции грунта, г; m_1 – масса пробы грунта, взятой для анализа, г.

3.4.2. Определение гранулометрического зернового состава глинистых грунтов ареометрическим методом

Суть метода состоит в измерении ареометром плотности суспензии в процессе ее отстаивания. Для выполнения теста применяют весь набор приборов и оборудования, используемых при ситовом анализе и дополнительно к нему: эксикатор с силикагель-индикатором, колбу коническую плоскодонную вместимостью 500 см³; воронки диаметром 4 и 14 см; мерный цилиндр вместимостью 1 л и диаметром (60±2) мм; термометр с погрешностью до 0,5 °С; мешалку для взбалтывания суспензии; секундомер; промывалку; пипетку на 25 мл; обратный холодильник; 25%-ный раствор аммиака; 4%-ный или 6, 7%-ный пиррофосфорнокислый натрий и ареометр со шкалой 0,995 - 1 - 1,030 и ценой деления 0,001.

Для испытания грунт доводят до воздушно-сухого состояния, помещают его в чашку и растирают комки резиновым наконечником пестика. Затем методом квартования берут среднюю пробу грунта. Отобранный грунт просеивают через колонку сит с отверстиями диаметром 10; 5; 2; 1 мм, снабженную поддоном. Все фракции, оставшиеся на ситах и прошедшие в поддон, взвешивают и определяют их массу. Из грунта, прошедшего сквозь сито с отверстиями диаметром 1 мм в поддон, методом квартования отбирают пробу грунта массой. Параллельно с этой процедурой выполняют отбор проб грунта, масса которых должна быть не менее 15 г, для определения плотности частиц грунта, а также природной или гигроскопической влажности по методикам, регламентируемым ГОСТ 5180–2015 [11].

Грунт помещают в колбу (требование ГОСТ 12536–2014 [54]) или чашку (требование ASTM 422 [55]) и доливают в него дистиллированную воду в количестве 200 см³, а в получившуюся суспензию добавляют 1 см³ 25% раствора аммиака. Колбу с суспензией закрывают крышкой с обратным холодильником или воронкой диаметром 4-5 см и кипятят в течение 30 мин – для супесей (песков) и 1 ч – для суглинков, глин. При кипячении необходимо следить, чтобы оно не было бурным. Выполнив кипячение, суспензию охлаждают до комнатной температуры. Суспензию, имеющую комнатную температуру, сливают в стеклянный цилиндр вместимостью 1 л сквозь сито с размером отверстий 0,1 мм. При этом рекомендуется разместить сито над воронкой диаметром приблизительно 14 см. Частицы грунта, оставшиеся на внутренней поверхности колбы, смывают дистиллиро-

ванной водой. Для этого используют промывалку, из которой льют воду на поверхность сита. В грунтовую суспензию добавляется стабилизатор.

В качестве стабилизатора используют 4% – ный или 6–7% – ный пирогосфорнокислый натрий, который доливают в объеме 5 см³. Сито с размером ячейки 0,1 мм осматривают, а задержавшиеся на нем частицы смывают струей воды в фарфоровую чашку, в которой их разминают резиновым наконечником пестика. В чашке образуется взвесь, которую сливают через сито с ячейками размером 0,1 мм в цилиндр. Эту операцию продолжают до тех пор, пока над частицами на дне чашки не образуется полностью осветленная вода. Проверяют уровень воды в цилиндре, который не должен превышать отметку 1000 см³.

Грунт, задержавшийся на сите, из промывалки смывают водой в фарфоровую чашку и выпаривают на песчаной бане и высушивают в сушильном. Высушенные до постоянной массы частицы грунта просеивают сквозь сита размером отверстий 0,5; 0,25 и 0,1 мм. Частицы грунта, прошедшие сквозь сито размером отверстий 0,1 мм, переносят в цилиндр с суспензией. Фракции грунта, задержавшиеся на ситах, взвешивают. Суспензию в мерном цилиндре доводят до объема 1000 см³.

Суспензию взбалтывают мешалкой в течение 1 мин на всю глубину до полного взмучивания осадка со дна цилиндра, не допуская выплескивания суспензии и вспенивания.

Используя табл. 3.5, определяют время снятия отсчетов по ареометру.

Таблица 3.5. **Время снятия отсчетов в зависимости от фракций грунта**

Диаметр фракций зерен грунта, мм	Время от конца взбалтывания суспензии до замера ее плотности
Менее 0,05	1 мин
Более 0,01	30 мин
Более 0,02	11 ч

Примечание. Для удобства работы с ареометром и расчетов следует брать упрощенные отсчеты, т.е. в отсчете плотности суспензии на шкале ареометра отбросить единицу и перенести запятую на три знака вправо: в этом случае тысячные деления будут представлять собой целые числа, а десятитысячные, которые берут на глаз, – десятые.

Непосредственно перед измерениями необходимо определить поправки на нулевое показание ареометра, высоту мениска (если ареометр тарирован по нижнему мениску) и диспергатор. Для этого

применяют методику, регламентированную ГОСТ 12536–2014 [52, прил. Б].

Для определения поправки на нулевое показание ареометра его помещают в стеклянный мерный цилиндр, наполненный дистиллированной водой, которая должна иметь температуру 20 °С (рис. 3.81). Считывают отсчет по шкале ареометра, который принимают за единицу плотности.



Рис. 3.81. Размещение ареометра в воде температурой 20 °С

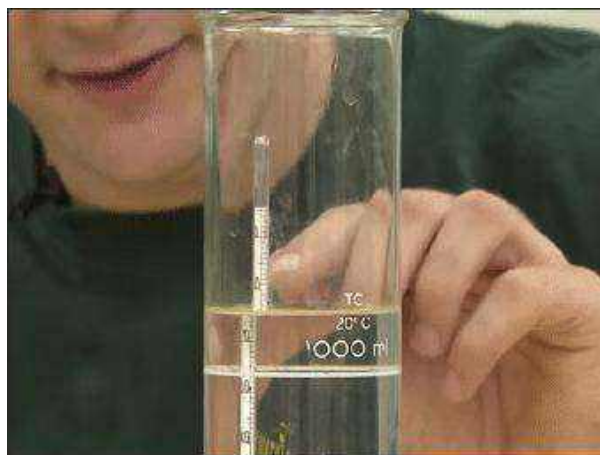


Рис. 3.82. Снятие отсчета, принимаемого за единицу плотности

Вычисляют разность между принятой единицей и измеренным отчетом по ареометру, которая численно равна поправке. Эту поправку вводят в расчет.

В том случае, если на заводе ареометр градуирован по нижнему краю мениска, необходимо ввести еще одну поправку. Для этого ареометр опускают в дистиллированную воду температурой 20 °С и снимают отсчеты по верхнему и нижнему краям мениска. Разница между этими отсчетами определяет величину поправки, которую вводят в расчет при каждом измерении плотности суспензии, выполняемом при последующем проведении лабораторных испытаний.

Также необходимо ввести поправку на диспергирующее вещество. Для этого в мерный цилиндр с налитой в него дистиллированной водой (при объеме воды 950 см³), имеющей температуру 20 С, опускают ареометр и снимают отсчет. Ареометр вынимают, а в цилиндр с водой добавляют диспергирующее вещество. После этого в цилиндр доливают дистиллированную воду так, чтобы ее объем стал равен 1 л. Смесь воды с диспергатором взбалтывают и вновь опускают ареометр, снимая отсчет по верхнему краю мениска. Разность между вторым и первым отсчетами будет поправкой на диспергатор. Поправку

вычитают из каждого отсчета по шкале ареометра при замерах плотности суспензии.

Определив все поправки, проводят опыт по измерению плотности грунтовой суспензии. Для этого в приготовленную грунтовую суспензию осторожно опускают ареометр (рис. 3.83). Погружение ареометра в суспензию необходимо выполнить за 10–12 с до измерения ее плотности. В суспензии ареометр должен свободно плавать и не касаться стенок и дна цилиндра. Отсчет с ареометра необходимо снять не более чем за 10 с. Для контроля температуры суспензии необходимо использовать термометр с погрешностью до 0,5 °С. Температуру грунтовой суспензии необходимо измерять в течение первых 5 мин (до начала опыта) и затем после каждого замера плотности суспензии ареометром (рис. 3.84).



Рис. 3.83. Размещение ареометра в грунтовой суспензии

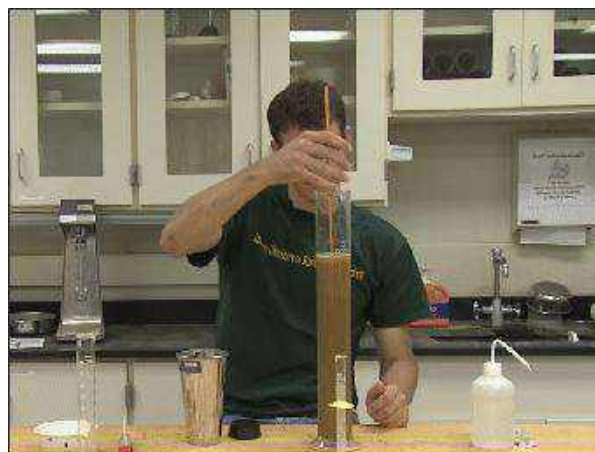


Рис. 3.84. Контроль температуры грунтовой суспензии по термометру

При температуре, отличающейся от 20 °С, к отсчетам по ареометру следует внести температурную поправку, определяемую по табл. 3.6.

Таблица 3.6. Поправки на температуру к отсчету по ареометру

Температура, °С	Поправки к отсчету по ареометру, R	Температура, °С	Поправки к отсчету по ареометру, R
1	2	3	4
10,0	-1,2	20,5	+0,1
10,5	-1,2	21,0	+0,2
11,0	-1,2	21,5	+0,3
11,5	-1,1	22,0	+0,4
12,0	-1,1	22,5	+0,5
12,5	-1,0	23,0	+0,6

Окончание табл. 3.6

1	2	3	4
13,0	-1,0	23,5	+0,7
13,5	-0,9	24,0	+0,8
14,0	-0,9	24,5	+0,9
14,5	-0,8	25,0	+1,0
15,0	-0,8	25,5	+1,1
15,5	-0,7	26,0	+1,3
16,0	-0,6	26,5	+1,4
16,5	-0,6	27,0	+1,5
17,0	-0,5	27,5	+1,6
17,5	-0,4	28,0	+1,8
18,0	-0,3	28,5	+1,9
18,5	-0,3	29,0	+2,1
19,0	-0,2	29,5	+2,2
19,5	-0,1	30,0	+2,3
20,0	0,0	—	—

Содержание фракций грунта размером более 10; 10–5; 5–2; 2–1 мм, выраженное в процентах, вычисляют по формуле (3.2). Масса абсолютно сухой пробы m_0 вычисляется с учетом поправки на гигроскопическую влажность. Расчет ведут по формуле

$$m_0 = \frac{m_{(cp)}}{1 + 0,01 \cdot W}, \quad (3.3)$$

где m_{cp} – масса средней пробы в воздушно-сухом состоянии, г; W – гигроскопическая (или природная) влажность, %.

Процентное содержание фракций грунта размером более 0,5; 0,25 мм и 0,1 мм находят по формуле

$$X = \frac{m_{(\phi)}}{m_0} \cdot (100 - K), \quad (3.4)$$

где m_{ϕ} – масса данной фракции грунта, высушенной до постоянной массы, г; m_0 – масса абсолютно сухой средней пробы грунта (взятой для ареометра), г; K – суммарное содержание фракции грунта размером более 1,0 мм, %.

По данным каждого замера ареометром вычисляют суммарное содержание всех фракций грунта менее данного диаметра грунта X , выраженное в процентах. Расчет ведут по формуле

$$X = \frac{R_n \cdot \rho_s}{(\rho_s - \rho_w) \cdot \rho_0} \cdot (100 - K), \quad (3.5)$$

где R_n – показания ареометра с поправками; ρ_s и ρ_w – плотность частиц грунта и воды ($\rho_w = 1 \text{ г/см}^3$); K – суммарное содержание фракции грунта размером более 1,0 мм, %.

После определения суммарного процентного содержания фракций грунта с помощью ареометра вычисляют процентное содержание каждой фракции грунта. Содержание фракций от 0,05 до 0,01 мм вычисляют по разности между процентным содержанием фракций менее 0,05 мм и менее 0,01 мм. Аналогично вычисляют процентное содержание фракций грунта 0,01–0,002 мм и 0,002–0,001 мм.

Результаты анализа надлежит регистрировать в журнале, в котором указывают процентное содержание в грунте фракций размером более 10; 10 – 5; 5 – 2; 2 – 1; 1– 0,5; 0,5 – 0,25; 0,25 – 0,1; 0,1 – 0,05; 0,05 – 0,01; 0,01– 0,002 и менее 0,002 мм, а также методы подготовки грунта к анализу. Результаты анализа необходимо сопровождать указанием процентного содержания гигроскопической влажности и химического вещества, примененного для стабилизации суспензии.

Задания для самооценки приобретенных знаний

1. Назовите правила отбора, хранения и транспортирования образцов.

2. Поясните методику определения влажности грунтов методом высушивания до постоянной массы по ГОСТ 5180–2015 и стандартам ASTM D 2216.

3. Поясните методику полевого метода А. Аттеберга, применяемого для определения вида грунта.

4. Поясните методику определения влажности грунтов методами и приборами для экспресс- оценки.

5. Поясните методику определения влажности на нижней и верхней границах пластичности по стандарту ASTM D 4318.

6. Поясните методику определения влажности на границе текучести и раскатывания по ГОСТ 5180–2015.

7. Поясните методику определения влажности на нижней и верхней границах пластичности методом конуса конструкции П.О. Бойченко.

8. Поясните методику определения гранулометрического зернового состава песчаных грунтов ситовым методом по ГОСТ 12536–2014.

9. Поясните методику определения гранулометрического зернового состава глинистых грунтов ареометрическим методом.

10. Поясните методику отбора пробы методами квартования по ГОСТ 8735–88 и квадратов.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ

Оценка качества уплотнения грунта земляного полотна производится сравнением коэффициента уплотнения грунта в насыпи или выемке k_y с его требуемыми значениями $k_{тр}$. Критерием качественного уплотнения является выполнение условия

$$k_y \geq k_{тр}. \quad (4.1)$$

Фактические значения коэффициента уплотнения определяются отношением плотности сухого грунта в насыпи или выемке ρ_d к его максимальной стандартной плотности, полученной в лабораторном приборе стандартного уплотнения СоюздорНИИ $\rho_{d(max)}$ по ГОСТ 22733–2016 [56] (в зарубежных странах – в приборе Проктора [57, 58]). Таким образом, коэффициент уплотнения определяется по формуле

$$k_y = \frac{\rho_d}{\rho_{d(max)}}. \quad (4.2)$$

Коэффициент уплотнения грунта является важнейшей характеристикой, которую тщательно контролируют, определяя плотность сухого грунта в теле земляного полотна и максимальную стандартную плотность.

В соответствии с требованиями [59] контроль плотности сухого грунта выполняют в каждом технологическом слое по оси земляного полотна и на расстоянии 1,5–2,0 м от бровки, а при ширине слоя более 20 м – также и в промежутках между ними. Плотность грунта необходимо проверять на каждой сменной захватке работы уплотняющих машин. Причем в насыпях высотой до 3 м плотность контролируется не реже чем через 200 м, в насыпях высотой более 3 м – 50 м. Контроль плотности верхнего слоя производится не реже чем через 50 м.

Кроме того, контроль плотности производится в каждом слое насыпки пазух труб, над трубами, в конусах и в местах сопряжения с мостами.

Контроль влажности используемого грунта следует производить, как правило, в месте его получения (в резерве, карьере) не реже одного раза в смену и обязательно при выпадении осадков. Плотность и влажность грунта следует определять по ГОСТ 5180–84 [11]. Для текущего контроля допускается использовать ускоренные и полевые

экспресс-методы и приборы.

Требуемые значения коэффициента уплотнения регламентируются СП 78.13330.2012 [7] и приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1. **Требуемые значения коэффициента уплотнения**

Элементы земляного полотна	Глубина расположения слоя, м	Наименьший коэффициент уплотнения грунта при типе дорожных одежд в дорожно-климатических зонах					
		капитальном			облегченном и переходном		
		I	II, III	IV, V	I	II, III	IV, V
Рабочий слой	$h \leq 1,5$	0,98-0,96	1,0-0,98	0,98-0,95	0,95-0,93	0,98-0,95	0,95
Неподтопляемая часть насыпи	$1,5 < h \leq 6$	0,95-0,93	0,95	0,95	0,93	0,95	0,90
	$h > 6$	0,95	0,98	0,95	0,93	0,95	0,90
Подтопляемая часть насыпи	$1,5 < h \leq 6$	0,96-0,95	0,98-0,95	0,95	0,95-0,93	0,95	0,95
	$h > 6$	0,96	0,98	0,98	0,95	0,95	0,95
В рабочем слое выемки ниже зоны сезонного промерзания	$h \leq 1,2$	—	0,95	—	—	0,95–0,92	—
	$h \leq 0,8$	—	—	0,95–0,92	—	—	0,90

Примечания. 1. Большие значения коэффициента уплотнения следует принимать при цементобетонных покрытиях и цементогрунтовых основаниях, а также при дорожных облегченного типа, меньшие – во всех остальных случаях.

2. В районах поливных земель при возможности увлажнения земельного полотна требования к плотности грунта для всех типов дорожных одежд следует принимать такими же, как указано в графах для II и III дорожно-климатических зон.

3. Для земляного полотна, сооружаемого в районах распространения островной высокотемпературной вечной мерзлоты, коэффициенты уплотнения следует принимать такими же, как для II дорожно-климатической зоны.

С увеличением плотности сухого грунта количество структурных связей увеличивается, а показатели механических свойств грунтов улучшаются. В количественном отношении зависимость показателей механических свойств грунтов от коэффициента уплотнения и влажности можно представить эмпирическими формулами В.М. Сиденко, О.Т. Батракова и Ю.А. Покутнева [60]. Эти формулы даны в табл.4.2. В соответствии с теорией упругости постоянные, применяемые для определения НДС, связаны формулами, представленными в табл. 4.3.

Таблица 4.2. **Формулы для расчета показателей механических свойств грунта**

Разновидность грунта	Формула	
Для ориентировочного расчета штампового модуля упругости, МПа		
Суглинки и глины	$E = 35046 \cdot k_y^{1,5} \cdot e^{(8,36 \cdot W^2 - 15,78 \cdot W)}$	
Супеси легкие непылеватые	$E = 209 \cdot k_y^{1,5} \cdot e^{(1,627 \cdot W^2 - 3,56 \cdot W)}$	
Супеси крупные	$E = 82 \cdot k_y^{1,5} \cdot e^{(0,4 \cdot W^2 - 0,72 \cdot W)}$	
Для ориентировочного расчета параметров линейной зависимости Кулона-Мора, называемых сцеплением C и углом внутреннего трения φ		
Суглинки, глины и супеси пылеватые	$C = 0,034 \cdot k_y^{1,5} \cdot e^{(3,94 \cdot W - 6,81 \cdot W^2)}$	$\varphi = 58,6 \cdot (1 - W) \cdot k_y$
Супеси легкие непылеватые	$C = 0,202 \cdot k_y^{1,5} \cdot e^{(4,6 \cdot W^2 - 7,58 \cdot W)}$	$\varphi = 43 \cdot (1 - 3 \cdot W) \cdot k_y$

Примечание. W – относительная влажность, определяемая отношением влажности грунта W_e к влажности на границе текучести W_T ($W = W_e / W_T$).

Таблица 4.3. **Зависимости между упругими постоянными**

Постоянные	Основная пара				
	λ, ν	G, μ	K, G	E, μ	E, G
λ	λ	$\frac{2 \cdot G \cdot \mu}{1 - 2 \cdot \mu}$	$K - \frac{2}{3} \cdot G$	$\frac{E \cdot \mu}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}$	$\frac{G \cdot (E - 2 \cdot G)}{3 \cdot G - E}$
ν	ν	G	G	$\frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)}$	G
G	ν	G	G	$\frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)}$	G
E	$\frac{\nu \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot \nu)}{\lambda + \nu}$	$2 \cdot G \cdot (1 + \mu)$	$\frac{9 \cdot K \cdot G}{3 \cdot K + G}$	E	E
K	$\lambda + \frac{2 \cdot \nu}{3}$	$\frac{2 \cdot G \cdot (1 + \mu)}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}$	K	$\frac{E \cdot \mu}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}$	$\frac{G \cdot E}{9 \cdot G - 3 \cdot E}$
μ	$\frac{\lambda}{2 \cdot (\lambda + \nu)}$	μ	$\frac{3 \cdot K - 2 \cdot G}{6 \cdot K + 2 \cdot G}$	μ	$\frac{E}{2 \cdot G} - 1$

Примечание. λ и ν – постоянные Ляме, Па; G – модуль сдвига или поперечной упругости; K – объемный модуль упругости, Па; μ – коэффициент Пуассона.

Примем, что коэффициент Пуассона – величина постоянная, например, по СНиП 2.02.01–83* для супесей $\mu=0,3$, суглинков $\mu=0,35$ и глин $\mu=0,42$. Тогда для суглинков и глин модуль сдвига можно определить по формуле

$$G = \frac{E_W \cdot k_y^{1,5}}{2 \cdot (1 + \mu)} = G_W \cdot k_y^{1,5}; \quad E_W = a \cdot 35046 \cdot e^{(8,36 \cdot W^2 - 15,78 \cdot W)}, \quad (4.3)$$

где E_W и G_W – модуль упругости и модуль сдвига при произвольной относительной влажности, Па; a – поправочный коэффициент для перехода от штампового модуля к продольному модулю упругости при одноосном сжатии, который может быть рассчитан по формуле Н.Н. Иванова, а может быть установлен экспериментально по аналогии с коэффициентами Агишева (эти коэффициенты используют для перехода от компрессионного модуля деформации к штамповому).

Используя эту основную пару деформационных характеристик, получим формулы

$$\begin{aligned} \nu &= G = \frac{E_W \cdot k_y^{1,5}}{2 \cdot (1 + \mu)} = G_W \cdot k_y^{1,5}; \\ \lambda &= \frac{G_W \cdot k_y^{1,5} (E_W \cdot k_y^{1,5} - 2 \cdot G_W \cdot k_y^{1,5})}{3 \cdot G_W \cdot k_y^{1,5} - E_W \cdot k_y^{1,5}} = \lambda_W \cdot k_y^{1,5}; \\ K &= \frac{G_W \cdot k_y^{1,5} \cdot E_W \cdot k_y^{1,5}}{9 \cdot G_W \cdot k_y^{1,5} - 3 \cdot E_W \cdot k_y^{1,5}} = K_W \cdot k_y^{1,5}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Таким образом, степень уплотнения грунта оказывает существенное влияние на любую деформационную характеристику. Чем выше плотность сухого грунта, тем больше величина деформационной характеристики и меньше деформации земляного полотна.

Из табл. 4.1 вытекает, что в зависимости от природно-климатических условий (ДКЗ) и условий эксплуатации дорожной конструкции (тип одежды и элемент земляного полотна) выдвигаются различные требования по степени уплотнения. Здесь возникает вполне резонный вопрос, а почему не принять одинаковые требования к степени уплотнения? Казалось бы, раз уплотнение столь позитивно сказывается на деформационных и прочностных характеристиках, то требования по коэффициентам уплотнения должны быть максимально возможные.

По мнению авторов, различие в требованиях к величине коэффициента уплотнения необходимо по двум основным причинам. Во-первых, уплотнение является достаточно энергоемким процессом. Поэтому в тех элементах земляного полотна, в которых возникают наибольшие напряжения и имеет место наибольшее увлажнение, следует предусматривать наибольшие требуемые коэффициенты уплотнения. В менее увлажненных элементах земляного полотна, а также в

элементах с меньшими напряжениями такие высокие коэффициенты уплотнения не требуются, и поэтому для уменьшения энергоемкости уплотнения требования могут быть ниже. Во-вторых, грунты земляного полотна испытывают деформации морозного пучения, набухания и усадки. Эти процессы приводят к тому, что в течение года плотность сухого грунта колеблется. Причем пучение и набухание вызывают уменьшение плотности сухого грунта. Поэтому если выполнить уплотнение грунта до высоких коэффициентов уплотнения, например, $1 > k_y \geq 1,1$ и не предусмотреть в конструкции земляного полотна мероприятий по недопущению увлажнения грунта, то со временем (2–3 года) коэффициенты уплотнения уменьшатся. В этом случае энергия, затраченная на переуплотнение грунта, будет израсходована зря.

Для раскрытия влияния влажности грунта на степень уплотнения обсудим процессы, происходящие в грунте при его уплотнении. Для этого необходимо рассматривать структуру грунтов и ее изменение в процессе уплотнения.

При уплотнении дисперсных грунтов любым из традиционных методов: укаткой, трамбованием или вибрацией – вода не успевает отжаться из зон контактов между агрегатами и частицами. Это объясняется тем, что для фильтрации воды через тонкие поры требуется определенное время. Поэтому уплотнение грунтов при воздействии циклических кратковременных нагрузок в основном происходит из-за вытеснения воздуха, вследствие чего минеральные частицы сближаются, а поры уменьшаются.

При уплотнении работа затрачивается на преодоление трения между частицами и агрегатами, а также на их перемещение. Если влажность грунта мала, то добавление в него воды уменьшает трение между частицами и агрегатами, а также способствует размягчению и растворению неводостойких кристаллизационных связей. Эти эффекты облегчают перемещение частиц и способствуют их более тесной укладке при той же затраченной работе. Поэтому с увеличением содержания воды в грунте до определенного предела плотность скелета увеличивается. В любом грунте существует связанная система воздушных пор, сообщающихся с атмосферой. В результате уплотнения нагрузкой воздух вытесняется в атмосферу, а объем такой системы пор постепенно уменьшается. Вследствие этого грунт упрочняется, а зависимость деформации уплотнения от количества воздействий нагрузок имеет затухающий характер.

При чрезмерной влажности смазывающий эффект уже не увеличивается, а вода препятствует сближению частиц и даже приводит к их раздвижке. Поэтому зависимость плотности скелета от влажности грунта имеет максимум.

Влажность грунта, при которой в лабораторном приборе стандартного уплотнения достигается максимальная плотность сухого грунта $\rho_{d(max)}$, называют оптимальной влажностью W_o . Здесь отметим, что в соответствии с формулой (4.2) максимальной стандартной плотности соответствует значение коэффициента уплотнения $k_y=1$. Коэффициенты уплотнения меньше 1 можно получить при влажности, отличающейся от оптимальной. Причем, чем меньше требуемое значение коэффициента уплотнения, тем больше интервал варьирования влажности, в котором можно выполнить такое уплотнение. При этом необходимо иметь в виду, что оценивая пригодность грунта для уплотнения по влажности, принято оперировать понятием «коэффициент увлажнения». Коэффициент увлажнения представляет собой отношение влажности грунта W_e к его оптимальной влажности и определяется по формуле

$$k_{ув} = \frac{W_e}{W_o}. \quad (4.5)$$

Допускаемые значения коэффициентов увлажнения регламентируются [59] и приведены в табл. 4.4.

Для того чтобы получить количественные зависимости плотности скелета грунта от влажности, а следовательно, и зависимости коэффициента уплотнения от коэффициента увлажнения, необходимо выполнить лабораторные испытания.

Таблица 4.4. Допускаемые значения коэффициентов увлажнения

Вид грунтов	Влажность при требуемом коэффициенте уплотнения		
	1–0,98	0,95	0,90
Пески пылеватые, супеси легкие, крупные	Не более 1,35	Не более 1,6	Не нормируется
Супеси легкие и пылеватые	0,8 – 1,25	0,75 – 1,35	0,7 – 1,6
Супеси тяжелые пылеватые и суглинки легкие и легкие пылеватые	0,85 – 1,15	0,8 – 1,2	0,75 – 1,4
Суглинки тяжелые и тяжелые пылеватые, глины	0,95 – 1,05	0,9 – 1,1	0,85 – 1,2

4.1. Лабораторные работы по определению максимальной плотности и оптимальной влажности

Выше отмечено, что за рубежом для определения максимальной стандартной плотности применяют метод Проктора, который заключается в уплотнении грунта, помещенного в металлическую обойму, падающим грузом. В приборах Проктора диаметр металлической обоймы составляет 10 см, а диаметр плоского основания трамбовки – 5 см. В обойму помещают грунт, который укладывают в слой и уплотняют 25 ударами падающего груза массой 2,5 кг, сбрасываемого с высоты 30,5 см.

Таким образом, в приборе Проктора деформирование грунта происходит с возможностью ограниченного бокового расширения, что может приводить к сдвигам и выпиранию. Такие особенности работы грунта соответствуют реальным условиям.

