Н. Г. Гринчар, П. В. Шепелина

ЗЕМЛЕРОЙНО-ТРАНСПОРТНЫЕ МАШИНЫ






«Инфра-Инженерия»

УДК 621.87
ББК 38.623
Г85

Рецензент:
кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъёмно-транспортные системы»
Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана
(Научно-исследовательский университет) *Кузнецов Андрей Алексеевич*

Гринчар, Н. Г.

Г85 Землеройно-транспортные машины : учебное пособие / Н. Г. Гринчар, П. В. Шепелина. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 312 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-1884-3

Рассмотрены четыре основных типа землеройно-транспортных машин, применяемых при строительстве автомобильных и железных дорог, а также в коммунальном хозяйстве – бульдозеры, скреперы, автогрейдеры и рыхлители. Приведены основы теории проектирования данных типов машин, их конструкции и методы расчета основных параметров, а также некоторые вопросы, связанные с практическим их применением.

Для студентов вузов и колледжей по направлениям обучения «Наземные транспортно-технологические комплексы», «Наземные транспортно-технологические средства», а также инженерно-технических работников машиностроительных отраслей, занимающихся разработкой, исследованием, проектированием и эксплуатацией такого типа машин.

УДК 621.87
ББК 38.623

ISBN 978-5-9729-1884-3

© Гринчар Н. Г., Шепелина П. В., 2024
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2024
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГРУНТАХ 8
1.1. Основные физико-механические свойства грунтов 8
1.2. Общие сведения о мерзлых грунтах 19
1.3. Классификация грунтов по трудности разработки и методы определения их в полевых условиях 27
2. БУЛЬДОЗЕРЫ 37
2.1. Конструкции бульдозеров 37
2.1.1. Назначение и классификация 37
2.1.2. Основные конструктивные особенности 39
2.1.3. Конструктивные особенности гусеничных тракторов 51
2.2. Основы расчета бульдозерного оборудования 63
2.2.1. Определение основных конструктивных параметров 63
2.2.2. Определение сопротивлений при работе бульдозера 71
2.2.3. Определение нагрузок на бульдозерное оборудование 76
2.2.4. Устойчивость бульдозера 79
2.3. Повышение эффективности разработки грунтов машинами с отвальными рабочими органами 82
2.3.1. Оборудование бульдозеров отвалами с перекосом и выступающим средним ножом 82
2.3.2. Оснащение бульдозеров отвалами адаптируемого типа 89
2.3.3. Сдвоенная работа бульдозеров и оснащение их отвалами с двухножевой системой копания 92
2.3.4. Бульдозерное оборудование многоцелевого назначения 103
2.4. Эксплуатация бульдозеров 108
2.4.1. Производительность бульдозеров 108
2.4.2. Технология производства бульдозерных работ 111
2.4.3. Основные правила эксплуатации, технического обслуживания и ремонта бульдозеров 118
2.4.4. Особенности эксплуатации машин в экстремальных климатических условиях 124
3. СКРЕПЕРЫ 129
3.1. Общие сведения о самоходных скреперах 129
3.1.1. Классификация и конструктивные схемы 129
3.1.2. Основные параметры скреперов 136
3.2. Технико-эксплуатационные характеристики самоходных скреперов 139
3.2.1. Условия эксплуатации самоходных скреперов 139
3.2.2. Эксплуатационная производительность скреперов 142
3.3. Тяговый расчет самоходных скреперов 149
3.3.1. Тяговый расчет самоходных колёсных скреперов 149
3.3.2. Тяговый расчет скреперов с элеваторной загрузкой 156
3.4. Нагрузки, действующие на скрепер 162
3.4.1. Нагруженность скрепера в разных режимах 162