Российский метод является совершенствованием метода Проктора, которое выполнили Н.Н. Иванов и М.Я. Телегин [61, с. 166]. Главным отличием является то, что в российском приборе диаметр основания трамбовки и диаметр металлической обоймы одинаковые. В этом случае условия работы грунта в приборе отличаются от натуральных, но деформирование грунта обуславливается только его уплотнением.

4.1.1. Определение максимальной плотности стандартным и модифицированным методами Проктора

Оба рассматриваемых метода стандартного уплотнения аналогичны методу Р.Р. Проктора, предложенному в 1933 г. Поэтому оба метода иногда называют стандартным и модифицированным методами Р.Р. Проктора. Эта терминология удобна, так как само название методов подчеркивает как их отличие друг от друга, так и отличие от российского метода стандартного уплотнения.

Суть этих методов заключается в построении кривой уплотнения, отображающей зависимость плотности сухого грунта от его влажности при уплотнении трамбованием.

Отметим, что в США действует две группы стандартов. К первой группе относят нормативные документы ASTM (Американское общество по испытаниям материалов), а ко второй – AASHTO (Американская ассоциация служащих государственных автодорог и

транспорта¹). В настоящих методических указаниях авторы придерживаются стандартов группы ASTM.

Стандартный и модифицированный методы Проктора реализуются при помощи трех разных тестов *A*, *B* и *C*. Каждый из этих тестов выполняется при строгом соблюдении условий, представленных в табл. 4.5.

Таблица 4.5. Требования к тестам *A*, *B* и *C* при выполнении лабораторных работ стандартным и модифицированным методами Проктора

Характеристика	Стандартный метод Проктора ASTM D 698 [57]			Модифицированный метод Проктора ASTM D 1557 [58]		
	Тест <i>A</i>	Тест <i>B</i>	Тест <i>C</i>	Тест <i>A</i>	Тест <i>B</i>	Тест <i>C</i>
1	2	3	4	5	6	7
Сито для просеивания грунта	№ 4 (4,75 мм)	3/8 дюйма (9,5 мм)	3/4 дюйма (19 мм)	№ 4 (4,75 мм)	4,75 и 9,5 мм	9,5 и 19 мм
Остаток на сите 4,75 мм, % по массе	≤25	Нет требований	Нет требований	≤20	>20	Нет требований
Остаток на сите 9,5 мм, % по массе	Нет требований	≤25	Нет требований	Нет требований	≤20	>20
Остаток на сите 19 мм, % по массе	Нет требований	Нет требований	≤30	Нет требований	Нет требований	<30
Масса трамбующего груза, кг	2,495	2,495	2,495	4,54	4,54	4,54
Высота падения груза, мм	304,8	304,8	304,8	457,2	457,2	457,2
Число уплотняемых слоев	3	3	3	5	5	5
Число ударов по слою	25	25	56	25	25	56
Диаметр пресс-формы, мм	101,6	101,6	152,4	101,6	101,6	152,4

¹ Использован один из вариантов перевода названия ассоциации, используемый в терминологии строителей (оригинальное название American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)). Другие варианты перевода [http://universal_ru_en.academic.ru/].

Окончание табл. 4.5

1	2	3	4	5	6	7
Высота пресс-формы, мм	116,4	116,4	116,4	116,4	116,4	116,4
Объем пресс-формы, см ³	943,7	943,7	2123,3	943,7	943,7	2123,3

Примечание. С учетом допусков для испытаний применяют формы диаметром $101,6 \pm 0,4$ и $152,4 \pm 0,7$ мм, высотой $116,4 \pm 0,5$ мм.

Лабораторные работы включают в себя:

1. Приготовление пробы в виде навески путем рассева исходного грунта.
2. Подготовку приборов, оборудования и средств измерений.
3. Увлажнение навески грунта и ее выдерживание в течение необходимого времени.
4. Изготовление образцов при помощи ручных трамбовок или машин с механическим приводом.
5. Обработку результатов испытаний.

Для приготовления навесок используются грунты, просеянные сквозь сита, указанные в табл. 4.1. Сита выбираются в зависимости от метода испытания (стандартный или модифицированный), а также от типа теста *A*, *B* или *C*. Сита должны отвечать требованиям стандарта ASTM E11-13 [62], а для исключения потерь грунта рассев выполняется в поддон. Применяемые в данном методе сита приведены на рис. 4.1– 4.4.



Рис. 4.1. Сито № 4 с ячейкой 4,75 мм



Рис. 4.2. Сито № 3/8-in. с ячейкой 9,5 мм



Рис. 4.3. Сито № 3/4-in. с ячейкой 19 мм Рис. 4.4. Дно набора сит для сбора пробы

Приборы для уплотнения грунтов состоят из пресс-формы и трамбовки. Общий вид приборов показан на рис. 4.5.



Рис. 4.5. Приборы Проктора с ручными трамбовками для выполнения тестов *A*, *B* и *C* стандартным и модифицированным методами

Пресс-форма включает в себя:

- квадратную опорную пластину, снабженную углублением для установки цилиндрической части формы. Для цилиндрической формы диаметром 101,6 мм применяется квадратное основание с длиной стороны 152,4 мм. Для формы диаметром 152,4 мм используют основание со стороной 203,2 мм:

- цилиндрическую часть, которая обычно выполняется литой неразъемной, но стандарты ASTM D 698-12 [57] и ASTM D 1557-12 [58] допускают применение форм, состоящих из двух полукруглых секций подобных российским частям цилиндрической формы, используемой в приборе стандартного уплотнения [56];

- верхнюю съемную насадку, которая должна надежно крепиться и легко отделяться. Насадка выполняется в виде литого неразъемного цилиндра или конуса.

Трамбовка управляется вручную или механическим приводом. Трамбовка состоит из:

- груза, масса которого должна составлять $2,495 \pm 0,023$ кг для стандартного метода, и $4,54 \pm 0,01$ кг для модифицированного метода. Поверхность груза, ударяющая по грунту, должна быть ровной и гладкой.

- направляющей гильзы, снабженной зазором, обеспечивающим свободное падение груза. Гильза должна иметь по меньшей мере 4 вентиляционных отверстия на каждой полуокружности. Таким образом, общее число отверстий в гильзе должно быть не менее восьми. Минимальный диаметр каждого отверстия должен составлять 9,5 мм. Стандарты ASTM D 698-12 [57] и ASTM D 1557-12 [58] выдвигают строгие требования к размещению этих отверстий.



Рис. 4.6. Гидравлический выталкиватель

Для извлечения уплотненного образца из цилиндрической части пресс-формы целесообразно применять выталкиватели (рис. 4.6).

Весы класса точности GP-5, применяемые для определения масс пустой цилиндрической формы и этой же формы с грунтом. Такие весы позволяют измерять массу с точностью до 1 г. Для определения влажности грунта нужно использовать весы класса точности GP-2, позволяющие измерять массу с точно-

стью до 0,1 г. Для сушки грунта применяют сушильный шкаф, позволяющий поддерживать температуру 110 ± 5 °С.

Для перемешивания грунта с водой и загрузки грунта в пресс-форму необходимо подготовить совок и шпатель, а для резки грунта – грунтовый нож или специальную линейку, снабженную скользящей кромкой (при толщине линейки более 3 мм эта кромка должна иметь скос). Желательным является механическое оборудование, позволяющее производить вибрационный рассев грунта при приготовлении навески и перемешивание грунта с водой. Для равномерного распределения воды по поверхности грунта рекомендуется использовать распыскиватель.

Для приготовления навески запрещается использовать грунт, ранее уплотненный в лаборатории (см. п. 10.1.1 стандартов ASTM D 698-12 [57] и ASTM D 1557-12 [58]). Это требование обусловлено тем, что повторное уплотнение приводит к более высоким значениям веса сухого грунта. Пробу грунта готовят одним из двух способов – влажным или сухим. Наиболее предпочтительным является влажный способ приготовления [57, 58].

При применении влажного способа грунт без сушки просеивается через одно сито или два сита, регламентируемые для выполняемого теста (см. табл. 4.5). Сухой способ требует предварительной сушки грунта на воздухе или в сушильном шкафу, в котором поддерживают температуру грунта, не превышающую 60 °С. После сушки агрегаты грунта аккуратно измельчаются, а проба просеивается через сита, соответствующие типу теста. На рис. 4.7 – 4.10 представлен процесс отсева грунта при выполнении теста *В* стандартным методом.



Рис. 4.7. Проба грунта, подготовленная для отсева на сите с ячейкой 9,5 мм



Рис. 4.8. Рассев пробы с применением вибрационного оборудования



Рис. 4.9. Остаток на сите
с ячейкой 9,5 мм



Рис. 4.10. Грунт, прошедший
сквозь сито с ячейкой 9,5 мм

После отсева пробы на лабораторных весах выполняется взвешивание каждой ее части. При этом измеряются массы части пробы, оставшейся на сите, и другой ее части, прошедшей сквозь сито. Измеренное значение масс округляется до 1 г и записывается в журнал испытаний. Часть пробы, взятой влажным способом, не прошедшая сквозь сито, высушивается в сушильном шкафу. После чего эта часть пробы взвешивается с определением массы сухих частиц и округлением результата измерения до 1 г. По результатам взвешиваний влажных и сухих негабаритных (крупных) частиц определяют их влажность. Остаток на сите пробы, взятой сухим способом, сушки не требует, эти частицы взвешиваются сразу после отсева.

Такие же процедуры выполняются с тестируемыми частями пробы, то есть грунтом, прошедшим сквозь сито. Результаты взвешиваний позволяют определить содержание негабаритных и тестируемых частиц грунта.

Содержание негабаритных частиц (фракций) грунта P_c рассчитывают по формуле

$$P_c = 100 \cdot \frac{m_{dof}}{m_{dof} + m_{dtf}}, \quad (4.6)$$

где m_{dof} – масса сухих негабаритных (крупных) фракций (oversize fraction), округленная до 1 г, отсеянных крупных частиц, г; m_{dtf} – масса сухих тестируемых фракций (test fraction), округленная до 1 г.

Содержание тестируемых частиц (фракций) грунта P_F рассчитывают по формуле

$$P_F = 100 - P_C. \quad (4.7)$$

Из тестируемых фракций выполняется отбор четырех или пяти (более предпочтительное количество) навесок грунта, которые будут использованы для изготовления образцов, испытываемых стандартным или модифицированным методом. Для этого тестируемый грунт тщательно перемешивают при помощи совка. Из перемешанной массы грунта выполняется отбор навесок массой 2,3 кг для тестов *A* и *B* и массой 5,9 кг для теста *C*.

Отбор навесок грунта выполняют на весах, постепенно подсыпая грунт в металлическую чашку. Процедура подготовки навески грунта для выполнения тестов *A* и *B* приведена на рис. 4.11 и 4.12.



Рис. 4.11. Подготовка навески (тест A)



Рис. 4.12. Подготовка навески (тест B)

Для увлажнения навесок используют специальную методику определения количества воды. При этом предварительными дополнительными испытаниями определяют предел пластичности грунта (влажность на границы раскатывания). Оптимальная влажность, как правило, немного меньше предела пластичности, определяемого в соответствии с требованиями ASTM D4318 [3]. Установленное значение предела пластичности принимается для определения оптимальной влажности. В первую навеску вводят количество воды, необходимое для увлажнения грунта до оптимальной влажности. Две другие навески увлажняют количеством воды так, чтобы влажность грунта в одной навеске была на 2% меньше оптимальной, а во второй, наоборот, на 2% больше оптимальной влажности. В оставшиеся две навески вводят количество воды из расчета, чтобы влажность грунта была на 4% больше и на 4% меньше оптимального содержания воды.

Количество воды, необходимой для увлажнения отобранной пробы до влажности испытания, можно определить по формуле стандарта РФ [56]

$$M_{\text{в}} = \frac{0,01 \cdot M_{\text{dtf}}}{1 + 0,01 \cdot W_g} \cdot (W_1 - W_g), \quad (4.8)$$

где M_{dtf} – масса отобранной пробы в воздушно-сухом состоянии, г; W_1 – влажность грунта для испытания, %; W_g – влажность грунта в воздушно-сухом состоянии, %.

Воду в образец рекомендуется вводить через специальные распылители. Причем добавление требуемого количества воды может быть выполнено непосредственно на весах. В этом случае дозирование воды выполняют, следя за изменением массы чашки с грунтом. Добавка воды прекращается при увеличении массы чашки с грунтом на требуемую массу воды. После введения воды выполняется тщательное перемешивание грунта шпателем. На рис. 4.13 и 4.14 приведены иллюстрации операций увлажнения навески грунта и перемешивания.



Рис. 4.13. Введение воды (тест В)



Рис. 4.14. Перемешивание увлажненного грунта навески воды (тест А)

Пробу переносят в эксикатор и накрывают крышкой. Проба выдерживается в течение определенного времени, которое указано в табл. 4.6.

Отметим, что действующий стандарт РФ ГОСТ 25100–11 [1, прил. Е] содержит гармонизацию требований классификаций [2] и [1], которую можно использовать при определении типа грунта в табл. 4.6. В зависимости от выполняемого теста А, В или С выбирается нужная пресс-форма, включающая опорную пластину, цилиндрическую часть и верхнюю насадку. Опорная пластина осматривается

на предмет наличия вмятин, зазубрин и других дефектов. При отсутствии этих дефектов выполняется проверка соответствия размеров основания и цилиндрической части пресс-формы путем их сборки и оценки надежности контакта.

Таблица 4.6. **Время выдержки увлажненной пробы в закрытом эксикаторе, регламентируемое стандартами ASTM D 698-12 [57] и ASTM D 1557-12 [58]**

Тип грунта по классификации ASTM D2487-11 [2]		Минимальное время, ч
Обозначение	Наименование	
GW	Гравий хорошо фракционированный	Не регламентируется
GP	Гравий плохо фракционированный	
SW	Песок хорошо фракционированный	
SP	Песок плохо фракционированный	
GM		3
SM		
Все остальные грунты		16

Примечание. Классификация гравелистых – G (gravel) и песчаных – S (sand) грунтов выполняется путем определения содержания фракций по граничным размерам частиц: 300; 76,2; 19,0; 4,75; 0,425 и 0,075 мм. Классификация этих грунтов на хорошо фракционированный W (well graded) и плохо фракционированный P (poorly graded) выполняется по степени фракционированности (коэффициенту однородности) C_u (coefficient of uniformity) и коэффициента кривизны C_c (coefficient of curvature).

Производят измерение геометрических размеров цилиндрической части формы и определение ее внутреннего объема. Проверяют соответствие отклонений геометрических размеров допускам стандартов [57, 58]. На цилиндрическую часть крепят верхнюю насадку и оценивают надежность контакта. Иллюстрации операций по оценке пригодности пресс-формы для испытаний приведены на рис. 4.15 – 4.18.



Рис. 4.15. Проверка контакта цилиндрической части и опорной пластины



Рис. 4.16. Измерение диаметра цилиндрической части пресс-формы



Рис. 4.17. Измерение глубины цилиндрической части пресс-формы

Объем цилиндрической части (см³) определяют по формуле [57]

$$V = K_3 \cdot \frac{\pi \cdot h_{avg} \cdot d_{avg}^2}{4}, \quad (4.9)$$

где K_3 – коэффициент, корректирующий размерность, $K_3=10^{-3}$; h_{avg} – среднее значение измеренных глубин цилиндрической части формы, мм; d_{avg} – среднее значение измеренных диаметров цилиндрической части формы, мм.

Выбирают нужную для реализации выполняемого стандартного или модифицированного метода трамбовку. Ручную или механическую трамбовку осматривают и убеждаются в ее полной комплектности и рабочем состоянии. При этом проверяют состояние трамбуемого груза (рис. 4.19), контрольными сбросами оценивают свободный ход трамбовки внутри направляющей гильзы (рис. 4.20).



Рис. 4.19. Оценка состояния трамбуемого груза



Рис. 4.18. Проверка контакта цилиндрической части и верхней насадки



Рис. 4.20. Взвешивание опорной пластины и свободной от грунта формы

При обнаружении дефектов приборы Проктора использовать не допускается до полного устранения неисправностей. В случае выполненного ремонта прибор нуждается в повторной поверке.

Увлажненный и выдержанный в течение времени, указанного в табл. 4.6, грунт перемешается из эксикатора в чашку или металлический поддон. Для влажных или наоборот сухих грунтов цилиндрическая часть формы соединяется с опорной пластиной (рис. 4.21) и в скрепленном, свободном от грунта состоянии взвешивается на весах (рис. 4.22) для измерения их массы M_0 [63].



Рис. 4.21. Собранные опорная пластина и цилиндрическая часть формы



Рис. 4.22. Взвешивание опорной пластины и свободной от грунта формы

Во всех остальных случаях взвешивается только цилиндрическая часть формы (рис. 4.23). После этого ее прикрепляют к основанию, установленному на полуавтоматической трамбовке (рис. 4.24).



Рис. 4.23. Взвешивание цилиндрической части формы



Рис. 4.24. Установка цилиндрической части на основание пресс-формы

В зависимости от типа теста (*A*, *B* или *C*), а также метода испытаний формовка образцов выполняется при определенных условиях. Для обоих методов и всех типов тестов общим является послойное уплотнение грунта в цилиндрической обойме. Поэтому цилиндрическая форма и ее дно смазываются материалом, позволяющим уменьшить трение грунта о внутреннюю поверхность обоймы (рис. 4.24). Это облегчает последующее извлечение образца из металлической обоймы. Перед подачей грунта в некоторых лабораториях на дно пресс-формы укладывают бумажный вкладыш (рис. 4.25).



Рис. 4.24. Смазка металлической обоймы антифрикционным материалом



Рис. 4.25. Закладка бумажного вкладыша на дно пресс-формы

При ручной трамбовке форма устанавливается на жесткое основание массой не менее 91 кг. Нижние слои грунта можно уплотнять без верхней насадки. В этом случае в цилиндрическую часть формы подают первую порцию грунта (рис. 4.26). В случае применения верхней насадки обычно вначале ее закрепляют на цилиндрической части формы (рис. 4.27), а затем подают порцию грунта.



Рис. 4.26. Подача первой порции грунта в цилиндрическую часть формы



Рис. 4.27. Крепление конусной верхней насадки к цилиндрической части

Порцию грунта распределяют ровным слоем, применяя различные приспособления, например нож или ложку, при помощи которой подавался грунт. До трамбования рыхлый грунт слегка уплотняется. Эта операция может быть выполнена при помощи груза от ручной трамбовки [57] или другого цилиндрического инструмента диаметром 5 мм [11]. При применении ручных нагрузок операцию выполняют, перемещая груз вдоль окружности пресс-формы (рис. 4.29 и 4.30), имитируя очередность выполнения ударов при основной формовке образца.



Рис. 4.29. Первое по счету воздействие при предварительном уплотнении



Рис. 4.30. Третье по счету воздействие при предварительном уплотнении

При выполнении испытания стандартным методом формовку образца выполняют в три слоя [57], а при испытании по модифицированному методу производят уплотнение пяти слоев [58]. В тестах *A* и *B* по каждому слою выполняется по 25 ударов, а в тесте *C* производят 56 ударов по слою. Требования, регламентирующие количество ударов по слою, одинаковые для стандартного и модифицированного метода. При применении ручной трамбовки необходимо избегать ее отбоя от образца вверх. Для этого [57, 58] рекомендуют держать направляющую втулку под углом к вертикали 5° и более. Удары следует наносить со скоростью 25 ударов/мин. Для обеспечения равномерного уплотнения слоя трамбующие удары необходимо наносить в определенной последовательности.

При выполнении тестов *A* и *B*, в которых применяют пресс-форму диаметром 101,6 мм, с помощью ручной трамбовки уплотнение ведут в последовательности, указанной на рис. 4.31 и 4.32. Следуя схеме рис. 4.31, наносят первые 4, а последующие удары ведут по схеме, представленной на рис. 4.32.

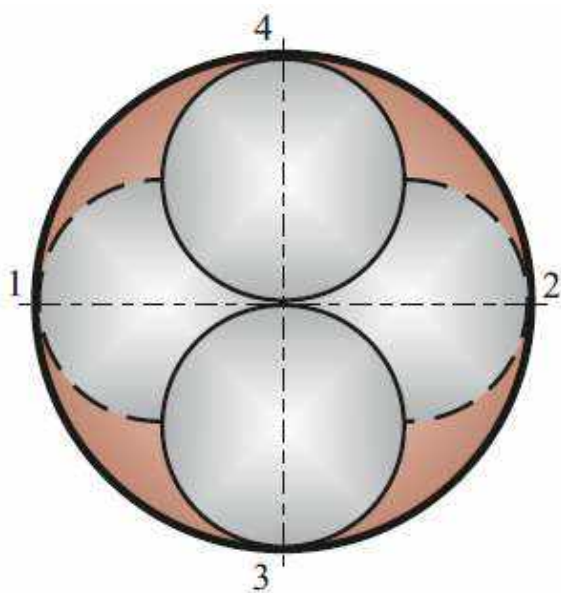


Рис. 4.31. Последовательность первых ударов при ручном уплотнении

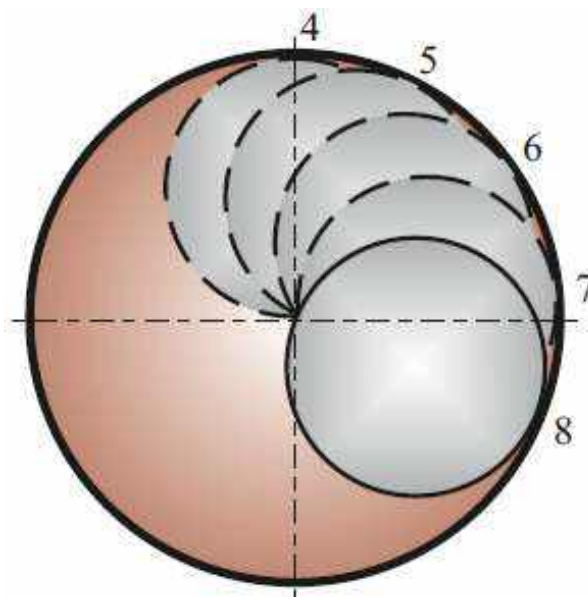


Рис. 4.32. Круговая последовательность ударов при ручной и механической трамбовке



Рис. 4.33. Первый удар ручной трамбовки при тесте А (схема рис. 4.31)



Рис. 4.34. Второй удар ручной трамбовки при тесте А (схема рис. 4.31)



Рис. 4.35. Третий удар ручной трамбовки при тесте А (схема рис. 4.31)



Рис. 4.36. Пятый удар ручной трамбовки при тесте А (схема рис. 4.32)

Также для уплотнения грунтов может применяться только кольцевая схема. Уплотнение грунта по кольцевой схеме приведено на рис. 4.37 – 4.42.



Рис. 4.37. Первый удар ручной трамбовки при тесте *B* (кольцевая схема)



Рис. 4.38. Второй удар ручной трамбовки при тесте *B* (кольцевая схема)



Рис. 4.39. Третий удар ручной трамбовки при тесте *B* (кольцевая схема)



Рис. 4.40. Четвертый удар ручной трамбовки при тесте *B* (кольцевая схема)



Рис. 4.41. Пятый удар ручной трамбовки при тесте *B* (кольцевая схема)



Рис. 4.42. Шестой удар ручной трамбовки при тесте *B* (кольцевая схема)

Применение полуавтоматической трамбовки исключает возможность использования схемы (см. рис. 4.31). В этом случае уплотнение выполняется посредством нанесения трамбующих ударов по кольцевой схеме, представленной на рис. 4.32. Уплотнение грунта механической трамбовкой приведено на рис. 4.43 – 4.48.



Рис. 4.43. Первый удар
полуавтоматической трамбовки при тесте А



Рис. 4.44. Второй удар
полуавтоматической трамбовки при тесте А



Рис. 4.45. Третий удар
полуавтоматической трамбовки при тесте А



Рис. 4.46. Пятый удар
полуавтоматической трамбовки при тесте А



Рис. 4.47. Двенадцатый удар полуавтоматической трамбовки при тесте А



Рис. 4.48. Двадцать пятый (последний)
удар трамбовки при тесте А

Конструкции полуавтоматических приборов различны, вследствие чего последовательность приложения ударов по кольцевой схеме реализуется одним из двух способов. При первом способе кольцевая схема уплотнения, проиллюстрированная на рис. 4.43 – 4.48, реализуется за счет кругового смещения трамбовки. При втором способе трамбовка бьет всегда в одну точку, а пресс-форма поворачивается после каждого удара на соответствующий угол.

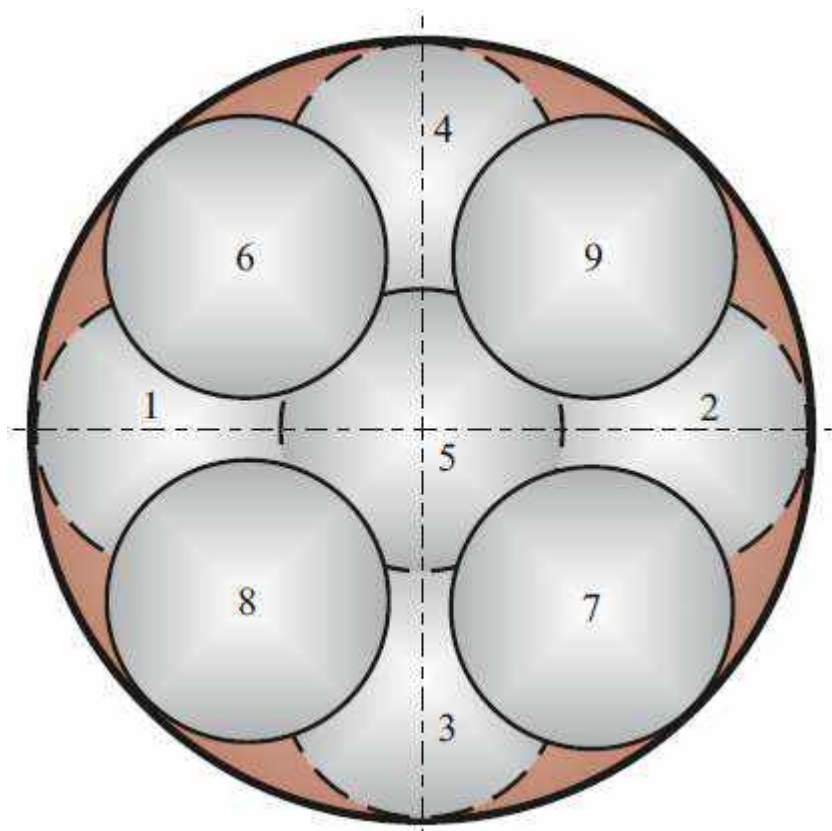


Рис. 4.49. Схема уплотнения образца ручной трамбовкой при выполнении теста С

вой схеме, но с обязательным уплотнением средней части образца [57].

При выполнении тестов *A* и *B* применение кольцевой схемы (рис. 4.32) может приводить к неравномерному уплотнению поверхности, как правило, это бывает при уплотнении грунтов с влажностью выше оптимальной [57]. В этом случае применяют схему (рис. 4.31), которая исключает возможность использования полуавтоматического прибора Проктора.

При применении стандартного метода после уплотнения каждого из двух нижних слоев необходимо произвести их осмотр и удалить неуплотненный грунт возле стенок формы и обрезать грунт, располо-

При выполнении теста *C* применяется форма диаметром 152,4 мм. В этом случае схемы уплотнения, представленные на рис. 4.31 и 4.32, неприменимы. Тогда уплотнение грунта при формовке образца ручной трамбовкой выполняют по схеме, представленной на рис. 4.49. После выполнения девятого удара уплотнение ведут по кольцевой

женный выше уплотненной поверхности [57]. При применении модифицированного метода аналогичные процедуры необходимо выполнить с каждым из четырех нижних слоев [58]. Если поверхность выглядит ровной, то эти меры не требуются.

Для сопряжения уплотненных слоев друг с другом поверхность нижнего слоя целесообразно взрыхлить ножом.

После уплотнения верхнего слоя (третьего для стандартного метода или пятого для модифицированного метода) необходимо снять верхнюю насадку и выполнить контроль высоты выступающей части образца.



Рис. 4.50. Подрезка грунта у боковой поверхности верхней насадки

Непосредственно перед отсоединением верхней насадки от цилиндрической части пресс-формы грунт у боковых стенок насадки подрезают ножом (рис. 4.50). После этого зажимные винты ослабляют и насадку отделяют от цилиндрической части формы.

На рис. 4.51 и 4.52 представлен общий вид образцов с выступающей частью

уплотненных при выполнении тестов *A* и *B*.



Рис. 4.51. Общий вид выступающей части грунта по завершению теста *A*



Рис. 4.52. Общий вид выступающей части грунта по завершению теста *B*

Высоту выступающей части измеряют при помощи линейки. Если высота выступающей части верхнего слоя превышает 6 мм, то образец бракуется [57, 58]. Если высота выступающей части третьего [57] или пятого [58] не превышает 6 мм, то эксперимент продолжают. Используя специальный нож–линейку, выполняют срезку выступающей части грунта (рис. 4.53) и последующее выравнивание поверхности образца «заподлицо» с верхней кромкой цилиндрической формы (рис. 4.54).



Рис. 4.53. Срезка выступающей части образца по завершению теста *A*



Рис. 4.54. Выравнивание поверхности образца по верхней кромке формы

После выравнивания поверхности образца производят ослабление винтов и отделение опорной пластины от цилиндрической части пресс-формы. При использовании в тесте бумажного вкладыша его отделяют от нижней поверхности образца (рис. 4.55). Эту поверхность осматривают и при необходимости подрезают. Для грунтов, испытываемых методами *B* и *C*, а также сухих или сильно увлажненных грунтов отделение дна от формы не выполняют (рис. 4.56).



Рис. 4.55. Отделение бумажного вкладыша от нижней поверхности образца



Рис. 4.56. Образец, подготовленный для взвешивания (тест *B*)

Обнаруженные на поверхностях образца дефекты допускается заполнять грунтом срезанной выступающей части [57, 58]. При этом, укладывая грунт в незаполненное место, на него необходимо надавить пальцами [57, 58], а после заполнения всех дефектов поверхность вновь зачищается ножом.

На рис. 4.57 и 4.58 приведены иллюстрации взвешивания цилиндрической формы с грунтом при снятой и присоединенной опорной пластине.



Рис. 4.57. Определение массы цилиндрической формы с грунтом



Рис. 4.58. Определение массы грунта с формой и опорной пластиной (тест В)

В случае использования опорной пластины при взвешивании (см. рис. 4.22 и 4.58) объем формы необходимо определять экспериментально, выполняя рекомендации [63, прил. А]. Для этого:

- Выполняют измерение массы опорной пластины с закрепленной на ней цилиндрической частью формы и стеклянной пластиной, которая применяется при дальнейшей калибровке объема m_0 . Результат определения массы округляют до 1 г.

- Форму с опорной поверхностью устанавливают на ровную поверхность и наполняют водой чуть выше верхней поверхности.

- Аккуратно устанавливают стеклянную пластину на верхнюю поверхность формы и следят за тем, чтобы пузырьки воздуха перестали выходить на поверхность.

- При необходимости воду добавляют или удаляют лишнюю. Эта операция выполняется при помощи шприца.

- С наружной части формы необходимо тщательно удалить всю воду, вытекшую из формы при ее наполнении.

- Производят измерение массы формы с водой и стеклянной пластиной m_1 . Результат измерения округляют до 1 г.

- С точностью до 1 °С измеряют температуру воды.
- Разностью масс m_1 и m_0 вычисляют массы воды m_v .
- По данным табл. 4.7 определяют плотность воды при измеренной температуре ρ_v .
- Делением массы воды на ее плотность находят объем формы и опорной пластины V .

Таблица 4.7. Зависимость плотности воды от температуры

Температура воды, °С	Плотность воды, г/см ³
18	0,99860
19	0,99841
20	0,99821
21	0,99799
22	0,99777
23	0,99754
24	0,99730
25	0,99705
26	0,99679

Измеренные массы формы M_0 и грунта с формой M_1 , а также объем формы или объем формы с опорной пластиной V используют при дальнейшей обработке данных для вычисления плотности грунта.



Рис. 4.59. Применение механического выталкивателя для извлечения образца из формы

После измерения массы формы с грунтом образец при помощи ручного или механического выталкивателя извлекается из цилиндрической части формы (рис. 4.59). Извлеченный образец используется для отбора проб при определении влажности грунта в соответствии с требованиями ASTM D2216-10 [39]. Стандарты [57, 58] для определения влажности грунта

рассматривают два метода. Первый наиболее предпочтительный способ состоит в том, что для определения содержания воды используется весь образец, который для облегчения сушки рекомендуется разбить на части.



Рис. 4.60. Резка образца ножом для отбора пробы для определения влажности

В соответствии со вторым способом для определения влажности используют пробу, взятую из образца. При выполнении испытания по модифицированному методу образец разрезают на две примерно равные части (рис. 4.60) [58].

Из одной части образца берут пробу грунта массой около 500 г. Для отбора

пробы от этой части по всей ее высоте отрезают пласт грунта (рис. 4.61) [63], который помещают в стаканчик для взвешивания (бюкс) (рис. 4.62) [58].



Рис. 4.61. Отделение пласта грунта



Рис. 4.62. Укладка грунта в бюкс

При выполнении испытаний по стандартному методу пробы на влажность берут из каждого уплотненного слоя [57]. В этом случае способ отбора проб для определения влажности аналогичен стандарту РФ ГОСТ 22733–2002 [56].

Дальнейшие работы по определению влажности грунта выполняются в соответствии с требованиями [39].

Выполнив испытания всех 4 или 5 образцов, выполняют обработку результатов эксперимента.

Обработку результатов эксперимента начинают с определения плотности грунта, расчет которой выполняют по формуле [57]

$$\rho = \frac{M_1 - M_0}{V}, \quad (4.10)$$

где M_1 – округленное до 1 г значение массы влажного грунта и формы (рис. 4.57 и 4.58), г; M_0 – округленное до 1 г значение массы формы (см. рис. 4.22 и 4.23), г; V – объем формы, вычисленный по (4.9) (допускается обоими стандартами [57, прил. А] и [58, прил. А]) или рассчитанный по измеренным массе и объему форму [58], см³.

Используя значение влажности, определенное по стандарту ASTM D2216-10 [39], производят расчет плотности сухого грунта

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + \frac{w}{100}}, \quad (4.11)$$

где w – влажность грунта в образце, рассчитанная по методике ASTM D2216-10 [39], с точностью до 0,1%.

Вес сухого грунта вычисляют по формуле

$$\gamma_d = K \cdot \rho_d, \quad (4.12)$$

где K – коэффициент, корректирующий размерность ($K=9,8066$ при единицах измерения ρ_d в г/см³, а γ_d в кН/м³).

Вычисленные значения веса сухого грунта и соответствующие им влажности используют для построения кривой уплотнения. Для контролируемых в РФ параметров уплотнения грунта достаточно построить график стандартного уплотнения, используя вычисленные по (4.11) плотности сухого грунта и соответствующие им влажности.

Для контроля правильности испытания грунтов стандарты [57, 58] так же, как и ГОСТ 22733-2002 [56], регламентируют построение «линии нулевого содержания воздуха». Эта линия показывает изменение плотности сухого грунта или его удельного веса от влажности при полном насыщении его пор водой. Требования, регламентируемые документами [57, 58] и [56], отличаются.

Согласно российскому стандарту пары чисел ρ_{di} и w_i для построения «линии нулевого содержания воздуха» при плотности частиц грунта ρ_s определяют, задаваясь значениями влажности, по формуле

$$\rho_{di} = \frac{\rho_s}{1 + 0,01 \cdot w_i \cdot \rho_s \cdot \frac{1}{\rho_w}}, \quad (4.13)$$

где ρ_s – плотность частиц грунта, определяемая по ГОСТ 5180–84 [11], г/см³; ρ_w – максимальное значение плотности воды, соответствующее ее температуре 3,98 °С и равное 1 г/см³.

В стандартах [57, 58] наоборот, в качестве независимой переменной принимают влажность, которая рассчитывается для заданного значения удельного веса сухого грунта. Приводя (4.13) к формуле, регламентируемой стандартами [57, 58], решим это уравнение относительно влажности и получим формулу

$$w_i = \left(\frac{\rho_w \cdot \rho_s - \rho_w \cdot \rho_{di}}{\rho_s \cdot \rho_{di}} \right) \cdot 100. \quad (4.14)$$

Далее выразим плотности воды, сухого грунта и его минеральных частиц из уравнений, подобных (4.12). Тогда получим

$$\rho_{di} = \frac{\gamma_{di}}{K} \quad \rho_w = \frac{\gamma_w}{K} \quad \rho_s = \frac{\gamma_s}{K}. \quad (4.15)$$

Выполняя подстановку (4.15) в (4.14), приводим (4.14) к виду

$$w_i = \left(\frac{\gamma_w \cdot \gamma_s - \gamma_w \cdot \gamma_{di}}{\gamma_s \cdot \gamma_{di}} \right) \cdot 100. \quad (4.16)$$

В США в качестве характеристики удельного веса частиц грунта используют термин «специальный удельный вес», представляющий собой отношение веса минеральной части к весу воды. Поэтому соотношение специального удельного веса и физического удельного веса частиц грунта можно дать в виде формул

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}; \quad \gamma_s = G_s \cdot \gamma_w. \quad (4.17)$$

Подставляя вторую зависимость (4.17) в (4.16), получим

$$w_i = \left(\frac{\gamma_w \cdot G_s - \gamma_{di}}{G_s \cdot \gamma_{di}} \right) \cdot 100. \quad (4.18)$$

Зависимость (4.18) является регламентируемой [57, 58] формулой для расчета влажности при построении линии нулевого давления, а выкладки (4.13) – (4.18) иллюстрируют схожесть подходов [56] и [57, 58] к построению «линии нулевого содержания воздуха».

Кривые Проктора приведены на рис. 4.63.

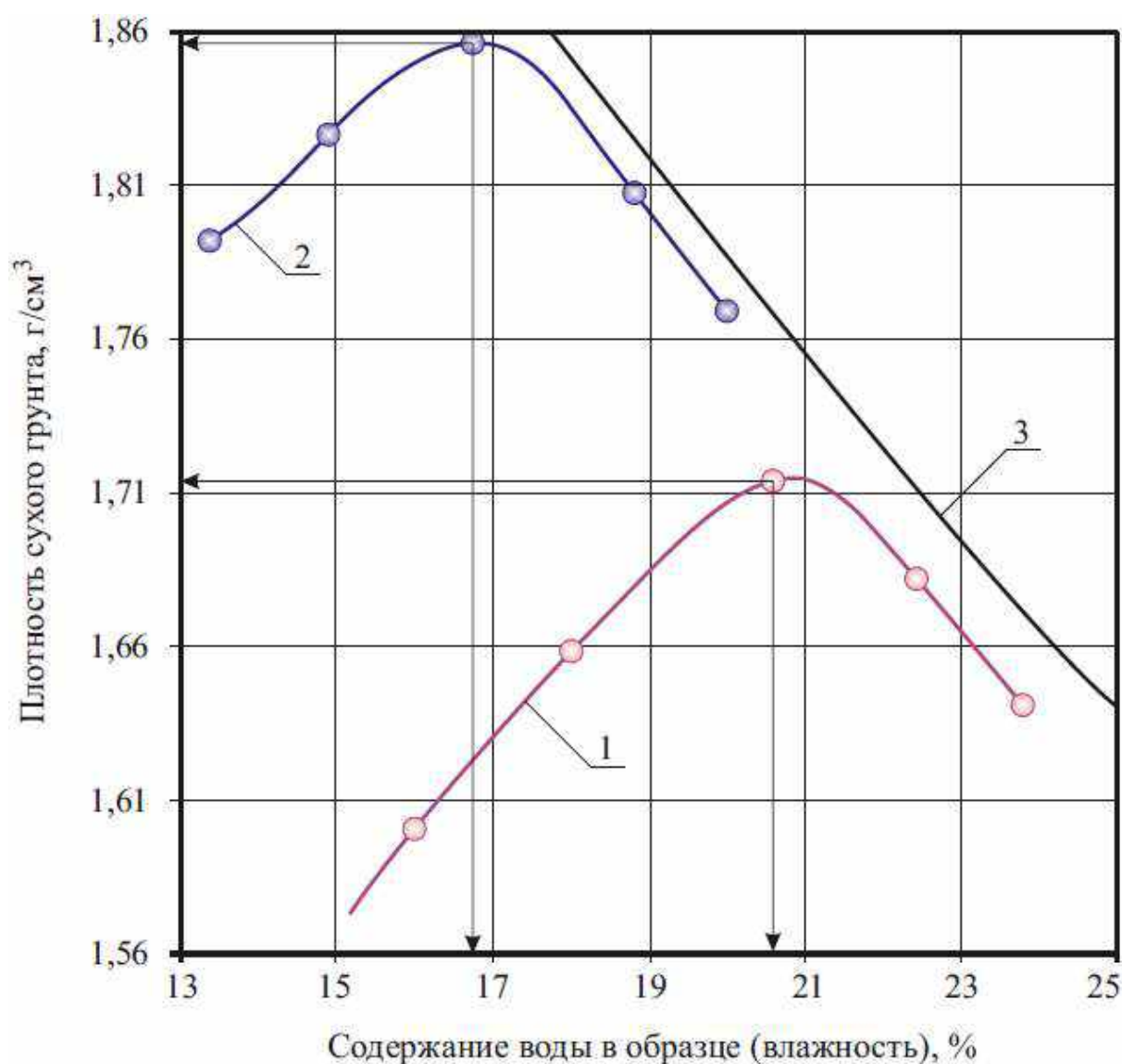


Рис. 4.63. Кривые Проктора для теста А:

- 1 – стандартный метод [57]; 2 – модифицированный метод [58];
3 – линия нулевого содержания воздуха

Значения максимальной плотности сухого грунта и оптимальной влажности можно пересчитать на аналогичные характеристики, определяемые по стандарту РФ [56]. Для этого плотности сухого грунта и оптимальные влажности, определяемые по стандартному [57] и модифицированному [58] методам, достаточно разделить на коэффициенты, численные значения которых даны в табл. 4.8.

Таблица 4.8. Коэффициенты приведения значений максимальной плотности и оптимальной влажности, установленные методами [57, 58] к характеристикам, полученным методом стандартного уплотнения [56]

Метод испытания грунта	Разновидность грунта							
	Песок		Супесь		Суглинок		Глина	
	ρ_{dmax}	w_{opt}	ρ_{dmax}	w_{opt}	ρ_{dmax}	w_{opt}	ρ_{dmax}	w_{opt}
Метод Проктора стандартный	1,0	1,0	0,99	1,02	0,96	1,03	0,97	1,02
Метод Проктора модифицированный	1,02	0,87	1,05	0,84	1,06	0,85	1,06	0,88

Примечание. Приведение значений максимальной плотности и оптимальной влажности для основных разновидностей грунтов, определяемых методом стандартного уплотнения, к значениям, полученным методами Проктора, осуществляют путем умножения на соответствующие коэффициенты, приведенные в таблице.

4.1.2. Определение максимальной плотности методом стандартного уплотнения по ГОСТ 22733–2016

В состав установки для испытания грунта методом стандартного уплотнения должны входить форма для образца грунта, насадка и устройство для механизированного или ручного уплотнения грунта с грузом, падающим с постоянной высоты.

Установка для уплотнения грунта должна обеспечивать падение груза массой (2500 ± 25) г по направляющей штанге с постоянной высоты (300 ± 3) мм на наковальню. Отношение массы груза к массе направляющей штанги с наковальней должно быть не более 1,5.

В качестве средств измерения используют: весы для статического взвешивания на 2–5 кг среднего класса точности, весы лабораторные на 0,2–1,0 кг 4-го класса точности, линейку металлическую, мерные цилиндры вместимостью 100 и 50 мл с ценой деления не более 1 мл.

В качестве вспомогательного оборудования и инструментов необходимо иметь: металлические чашки вместимостью 5 л, стаканчики для взвешивания ВС-1 с крышками, устройство растирочное или ступка фарфоровая с пестиком, шкаф сушильный, набор сит с диаметром отверстий 20, 10 и 5 мм, эксикатор Э-250, шпатель металлический, нож лабораторный с прямым лезвием длиной не менее 150 мм.

Все средства измерений должны пройти поверку или калибровку, а испытательное оборудование должно быть аттестовано в установленном порядке.

Прибор стандартного уплотнения показан на рис. 4.64, а на рис. 4.65 приведено вспомогательное оборудование и некоторые инструменты.



Рис. 4.64. Установка для испытания грунта методом стандартного уплотнения СоюздорНИИ:
1 – форма для образца грунта;
2 – насадка; 3 – устройство для ручного уплотнения грунта с грузом массой 2500 г



Рис. 4.65. Приборы и оборудование:
1 – 3 – цилиндрическая часть, поддон и зажимное кольцо формы;
4 – штанга, для груза; 5 – насадка;
6 – мерные цилиндры;
7 – нож; 8 – шпатель; 9 – бюксы;
10 – металлические чашки с грунтом

При механизированном способе уплотнения в состав устройства должен входить механизм подъема груза на постоянную высоту и счетчик числа ударов. При испытаниях установка должна размещаться на жесткой горизонтальной плите (бетонной или металлической) массой не менее 50 кг. Отклонение поверхности от горизонтали не должно быть более 2 мм/м.

Для подготовки пробы производят отбор грунта нарушенного сложения, масса которого в естественном состоянии должна быть не менее 10 кг при наличии агрегатов крупнее 10 мм и не менее 6 кг – при отсутствии частиц крупнее 10 мм. Отобранный грунт высушивают до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре или в

сушильном шкафу. При высушивании в сушильном шкафу несвязных минеральных грунтов температура не должна превышать 100 °С, связных – 60 °С. В процессе сушки грунт периодически перемешивают. Размельчение агрегатов грунта выполняют без дробления крупных частиц в растирочном устройстве или в фарфоровой ступке.

Грунт взвешивают и просеивают через сита с отверстиями диаметром 20 и 10 мм (рис. 4.66). При просеивании вся масса грунта должна пройти через сито с отверстиями диаметром 20 мм. После отсева производят взвешивание отсеянных крупных частиц (рис. 4.67).



Рис. 4.66. Рассев грунта сквозь сита № 20 и № 10



Рис. 4.67. Взвешивание частиц, оставшихся на сите № 10

Из отсеянных крупных частиц отбирают пробы для определения их влажности W_k и средней плотности частиц ρ_k . При определении влажности отсеянные крупные частицы насыпаются в сосуд и взвешиваются для определения массы пробы во влажном состоянии m_v . Затем пробу высушивают до постоянной массы и снова взвешивают и определяют массу пробы в сухом состоянии m .

Влажность крупных частиц W_k , % по массе, определяют по формуле

$$W_k = \frac{m_B - m}{m} \cdot 100. \quad (4.19)$$

Из грунта, прошедшего через сито, отбирают пробы для определения его влажности в воздушно-сухом состоянии W_a по [11].

Вычисляют содержание в грунте крупных частиц K , %, с точностью 0,1% по формуле

$$K = \frac{m_k \cdot (1 + 0,01 \cdot W_g)}{m_p \cdot (1 + 0,01 \cdot W_k)} \cdot 100, \quad (4.20)$$

где m_k – масса отсеянных крупных частиц, г; W_a – влажность просеянного грунта в воздушно-сухом состоянии, %; m_p – масса образца грунта в воздушно-сухом состоянии, г; w_k – влажность отсеянных крупных частиц, %.

В том случае, если масса частиц грунта крупнее 10 мм составляет 5% и более, дальнейшее испытание проводят с пробой грунта, прошедшего через сито 10 мм. Если масса частиц грунта крупнее 10 мм составляет менее 5%, производят дальнейшее просеивание грунта через сито с отверстиями диаметром 5 мм и определяют содержание частиц крупнее 5 мм. В этом случае дальнейшее испытание проводят с пробой грунта, просеянного сквозь сито 5 мм.

Из просеянного грунта методом квартования отбирают пробу грунта массой 2500 г и помещают в металлическую чашку для испытаний.

Весь цикл испытаний допускается проводить с одной отобранной пробой, но для испытания грунтов, содержащих частицы, легко разрушающиеся при уплотнении, отбирают несколько отдельных проб. Каждую пробу испытывают только один раз. Влажность грунта для первого испытания назначают по табл. 4.9.

Таблица 4.9. Рекомендуемые влажности грунтов для первого испытания

Грунты	Влажность w_1 грунта для первого испытания, %
Песок гравелистый, крупный и средней крупности	4
Песок мелкий и пылеватый	6
Супесь, суглинок легкий	6 – 8
Суглинок тяжелый, глина	10 – 12

Количество воды, необходимой для доувлажнения отобранной пробы до влажности первого испытания, определяют по формуле

$$Q = \frac{0,01 \cdot m'_p}{1 + 0,01 \cdot W_g} \cdot (W_1 - W_g), \quad (4.21)$$

где m'_p – масса пробы, г; W_1 – влажность грунта для первого испытания, назначаемая по табл. 1, %; W_g – влажность просеянного грунта в воздушно-сухом состоянии, %.

В пробу вводят рассчитанное количество воды за несколько приемов, перемешивая грунт металлическим шпателем. Пробу грунта переносят в эксикатор (рис. 4.68), который накрывают крышкой и выдерживают пробу при комнатной температуре. Время выдерживания несвязных грунтов должно быть не менее 2 ч, а для связных – не менее 12 ч. Взвешиванием цилиндрической части формы (рис. 4.69) производится измерение ее массы.



Рис. 4.68. Перемещение грунта из металлического поддона в эксикатор



Рис. 4.69. Взвешивание цилиндрической части формы для измерения ее массы

Далее выполняется сборка металлической формы и подготовка установки к испытаниям. При этом цилиндрическая часть формы ус-

танавливается на поддон. Не зажимая цилиндрическую часть винтами поддона, на нее надевают зажимное кольцо. После этого попеременно винтами поддона и кольца зажимают цилиндрическую часть формы. Внутреннюю поверхность формы протирают ветошью, смоченной керосином, минеральным маслом или техническим вазелином. Собранный форму устанавливают на плоское основание и проверяют соосность направляющей штанги и цилиндрической части формы и свободный ход груза по штанге.

Проба грунта переносится из эксикатора в металлическую чашку и тщательно перемешивается. Затем в собранную форму загружают грунт, распределяя слоем толщиной 5 – 6 см (рис.4.70).

Форму с грунтом помещают на железобетонное или металлическое плоское основание, масса которого не менее 50 кг, и уплотняют 40 ударами груза. Поверхность уплотненного грунта взрыхляют ножом на глубину 1 – 2 мм (рис. 4.71).



Рис. 4.70. Загрузка грунта в форму слоем толщиной 5 – 6 см



Рис. 4.71. Рыхление нижнего слоя на глубину 1-2 мм

Производится засыпка грунта второго слоя, и он уплотняется 40 ударами. После рыхления поверхности слоя на форму устанавливают насадку и засыпают третий слой грунта (рис. 4.72), который тоже уплотняется 40 ударами. При уплотнении следят за тем, чтобы при каждом ударе обеспечивалась соосность штанги и формы, а при воз-

никновении перекоса его устраняют наклоном штанги (рис. 4.73). После уплотнения насадку снимают и контролируют высоту части грунта, выступающей из формы (рис.4.74). Если высота выступающей части грунта не превышает 10 мм, то ее срезают заподлицо с торцом формы (рис. 4.75).



Рис. 4.72. Установка насадки и засыпка грунта третьего слоя



Рис. 4.73. Контроль соосности штанги и формы при уплотнении



Рис. 4.74. Измерение и контроль высоты выступающей части грунта

В том случае, если высота выступающей части грунта превышает



Рис. 4.75. Общий вид образца после срезки выступающей части грунта

10 мм, то выполняется дополнительное количество ударов из расчета 1 удар на 2 мм превышения. Если при зачистке поверхности образца происходит выпадение крупных частиц с образованием углублений, то их заполнение производят вручную грунтом из оставшейся части отобранной пробы и выравнивают ножом.

Производится снятие зажимного кольца и поддона. После этого проверяется нижняя часть образца, которая не должна иметь выступающей части грунта из цилиндрической формы. Цилиндрическую часть формы вместе с грунтом взвешивают, измеряя массу m_i (рис.4.76). Образец грунта извлекают из цилиндрической части формы, а из верхней, средней и нижней частей образца отбирают пробы для определения влажности грунта w_i (рис. 4.77).



Рис. 4.76. Взвешивание цилиндрической части формы с грунтом



Рис. 4.77 Отбор проб из верхней, средней и нижней частей образца для определения влажности

Плотность грунта рассчитывают по формуле

$$\rho_i = \frac{m_i - m_c}{V}, \quad (4.22)$$

где m_i – масса цилиндрической части формы с уплотненным грунтом, г; m_c – масса цилиндрической части формы без грунта, г; V – вместимость формы, см³.

Грунт, извлеченный из формы, присоединяют к оставшейся в чашке части пробы и производят измельчение и перемешивание грунта. Размер агрегатов после измельчения и перемешивания не должен превышать наибольшего размера частиц испытываемого грунта.

После визуальной оценки размеров агрегатов грунта в грунт вводят необходимое количество воды для того, чтобы увеличить влажность несвязных грунтов на 1 – 2% , а связных на 2 – 3%. Количество воды рассчитывают по формуле (4.21), в которой за W_q и W_1 принимают соответственно влажности при предыдущем и очередном испытаниях. Это правило соблюдают при каждом последующем испытании. После добавления воды грунт тщательно перемешивают, накрывают влажной тканью (рис. 4.78) и выдерживают в течение необходимого времени, которое для несвязных грунтов должно быть не менее 15 мин, а связных – не менее 30 мин.

После выдерживания грунта производят испытание в соответствии с вышеописанным порядком. Последовательные испытания грунта с увеличением его влажности ведут до тех пор, когда с повышением влажности пробы при последующих двух испытаниях происходит последовательное уменьшение значений массы и плотности уплотняемого образца грунта, а также когда при ударах происходит отжатие воды или выделение разжиженного грунта через соединения формы.

Определение влажности грунта производят методом высушивания до постоянной массы по ГОСТ 5180–2015, помещая стаканчики ВС-1 с пробами грунта, взятыми из каждого образца, в сушильный шкаф (рис. 4.79).

Используя полученные значения плотности грунта и его влажности, вычисляют плотность сухого грунта с точностью 0,01 г/см³. Расчеты производят по формуле

$$\rho_{di} = \frac{\rho_i}{1 + 0,01W_{ei}}, \quad (4.23)$$

где ρ_i – плотность грунта, г/см³; w_{ei} – влажность грунта при очередном испытании, %.

Влажность грунта при очередном испытании определяется как среднее значение влажностей, полученных из проб, взятых из верхней средней и нижней частей образца при очередном испытании.

Используя полученные результаты плотности сухого грунта и влажности, выполняется построение графика зависимости изменения значений плотности сухого грунта от влажности. По наивысшей точке

графика для связных грунтов находят значение максимальной плотности $\rho_{d \max}$ и соответствующее ему значение оптимальной влажности W_o .



Рис. 4.78. Укрытие грунта влажной тканью с последующим выдерживанием в течение необходимого времени



Рис. 4.79. Высушивание проб грунта до постоянной массы при определении влажности

Для несвязных грунтов график стандартного уплотнения может не иметь заметно выраженного максимума. В этом случае значение оптимальной влажности принимают на 1,0 – 1,5% менее влажности w_{ei} , при которой происходит отжатие воды. Значение максимальной плотности принимают по соответствующей ей ординате. При этом 1,0 % принимают для песков гравелистых, крупных и средней крупности; 1,5% – для мелких и пылеватых песков.

При содержании в грунте крупных частиц, которые перед испытанием были удалены из пробы, для учета влияния их состава корректируют установленное значение максимальной плотности сухого грунта. В этом случае расчет уточненного значения $\rho'_{d \max}$ производят по формуле

$$\rho'_{dmax} = \frac{\rho_{dmax} \cdot \rho_k}{\rho_k - 0,01 \cdot K \cdot (\rho_k - \rho_{dmax})}, \quad (4.24)$$

где ρ_k – плотность крупных частиц, г/см³; K – содержание крупных частиц в грунте, %.

Уточненное значение оптимальной влажности грунта W'_o , %, определяют по формуле

$$W'_o = 0,01 \cdot W_o \cdot (1 - K). \quad (4.25)$$

Для контроля правильности испытания связных грунтов строят «линию нулевого содержания воздуха», показывающую изменение плотности сухого грунта от влажности при полном насыщении его пор водой. Пары чисел ρ_{di} и w_i для построения «линии нулевого содержания воздуха» при плотности частиц грунта ρ_s определяют, задаваясь значениями влажности, по формуле

$$\rho_{di} = \frac{\rho_s}{1 + 0,01 \cdot w_i \cdot \rho_s \cdot \frac{1}{\rho_w}}, \quad (4.26)$$

где ρ_s – плотность частиц грунта, определяемая по ГОСТ 5180–2015 [11], г/см³; ρ_w – максимальное значение плотности воды, соответствующее ее температуре 3,98 °С и равное 1 г/см³.

Допускается принимать пары чисел ρ_{di} и w_i по табл.10.