3.4.2. Общая схема сил, действующих на скрепер 168
3.4.3. Выбор расчетных положений 178
3.4.4. Оценка устойчивости самоходного скрепера 181
3.4.5. Определение усилий в механизме подъема заслонки и в механизме разгрузки ковша скрепера 186
3.5. Разработка грунта скреперами 189
4. АВТОГРЕЙДЕРЫ 193
4.1. Назначение, конструкция и основные параметры автогрейдеров 193
4.1.1. Основные конструктивные узлы автогрейдеров 193
4.1.2. Основные параметры автогрейдеров 202
4.1.3. Тяговый расчет автогрейдера 207
4.1.4. Силы, действующие на автогрейдер 213
4.1.5. Поперечная устойчивость автогрейдера 216
4.2. Расчет механизмов автогрейдеров 218
4.2.1. Механизм подъема отвала 218
4.2.2. Механизмы поворота ножа в горизонтальной плоскости 221
4.2.3. Механизм наклона колес автогрейдера 223
4.3. Основные положения общего расчета элементов конструкции автогрейдера на прочность 225
4.3.1. Расчет основной рамы 225
4.3.2. Расчет тяговой рамы 231
4.3.3. Расчет ходового оборудования 234
4.4. Эксплуатация и применение автогрейдеров 236
4.4.1. Производительность автогрейдера 236
4.4.2. Основные работы с применением автогрейдеров 237
4.4.3. Устройство и отделка насыпей и выемок 241
5. РЫХЛИТЕЛИ 248
5.1. Назначение и классификация 248
5.2. Конструкция отечественных рыхлителей 251
5.3. Конструктивные особенности зарубежных рыхлителей 264
5.4. Основные направления развития и совершенствования рыхлителей 271
5.5. Выбор основных параметров рыхлителей 296
5.6. Расчет рыхлительного оборудования 302
ЛИТЕРАТУРА 308

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГРУНТАХ

1.1. Основные физико-механические свойства грунтов

При выполнении земляных работ объектом разработки являются грунты, к которым относят любые горные породы или почвы, слагающие верхние слои земной коры, а также твердые отходы производственной и хозяйственной деятельности человека, используемые в строительно-технических целях.

Грунты представляют собой сложные многокомпонентные среды, трудность разработки которых землеройными машинами зависит в первую очередь от характера структурных связей, происхождения, условий образования, гранулометрического состава, пластичности, структуры, текстуры, наличия влаги, льда, газов, солей. По совокупности основных свойств и физическому состоянию грунты дифференцируют на скальные – с жесткими кристаллизационными или цементационными связями и нескальные – без жестких структурных связей.

Грунты являются сложными дисперсными телами, состоящими при положительной температуре из трех или двух фаз: твердой, жидкой и газообразной или твердой и жидкой. Грунты, состоящие из твердой и газообразной фаз, в природных условиях встречаются редко. При отрицательной температуре в состав грунта входят не только минеральные зерна, вода и газы, а также и лед.

Свойства каждой из фаз, количественные соотношения и взаимодействие между ними определяют специфическую физическую и химическую природу грунтов и их строительные свойства.

Для оценки фазового состава грунтов применяются характеристики, которыми выражают количественные отношения между объемами твердых минеральных частиц, воды и газа.

К скальным относят магматические, метаморфические, осадочные сцементированные, а также искусственные грунты, закреплённые цементными растворами, битумами, жидкими силикатами и т. п.

К нескальным относят: песок, супесь, суглинок, глину, лесс (без примесей и с примесями щебня, гальки, гравия или строительного мусора); грунты растительного слоя, черноземы и торфяные грунты (органогенные породы, представляющие собой скопление остатков растений, подвергшихся неполному разложению в условиях избыточной влажности и затрудненного доступа воздуха); солончаки и солонцы (грунты, содержащие растворы солей); гравийно-галечные, щебенистые грунты, а также шлаки.

Глины обладают большой связностью, плотностью и пластичностью. Практически водонепроницаемы.

Глины, суглинки и супеси относятся к группе глинистых грунтов.

Супесь, суглинок и глину относят к глинистым грунтам, которые характеризуются содержанием более 3 % глинистых частиц; размером до 0,005 мм. Пески характеризуются преобладанием частиц размером 0,05–2 мм (количество глинистых частиц в них не превышает 3 %). Для лесса характерно высокое (более 50 %) содержание пылеватых частиц размером 0,05–0,005 мм и небольшое количество глинистых частиц. В составе щебенистых или гравийно-галечных

грунтов преобладают соответственно угловатые или окатанные обломки горных пород размером 4–20 мм.