Таблица 4.10. Пары чисел влажности W_{ei} и плотности сухого грунта ρ_{di} для построения «линии нулевого содержания воздуха»

Влажность w_i , %	Плотность сухого грунта ρ_{di} , г/см ³ , при плотности частиц грунта ρ_s				
	2,58	2,65	2,69	2,70	2,74
1	2	3	4	5	6
2	2,45	2,64	-	-	-
3	2,40	2,45	-	-	-
4	2,33	2,40	-	-	-
5	2,29	2,34	-	-	-
6	2,23	2,29	-	-	-
7	2,16	2,23	-	-	-
8	2,14	2,19	-	-	-
9	2,09	2,14	-	-	-
10	2,05	2,09	2,11	2,13	2,15
11	2,01	2,05	2,07	2,08	2,11
12	1,97	2,01	2,03	2,04	2,06
13	1,93	1,97	1,99	2,00	2,02

Окончание табл. 4.10

1	2	3	4	5	6
14	1,90	1,93	1,95	1,96	1,98
15	1,86	1,90	1,91	1,92	1,94
16	1,83	1,86	1,88	1,89	1,91
17	1,79	1,83	1,84	1,85	1,87
18	1,76	1,80	1,81	1,82	1,83
19	1,73	1,76	1,78	1,78	1,80
20	1,70	1,73	1,74	1,75	1,77
21	1,67	1,70	1,71	1,73	1,74
22	1,65	1,67	1,69	1,69	1,71
23	1,62	1,65	1,65	1,66	1,68
24	1,60	1,62	1,63	1,64	1,65
25	1,57	1,59	1,60	1,61	1,63
26	1,54	1,57	1,58	1,59	1,60
27	1,52	1,54	1,55	1,56	1,57
28	1,50	1,52	1,53	1,54	1,55
29	1,48	1,50	1,51	1,51	1,53
30	1,45	1,48	1,49	1,49	1,50

Примечание. Плотность частиц грунта ρ_s определяют по [11] или принимают в зависимости от разновидности грунта.

Нисходящая часть графика стандартного уплотнения не должна пересекать «линию нулевого содержания воздуха».

При необходимости сравнения или приведения значений максимальной плотности и оптимальной влажности грунта к значениям, полученным методами Проктора, допускается использовать переходные коэффициенты, приведенные в табл. 4.11.

Таблица 4.11. Коэффициенты приведения значений максимальной плотности и оптимальной влажности грунта к значениям, полученным методами Проктора

Метод испытания грунта	Разновидность грунта							
	Песок		Супесь		Суглинок		Глина	
	ρ_{dmax}	w_{opt}	ρ_{dmax}	w_{opt}	ρ_{dmax}	w_{opt}	ρ_{dmax}	w_{opt}
Метод Проктора стандартный	1,0	1,0	0,99	1,02	0,96	1,03	0,97	1,02
Метод Проктора модифицированный	1,02	0,87	1,05	0,84	1,06	0,85	1,06	0,88

Примечание. Приведение значений максимальной плотности и оптимальной влажности для основных разновидностей грунтов, определяемых методом стандартного уплотнения, к значениям, полученным методами Проктора, осуществляют путем умножения на соответствующие коэффициенты, приведенные в таблице.

График стандартного уплотнения может быть использован для уточнения допускаемых коэффициентов увлажнения, значения которых приведены в табл. 4.4. Для этого график стандартного уплотнения целесообразно построить в координатах коэффициента уплотнения и коэффициента увлажнения. Затем из точек, соответствующих требуемому коэффициенту уплотнения, нужно провести нормаль к оси коэффициента увлажнения, полученные точки укажут нижний и верхний пределы допускаемых коэффициентов увлажнения. Пример такого определения представлен на рис. 4.80.

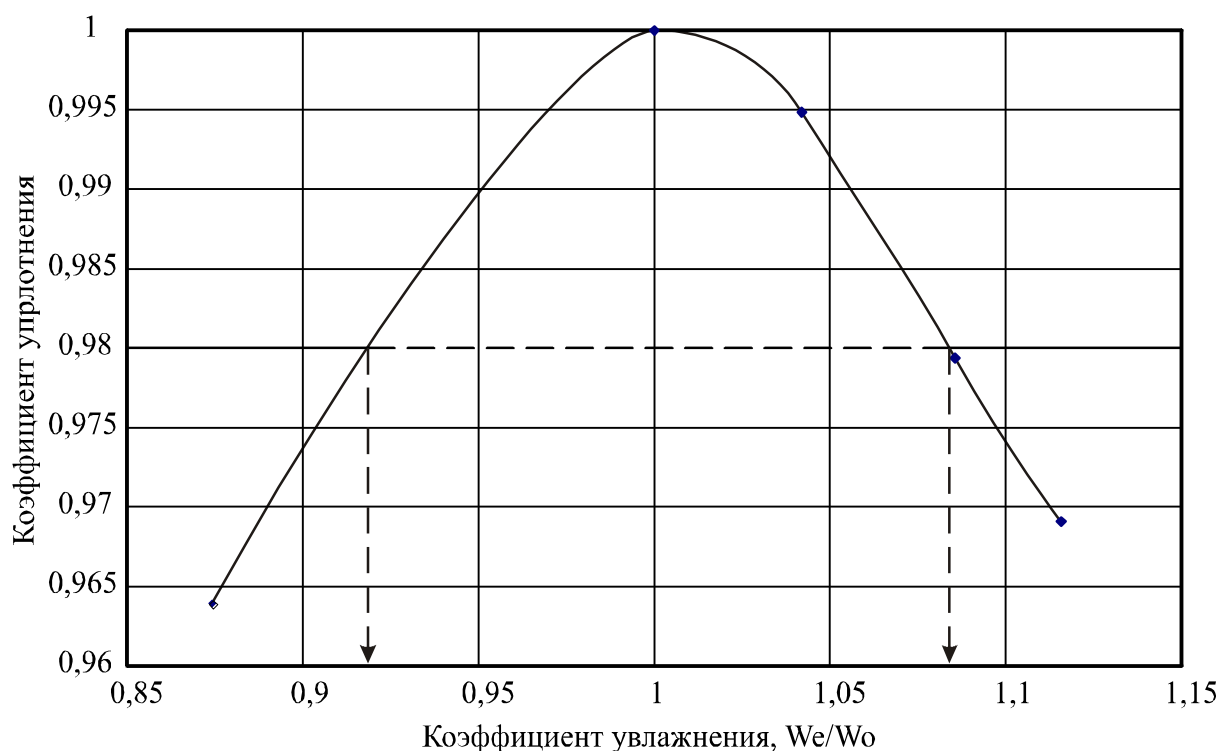


Рис. 4.80. Использование графика стандартного уплотнения в координатах коэффициентов уплотнения и увлажнения для оценки допускаемых коэффициентов увлажнения

Из графика, представленного на рис. 4.80, следует, что при требуемом коэффициенте уплотнения 0,98 минимальное допустимое значение коэффициента увлажнения суглинка тяжелого составляет 0,92, а максимальное – 1,08. Допускаемые табл. 4.4 коэффициенты увлажнения варьируются в пределах 0,95 – 1,05, то есть требования табл. 5 строже, чем полученные при испытаниях, в связи с чем в качестве предельных значений коэффициентов увлажнения целесообразно принять данные табл. 4.4.

4.2. Лабораторные работы по определению плотности грунта

Необходимость определения плотности сухого (скелета) грунта вытекает из анализа формулы (4.5), в соответствии с которой определяется коэффициент уплотнения грунта в земляном полотне. Рассмотренные выше правила определения максимальной стандартной плотности позволяют утверждать, что для каждой разновидности грунта она зависит от метода выполнения испытаний. Например, для одного и того же грунта наименьшее значение максимальной стандартной плотности получается при использовании стандартного метода Р. Проктора, а наибольшее ее значение будет получено при испытаниях модифицированным методом Р. Проктора. Таким образом, максимальная стандартная плотность есть величина постоянная для одного и того же грунта при ее определении одним из трех способов, описанных нами выше. Поэтому коэффициент уплотнения можно представить в виде функции плотности сухого грунта. В связи с этим зависимость (4.2) представим в виде

$$k_y = \frac{\rho_d}{\rho_{d(max)}}, \quad (4.27)$$

Где $\rho_{d(max)}$ – максимальная стандартная плотность, установленная испытаниями при помощи стандартного метода Р. Проктора, метода стандартного уплотнения и модифицированного метода Р. Проктора.

Плотность сухого грунта можно выразить через различные показатели физических свойств грунта (см. табл. 4.12), в том числе и через плотность грунта и его влажность.

Таблица 4.12. Связь плотности сухого грунта с показателями физических свойств

Основная пара показателей физических свойств	Формула для расчета плотности сухого грунта ρ_d
Плотность грунта ρ , г/см ³ (т/м ³)	$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0,01 \cdot W_e}$
Влажность грунта W_e , %	
Плотность частиц грунта ρ_s , г/см ³ (т/м ³)	$\rho_d = \rho_s (1 - 0,01 \cdot n)$
Пористость n , %	
Плотность частиц грунта ρ_s , г/см ³ (т/м ³)	$\rho_d = \frac{\rho_s}{1 + e}$
Коэффициент пористости e	

Представленные в табл. 4.12 формулы являются в равной степени достоверными, но наиболее просто и с достаточной для инженерных

целей точностью определяются экспериментальные значения плотности грунта и его влажности. Поэтому расчет плотности сухого грунта рационально производить по значениям плотности и влажности грунта, полученным в результате испытаний.

Определение плотности и влажности грунтов производится в соответствии с требованиями [11, 36, 63]. Для этого производится отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов грунта в соответствии с требованиями [38], используя точечный метод отбора.

В зависимости от свойств грунта выбирают метод определения плотности и влажности, а в зависимости от метода отбирают образцы ненарушенного сложения (монолиты) или нарушенного сложения. Методы определения характеристик выбираются в зависимости от свойств грунта в соответствии с [11].

4.2.1. Определение плотности грунта методом режущего кольца по ГОСТ 5180 -2014

Для определения плотности грунта необходимо установить массу грунта в единице объема в условиях залегания грунта в насыпи, выемке или естественном состоянии. Для этого из земляного полотна или резерва необходимо точечным методом отбора взять образцы ненарушенного сложения (монолиты). В лабораторных условиях измеряют массу грунта, а объем образца соответствует объему кольца пробоотборника. В зависимости от вида грунта и его состояния выбирают режущее кольцо-пробоотборник в соответствии с указаниями табл. 4.13.

Таблица 4.13. Требования к размерам кольца-пробоотборника

Наименование и состояние грунтов	Размеры кольца-пробоотборника			
	Толщина стенки, мм	Диаметр внутренний d , мм	Высота h	Угол заточки наружного режущего края
Немерзлые пылевато-глинистые грунты	1,5–2,0	≥ 50	$0,8 d \geq h > 0,3 d$	Не более 30°
Немерзлые и сыпуче-мерзлые песчаные грунты	2,0–4,0	≥ 70	$d \geq h > 0,3 d$	То же
Мерзлые пылевато-глинистые грунты	3,0–4,0	≥ 80	$h = d$	45°

Кольца-пробоотборники изготавливают из стали с антикоррозионным покрытием или из других материалов, не уступающих по твердости и коррозионной стойкости.

В настоящее время изготавливают комплекты колец-пробоотборников КОПГ-01 (КПГ-01), КП-402, ПГ-50, ПГ-200, ПГ-400, соответствующие требованиям табл. 4.28. Общий вид таких комплектов пробоотборников представлен на рис. 4.81.

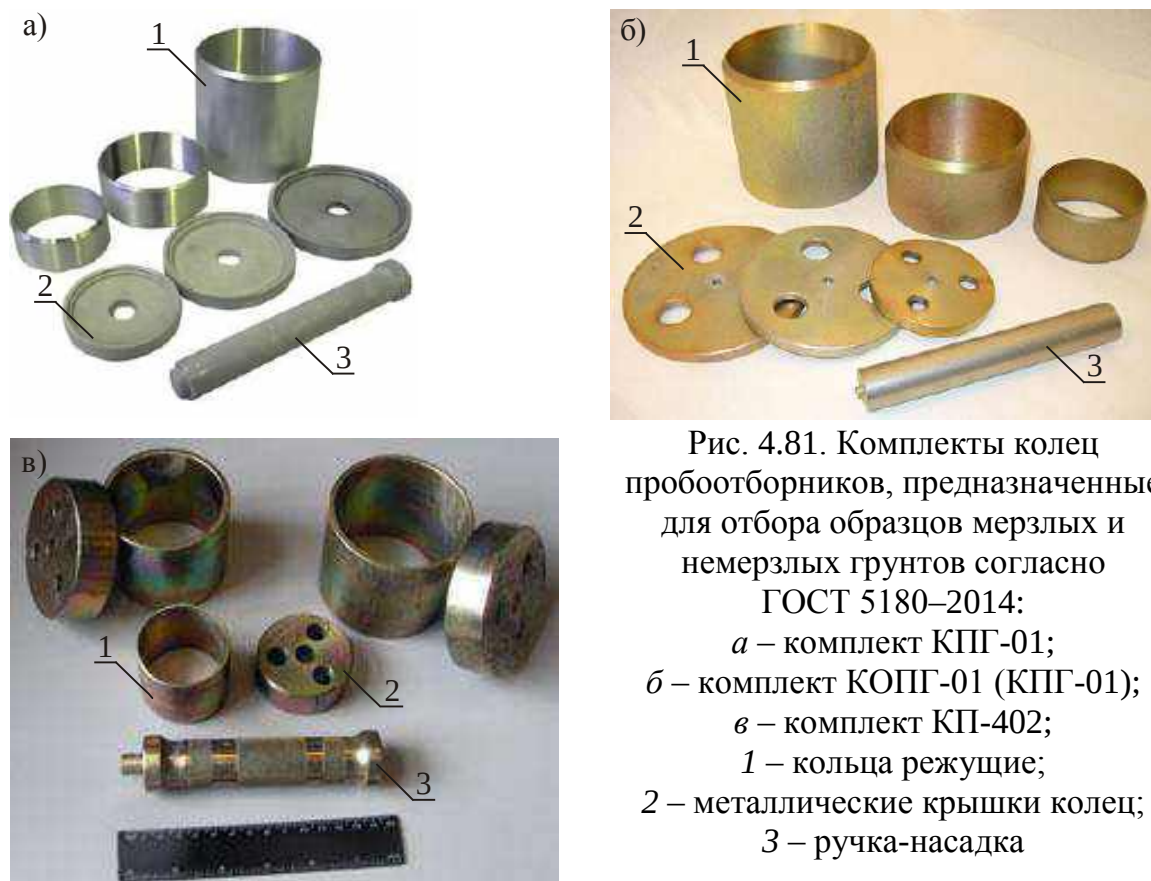


Рис. 4.81. Комплекты колец пробоотборников, предназначенные для отбора образцов мерзлых и немерзлых грунтов согласно ГОСТ 5180–2014:

- а – комплект КПГ-01;
- б – комплект КОПГ-01 (КПГ-01);
- в – комплект КП-402;
- 1 – кольца режущие;
- 2 – металлические крышки колец;
- 3 – ручка-насадка

Согласно требованиям [11] лабораторная работа по определению плотности грунта методом режущего кольца включает в себя три этапа: подготовку к испытанию, проведение испытания и обработку результатов.

Для проведения испытаний подготавливают необходимое количество колец, которые нумеруются и взвешиваются (рис. 4.82). Кроме колец подготавливают пластинки с гладкой поверхностью (из стекла, металла и т. д.), которые тоже нумеруются и взвешиваются (рис. 4.83). У каждого кольца при помощи штангенциркуля измеряются внутренний диаметр и высота с погрешностью не более 0,1 мм. По результатам измерений вычисляют объем кольца с точностью до 0,1 см³.



Рис. 4.82. Взвешивание кольца



Рис. 4.83. Взвешивание пластинок

При отборе проб для контроля качества уплотнения грунтов руководствуются требованиями [25], согласно которым контроль плотности грунта выполняют в каждом технологическом слое по оси земляного полотна и на расстоянии 1,5 – 2,0 м от бровки, а при ширине слоя более 20 м – также и в промежутках между ними. Плотность грунта необходимо проверять на каждой сменной захватке работы уплотняющих машин. В насыпях высотой до 3 м плотность контролируется не реже чем через 200 м. Плотность грунта в насыпях высотой более 3 м и в верхнем слое контролируют не реже чем через 50 м.

Контроль плотности следует производить на глубине, равной $1/3$ толщины уплотняемого слоя, но не менее 8 см.

Для отбора пробы в резервах, выемках и нулевых отметках подготавливают ровную площадку, а грунт изымают на глубину 8 см. При отборе пробы из насыпи изъятие грунта производится из верхней части технологического слоя на глубину $1/3$ от его толщины, но не менее чем на 8 см (рис. 4.84). То есть при толщине технологического слоя 30 см из его верхней части необходимо удалить 10 см грунта, а при толщине – 20 см грунт удаляется на 8 см. Поверхность полученной площадки выравнивают, срезая излишки грунта ножом (рис. 4.85).



Рис. 4.84. Изъятие грунта из верхней части технологического слоя



Рис. 4.85. Выравнивание верхней плоскости образца

Завершив подготовку площадки, кольцо с внутренней стороны смазывают тонким слоем вазелина или консистентной смазки. На подготовленную поверхность устанавливают режущий край кольца и слегка вдавливают кольцо в грунт на глубину 2 – 3 мм (рис. 4.86). Снаружи кольцо на глубину 5–10 мм ниже режущего края обрезается от окружающего грунта (рис. 4.87). Обрезка производится таким образом, чтобы сформировался столбик грунта, диаметр которого на 1–2 мм больше наружного диаметра кольца.

Затем периодически, по мере срезания грунта, легкими нажимами пресса или насадки насаживают кольцо на столбик грунта, не допуская перекосов (рис. 4.88). После заполнения кольца грунт, расположенный на 8–10 мм ниже режущего края кольца, подрезают ножом на конус и отделяют кольцо с грунтом (рис. 4.89).



Рис.4.86. Погружение кольца в грунт на глубину 2 – 3 мм



Рис. 4.87. Обрезка грунта вокруг кольца на глубину 5–10 мм ниже края



Рис. 4.88. Насаживание кольца на столбик



Рис. 4.89. Изъятое кольцо с подрезанным на конус грунтом

Грунт, выступающий за края кольца, срезают ножом от себя под углом 45° (рис. 4.90) и зачищают поверхность грунта вровень с краями кольца (рис. 4.91). Торцы кольца с грунтом закрывают пластинками.



Рис. 4.90. Срезка грунта, выступающего за края кольца



Рис. 4.91. Зачищенная поверхность грунта в кольце

В пластичный или сыпучий грунт кольцо вдавливают плавно и без перекосов (рис. 4.92), а грунт вокруг кольца удаляют. Затем зачищают поверхность грунта, накрывают кольцо пластинкой и подхватывают его снизу плоской лопаткой (рис. 4.93).



Рис. 4.92. Вдавливание кольца в песок средней крупности



Рис. 4.93. Образец, накрытый пластинкой и извлеченный при помощи лопатки

Кольца, закрытые пластинками, доставляют в лабораторию и взвешивают, определяя массу грунта в кольце, закрытого пластинками (рис. 4.94).



Рис. 4.94. Взвешивание кольца с грунтом, закрытого пластинками

Плотность грунта ρ , г/см³, вычисляют по формуле

$$\rho = \frac{m_1 - m_0 - m_2}{V}, \quad (4.28)$$

где m_1 — масса грунта с кольцом и пластинками, г; m_0 — масса кольца, г; m_2 — масса пластинок, г; V — внутренний объем кольца, см³.

Результаты испытаний представляют в виде таблицы. При инженерных изысканиях таблица должна иметь вид в соответствии с ГОСТ 5180–2014 [11], а при контроле степени уплотнения грунта в земляном полотне данные можно представить в виде таблицы, вид которой регламентирует заказчик.

4.2.2. Определение плотности грунта замещением объема по ГОСТ 28514–90 и стандартам ASTM D 1556 – 00, ASTM D2167

Метод замещения объема, или, как его еще называют, метод лунок, применяется для определения плотности грунтов и материалов, в которых затруднительно произвести испытания другими более простыми методами. Например, из мерзлых грунтов или грунтов с малой влажностью, а также содержащих более 15% зерен. Крупнее 2 мм затруднительно взять пробу кольцом-пробоотборником.

Поэтому определение плотности таких грунтов выполняют методом замещения объема, соблюдая требования ГОСТ 28514–90 [64], ASTM D 1556 [65] и руководства [66]. При определении плотности щебеночных и гравийных материалов следуют требованиям ВСН 7-89 [67].

Сущность метода заключается в замещении объема взятой пробы грунта или материала однородной средой (песком или резиновым баллоном, наполненным водой) с измеренным объемом. Объем однородной среды, замещающей объем взятой пробы, производится с применением специальной аппаратуры.

На рис. 4.95 приведены пескозагрузочные аппараты, отвечающие требованиям ГОСТ 28514–90 [64], на рис. 4.96 представлена двойная воронка, соответствующая требованиям руководства [66].

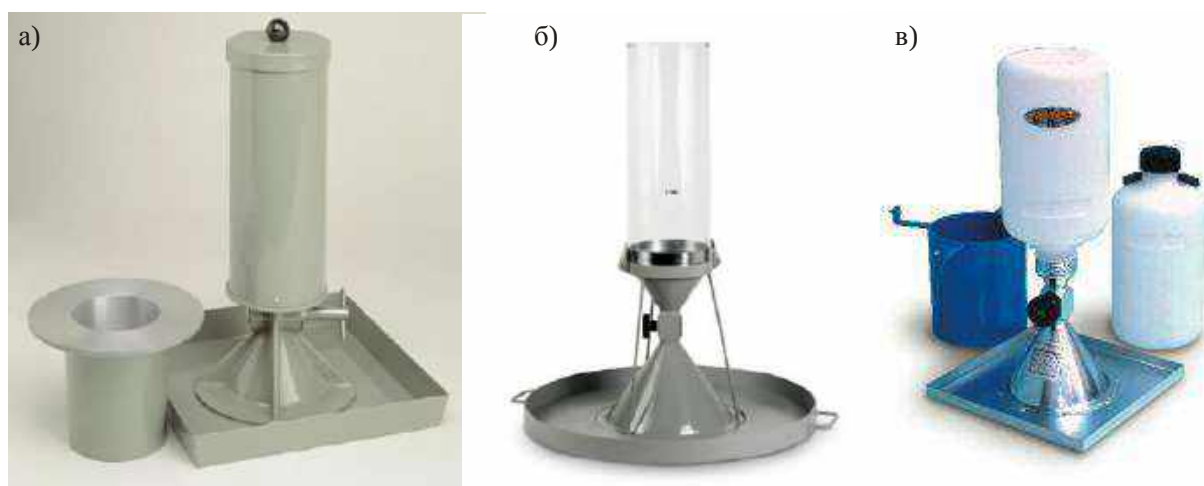


Рис. 4.95. Пескозагрузочные аппараты:
а – 35-T0125; *б* – 35-T0133; *в* – S234 (Matest, Италия)



Рис. 4.96. Двойная воронка

На рис. 4.97 приведены баллонные плотномеры, или, как их еще называют ,аппараты с резиновыми баллонами, соответствующие требованиям документов [64, 67].

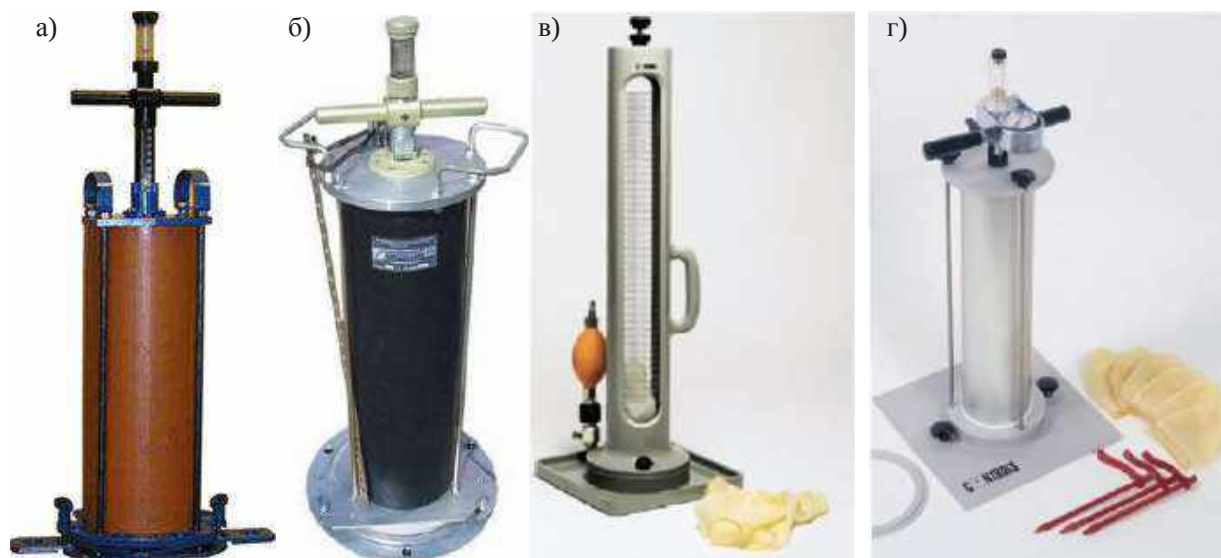


Рис. 4.97. Баллонные плотномеры:
а– ПБД-КМ; б– ПГ-7С; в–35-Т0131; г– 35-Т0134/А

ГОСТ 28514–90 [64] допускает применение аппаратов, отличающихся от представленных на рис. 4.95 и 4.96 и описываемых ниже, но при условии обеспечения точности измерений, указанной в табл. 4.14.

Таблица 4.14. Требования ГОСТ 28514–90 к точности измерений

Измеряемая характеристика	Объем однородной среды	Масса пробы грунта
Погрешность, %	Не более 1	Не более 0,2

Минимальный объем пробы следует назначать в зависимости от максимальной крупности зерен испытуемого грунта по табл. 4.15.

Таблица 4.15. Требования ГОСТ 28514–90 к минимальному объему изымаемой пробы

Максимальная крупность зерен грунта, мм	10	20	31,5	40	63
Минимальный объем пробы, см ³	1000	1500	2000	3000	6000

Для испытания применяют пескозагрузочный аппарат, снабженный загрузочной камерой и задвижкой для перекрытия. Диаметр вы-

пускного отверстия должен быть 15 ± 5 мм, а нижняя часть пескобака и загрузочная камера должны иметь угол наклона к оси $30 \pm 5^\circ$. На рис. 4.98 представлены основные элементы аппарата 35-Т0125.

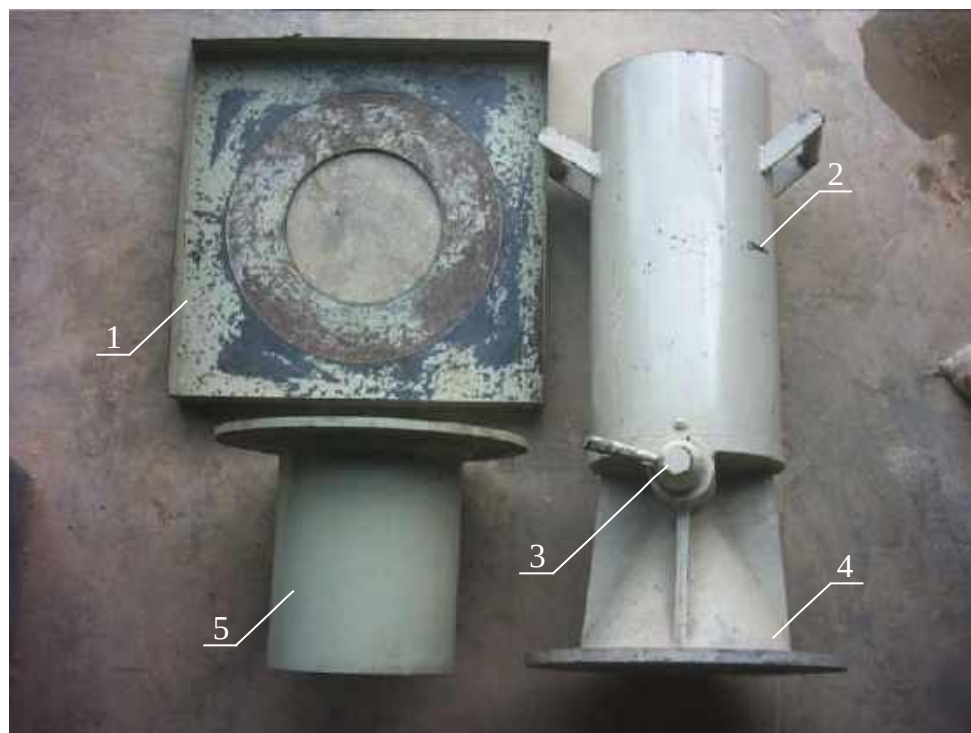


Рис. 4.98. Элементы пескозагрузочного аппарата 35-Т0125:

1 – лист основания; 2 – пескобак;
3 – задвижка; 4 – загрузочная камера; 5 – калибровочный сосуд

Для выполнения работы необходимы:

1. Жесткий лист основания 1 размером не менее 300 х 300 мм или диаметром 300 мм с отверстием посередине, соответствующим выпускному отверстию загрузочной камеры 4, но не менее 100 мм в диаметре.

2. Калибровочный сосуд цилиндрической формы 5 с известным объемом, внутренний диаметр которого соответствует диаметру отверстия в листе основания.

3. Сита с размерами ячеек: 63; 40; 31,5; 20; 10; 2 и 0,2 мм.

4. Весы технические с пределом взвешивания 5 и 20 кг, обеспечивающие погрешность не более 0,1%.

5. Инструменты для выравнивания поверхности грунта и для углубления лунки (например, металлическая линейка, резец, молоток, ложка и кисть).

6. Посуда для отбора пробы.

Плотность грунтов определяют на основе результатов двух па-

раллельно проведенных испытаний. Замещение объема следует проводить в местах, расположенных на расстоянии не более 1 м друг от друга.

В качестве однородной среды с известной плотностью применяется свободно сыпучий сухой песок, зерновой состав которого соответствует формулам [64]

$$\frac{d_{max}}{d_{min}} \leq 2; \quad 0,2 < d < 2, \quad (4.29)$$

где d – крупность зерен наполняющего песка, мм; d_{max} и d_{min} – максимальная и минимальная крупность зерен, выраженная размерами квадратных ячеек верхнего и нижнего сит, мм.

Допускается повторное использование песка, но в этом случае песок должен быть пропущен через сита с размером отверстий, соответствующим максимальному и минимальному размеру частиц песка, используемого для проведения испытания.



Рис. 4.99. Рассев сухого песка сквозь сита с размерами ячеек 0,5 и 1 мм

На рис. 4.99 представлен рассев сухого песка сквозь сита с размером ячеек 0,5 и 1 мм, что соответствует условиям (4.29).

Песок, не прошедший сквозь сито 0,5 мм, следует использовать при испытании в качестве наполняющей однородной среды.

После подготовки наполняющего песка производится определение его плотности [64], или, как говорят за рубежом, калибровка прибора (пескозагрузочного аппарата) [65]. Технология калибровочных работ, регламентируемая ГОСТ 28514–90 [64], ASTM D 1556 [65], аналогична, а последовательность выполнения технологических операций отличается, но это не имеет принципиального значения.

В соответствии с требованиями ГОСТ 28514–90 [64] и ASTM D 1556 [65] вначале выполняют определение массы аппарата, наполненного песком. Для этого при закрытой задвижке полностью наполняют пескобак сухим песком и производят взвешивание аппарата, из-

мерив массу m_1 . Наполнение песком пескозагрузочного аппарата (рис. 4.100) выполняют так, чтобы после разравнивания горки песка (рис. 4.101) получалась ровная песчаная поверхность, которая расположена на расстоянии около 1 см от верха пескобака (рис. 4.102). Наполненный таким образом пескозагрузочный аппарат взвешивают на весах с точностью до 1 г (рис. 4.104).



Рис. 4.100. Наполнение пескобака сухим песком



Рис. 4.101. Горка песка, образующаяся при заполнении пескобака

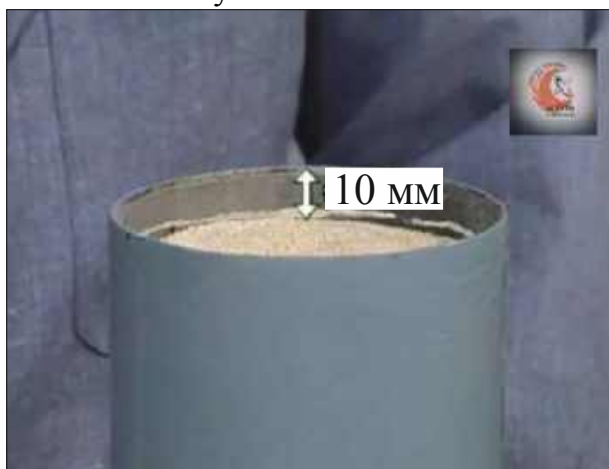


Рис. 4.102. Иллюстрация разницы между поверхностью песка и верхом пескобака



Рис. 4.103. Измерение массы пескозагрузочного аппарата с песком

Далее следуя указаниям ASTM D 1556 [65], необходимо определить массу аппарата с оставшимся в нем песком после заполнения калибровочного сосуда. Эту массу обозначим m_2 . Для измерения этой массы калибровочный сосуд устанавливают на ровную поверхность (рис. 4.104). Согласно требованиям ГОСТ 28514–90 [64] поверх калибровочного сосуда устанавливают лист основания, на котором размещают пескобак с загрузочной камерой. За рубежом пескозагрузоч-

ный аппарат устанавливают непосредственно на калибровочный сосуд (рис. 4.105). Убедившись в точности установки загрузочной камеры на калибровочном сосуде, открывают задвижку (рис. 4.106) и наблюдают за поверхностью песка в пескобаке. По мере наполнения калибровочного сосуда песчаная поверхность в пескобаке перемещается вниз (рис. 4.107).



Рис. 4.104. Установка калибровочного сосуда на ровную поверхность



Рис. 4.105. Установка загрузочной камеры на калибровочном сосуде



Рис. 4.106. Открытие задвижки для наполнения сосуда песком



Рис. 4.107. Перемещение песчаной поверхности вниз

Дождавшись прекращения перемещения песчаной поверхности в пескобаке, что свидетельствует о завершении высыпания песка в калибровочный сосуд, производят закрытие задвижки.

После наполнения калибровочного сосуда на его поверхности образуется горка, объем которой и масса песка в ней равны объему загрузочной камеры и массе помещающегося в ней песка. Поэтому производят измерение массы песка, помещающегося в загрузочной камере m_3 . Для этого на ровной поверхности устанавливают стеклянную

пластину, поверх которой помещают лист основания и пескозагрузочный аппарат, или сразу ставят прибор на стеклянную пластину (рис. 4.108). После установки прибора открывают заслонку (рис. 4.109) и, дождавшись прекращения высыпания песка на пластину, закрывают заслонку (рис. 4.110). Пескозагрузочный аппарат снимают с пластины, на которой остаются песчаная горка (рис. 4.111), масса которой соответствует массе песка в загрузочной камере, а также массе песка в горке на калибровочном сосуде.



Рис. 4.108. Установка прибора на стеклянной пластине



Рис. 4.109. Иллюстрация высыпания песка при открытой заслонке



Рис. 4.110. Иллюстрация разницы между поверхностью песка и верхом пескобака



Рис. 4.111. Иллюстрация песчаной горки из песка, выпавшего на пластину

При измерении массы песка в песчаной горке на весы устанавливают тару и измеряют ее массу. После чего в эту тару со стеклянной пластины высыпают песок (рис. 4.112) и измеряют массу тары с песком. Массу песка на стеклянной пластине определяют разностью массы тары с песком и пустой тары. При выполнении этого измерения можно воспользоваться функцией памяти электронных весов, которая

позволяет запомнить массу пустой тары, а при взвешивании тары с песком весы выдают результат в виде массы песка (рис. 4.113).



Рис. 4.112. Засыпка песка со стеклянной пластины в тару с известной массой



Рис. 4.113. Измерение массы песка с использованием функции памяти

Расчет массы песка в сосуде выполняют по формуле

$$m = m_1 - (m_2 + m_3). \quad (4.30)$$

Плотность наполняющего песка $\rho_{\text{нп}}$ вычисляют отношением

$$\rho_{\text{нп}} = \frac{m}{V_{\text{к}}}, \quad (4.31)$$

где $V_{\text{к}}$ – объем калибровочного сосуда, см^3 .

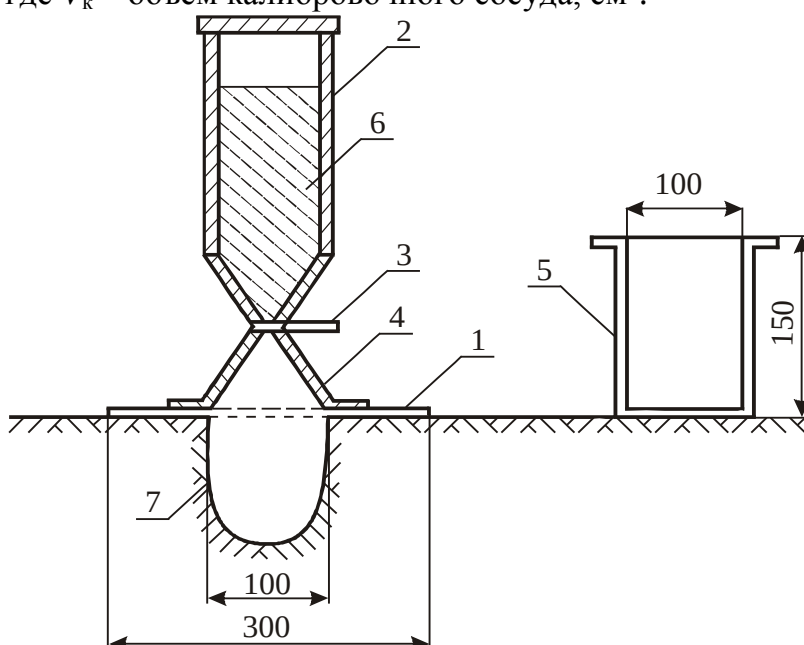


Рис. 4.114. Схема пескозагрузочного аппарата:

- 1 – лист основания; 2 – пескобак; 3 – задвижка;
4 – загрузочная камера; 5 – калибровочный сосуд;
6 – песок; 7 – лунка

После определения плотности наполняющего песка производят работы по определению плотности грунта. Эти работы выполняются в соответствии со схемой, представленной на рис. 4.114 непосредственно на строительной площадке. Перед выполнением теста пескозагрузочный аппарат наполняют

песком с известной плотностью (рис. 4.115) и взвешиванием на весах, которыми снабжена мобильная полевая грунтовая лаборатория, измеряют массу m_1 (рис. 4.116).



Рис. 4.115. Наполнение пескобака песком перед полевыми испытаниями



Рис. 4.116. Измерение массы прибора, наполненного песком

При выполнении измерений на грунтовой поверхности выбирают горизонтальную площадку, поверхность которой разравнивают так, чтобы ее размеры после выравнивания соответствовали размерам листа основания. На этой площадке устанавливают и закрепляют лист основания так, чтобы исключалась возможность его смещения (рис. 4.117). После этого в отверстии листа основания выполняют разработку грунта при помощи ручного бура (рис. 4.118).



Рис. 4.117. Крепление листа основания на выровненной поверхности грунта



Рис. 4.118. Разработка грунта в отверстии листа основания

После бурения режущую поверхность бура очищают при помощи кисти, стряхивая грунт в лунку или на лист основания прибора (рис. 4.119). Очищенный бур откладывают в сторону, а из лунки непосредственно из-под отверстия листа основания грунтовой ложкой или совком отбирают грунт, помещая его в тару с заранее измеренной массой (рис. 4.120). После выемки грунта поверхность листа основа-

ния очищают кистью, смахивая грунт на дно лунки (рис. 4.121). Этот грунт аккуратно изымают при помощи того совка или той же грунтовой ложки (рис. 4.122).



Рис. 4.119. Очистка режущей поверхности бора от налипшего грунта



Рис. 4.120. Отбор пробы грунта в тару с заранее измеренной массой



Рис. 4.121. Очистка листа основания при помощи кисти



Рис. 4.122. Изъятие остатков грунта из лунки

Лунка должна иметь приблизительно вертикальные стенки из грунта ненарушенного естественного сложения, а ее глубина должна обеспечивать отбор пробы минимального объема.

Отобрав грунт, на поверхность листа ставят пескозагрузочный аппарат так (рис. 4.123), чтобы его загрузочная камера оказалась над лункой. После установки прибора на лист основания открывают заслонку (рис. 4.124) и песок начинает осыпаться в лунку.



Рис. 4.123. Установка прибора на лист основания



Рис. 4.124. Открытие заслонки для засыпки лунки песком

За движением песка в металлических приборах типа 35-T0125 с непрозрачной поверхностью следят, заглядывая внутрь пескобака, как это продемонстрировано на рис. 4.107. В приборах типа 35-T0133 стенки пескобака прозрачны, а в приборах S234– полупрозрачные. В таких приборах песок отчетливо виден или просвечивает сквозь стенки пескобака. Поэтому при контроле перемещения песка смотрят на стенки прибора, а о завершении движения песка судят по остановившейся верхней кромке (рис. 4.125). После прекращения движения песка заслонку закрывают (рис. 4.126).



Рис. 4.125. Контроль за движением песка сквозь полупрозрачную стенку



Рис. 4.126. Закрытие заслонки после прекращения движения песка

Пескозагрузочный аппарат снимают с листа основания и убирают в сторону. На поверхности листа образуется горка песка (рис. 4.127), который после выемки анкеров и снятия листа основания высыпают и оставляют на месте выполнения эксперимента (рис. 4.128).



Рис. 4.127. Съем прибора с основания и образовавшаяся горка песка



Рис. 4.128. Съем листа основания и высыпание песка

Для определения массы грунта контейнер с грунтом взвешивают (рис. 4.129). Впоследствии это позволяет рассчитать плотность грунта. Для расчета плотности сухого грунта выполняют определение его влажности. Лабораторная работа по определению влажности грунта методом его высушивания до постоянной массы может выполняться непосредственно в мобильной грунтовой лаборатории. Для этого отбирают пробу грунта и помещают его в сушильный шкаф (рис. 4.130).



Рис. 4.129. Измерение массы контейнера и влажного грунта



Рис. 4.130. Установка пробы грунта в сушильный шкаф

Электропитание сушильного шкафа можно произвести от генератора (рис. 4.131). В процессе сушки больших проб грунт в них периодически перемешивают и взвешивают (рис. 4.132), определяя момент высыхания грунта до постоянной массы. Расчет влажности выполняют по формуле (3.1).



Рис. 4.131. Генератор, осуществляющий электропитание лаборатории



Рис. 4.132. Взвешивание грунта после сушки

Расчет массы песка, высыпаемого в лунку $m_{\text{п}}$ и плотности грунта $\rho_{\text{гр}}$ производят по формулам

$$m_{\text{п}} = m_1 - (m_2 + m_4), \quad (4.32)$$

где m_2 – масса песка, высыпаемого из пескобака в загрузочную камеру конической формы, г.

$$\rho_{\text{гр}} = \frac{m_{\text{гр}}}{m_{\text{п}}} \cdot \rho_{\text{нп}}. \quad (4.33)$$

Плотность сухого грунта определяют по формуле табл.4.12, используя экспериментально установленные влажность и плотность грунта.

Определение плотности при помощи двойной воронки, регламентируемое руководством [45], имеет некоторые отличия от рассмотренной методики.

Испытание выполняется в соответствии с требованиями руководства [45], по которым производят подготовку сухого песка и определение объема лунки замещением объема изъятых грунта наполняющим песком.

Песок, применяемый в качестве наполняющего материала, не должен содержать пылеватых и глинистых частиц (если такие частицы содержатся, их следует отмыть, песок высушить) и частиц крупнее 2 мм. Для этого сухой песок просеивают через сито с отверстиями 2 мм и замеряют объем песка, подготовленного для измерения с точностью $\pm 5 \text{ см}^3$.

На поверхности слоя, подлежащего испытанию, разравнивается площадка и выкапывается лунка диаметром около 20 см и глубиной 10 – 15 см. При этом следует избегать смятия краев и боковых стенок

лунки рабочим инструментом, что может привести к увеличению объема лунки и искажению получаемых результатов. Грунт из лунки собирают на поддон и взвешивают на 10 – 20 - килограммовых весах.

Для определения объема лунки над ней размещают двойную воронку. Через верхнюю воронку в нижнюю воронку и лунку насыпают сухой песок. Объем засыпаемого песка измеряют мерными стеклянными цилиндрами вместимостью 0,1–1,0 л с точностью до 5 см³. Песок в мерный цилиндр насыпают через обычную воронку без встряхивания.

Объем песка в лунке определяется разностью общего объема засыпанного песка и объема песка, находящегося в двойной воронке. Плотность грунта рассчитывается отношением массы грунта, извлеченного из лунки к объему песка в лунке.

Для определения плотности при помощи баллонного плотномера (аппарата с резиновым баллоном) используют полевую грунтовую лабораторию, которая должна быть укомплектована:

- аппаратом с резиновым баллоном, удовлетворяющим требованиям [64, 68]. Причем размеры аппарата должны быть такими, чтобы обеспечить измерение минимального объема пробы в соответствии с требованиями [64, 67, 68];

- средствами для разравнивания поверхности грунта и углубления лунки (например, металлическая линейка, резец, молоток, ложка и кисть);

- контейнером (сосудом) для отбора пробы;

- штырями для фиксации листа основания прибора от смещения;

- техническими весами с пределом взвешивания 5 и 20 кг.



Рис. 4.133. Крепление листа основания штырями, забиваемыми в грунт

В точке земляного полотна, подлежащей контролю, разравнивают поверхность требуемой площади. На подготовленной площадке устанавливают лист основания и закрепляют его, забивая штыри через отверстия, имеющиеся в основании, в грунт так, чтобы лист основания не смещался (рис. 4.133). Аппарат через полый стержень поршня заливают водой. Затем из цилиндра вытесняют воздух. При использовании

баллонных плотномеров, снабженных поршнем, эту операцию выполняют слегка вдавливая поршень. Для вытеснения воздуха из аппаратов, снабженных резиновой грушей, ее закрепляют на приборе (рис. 4.134) и интенсивно сжимают и разжимают (см. рис. 4.135).



Рис. 4.134. Крепление резиновой груши на приборе



Рис. 4.135. Сжатие резиновой груши при вытеснении воздуха из аппарата

После этого перекрывают наполнительное отверстие. Вытеснив воздух, аппарат помещают на лист основания и поджимают баллон на выравненную грунтовую поверхность. По шкале определяют объем V_0 . Оттягивают поршень и снимают аппарат с листа основания.



Рис. 4.136. Разработка грунта при устройстве лунки в отверстии дна основания прибора

Через круглое отверстие в листе основания выкапывают лунку с примерно вертикальными стенками (рис. 4.136). Глубина лунки должна обеспечивать минимальный объем пробы, регламентируемый [64] и указанный в табл. 4.15.

В стенках и дне лунки следует удалить выступающие острые части крупных обломков таким образом, чтобы избежать нарушения естественного сложения грунта. Изъятый при этом грунт следует тщательно собрать в сосуд. Для этого грунт, выбранный из лунки, собирают в тару (рис. 4.137). Грунт, попавший на лист основания, при помощи кисточки сметают в лунку (рис. 4.138), из которой его изымают повторно, помещая в тару

(рис. 4.139). Аппарат вновь устанавливают на листе основания и закрепляют, после чего поршень вдавливают до тех пор, пока баллон не прижмется к стенке полости. В конструкциях прибора, снабженных резиновой грушей, эта операция выполняется сжиманием груши (рис. 4.140).



Рис. 4.137. Изъятие грунта из лунки



Рис. 4.138. Удаление грунта с листа основания в лунку кисточкой



Рис. 4.139. Повторное изъятие грунта



Рис. 4.140. Сжатие резиновой груши при прижимании баллона к стенкам лунки

После этого на шкале считывают значение объема V_1 . Далее необходимо определить значение объема V_1 повторно. Операции, выполняемые при повторном определении объема V_1 , зависят от конструкции прибора. Если прибор снабжен поршнем, то без изменения положения прибора вытягиванием поршня воду из резинового баллона направляют в аппарат и повторно определяют объем V_1 . Если два считанных значения отличаются друг от друга не более чем на 2%, то за основу следует брать их среднее значение. В противном случае следует повторить испытание.

Значение плотности грунта с точностью до 0,01 г/см³ по формуле

$$\rho = \frac{m}{V_1 - V_0}, \quad (4.34)$$

где m – масса грунта, извлеченного из лунки, г; V_0 – объем воды перед извлечением грунта, см³; V_1 – объем воды после извлечения грунта, см³.

4.3. Экспресс - оценка плотности грунта в полевых условиях

Определение плотности грунта режущим кольцом и методом замещения объема требует достаточно большого времени, а при оценке коэффициента уплотнения необходимо произвести тест по определению максимальной стандартной плотности. Поэтому для повышения производительности при контроле степени уплотнения грунта [59, 66] допускается использование экспресс-методов и приборов для ускоренного контроля плотности. При этом не менее 10% всех измерений следует выполнять стандартным методом с отбором образцов, соблюдая все требования стандартов [11, 38, 39, 56, 57, 58, 64, 65, 68]. По принципу действия приборы для ускоренного определения плотности грунта подразделяют на радиометрические, пенетрационные, штамповые, гидростатические и др. [66].

4.3.1. Применение пробора Н.П. Ковалева для ускоренной оценки плотности и влажности грунтов

Для определения плотности грунта в полевых условиях применяется прибор Н.П. Ковалева, работающий по методу гидростатического взвешивания. Продолжительность теста составляет около 30 мин, что существенно меньше времени выполнения испытаний при помощи режущего кольца, пескозагрузочного аппарата и баллонного плотномера. Поэтому определение плотности грунта при помощи прибора Н.П. Ковалева считается одним из методов ускоренных испытаний или методом экспресс- оценки [66].

Конструкция прибора Н.П. Ковалева приведена на рис. 4.141, а на рис. 4.140 представлен общий вид в виде фотографии.

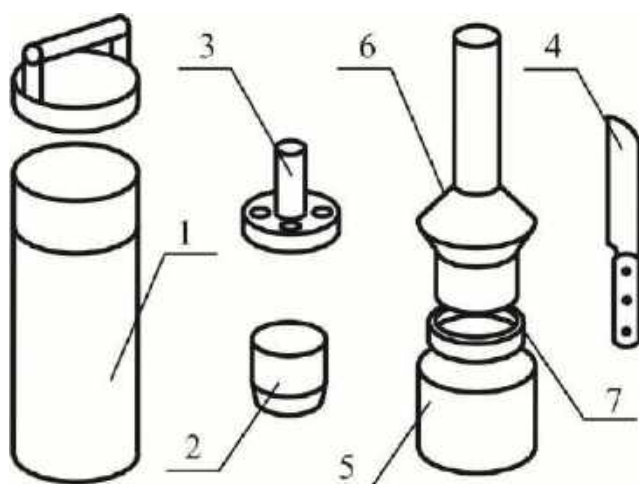


Рис. 4.141. Прибор Н.П. Ковалева:
1 – ведро-футляр; 2 – режущее кольцо;
3 – насадка для забивания кольца; 4 – нож;
5 – латунный сосуд; 6 – латунный поплав-
ок с трубкой; 7 – крышка поплавка.

кольца – 200 см^3 . При испытаниях грунтов в ведро-футляр наливают воду, в обычное время оно служит футляром для переноса прибора.

Перед началом работы прибор необходимо тарировать. Для этого в ведро-футляр, наполненный водой, погружают пустой поплавок 6 с присоединенным к нему сосудом 5 и вложенным режущим кольцом 2. Поплавок должен опуститься до начальной черты на шкале ВЛ, соответствующей плотности $1,2 \text{ г/см}^3$. При этом точное совпадение уровня воды с начальной чертой шкалы регулируется путем добавления снятия грузов (пластинок) в крышке поплавка 7.

Плотность грунта естественного основания и в слоях насыпей контролируется путем отбора проб в местах отбора, указанных документами [59, 66]. Пробы грунта отбирают на глубине 8–10 см от поверхности уплотненного технологического слоя.

На выровненную поверхность грунта земляного полотна устанавливают режущее кольцо, на которое крепят насадку 3. Ударами молотка по насадке кольцо забивается в грунт полностью, до выхода грунта из насадки. Затем кольцо аккуратно окапывается ножом и подрезается грунт снизу кольца. Отделяют кольцо с грунтом от массива. Избыток грунта сверху и снизу кольца удаляется ножом так, чтобы поверхность грунта в кольце была ровная и не имела раковин.

Режущее кольцо с грунтом помещают в поплавок и закрывают крышкой. После этого поплавок без нижнего сосуда погружают в ведро-футляр с водой. Отсчет берут по шкале ВЛ на уровне воды. Результаты измерений заносят в журнал.

В соответствии с рис. 4.139 прибор состоит из ведро-футляра 1, режущего кольца 2, насадки для удобства забивания кольца 3, ножа 4, латунного сосуда 5, латунного поплавка 6 с трубкой, на которой нанесены четыре шкалы для определения плотности (ВЛ) грунта и плотности сухого грунта. Цена деления каждой шкалы $0,01 \text{ г/см}^3$. К поплавку 6 подвешивают сосуд 5 при помощи трех замков. Вместимость режущего

Для определения плотности скелета грунта пробу из режущего кольца полностью переносят в латунный сосуд. После этого сосуд с грунтом заполняют водой на $\frac{2}{3}$ его высоты. Деревянной рукоятью ножа грунт в воде тщательно растирают до получения суспензии однородной консистенции. В грунтовой суспензии не должно быть пузырьков воздуха, которые должны быть удалены при перемешивании в процессе соединения грунтовой воды и воды, налитой в латунный сосуд. Если на поверхности суспензии наблюдается образование водно-воздушной пенки, то ее необходимо удалить, в противном случае она даст большую погрешность при определении плотности сухого грунта.

Сосуд с грунтовой суспензией без режущего кольца соединяют с поплавком, закрепляя всеми тремя замками. Между сосудом и поплавком должен иметься зазор величиной 1–2 мм. Наличие этого зазора необходимо для поступления в сосуд воды и выхода из него воздуха.

Поплавок с присоединенным к нему сосудом и суспензией погружают в ведро-футляр с налитой в него водой. Далее необходимо подождать пока вода из ведра-футляра через зазор между поплавком и сосудом наполнит сосуд. Этот процесс отслеживают по погружению сосуда и поплавок в воду до определенной глубины.

Дождавшись погружения поплавка и сосуда в воду ведра-футляра на конечную глубину с соответствующей, испытываемому грунту шкалы, нанесенной на трубку поплавка, снимают отсчет.

Для пояснений правил снятия отсчета отметим, что на трубке поплавка 4 шкалы. Назначение шкалы ВЛ нами пояснено, при определении плотности скелета грунта эта шкала не используется. Плотность сухого грунта устанавливают по одной из трех других шкал, они помечены буквами П, Г и Ч. Шкала П предназначена для определения плотности сухого грунта песчаных грунтов, а шкала Г – глинистых. Шкала Ч служит измерителем плотности скелета грунта черноземов.

4.3.2. Применение пенетрометров для определения параметров прочности и деформируемости грунта и коэффициента уплотнения

При оценке качества строительства земляного полотна применяется большее число приборов, измеряющих параметры прочности и деформируемости грунтов и связывающих эти показатели с коэффициентом уплотнения.

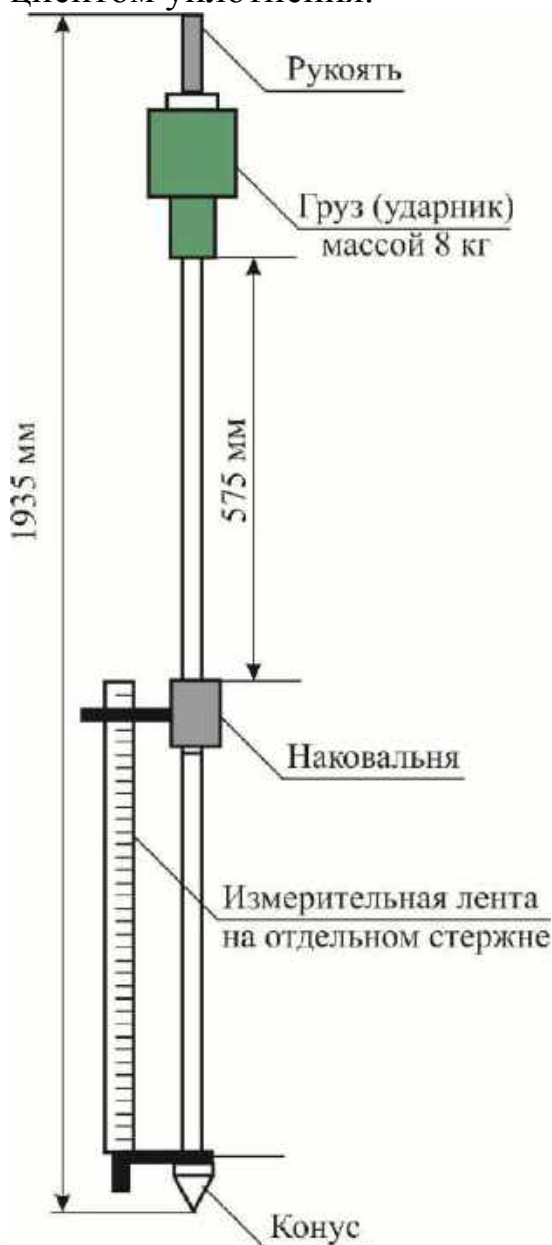


Рис. 4.142. Оригинальный динамический конусный пенетрометр

Из большого многообразия приборов для экспресс - оценки степени уплотнения грунтов особое место занимают динамические конусные пенетрометры (оригинальное название Dynamic Cone Penetrometer (DCP)). Одна из известных модификаций такого прибора приведена на рис. 4.142.

Оригинальный динамический конусный пенетрометр был разработан в 1959 году профессором Джорджем Ф. Соуэрсом. Суть метода, предложенного проф. Д.Ф. Соуэрсом, состоит в измерении глубины проникновения конуса диаметром 2 см и углом при вершине 60° от удара груза массой 8,0 кг, падающего с высоты 57,5 см на стальную наковальню.

Динамический конусный пенетрометр представляет собой довольно простой прибор. Он состоит из стального стержня с коническим наконечником из закаленной стали, который заглубляется в земляное полотно или дорожную одежду под воздействием стандартного падающего груза. Измеряемая в милли-

метрах глубина внедрения конуса (пенетрация) в грунт земляного полотна или материал слоев дорожного покрытия за каждый удар груза

дает основу для оценки прочности этого материала. Прибор собирается на месте из составных частей, которые для удобства транспортирования уложены в специальный футляр (рис. 4.143).



Рис. 4.143. Составные части оригинального динамического конусного пенетromетра и футляр для хранения и транспортирования прибора

Перед началом испытания необходимо произвести сборку прибора. Для этого к нижней части стержня прикрепляют измерительную ленту, а затем крепят конус, заворачивая его от руки (рис. 4.144). Затем к собранной нижней части стержня с конусом и измерительной лентой крепят стержень с грузом (рис. 4.145).



Рис. 4.144. Крепление конуса к нижней части стержня с измерительной лентой



Рис. 4.145. Крепление стержня с грузом к стержню с конусом и измерительной лентой

Для надежного соединения стержней стык подбивают грузом, сбрасывая его на наковальню с высоты 10 – 20 см (рис. 4.146). После

соединения составных частей проверяют контакт груза с наковальней, который должен быть по площади поверхности (рис. 4.147).



Рис. 4.146. Подбивка места соединения стержней двумя-тремя ударами груза, сбрасываемого с высоты 10 – 20 см

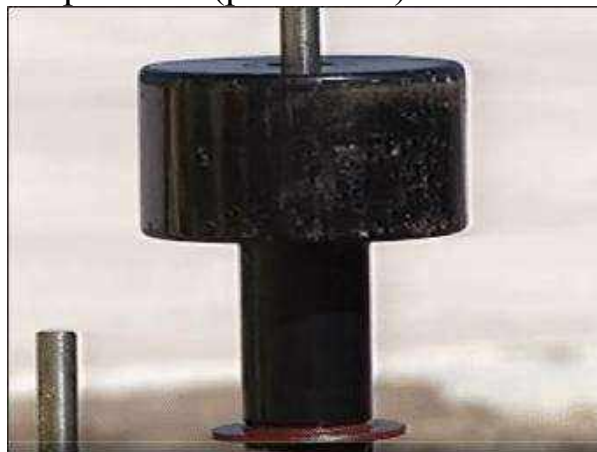


Рис. 4.147. Визуальная оценка контакта падающего груза и наковальни

После сборки прибор устанавливают на точку измерений и снимают начальное показание (рис. 4.148 и 4.149).



Рис. 4.148. Снятие начального показания по измерительной ленте



Рис. 4.149. Иллюстрация начального показания по измерительной ленте

При испытании специалист, выполняющий тестирование, удерживает прибор в вертикальном положении. Для этого лаборант одной рукой держит рукоятъ прибора (рис. 4.150) так, чтобы на протяжении всего опыта обеспечивалось вертикальное положение пенетromетра. Второй рукой лаборант поднимает груз до нижней поверхности рукоятки (рис. 4.151), а в момент касания груза рукоятки отпускает руку и производит сброс груза (рис. 4.152) на наковальню (рис. 4.153). Груз должен падать на наковальню свободно.



Рис. 4.150. Удерживание прибора в вертикальном положении за рукоять



Рис. 4.151. Подъем груза до касания с нижней поверхностью рукояти



Рис. 4.152. Сброс груза



Рис. 4.153. Удар груза по наковальне

Во время теста следят за глубиной проникновения конуса, которая регистрируется в журнале.

Обычно испытание выполняется на глубину до 80 см. Это позволяет построить профиль, отражающий изменение свойств грунтов по глубине земляного полотна.

Результаты испытаний в отношении плотности и влажности песчаных материалов хорошо коррелируют с калифорнийским числом.

Испытания с динамическим конусным пенетрометром должны быть повторены несколько раз, чтобы получить надежный результат, так как отклонения между отдельными испытаниями относительно велики. Поэтому измерения требуют статистического анализа для получения надежного значения в процентах (для второстепенных дорог точность составляет обычно 20%, для автомагистралей – 5%). По результатам испытания пенетрометром можно судить о толщине слоев дорожной одежды с одинаковой прочностью. Компьютерные программы позволяют выполнять этот анализ для расчета значений CBR.

Для определения фактического коэффициента уплотнения $K_{упл}^{\Phi}$ грунта в слое земляного полотна применяется универсальный динамический плотномер КП-150, но в комплектации №1 (для грунтов). Общий вид прибора в собранном виде представлен на рис. 4.154.

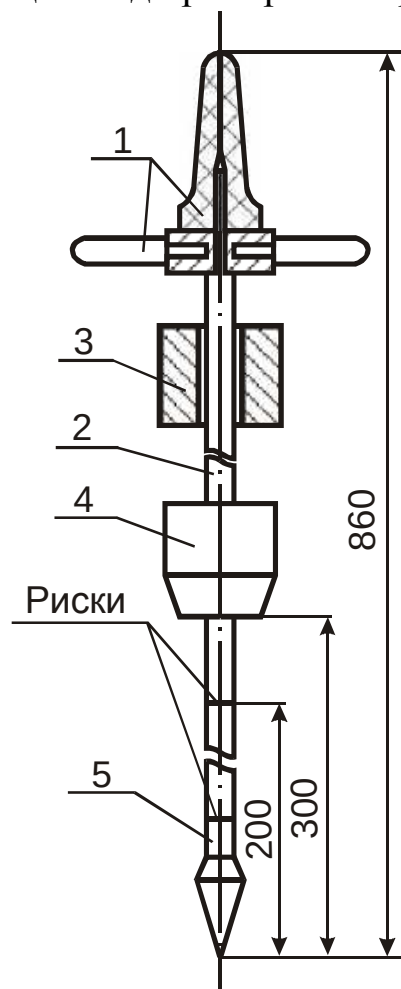


Рис. 4.154. Общий вид универсального динамического плотмера КП-150

Прибор состоит из рукоятки 1 с ввинчивающейся в неё направляющей 2, на которой находится свободно перемещающийся груз 3. На направляющую навинчивается наковальня 4, в которую завинчивается стержень с коническим наконечником 5. На него нанесены две риски на расстоянии 20 и 30 см от конца наконечника.

Прибор относится к пенетрометрам динамического действия. Принцип работы прибора заключается в определении необходимого количества ударов n для погружения наконечника на определенную глубину.

Прибор КП-150 применяется для определения $K_{упл}^{\Phi}$ песков, супесей и суглинков, свежесыпанных и слежавшихся (от 1 месяца до 1 года).

Границы допустимых значений влажности и плотности грунтов, при которых допускается применение КП-150, даны в табл. 4.16.

Поэтому перед проведением испытаний необходимо установить вид грунта и его влажность.

Таблица 4.16. Область применения КП-150

Вид грунта	W, %	γ , г/см ³
Песок	7–12	1,08–1,86
Супесь	9–15	1,84–1,96
Суглинок	14–21	1,65–1,81

Испытания по определению вида грунта и его влажности выполняют в соответствии с требованиями [11] и [52]. При использовании прибора КП-150 для текущего и приемочного контроля не менее 10%

всех измерений необходимо проводить стандартным весовым методом с отбором проб грунта кольцами по [11].

Перед проведением измерений прибор собирается в следующем порядке: в ручку 1 завинчивается направляющая 2, на направляющую одевается груз 3, затем навинчивается наковальня 4, в которую завинчивается стержень с наконечником 5. Сборка прибора производится «от руки» без использования инструментов. После сборки необходимо проверить работоспособность прибора – груз должен свободно перемещаться по направляющей под действием собственного веса (рис. 4.155).

В местах определения $K_{упл}^{\phi}$ подготавливается площадка размером 50×50 см, поверхность площадки зачищают и выравнивают. Прибор КП-150 устанавливают вертикально в центре площадки и последовательными ударами свободно падающего груза погружают стержень с наконечником на глубину 20 см (нижняя риска) (рис.4.156).



Рис. 4.155. Прибор КП-150 в сборе и проверка работоспособности



Рис. 4.156. Погружение стержня с наконечником на 20 см (до нижней риски)

После погружения стержня на глубину 20 см начинают фиксировать (отсчитывать) количество ударов (рис. 4.157), необходимых для погружения стержня еще на 10 см (верхняя риска). После окончания

погружения прибора на полную глубину 30 см (рис. 4.158) его извлекают с помощью ручек. На одной площадке производят не менее двух параллельных измерений. Расстояние между точками зондирования на одном месте должно быть не менее 20 см.



Рис. 4.157. Погружение прибора до верхней риски с отсчетом числа ударов



Рис. 4.158. Окончание испытания при погружении прибора на 30 см

Результаты зондирования заносят в журнал (табл. 4.17). За иско-мое количество ударов $n_{ср}$ принимают среднеарифметическое из из-мерений, проведенных на одном месте, округляя до целого числа.

Таблица 4.17. Показатели грунтов

Да-та	КМ	ПК	Место отбора проб			Вид грун-та	Влаж-ность грун-та, %	Коли-чество ударов n_i	Среднее количе-ство ударов $n_{ср}$	Коэффици-ент уплотнения k_y
			ось	влево	впра-во					
1	2	3	4	5	6	8	10	11	12	13

По среднему значению количества ударов $n_{ср}$, необходимых для погружения стержня с наконечником на 10 см (от 20 до 30 см), по табл. 4.18 и 4.19 определяют $K_{упл}^{\Phi}$ грунта. Погрешность определения $K_{упл}^{\Phi}$ прибором КП-150 не превышает 3%.

Таблица 4.18. Коэффициенты уплотнения для свежесыпанных грунтов

Количество ударов $n_{\text{ср}}$	$K_{\text{упл}}^{\Phi}$		
	Песок	Супесь	Суглинок
4	—	0,89	—
6	—	0,9	—
7	0,91	—	—
8	0,92	0,91	0,82
9	—	—	0,9
10	0,93	0,92	0,91
11	0,94	0,93	0,92
12	—	—	0,93
13	0,95	0,94	—
14	—	—	0,94
15	0,96	0,95	-
17	—	0,96	0,95
18	0,97	—	—
20	—	0,97	—
21	—	—	0,96
22	0,98	—	—
24	—	0,98	—
26	—	—	—
27	0,99	—	0,97
32	—	0,99	-
33	—	—	0,98
38	1,00	—	—
39	—	1,00	—
45	—	—	0,99
51	—	—	1,00

Таблица 4.19. Коэффициенты уплотнения для слежавшихся грунтов

Количество ударов $n_{\text{ср}}$	$K_{\text{упл}}^{\Phi}$		
	Песок	Супесь	Суглинок
1	2	3	4
9	—	0,91	—
10	0,91	0,92	—
11	0,92	—	—
13	0,93	0,93	0,9
14	—	—	0,91
15	0,94	—	—
16	—	0,94	—
17	—	—	0,92
18	—	0,95	—
19	0,95	—	0,93
21	-	0,96	-

Окончание табл. 4.19

1	2	3	4
22	0,96	-	0,94
26	—	0,97	—
27	0,97	—	—
28	—	—	0,95
30	0,98	—	—
35	—	0,98	—
36	—	—	0,96
37	0,99	—	-
44	1,00	—	0,97
49	—	0,99	—
52	—	—	0,98
57	—	—	0,99
58	—	1,00	-
63	—		1,00

Для определения фактического коэффициента уплотнения $K_{\text{упл}}^{\phi}$ грунта в слое земляного полотна применяются статические плотномеры, представленные на рис. 4.159.

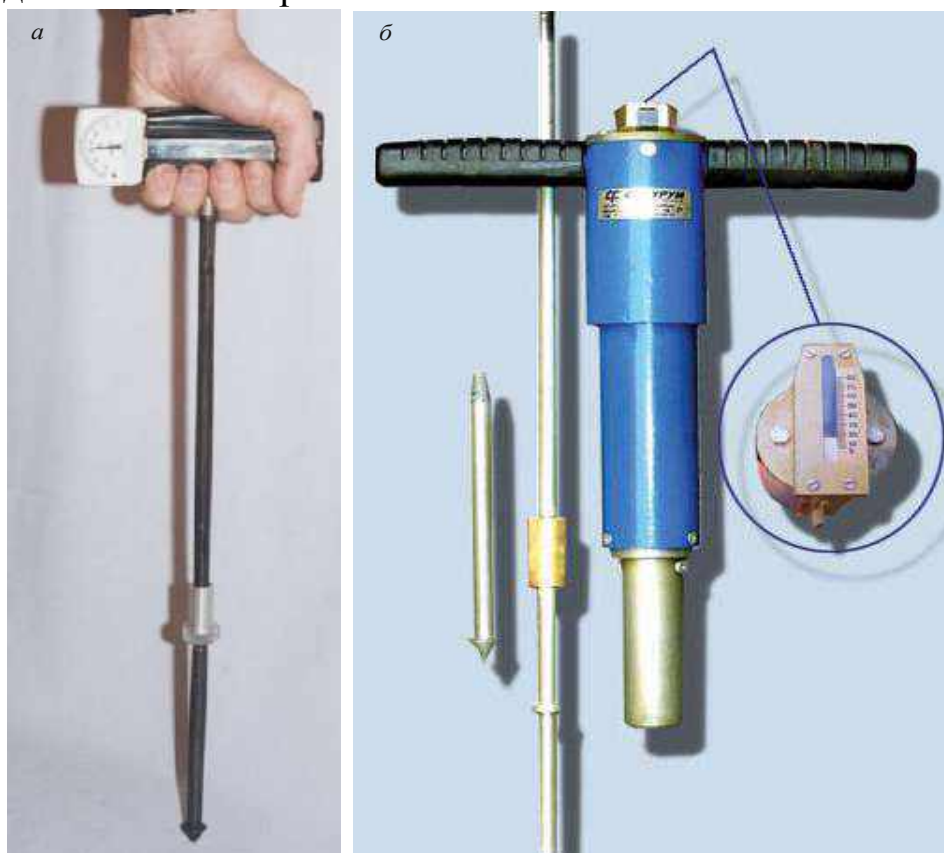


Рис. 4.159. Статические плотномеры:
а — плотномер СПГ-1; *б* — плотномер СПГ-1М

Конструкция прибора СПГ-1 приведена на рис. 4.160.

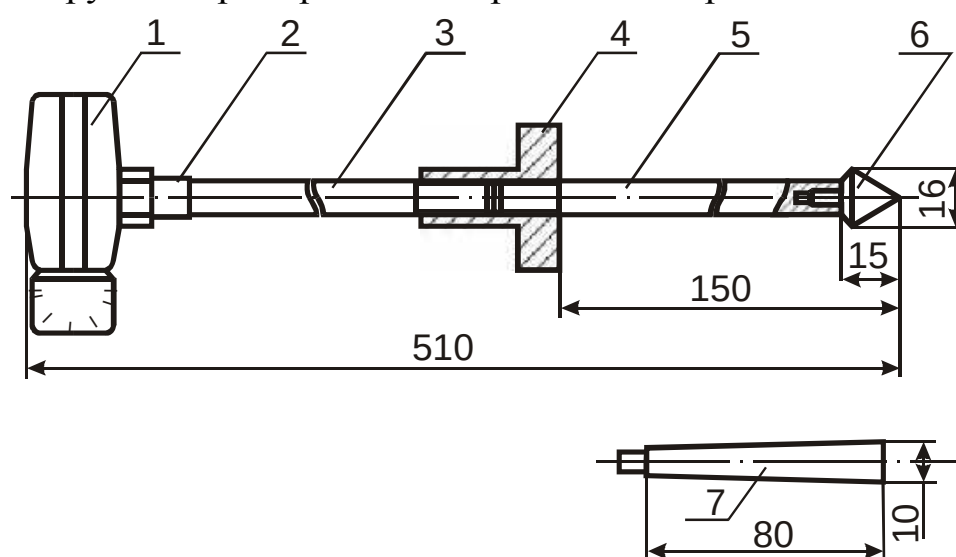


Рис. 4.160. Конструкция универсального статического плотномера СПГ-1

Прибор состоит из силоизмерительного устройства 1 с крепежной гайкой 2, в которую заворачивается переходной стержень 3 с ограничительной муфтой 4; рабочего стержня 5 и двух сменных наконечников – конуса 6 и усеченного конуса 7 в комплекте с ограничительной шайбой.

Тип прибора – пенетрометр статического действия. Принцип действия прибора заключается в определении усилия P , необходимого для погружения наконечника на определенную глубину.

В качестве силоизмерительного устройства используется плоскопараллельный динамометр ДК- 50 или ДК- 100 с ценой деления 1...2 daN.

Прибор СПГ-1 применяется для определения $K_{упл}^{\phi}$ дисперсных грунтов, содержащих не более 15% песчаных частиц размером более 2 мм. Границы допустимых значений влажности и плотности грунтов, при которых допускается применение СПГ-1, даны в табл. 4.20.

Таблица 4.20. Область применения СПГ-1

Вид грунтов	W, %	γ , г/см ³
Песок пылеватый	12–15	1,65–1,84
Песок мелкий	10–12	1,72–1,83
Песок средней крупности	7–10	1,74–1,87
Песок крупный	5–9	1,84–1,89
Супесь	14–17	1,6–1,65
Суглинки легкие, тяжелые и тяжелые пылеватые	19–20	1,67–1,69

Перед проведением испытаний необходимо установить вид грунта и его влажность по [11] и [52].

При использовании прибора СПГ-1 для текущего и приемочного контроля не менее 10% всех измерений необходимо проводить стандартным весовым методом с отбором проб грунта кольцами по [11]. При значительном расхождении результатов, полученных при помощи прибора СПГ-1 и весовым методом, следует провести дополнительную тарировку на данный вид грунта с составлением графика зависимости k_y от P .

Перед проведением испытаний прибор необходимо собрать в соответствии с рис. 4.160. В зависимости от вида грунта при испытаниях используют конус (пески и супеси) или усеченный конус с шайбой (суглинки).

В местах определения $K_{упл}^{\phi}$ подготавливается площадка размером 20 x 20 см. Верхний слой грунта толщиной 3...5 см удаляют, зачищают и выравнивают поверхность.

Фиксирующую кнопку, расположенную на тыльной стороне динамометра, сдвигают в сторону, противоположную положению «0».

Прибор устанавливают вертикально в центре подготовленной площадки и нажимом на рукоять динамометра погружают наконечник в грунт до упора ограничительной муфты или шайбы (при усеченном конусе) в поверхность грунта. После этого пенетrometer извлекают из грунта и показания на шкале динамометра записывают в журнал (табл. 4.21).

Таблица 4.21. Показатели грунтов

Дата	КМ	ПК	Место отбора проб			Вид грунта	Влажность грунта, %	Усилие P_i	Среднее усилие P_{cp}	Коэффициент уплотнения $K_{упл}^{\phi}$
			ось	влево	вправо					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

На одном месте проводят от 3 до 5 параллельных зондирований, при этом расстояние между точками зондирования должно быть не менее 12...15 см. За искомую величину P_{cp} принимают среднеарифметическое из измерений, проведенных на одном месте. Перед каждым

последующим измерением показания динамометра сбрасывают путем перемещения фиксатора в положение «0».

По полученному значению $R_{ср}$ с помощью графиков, представленных на рис. 4.161 – 4.166, определяют коэффициент уплотнения грунтов. Погрешность определения составляет 1%.

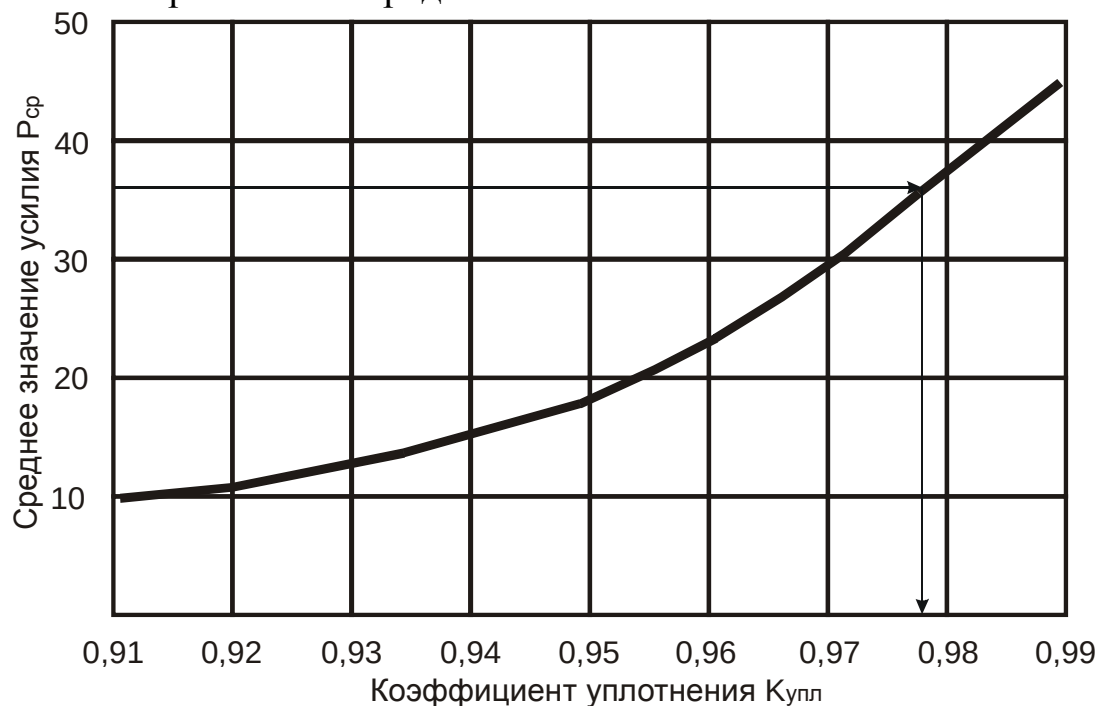


Рис. 4.161 График для определения коэффициента уплотнения песка крупного

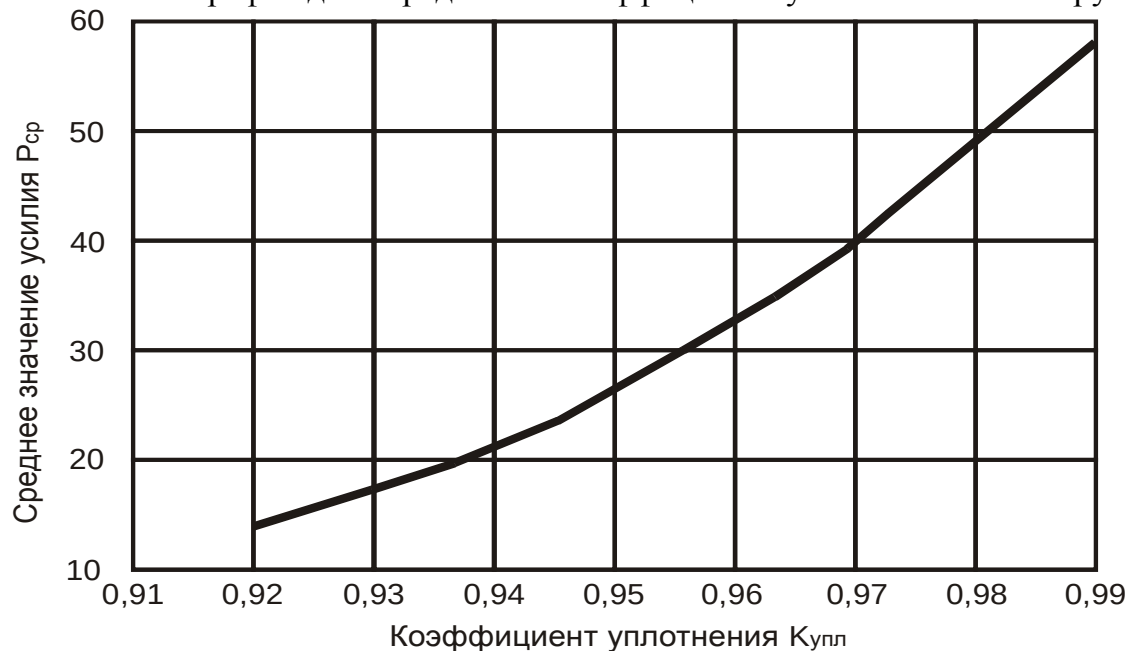


Рис. 4.162. График для определения коэффициента уплотнения песка средней крупности

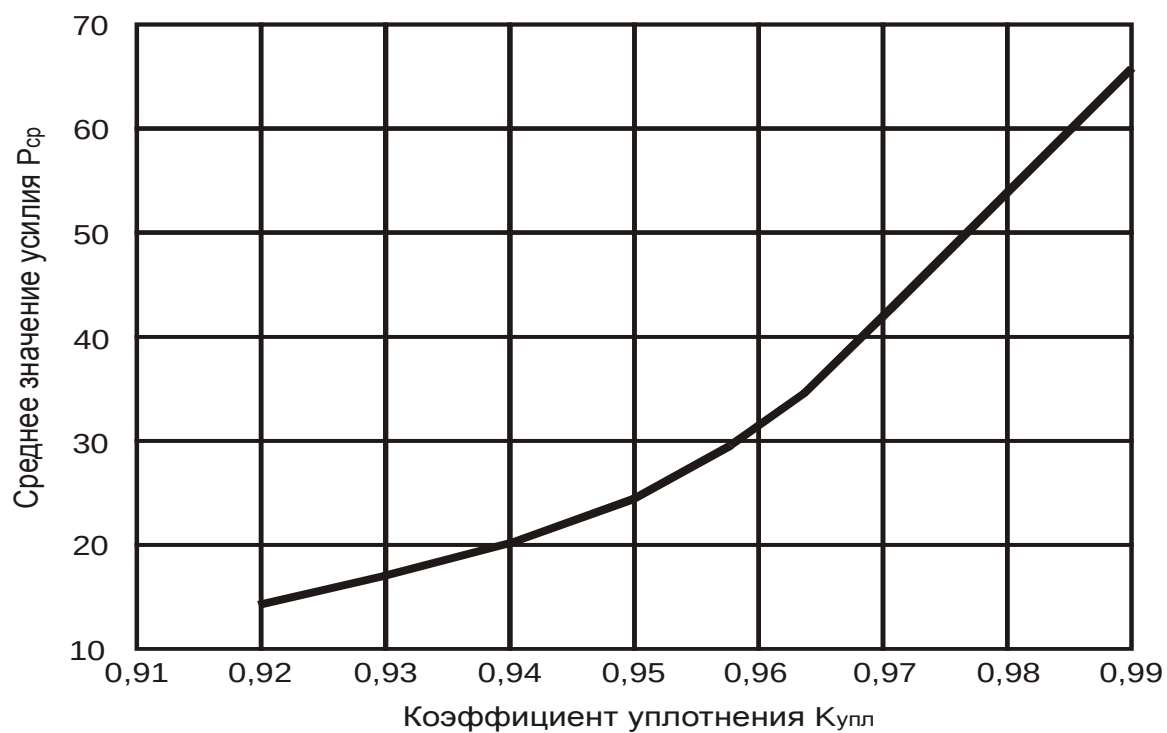


Рис 4.163. График для определения коэффициента уплотнения песка пылеватого

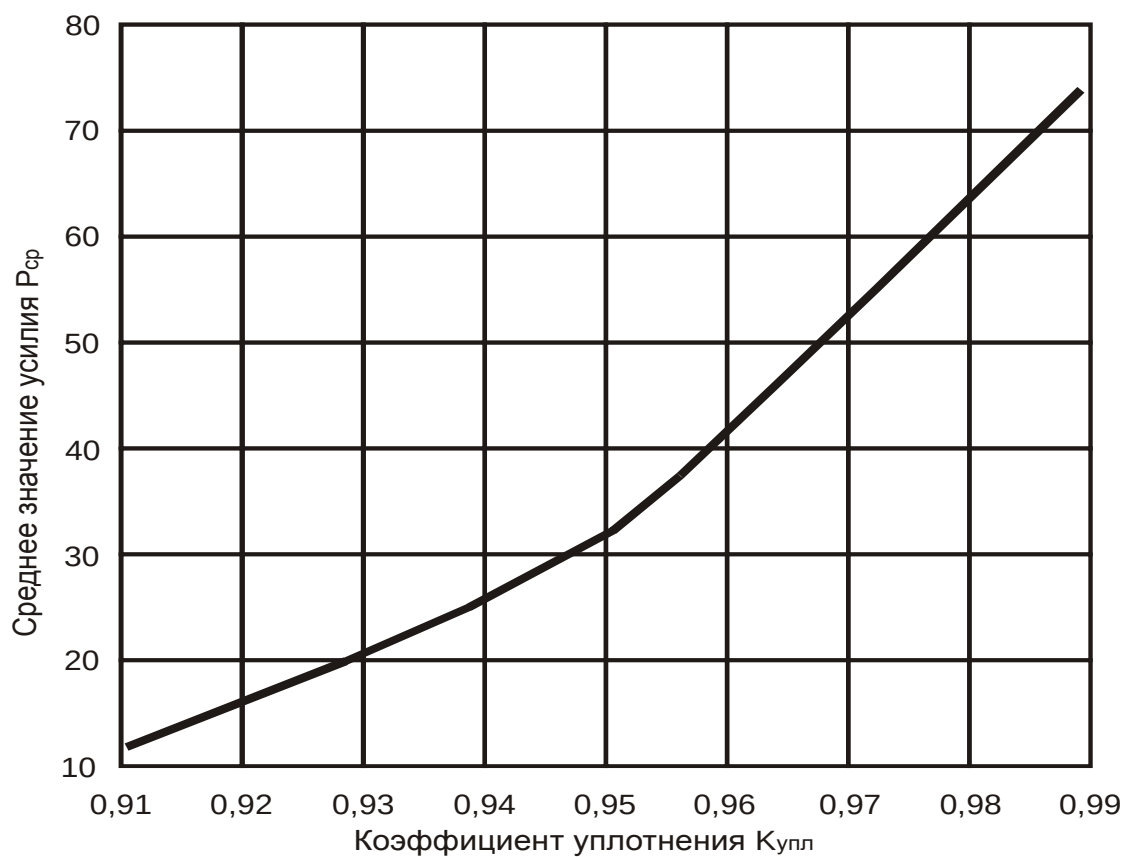


Рис. 4.164. График для определения коэффициента уплотнения песка мелкого

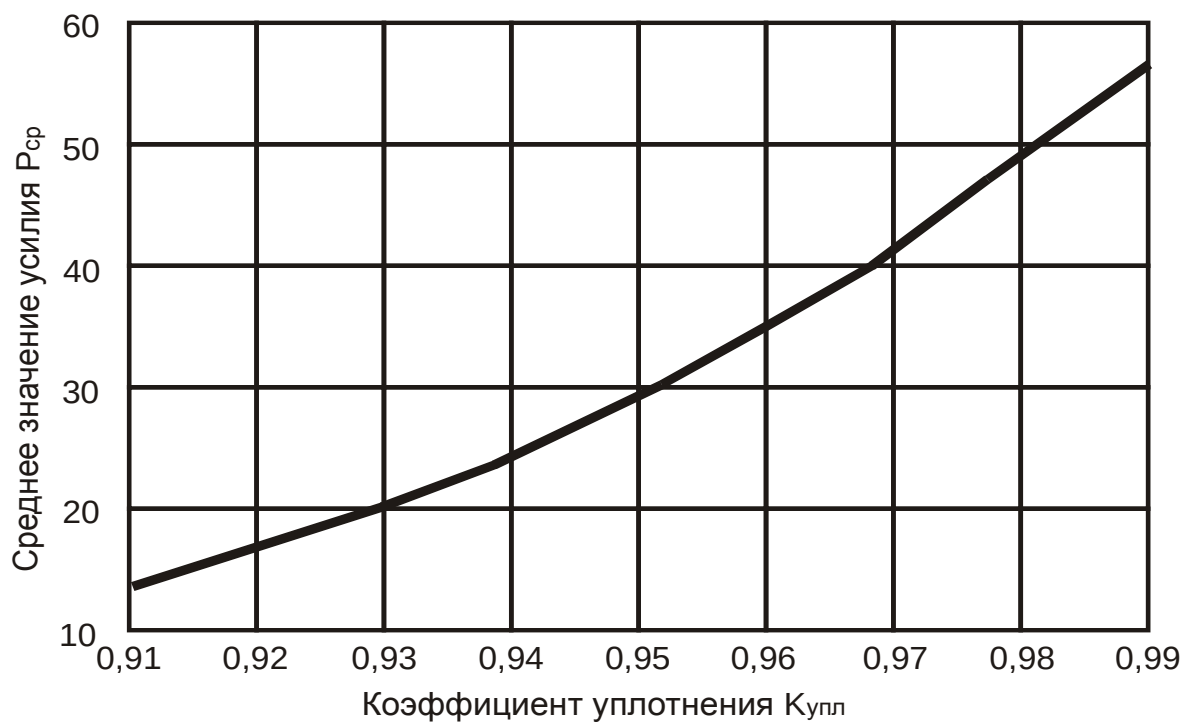


Рис. 4.165. График для определения коэффициента уплотнения супесей

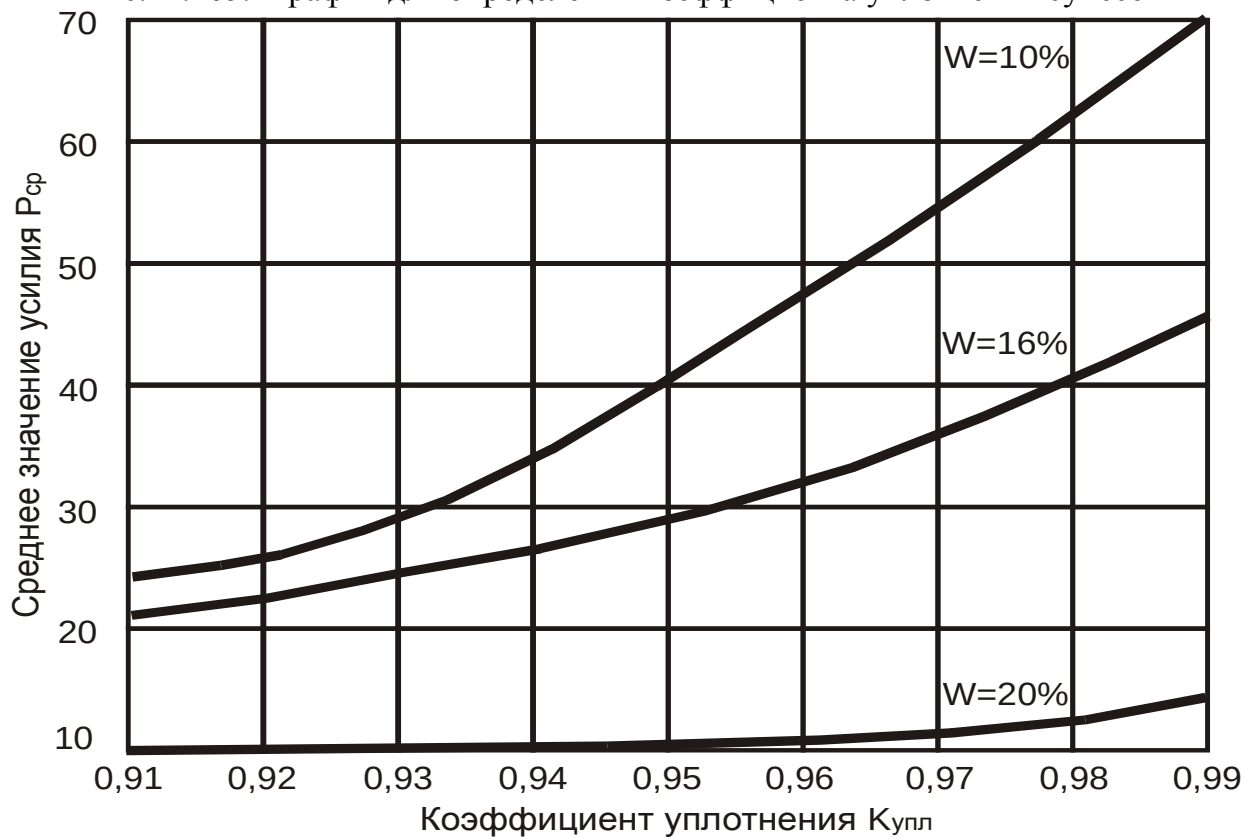


Рис. 4.166. График для определения коэффициента уплотнения суглинка

После определения коэффициента уплотнения грунтов дается их качественная оценка, которая записывается в виде выводов по выполненной лабораторной работе.

4.3.3. Применение установок динамического нагружения для определения модуля упругости и коэффициента уплотнения грунтов

Установки динамического нагружения применяют для определения динамического модуля упругости грунтов, который коррелирует с величиной статического модуля упругости, определяемого при помощи штамповых испытаний, и коэффициентом уплотнения.

В настоящее время в РФ и за рубежом разработано большое количество приборов, позволяющих произвести динамические штамповые испытания в полевых условиях. Некоторые приборы приведены на рис. 4.167.



Рис.4.167. Конструкции установок динамического нагружения:

- а– дорожно-диагностический комплекс ДПГ-ДДК;
- б– плотномер грунтов динамический ПДУ-МГ4 «Удар»;
- в– плотномеры грунтов динамические ДПГ 1.2 и ДПГ 1.1

Каждая установка сопровождается руководством, в котором описаны правила калибровки прибора, подготовка площадки и прибора к

испытанию, методика проведения экспериментов и правила обработки результатов [69, 70, 71, 72]. Данные этих руководств должны соответствовать требованиям [73].

Метод испытаний грунтов и земляного полотна установками динамического нагружения заключается в определении значений модуля упругости, а в ряде случаев и радиуса кривизны упругой чаши прогиба (осадки) на поверхности земляного полотна или испытываемого слоя дорожной одежды по амплитудам деформации, полученным от действия ударной силы через круглый, жесткий штамп [73]. Значения динамического модуля упругости пересчитываются в статический модуль упругости и коэффициент уплотнения грунта. Для этого используются корреляционные зависимости, заложенные в программах электронных блоков приборов. В динамических плотномерх ДПГ величина динамического модуля упругости имеет прямую корреляционную связь со статическим модулем упругости и коэффициентом уплотнения. Таким образом, приборы позволяют произвести определение статического модуля упругости в диапазоне от 10 до 480 МПа и коэффициента уплотнения в диапазоне от 0,9 до 1.

Выполнение экспериментальных работ рассмотрим на примере использования прибора ПДУ-МГ4 в соответствии с правилами [72]. Этот прибор предназначен для косвенного измерения модуля упругости на основе прямых измерений амплитуды перемещения штампа и ударной силы, действующей на круглый, жесткий штамп. Такие испытания проводятся для контроля качества уплотнения грунтов и оснований при строительстве дорог, мостов, опор, железнодорожного полотна, фундаментов, каналов, траншей, на предприятиях стройиндустрии, в научно-исследовательских, дорожных и строительных лабораториях. Технические характеристики модификаций приборов ПДУ-МГ4 приведены в табл. 4.22.

Таблица 4.22. Технические характеристики приборов типа ПДУ-МГ4

Характеристики	Модификация прибора	Единица измерения	Величина
1	2	3	4
Диапазон измерений силы	ПДУ-МГ4 «Удар»,	кН	0,1–19
	ПДУ-МГ4.01 Удар»,	кН	0,1–10
	ПДУ-МГ4 «Импульс»		
Диапазон измерений перемещения штампа	Все модификации	мкм	50 – 9999

Окончание табл. 4.22

1	2	3	4
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения силы (F – измеряемая сила)	Все модификации	Н	$\pm(0,01F+20)$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения перемещения штампа (L – измеряемое перемещение)	Все модификации	мкм	$\pm(0,03L+10)$
Диапазон измерений модуля упругости	ПДУ-МГ4 «Удар»	МН/м ² или МПа	5–370
	ПДУ-МГ4.01 Удар»,		5–300
	ПДУ-МГ4 «Импульс»		5–300
Масса падающего груза	ПДУ-МГ4 «Удар»	кг	$10,3 \pm 0,1$
	ПДУ-МГ4.01 Удар»,		$5,3 \pm 0,1$
	ПДУ-МГ4 «Импульс»		$5,3 \pm 0,1$
Максимальная высота падения груза	Все модификации	мм	850

Все модификации прибора ПДУ-МГ4 состоят:

- из нагрузочного устройства, снабженного подвижным грузом;
- плиты динамического нагружения (ПДН), представляющей собой круглый, жесткий штамп, на котором установлены тензорезисторный датчик силы и акселерометр, вторичного измерительного преобразователя (электронного блока), на передней панели которого размещены жидкокристаллический дисплей и клавиатура.

Прибор поставляется в потребительской таре.

Согласно руководству [72] принцип действия прибора ПДУ-МГ4 заключается в преобразовании деформации упругих элементов тензометрического датчика, возникающей под действием силы, в аналоговый электрический сигнал, изменяющийся пропорционально силе. Аналоговый электрический сигнал с акселерометра, установленного на штампе, пропорционален ускорению, которое приобретает штамп под действием силы [72]. Для преобразования величины ускорения штампа в перемещение применяется цифровой интегратор [72]. Электрические сигналы с тензометрического датчика и акселерометра поступают во вторичный измерительный преобразователь (электронный блок) для аналого-цифрового преобразования, обработки и индикации результатов измерений.

Значение модуля упругости определяется по формуле

$$E = \frac{\pi \cdot D \cdot p \cdot (1 - \mu^2)}{S}, \quad (4.35)$$

где D – диаметр штампа, м; p – контактное давление, МПа; μ – коэффициент Пуассона (для грунтов $\mu = 0,35$, для дорожных конструкций $\mu = 0,30$); S – перемещение штампа, м.

Перед испытанием выполняют подготовку поверхности в точке измерений. На подготовленную поверхность устанавливают жесткий круглый штамп, который для обеспечения плотного контакта с грунтовой поверхностью поворачивают и перемещают по ней. После установки штампа выполняют установку нагружающего устройства, вставляя его в шаровую опору ПДН (штампа). Затем к ПДН и электронному блоку подключают кабель. Иллюстрации этих операций приведены на рис. 4.168 – 4.171.



Рис.4.168. Установка ПДН на поверхность испытываемой конструкции



Рис.4.169. Установка нагружающего устройства в шаровую опору ПДН



Рис.4.170. Подключение кабеля к ПДН



Рис.4.171. Подключение кабеля к электронному блоку

Далее выполняют три предварительных сброса груза (рис. 4.172), а затем включают прибор и производят автоподстройку (рис. 4.173). Выполнив автоподстройку прибора, груз поднимают до защелкивания в механизме фиксации (рис. 4.174), после чего выполняют сброс груза (рис. 4.175).



Рис.4.172. Предварительные сбросы груза



Рис.4.173. Автоподстройка прибора



Рис.4.174. Груз в механизме фиксации



Рис.4.175. Сброс груза

На дисплее прибора отображаются графические зависимости изменения силы и перемещения во времени, а также приводится информация о виде грунта и даются коэффициенты Пуассона, значения модуля упругости, перемещения ПДН и силы удара. Показания дисплея приведены на рис. 4.176.

В каждой точке производится по три измерения. По результатам этих трех измерений рассчитываются средние значения модуля упругости, перемещения штампа и силы удара. Значения средних характеристик выводятся на дисплее (рис. 4.177). Для вычисления коэффициента уплотнения можно использовать эмпирические зависимости.

Примером таких зависимостей являются уравнения, представленные в табл. 4.2. Решением таких уравнений относительно коэффициента уплотнения можно получить формулы, позволяющие рассчитывать его значения в зависимости от модуля упругости и относительной влажности.

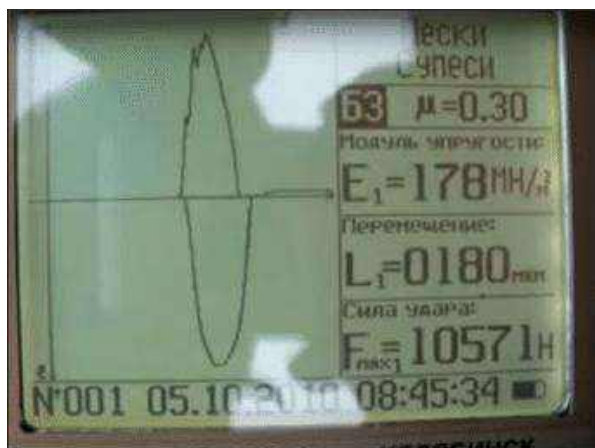


Рис.4.176. Показания, отображаемые на дисплее



Рис.4.177. Средние значения характеристик, отображаемые на дисплее

В блоках электронной обработки результатов испытаний некоторых установок динамического нагружения заложены корреляционные зависимости коэффициента уплотнения от модуля упругости. В приборах ДПГ такая зависимость дается полиномом второй степени, она позволяет вычислить коэффициент уплотнения и вывести его значение на дисплей. Кроме того, имеется возможность вывода и ввода в прибор новых эмпирических зависимостей коэффициента уплотнения от модуля упругости.

Правила и последовательность выполнения испытаний при помощи прибора ДПГ-1.2 аналогичны представленным нами регламентом использования применения прибора ПДУ-МГ4, но есть некоторые отличия. При использовании прибора ДПГ-1.2 выполняют:

- подготовку точки испытания, на которую устанавливают собранный прибор (рис. 4.178);
- закрепление у рукояти прибора механизма сброса и фиксации груза (рис. 4.179);
- подъем груза и его крепление в механизме фиксации (рис. 4.180);
- нажатие на рычаг механизма сброса груза (рис. 4.181);
- сброс груза (рис. 4.182);

– подхват груза, отскочившего от амортизирующего устройства штампа и его плавное опускание в нижнюю часть прибора (рис. 4.183);

– чтение показаний с дисплея электронного блока, на котором высвечиваются значения динамического модуля упругости трех параллельных испытаний и средние значения динамического и статического модуля упругости;

– чтение показаний о величине коэффициента уплотнения.



Рис. 4.178. Установка прибора ДПГ-1.2 на точку измерения



Рис. 4.179. Крепеж механизма сброса и фиксации груза



Рис. 4.180. Подъем и закрепление груза в механизме фиксации



Рис. 4.181. Нажатие рычага сброса груза



Рис. 4.182. Сброс груза и его удар по штампу



Рис. 4.183. Подхватывание груза

4.3.4. Применение измерителей жесткости грунтов для оценки их модуля упругости коэффициента уплотнения

Измерители жесткости грунта применяют для определения модуля упругости грунта, значение которого можно использовать для вычисления коэффициента уплотнения по заранее полученным эмпирическим зависимостям.

Одним из наиболее эффективных геоизмерителей жесткости грунта является полевой прибор GeoGauge, выпускаемый компанией Humboldt. Этот прибор используется для оценки параметров качества строительства и однородности свойств грунтов земляного полотна и слоев дорожной одежды из несвязанных материалов.

Оценка однородности выполняется путем измерения и оценки отличий в жесткости. Этот инструмент выявляет аномалии строительства, дополняя сведения, полученные на основе операционного контроля плотности сухого грунта и коэффициентов уплотнения. Измерения жесткости, выполняемые GeoGauge, позволяют выявить места с существенным их отличием. В результате появляется возможность своевременно назначить мероприятия, направленные на повышение однородности свойств земляного полотна и конструктивных слоев дорожной одежды.



Рис. 4.184. Прибор Geogauge

На рис. 4.184 представлен общий вид прибора Geogauge. Принципом работы Geogauge является создание малых динамических нагрузок, действующих на частотах от 100 до 196 Гц. В лабораторных исследованиях [74, 75] сила, порожденная Geogauge, приблизительно составляет 9 Н. Операции Geogauge генерируют небольшое смещение почвы, составляющее около $5 \cdot 10^{-4}$ дюйма, или $1,27 \cdot 10^{-6}$ м. Перемещения грунта имеют устойчивые значения на 25 частотах, находящихся в диапазоне между 100 и 196 Гц. Жесткость почвы (грунта) определяется на каждой

частоте и отображается средним значением. Весь процесс испытаний и обработки результатов занимает около полутора минут. Электропитание прибора осуществляется набором из 6 D-батарей. Прибор скон-

струирован таким образом, что работающее поблизости оборудование не вызывает отклонения показателей и соответственно не влияет на точность измерений. Это объясняется тем, что частоты колебаний, порождаемых работающим поблизости оборудованием и транспортом, движущимся по шоссе, составляют около 30 Гц, что ниже рабочих частот Geogauge [76].

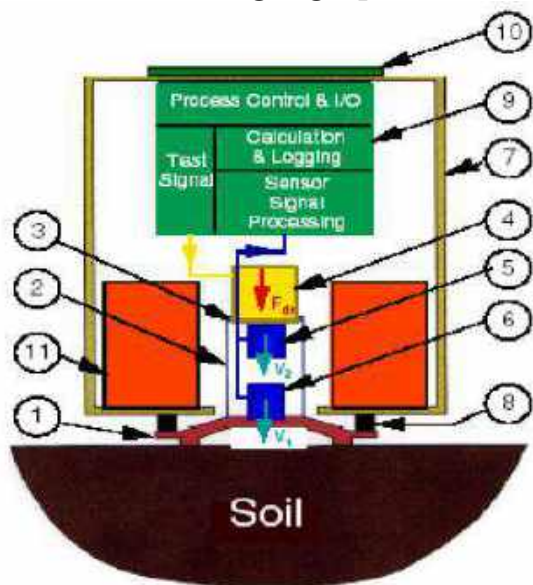


Рис. 4.185. Схема устройства прибора:
1 – жесткое опорное кольцо; 2 – жесткая цилиндрическая втулка; 3 – гибкая пластина; 4 – электро-механический шакер;
5 и 6 – измерители скорости;
7 – внешний корпус; 8 – крепление виброизоляции; 9 – электроника;
10 – дисплей; 11 – вибраторы.

На рис. 4.185 приведена схема устройства прибора. Усилие, передающееся через шейкер и гибкую пластину на землю через измеряется двумя датчиками скорости смещений. Это усилие определяется по формулам

$$F_{dr} = K_{flex} \cdot (X_2 - X_1), \quad (4.36)$$

где F_{dr} – усилие, передающееся на шейкер; K_{flex} – жесткость гибкой пластины; X_1 и X_2 – смещение гибкой и жесткой пластин.

$$F_{dr} = K_{flex} \cdot (V_2 - V_1), \quad (4.37)$$

где V_1 и V_2 – скорости смещений жесткой и гибкой пластины.

В области частот работы основного входного сопротивления контролируется жесткость грунтового основания, определяемая по формуле

$$K_{soil} = F_{dr} / X_1. \quad (4.38)$$

Для измерения жесткости грунта выполняется серия тестов общим количеством n . Математическое ожидание жесткости грунта вычисляют как среднее выборочное значение. Для этих вычислений используют формулы

$$K_{soil} = K_{flex} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \cdot \frac{X_{2i} - X_{1i}}{X_{1i}}; \quad (4.39)$$

$$K_{soil} = K_{flex} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \cdot \frac{V_{2i} - V_{1i}}{V_{1i}}. \quad (4.40)$$

Применение измерителей скорости смещений устраняет необходимость вносить корректировки, учитывающие смещения почвы, и позволяет точно оценивать малые перемещения пластин. Предполагается, что реакция Geogauge преобладает над жесткостью почвы.

Среднее значение жесткости грунта, вычисленное по результатам частных измерений, может быть использовано для расчета модуля упругости.

Связь статической жесткости K с модулем упругости однородного полупространства описывается формулой Егорова, а именно

$$K = \frac{E \cdot R}{(1 - \mu^2) \cdot \omega(n)}, \quad (4.41)$$

где E – модуль упругости грунтового полупространства; R – внешний радиус жесткого опорного кольца прибора; μ – коэффициент Пуассона; $\omega(n)$ – отношение внутреннего и внешнего радиусов жесткого опорного кольца прибора, которое для GeoGauge составляет 0,565.

С учетом конструкции жесткой кольцевой опоры (4.41) примет вид

$$K = \frac{1,77 \cdot E \cdot R}{(1 - \mu^2)}. \quad (4.42)$$

Из зависимости (4.42) модуль упругости определяется по формуле

$$E = \frac{K \cdot (1 - \mu^2)}{1,77 \cdot R} = \frac{H_{SG} \cdot (1 - \mu^2)}{1,77 \cdot R}, \quad (4.43)$$

где H_{SG} – считываемые Geogauge показания жесткости, МН/м; R – внешний радиус жесткого опорного кольца прибора, составляющий 57,15 мм (2,25 дюйма).

Значения коэффициентов Пуассона, которые используются в (4.43) для расчетов модуля упругости, приведены в табл. 4.23.

Таблица 4.23. Коэффициенты Пуассона материалов и грунтов

Материал	Значения коэффициентов Пуассона	
	Интервал варьирования	Наиболее вероятное значение
Известково-золотые смеси	0,1 – 0,15	0,15
Материалы, обработанные известью	0,1 – 0,25	0,2
Портландцемент и бетон	0,15 – 0,2	0,15
Материалы, обработанные цементом	0,1 – 0,2	0,15
Мелкодисперсные грунты, укрепленные цементом	0,15 – 0,35	0,25
Необработанные гранулированные материалы	0,3 – 0,4	0,35
Плотный песок	0,2 – 0,4	0,35
Мелкодисперсные грунты (содержат пылеватоглинистые частицы)	0,3 – 0,45	0,4
Водонасыщение слабых грунтов	0,4 – 0,5	0,45

Для грунтов с коэффициентом Пуассона 0,35 измеренное в МН/м значение жесткости грунта H_{SG} можно перевести в модуль упругости E в МПа простым умножением показаний прибора на 8,67. Производить такие вычисления можно только в тех случаях, когда регистрируемая прибором жесткость H_{SG} имеет значения до 23 МН/м. При больших считываемых значениях жесткости $H_{SG} > 23$ МН/м точность показаний снижается [76].

Методика применения измерителя жесткости включает в себя:

- поверку и тарировку прибора;
- подготовку грунтовой поверхности в точке измерений;
- подготовку прибора к испытанию;
- проведение испытания.

При поверке и тарировке прибора его необходимо подключить к компьютеру и связаться с официальным сайтом компании Humboldt [76]. Специалисты компании Humboldt, управляя программным обеспечением, производят поверку и тарировку прибора на расстоянии.

Перед каждым тестированием в точке измерений подготавливают ровную площадку (рис. 4.186) и осматривают опорное кольцо прибора, которое при необходимости очищают от остатков грунта.



Рис. 4.186. Этапы подготовки поверхности для испытания измерителем жесткости GeoGauge:

a – подсыпка песка в неровности;

б – выравнивание поверхности грунтового основания

Убедившись, что опорное кольцо свободно от почвы и других загрязнений, прибор устанавливают на подготовленную поверхность (рис. 4.187, *a*). При установке прибора усилие вниз не прикладывают, это необходимо для того, чтобы не оказывать силового воздействия на датчик. После установки прибора осматривают внешний корпус и убеждаются, что он не вступает в контакт с какими-либо объектами,

например блоками фундамента трубы. После этого прибор поворачивают вокруг своей оси примерно на $\frac{1}{2}$ оборота (рис. 4.187, б). Вращение должно быть свободным и не встречать затруднений.

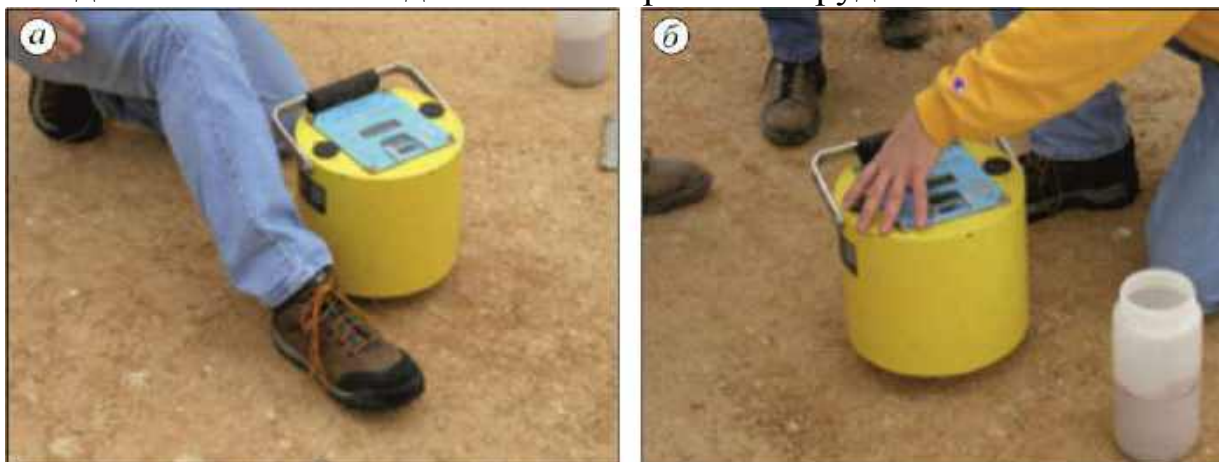


Рис. 4.187. Этапы подготовки измерителя жесткости GeoGauge для испытания:
а – установка прибора с опорным кольцом на подготовленную поверхность;
б – поворот прибора на $\frac{1}{2}$ оборота для оценки контакта с грунтовой поверхностью

Далее прибор поднимают и по отпечатку, оставленному на поверхности опорным кольцом, оценивают площадь контакта. Площадь контакта считается удовлетворительной, если на грунтовой поверхности четко видно 80% и более площади отпечатка опорного кольца (рис. 4.188).



Рис. 4.188. Иллюстрации удовлетворительного контакта опорного кольца с поверхностью

В случае если контакт признан неудовлетворительным, то на поверхность необходимо подсыпать слой песка и разровнять его, подготовив ровную площадку. На подготовленный слой песка устанавливают измеритель жесткости и повторяют все процедуры, необходимые для оценки площади контакта.

При выполнении испытания необходимо:

- выровнять поверхность отпечатка на проверенном контакте;
- установить прибор на эту выровненную поверхность;
- включить прибор и снять показания.

Показания снимают в виде модуля упругости. Для определения коэффициента уплотнения строят градуировочную кривую и подбирают эмпирические формулы, позволяющие вычислять коэффициент уплотнения по величине модуля упругости.

Задания и для самооценки приобретенных знаний

1. *Дайте определение максимальной стандартной плотности грунта и оптимальной влажности.*
2. *Поясните методику определения максимальной стандартной плотности грунта и оптимальной влажности стандартным и модифицированным методами Проктора.*
3. *Поясните отличия в методах А, В и С, применяемых для определения максимальной стандартной плотности грунта и оптимальной влажности, регламентируемых стандартами ASTM D 698-12 и ASTM D 1557-12.*
4. *Поясните методику определения максимальной плотности и оптимальной влажности методом стандартного уплотнения по ГОСТ 22733–2002.*
5. *Поясните методику определения плотности грунта методом режущего кольца и приведите формулы для расчета плотности сухого грунта.*
6. *Поясните методики определения плотности грунта методом замещения объема, соответствующие требованиям стандартов ГОСТ 28514–90, ASTM D 1556 и ASTM D 2167.*
7. *Поясните методику определения плотности грунта, плотности сухого грунта и влажности при помощи прибора Н.П. Ковалева.*
8. *Поясните методики определения коэффициента уплотнения при помощи динамических и статических плотномеров.*
9. *Поясните методику определения модуля упругости и коэффициента уплотнения при помощи установок динамического нагружения.*
10. *Поясните методику определения модуля упругости и коэффициента уплотнения при помощи измерителей жесткости грунта.*

5. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ВЫСОТНЫЕ ОТМЕТКИ

5.1. Допускаемые отклонения и правила оценки качества

В процессе строительства, реконструкции и капитального ремонта земляного полотна автомобильных дорог СП 78.13330.2012 [59] регламентирует значения нормативных геометрических требований к элементам земляного полотна.

Контроль качества сооружения земляного полотна включает:

- правильность размещения осевых линий земляного полотна и высотные отметки;
- толщину снимаемого растительного слоя грунта и отсыпаемых слоев насыпи;
- ровность слоев земляного полотна;
- поперечный профиль (расстояние между осью и бровкой, поперечный уклон, крутизну откосов);
- правильность геометрических форм водоотводных и дренажных конструкций.

Таблица 5.1. Допустимые геометрические отклонения при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте земляного полотна [59]

Конструктивный элемент, вид работ и контролируемый параметр	Значения нормативных требований
1	2
1.1. Подготовка основания земляного полотна:	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений до $\pm 40\%$, остальные – до $\pm 20\%$
толщина снимаемого плодородного слоя грунта	
1.2. Возведение насыпей и разработка выемок:	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений до ± 20 мм; остальные – до ± 10 мм
1.2.1. Высотные отметки продольного профиля	
1.2.2. Расстояния между осью и бровкой земляного полотна	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений до ± 20 см, остальные – до ± 10 см
1.2.3. Поперечные уклоны	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах от минус 0,010 до 0,015, остальные – до $\pm 0,005$

Окончание табл. 5.1

1	2
1.2.4. Уменьшение крутизны откосов	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений до 20%, остальные – до 10%
1.3. Устройство водоотвода:	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений до 10 см, остальные – до 5 см
1.3.1. Увеличение поперечных размеров кюветов, нагорных и других канав (по дну)	
1.3.2. Глубина кюветов, нагорных и других канав (при условии обеспечения стока)	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений до ± 10 см, остальные – до ± 5 см
1.3.3. Поперечные размеры дренажей	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений до ± 10 см, остальные – до ± 5 см
1.3.4. Продольные уклоны дренажей	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений до $\pm 0,002$, остальные – до $\pm 0,001$
1.3.5. Ширина насыпных берм	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений до ± 30 см, остальные – до ± 15 см
1.4. Устройство присыпных обочин	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах от минус 22 до плюс 30 мм, остальные - до ± 15 мм
1.4.1. Толщина укрепления	Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах от минус 0,010 до 0,015, остальные – до $\pm 0,005$
1.4.2. Поперечные уклоны обочин	

Не реже чем через каждые 100 м (в трех точках на поперечном профиле) необходимо оценивать правильность:

- расположения оси земляного полотна;
- высотных отметок;
- поперечного профиля земляного полотна, обочин, дренажных и водоотводных сооружений;
- толщины слоев.

Наиболее удобно производить такие проверки в местах размещения знаков рабочей разбивки с использованием шаблонов и различных геодезических приборов и инструментов.

Оценка ровности поверхности слоев земляного полотна производится с помощью сравнения фактических высотных отметок с дан-

ными проекта, а также с помощью визуального осмотра (на поверхности слоя не должно быть искажений продольного и поперечного профиля в виде колеи, выбоин, просадок, следов от кулачкового катка или волн и др.). Фактические высотные отметки определяют нивелированием, шаг которого не должен быть более 50 м в трех точках на поперечном профиле (ось и бровки).

Не реже чем через 100 м необходимо контролировать толщину слоев грунта над и под прослойкой геомембран. Измерение производится линейкой в трех точках на поперечном профиле (по оси и у бровок) [59].

При разбивке элементов земляного полотна в натуру выносят и закрепляют на местности пикеты и вершины углов поворота, отмечают расположение оси дороги, главные и промежуточные точки кривых. Обязательным условием является дублирование разбивочных знаков за пределами полосы производства работ (например, вынос пикетных створов).

Рабочую разбивку следует выполнять от установленных реперов и пикетов на расстоянии не реже чем через 50 м на прямых, а на кривых не реже чем через 20 м. Разбивку выполняют непосредственно перед выполнением технологической операции.

Геодезические работы следует выполнять в соответствии с СП 126.13330.2012.

5.2. Измерение геометрических параметров земляного полотна

Измерение линий на местности является наиболее частым видом измерения при сооружении любого объекта, линии измеряют как на горизонтальных, так и на вертикальных плоскостях. Известно большое количество оборудования, позволяющего измерять линии (длины). К такому оборудованию относят деревянные или металлические метры, рулетки, специальные землемерные проволоки и ленты, электронные дальнометры и др.

На поверхности ленты рулетки или линейки нанесены штрихи обычно длиной 1 мм, которые подписаны цифрами у каждого сантиметра. Измерение расстояния между двумя точками (длины линии) производится путем совмещения штриха с подписью ноль, приложенного к начальной точке линии, и штриха с конечной точкой линии, отсчет на измерительной ленте, совпадающий со второй точкой, и будет результатом измерения.

Таким способом можно точно измерить большинство геометрических параметров земляного полотна. Измерения следует производить на поверхности слоя. Измерениям не должны препятствовать загрязнения на поверхностях в виде пыли и грязи или снежных образований [77]. Результаты линейных измерений сравнивают с требуемым значением.

При необходимости обеспечения высокой точности измерений следует учитывать поправки на температурный коэффициент линейного расширения в случаях, если температура окружающей среды отличается от 20 °С.

Важной характеристикой поперечного профиля являются уклоны. Уклонами в дорожном строительстве называют изменения поверхности конструктивного элемента относительно горизонтального положения. Единицей измерения уклонов является промилле или процент. В процессе работы с земляным полотном следует строго контролировать требуемые значения поперечных и проектных значений продольных уклонов. Величина уклонов обуславливает скорость стока воды (в период выпадения жидких осадков) и качество сопряжения слоев насыпи при послойной отсыпке.

Уклоны могут определяться двумя способами:

- с помощью трехметровой универсальной дорожной рейки;
- нивелира с геодезической рейкой.

Считается, что дорожной рейкой определяют уклоны в процессе операционного контроля, а геометрическое нивелирование предпочтительнее производить при приемочном контроле [77].

Рассмотрим наиболее распространенный способ проверки уклонов в дорожном строительстве при помощи трехметровой универсальной дорожной рейки. Рейка предназначена для измерения уклонов и контроля горизонтальности поверхностей с пределом до 1:10. Также при помощи этого прибора возможно определение прямолинейности и плоскостности поверхности конструктивного элемента автомобильных дорог с пределом измерения до 10 мм на трехметровой базе.

Перед началом работ необходимо произвести сборку рейки в рабочее положение и убедиться в ее рабочем состоянии. Сборка производится так, чтобы исключить зазоры между частями рейки (коленами), также должен полностью отсутствовать люфт. Рабочее состояние проверяется по следующему регламенту.

На ровной поверхности без посторонних предметов (загрязнений) необходимо приложить рейку и отметить ее положение мелом и определить значение уклона. Значение уклона определяется путем вращения винта измерительной головки. Вращением винта добиваются установки уровня в горизонтальное положение и в зависимости от конструкции в случае с пузырьковым уровнем фиксацию производят по центральному положению пузырька в ампуле уровня. За величину уклона принимают значение, соответствующее положению стрелки по шкале лимба измерительной головки, затем поворачивают рейку на 180° и устанавливают точно по отмеченным линиям в первоначальное место, после снимают значение повторно. Разность полученных значений не должна отличаться более чем на 3 ‰. Если значение разницы отчетов превышает предельное, то необходимо произвести корректировку путем ослабления винта шкалы и ее регулировки в сторону уменьшения величины уклона. Значение, на которое необходимо повернуть головку, рассчитывается и равно половине разницы полученного значения. Такая тарировка производится до получения заданной величины отклонения.

Измерения производятся путем приложения рейки к поверхности в продольном или поперечном направлении и снятия контрольных отсчетов. Полученные результаты сравнивают с требуемыми значениями.

В процессе производства работ и их приемки необходимо производить измерения величины заложения откосов. Большинство универсальных дорожных реек снабжены приспособлением для измерения заложения откосов насыпей, выемок и кюветов. При таких измерениях рейка, собранная в рабочее положение, устанавливается непосредственно на поверхность откоса перпендикулярно бровке земляного полотна. Значение определяется путем снятия отсчета со шкалы балансира-эклиметра, указанного в требуемых значениях заложения откоса (например, 1:3, 1:4).

Также в процессе работ с дорожными конструкциями необходимо производить измерения точек вершин углов поворота, точек переходных кривых, реперов, промежуточных осевых точек, пикетных и плюсовых точек на прямых участках. Эти измерения могут производиться теодолитами. Теодолит – геодезический прибор, предназначенный для измерения горизонтальных и вертикальных углов в процессе топографической съемки.

Перед началом работ по измерению углов поворота необходимо подготовить прибор к работе. В первую очередь производится установка штатива над точкой таким образом, чтобы плоскость головки была горизонтальна, необходимо также учесть рост наблюдателя. После установить теодолит на головку штатива и закрепить станovým винтом. Следующим действием обычно производят горизонтирование теодолита. Для этого с помощью подъемных винтов подставки выводят пузырек кругового уровня в центр окружностей. Далее располагают цилиндрический уровень параллельно прямой, которая соединяет подъемные винты подставки путем вращения алидады, вращая винты подставки, выводят пузырек уровня на середину. Повернув алидаду на 90° , вращая третий винт подставки, повторно выводим уровень. На последнем этапе производим проверку. Для этого путем поворота алидады на 180° проверяем положение пузырька и уровня. В случае смещения пузырька необходимо произвести юстировку. Также нельзя забывать о центрировании прибора. В самом простом случае это производится с помощью отвеса, который закрепляется на становой винт. Для этого его предварительно ослабляют, далее, перемещают теодолит по плоскости головки штатива с целью центрирования над конкретной точкой. После необходимо проверить правильность юстировки центрира.

Приведя прибор в рабочее состояние, можно приступить к измерению углов.

С помощью оптического визира производится грубая наводка на цель, далее вращением окуляра настраиваем изображение сетки нитей, а путем поворота кремальеры фокусируем изображение цели. После этого необходимо зафиксировать положение теодолита с помощью зажимных винтов. Точная наводка производится путем вращения наводящих винтов. Использование зеркал освещения позволяет улучшать качество освещения шкал кругов, при повороте винта окуляра микроскопа нужно добиться четкого изображения шкал снятия отсчетов по горизонтальному и вертикальному кругу, на каждый из которых приходится по две шкалы. Верхняя шкала позволяет определить целое число градусов и десятые доли минут, в свою очередь нижняя – показывает секунды и единицы минут. Здесь следует отметить, что последовательность и порядок подготовки к работе и работы приборов может отличаться в зависимости от конструкции.

При измерении горизонтальных углов используют в основном способ приемов, который в свою очередь состоит из двух полупри-

мов. Выполнение первого полуприема производят при положении вертикального круга слева от зрительной трубы. В положении, когда откреплена алидада и жестко зафиксирован лимб, производится наведение зрительной трубы на правую визирную цель. Добиваемся попадания знака в изображение трубы, жестко фиксируем алидаду и трубу при помощи винтов алидады и трубы, наводим центр нитей на необходимый знак и берем отсчет по горизонтальному кругу. После открепления трубы и алидады необходимо навести прибор на левую визирную цель и произвести регистрацию второго отсчёта. Результатом является разница первого и второго отсчетов. Второй полуприем производят при положении вертикального круга справа. Для отличия показаний, взятых в первом случае (полуприеме), необходимо сместить лимб на несколько градусов. Далее методика повторяется по аналогии с первым полуприемом. Также измерение горизонтальных углов возможно и другими способами, например способом совмещения нулей лимба и алидады или способом повторений.

При измерении вертикальных углов используют вертикальный круг теодолита, который жестко закрепляют на оси зрительной трубы, и их вращение происходит совместно. Чтобы произвести непосредственное измерение, трубу наводят на визирную цель при двух положениях вертикального круга слева и справа, при каждом из положений требуется привести пузырек уровня в нулевое положение и взять отсчеты по вертикальным кругам (круг лева и круг права). Вычисление значения производится по различным формулам, которые, как правило, зависят от оцифровки вертикальных кругов.

5.3. Измерение высотных отметок

Измерения высотных отметок производят для определения превышений между двумя точками поверхности, такие измерения можно выполнять геодезическим прибором нивелиром.

Для начала работ по измерению высотных отметок следует подготовить нивелир к работе. При подготовке нивелира устанавливают штатив (расстояние между ножками выбирается таким образом, чтобы образовывался равносторонний треугольник) на уровне глаз наблюдателя с учетом высоты прибора. Головка штатива должна располагаться практически горизонтально. На следующем этапе производят крепление нивелира к штативу становым винтом. После этого начинаем настройку прибора. При помощи винтов необходимо добиться

центрирования пузырька кругового уровня, далее, повернув прибор на 180° , смотрят, есть ли смещение пузырька в круговом уровне. При видимом смещении необходимо произвести повторную настройку прибора до полного устранения смещения пузырька при повороте прибора. Также необходимо четко видеть сетку нитей, регулировка которой производится винтом, обычно он находится у окуляра.

Непосредственное нивелирование производят при помощи подготовленного нивелира и нивелирной рейки. Нивелирную рейку следует устанавливать на таком расстоянии от прибора, чтобы при наблюдении в визирную трубу можно было четко отсчитывать десятую долю наименьшего деления рейки. Существует два способа нивелирования. Первый – нивелирование из середины, а второй – нивелирование вперед. При первом способе нивелир ставят таким образом, чтобы приведенная в горизонтальное положение визирная ось позволяла наводиться на заднюю и переднюю точки для снятия отсчетов по рейке. Результат измерения равен разности этих двух измерений. При таком способе плечо (расстояние от нивелира до рейки) стараются делать одинаковым. При втором способе нивелирования прибор устанавливают в задней точке, производят измерения высоты нивелира и берут отсчет по рейке, которая устанавливается в передней точке, результатом считают разность высот инструмента и отсчета, взятого по рейке.

В настоящее время существуют различные виды нивелиров. Отдельно можно выделить цифровые и лазерные нивелиры. Цифровые нивелиры отличаются в первую очередь высокой точностью измерений и автоматическим сбором информации. Такие приборы используются в комплекте со специальными рейками, на лицевой стороне которых нанесена растровая шкала чередующихся черных полос и белых промежутков, в зависимости от высоты они кодируются. Устройство нивелира позволяет декодировать световые волны от штрих-кодированного рисунка. Лазерные нивелиры используются для измерения превышений и передачи (с помощью пучка света) высотных отметок.

Задания для самооценки приобретенных знаний

- 1. Перечислите виды контролируемых геометрических параметров земляного полотна.*
- 2. Назовите допускаемые отклонения геометрических параметров земляного полотна.*

3. Поясните методику и правила измерения геометрических параметров земляного полотна.

4. Поясните методику определения углов поворота при помощи теодолита.

5. Поясните методику высотного нивелирования.

Библиографический список

1. ГОСТ 25100–2015. Грунты. Классификация. – Взамен ГОСТ 251000–2011 ; введ. 2015–07–01. – М. : Стандартинформ, 2015–38 с.

2. ASTM D 2487–2000. Standard Test Method for Classification of Soils for Engineering Purposes.

3. ASTM D 4318–2000. Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soil.

4. ISO 14688-2:2004. Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of soil – Part 2 : Classification principles and quantification of descriptive characteristics.

5. ISO/TS 17892-12:2004. Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil–Part 12 : Determination of the Atterberg limits.

6. Горная энциклопедия [Электронный ресурс] URL: <http://www.mining-enc.ru>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения к ресурсу: 01.07.2015).

7. Сиротюк, В.В. Сооружение земляного полотна из грунтов с влажностью выше оптимальной : учебное пособие / В.В. Сиротюк. – Омск : СибАДИ, 2004. – 151 с.

8. Цытович, Н.А. Механика грунтов : учебное пособие / Н.А. Цытович. – М. : Госстройиздат, 1963. – 636 с.

9. Пьянков, С.А. Механика грунтов: учебное пособие / С.А. Пьянков, З.К. Азизов. – Ульяновск : УлГТУ, 2008. – 103 с.

10. Das. B.M. Advanced soil mechanics : Third Edition. – New York. Taylor & Francis, 2008. – 567 p.

11. ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Взамен ГОСТ 5180–84 ; введ. 20016–04–01 . М. : Стандартинформ, 2015.

12. ASTM D 4943–2008. Standard Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Wax Method.

13. Далматов, Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты (включая специальный курс инженерной геологии) / Б.И. Далматов. –

Л. : Стройиздат, 1988. – 415 с.

14. Достовалов, Б.Н. Общее мерзлотоведение / Б.Н. Достовалов, В.А. Кудрявцев. – М. : МГУ 1967. – 404 с.

15. Ломтадзе, В.Д. Инженерная гидрология. Инженерная петрология : учебник / В.Д. Ломтадзе. – Л. : Недра. – 1984. – 511 с.

16. ГОСТ 12248–2010. Грунты. Метод лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – Взамен ГОСТ 12248–96 и ГОСТ 24143–80 ; введ. 2012–01–01. – М. : Стандартинформ, 2011.

17. ГОСТ 20276–99. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. – Взамен ГОСТ 20276–85, ГОСТ 21719–80, ГОСТ 23253–78, ГОСТ 23741–79; введ. 2000–07–01. – М. : ГУП ЦПП, 2000.

18. ГОСТ 23740–79. Грунты. Методы лабораторного определения содержания органических веществ. – Введ. 1980–01–01. – М. : Издательство стандартов, 1987.

19. ГОСТ 26213–91. Почвы. Методы определения органического вещества. Взамен ГОСТ 26213–84 ; введ. 1993–07–01. – М. : Издательство стандартов, 1992.

20. Строительный контроль : методическое пособие / под ред. В.С. Котельниковой. – М. : Изд-во ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность 2010. – 499 с.

21. ГОСТ 16504–81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. – Взамен ГОСТ 16504–74; введ. 1982–01–01. – М. : Стандартинформ, 2011.

22. ГОСТ 32731–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к проведению строительного контроля. – Введ. 2015–02–01. – М. : Стандартинформ, 2014.

23. СП 78.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03–85. – М. : Минрегион России, 2013.

24. ГОСТ 50779.11–2000. Статистические методы. Статистическое управление качеством. Термины и определения. – Введ. 2001–07–01. – М. : Издательство стандартов, 2001.

25. СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02–85. – М. : Госстрой России, 2013.

26. ГОСТ 20522–2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. – Взамен ГОСТ 20522–96; введ. 2013–07–01. – М. : Стандартинформ, 2013.

27. Закс, Л. Статистическое оценивание / Л. Закс. – М. : Стати-

стика, 1976. – 598 с.

28. Львовский, Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е.Н. Львовский. – М. : Высшая школа, 1988. – 239 с.

29. Леман, Э. Проверка статистических гипотез / Э. Леман. – М. : Наука, 1979. – 408 с.

30. Митропольский, А.К. Теория моментов / А.К. Митропольский. – М.; Л. : Государственное издательство колхозной и совхозной литературы, 1933. – 224 с.

31. Румшицкий, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З. Румшицкий. – М. : Наука, 1971. – 192 с.

32. Венцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Венцель. – М. : Высшая школа, 2001. – 575 с.

33. Гнеденко, Б.В. Элементарное введение в теорию вероятностей / Б.В. Гнеденко, А.Я. Хинчин. – М. : Наука, 1970. – 168 с.

34. Калинина, В.Н. Математическая статистика / В.Н. Калинина, В.Ф. Панкин. – М. : Высшая школа, 2001. – 336 с.

35. Айвазян, С.А. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М. : Финансы и статистика, 1983. – 471 с.

36. Учебник по программе STATISTICA [Электронный ресурс]. – URL: <http://hr-portal.ru/statistica/index.php> (дата обращения к ресурсу: 23.02.2015).

37. Померанцев, А. Статистика. [Электронный ресурс] – URL: <http://rcs.chemometrics.ru/Tutorials/statistics.htm> (дата обращения к ресурсу: 23.02.2015).

38. ГОСТ 12071–2000. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. – Взамен ГОСТ 12071–84 ; введ. 2001–07–01. – М. : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2001.

39. ASTM D 2216 – 10. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.

40. ГОСТ 28498–90. Термометры жидкостные стеклянные. Общие технические требования. Методы испытаний. – Взамен ГОСТ 4.320–85 и ГОСТ 27544–87; введ. 1991–01–01. – М. : Издательство стандартов, 1990.

41. ГОСТ 23932–90. Посуда и оборудование лабораторные стеклянные. Общие технические условия. – Взамен ГОСТ 23932–79; введ. 1991–07–01. – М. : Издательство стандартов, 2003.

42. ГОСТ Р 53228-2008. Весы неавтоматического действия. Часть 1. Метрологические и технические требования. Испытания. – Введ. 2010–01–01. – М. : Стандартинформ, 2010.
43. ASTM E 145. Specification for Gravity-Convection And Forced Ventilation Ovens.
44. ASTM D 6026. Guide for Using Significant Digits in Calculating and Reporting Geotechnical Test Data.
45. Влагомер МГ-44. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – [Электронный ресурс] – URL: <http://rkpo.ru/sites/default/files/243-pasport-vlagomera-mg-44.pdf> (дата обращения к ресурсу: 06.01.2016).
46. Коростовенко, В.В. Науки о земле. Почвоведение, ландшафтоведение защита литосферы : учебное пособие по лабораторным работам / В.В. Коростовенко, Н.М. Капличенко, В.И. Фомина. – Красноярск, 2008. – 76 с.
47. Дмитриев, В.В. Методы и качество лабораторного изучения грунтов : учебное пособие / В.В. Дмитриев, Л.А. Ярғ. – М. : КДУ, 2008. – 542 с.
48. ASTM D 4318–10. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
49. ГОСТ 427 – 75. Линейки измерительные металлические. Технические условия (с Изменениями № 1, 2, 3). – Взамен ГОСТ 427 – 56; введ. в действие 1977–01–01. – М. : Стандартинформ, 2007.
50. Некоторые методы определения физико-механических свойств грунтов : пособие для грунтовых лабораторий / П.О. Бойченко, Г.Ф. Богданов, под ред. В.В. Охотина. – Л. : ЛГУ, 1950. – 96 с.
51. Бойченко, П.О. Определение пределов пластичности и консистенции глинистых грунтов методом конуса. – Л. : ЛГУ, 1964. 47 с.
52. ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Взамен ГОСТ 12536–79. – Введ. 2015–07–01. – М. : Стандартинформ, 2015.
53. Девальтовский, Е.Э. Механика грунтов : лаб. практикум / Е. Э. Девальтовский, Е. В. Скутина. – Ухта : УГТУ, 2015. – 112 с.
54. ГОСТ 8735–2014. Песок для строительных работ. Методы испытаний (с Изменениями № 1, 2). – Взамен ГОСТ 8735–75 и ГОСТ 25589–83; введ. 2015–07–01. – М. : Стандартинформ, 2014.

55. ASTM D 422–63 (2007) Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.

56. ASTM D 698–12 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbs/ft³ (600 KN-m/m³)).

57. ASTM D 1557–12 Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbs/ft³ (2,700 KN-m/m³)).

58. СП 78.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03–85. – Введ. 2013-07-01. – М. : Минрегион России, 2013.

59. Сиденко, В.М. Дорожные одежды с парогидроизоляционными слоями / В.М. Сиденко, О.Т. Батраков, Ю.А. Покутнев – М. : Транспорт, 1984. – 142 с.

60. Радовский, Б.С. Методы и приборы контроля качества строительства дорожных покрытий в США // Дорожная техника. – М., 2005. – С. 162–174.

61. ASTM E11–13 Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves.

62. ASTM D7263 – 09 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens.

63. ГОСТ 28514–90. Строительная геотехника. Определение плотности грунтов методом замещения объема. – Введ. 1990–05–01. – М. : Стандартинформ, 2008.

64. ASTM D 1556 – 00. Density and Unit Weight of Soil in Place by the Sand-Cone Method.

65. Руководство по сооружению земляного полотна автомобильных дорог. Минтрансстрой СССР. – М. : Транспорт, 1982.

66. Указания по строительству, ремонту и содержанию гравийных покрытий ВСН 7-89. Минавтодор РСФСР. М.: Транспорт, 1990.

67. ASTM D2167 – 15 Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Rubber Balloon Method.

68. Измеритель динамический модуля упругости грунтов ДПГ-1.1. Руководство по эксплуатации. – Челябинск : Научно-производственное предприятие «Интерприбор», 2009. – 37 с.

69. Измеритель динамический модуля упругости грунтов ДПГ-1.2. Руководство по эксплуатации. – Челябинск : Научно-производственное предприятие «Интерприбор», 2011. – 36 с.

70. Руководство по эксплуатации измерителя динамического модуля упругости грунтов ZFG 3000 GPS ZFG 3000 ECO. – Стендаль, 2011. – 24 с.

71. Измерители модуля упругости грунтов и оснований дорог ПДУ-МГ4. Руководство по эксплуатации. – Челябинск : СКБ «Строй-прибор», 2010. – 40 с.

72. СТ СЭВ 5497–86. Дороги автомобильные международные. Определение несущей способности дорожных конструкций и их конструктивных слоев установкой динамического нагружения (УДН). – Введ. 1987–03–17.

73. Sawangsuriya, A.; Edil, T.; Bosscher, P. Laboratory Evaluation of The Soil Stiffness Gauge (SSG), 81-th Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 2002, Washington, D.C.

74. Sawangsuriya, A.; Edil, T.; Bosscher, P. Comparison Of Moduli Obtained From The Soil Stiffness Gauge With Moduli From Other Tests, 81-th Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 2002, Washington, D.C.

75. Humboldt. Construction Materials Testing Equipment. GeoGauge [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.humboldtmfg.com/geogauge.html] (дата обращения: 12.02.2013).

76. ГОСТ Р 52577–2006. Дороги автомобильные общего пользования. Методы определения параметров геометрических элементов автомобильных дорог. – Введ. 2007–01–01. – М. : Стандартинформ, 2006.