В зависимости от температуры и наличия льда грунты подразделяют на немерзлые, морозные (охлажденные) и мерзлые. Немерзлые – не содержат лед и имеют положительную температуру; морозные – не содержат лед при отрицательной температуре. В них отсутствуют льдоцементные связи. Мерзлые грунты имеют отрицательную или нулевую температуру и содержат лед, цементирующий минеральные частицы. По продолжительности непрерывного пребывания в мерзлом состоянии их делят на кратковременно-мерзлые (часы, сутки), сезонно-мерзлые (месяцы), перелетки (от одного до двух лет) и многолетнемерзлые (от трех лет и выше).

Прочностные характеристики грунтов во многом зависят от состава грунта, т. е. от относительного содержания в нем частиц различной крупности, а также от плотности и влажности (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Характеристики грунтов

Название грунта	Содержание фракций по весу в %		
	песчаных с частицами диаметром от 2,0 до 0,05 мм	пылеватых с частицами диаметром от 0,05 до 0,005 мм	глинистых с частицами диаметром менее 0,005 мм
Песчаный	–	< 15	< 3
Песчаный пылеватый	–	15–20	< 3
Супесчаный	Больше 50 % (частицы диаметром от 2,0 до 0,25 мм)	Меньше, чем песчаный	3–12
Супесчаный мелкий	Меньше 50 % (частицы диаметром от 2,0 до 0,25 мм)	То же	3–12
Пылеватый	–	Больше, чем песчаных	< 12
Суглинистый	Больше, чем пылеватых	–	12–18
Тяжелый суглинистый	То же	–	18–25
Суглинистый пылеватый	–	Больше, чем песчаных	12–25
Глинистый	–	–	> 25

Супесчаные мелкие грунты содержат большое количество пылеватых частиц, что делает их неустойчивыми в увлажненном состоянии. Эти грунты малопластичны и при увлажнении легко деформируются.

Пылеватые грунты при увлажнении переходят в состояние плывунов и резко снижают сопротивление нагрузкам. Легко размываются водой, склонны к пучинообразованию.

Суглинистые грунты пластичны, обладают большой связностью в сухом состоянии, но быстро теряют ее при увлажнении.

Тяжелые суглинистые грунты. Свойства связности, пластичности, сжимаемости и низкой водопроницаемости выражены сильнее, чем у суглинистых грунтов.

В природных условиях грунты могут иметь различное физическое состояние: песчаные – от плотного до весьма рыхлого, глинистые – от твердого до текучего.

Для оценки грунтов, как среды для земляных работ, необходимо знать их свойства и состояние.

Пористостью грунтов называется объем пор (занятых водой и воздухом), выраженный в процентах от общего объема грунта:

$$n = \left[1 - \frac{\gamma_г}{\Delta(1+0{,}01\omega)}\right] 100 = \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} 100\ \%,$$

где Δ – удельный вес твердых частиц в Г/см^3;

$\gamma_г$ – объемный вес влажного грунта в Г/см^3;

ω – весовая влажность в %;

ε – коэффициент пористости.

Коэффициент пористости – отношение объема пор (занятых водой и воздухом) к объему твердых частиц грунта:

$$\varepsilon = \frac{n}{100-n} = \frac{\Delta(1+0{,}01\omega)}{\gamma_г} - 1.$$

Весовая влажность – отношение веса воды g_2 к весу сухого грунта g_1:

$$\omega = \frac{g_2}{g_1} 100\ \%.$$

Объемный вес – отношение веса грунта при естественной влажности g_0 к его объему V:

$$\gamma_г = \frac{g_0}{V}.$$

Объемный вес грунтов обычно колеблется в пределах 1,5–2,0 т/м^3 в зависимости от минералогического состава, пористости и влажности. Объемный вес оказывает существенное влияние на затрату энергии при подъеме и транспортировании грунта.

Объемный вес скелета грунта:

$$\delta_0 = \frac{\gamma_г}{1+\frac{\omega}{100}}.$$

Объемным весом скелета обычно пользуются при определении степени уплотнения грунта.

Наибольшая плотность грунта, полученная методом стандартного уплотнения, называется максимальной стандартной плотностью δ_{max}, а соответствующая ей влажность – оптимальной влажностью $\omega_{опт}$.

Оптимальная влажность – это влажность, при которой максимальная плотность грунта может быть достигнута при наименьшей затрате механической работы.

Удельным весом грунта А называется отношение веса твердых частиц грунта к объему вытесненной ими жидкости. Удельный вес большинства минералов, входящих в состав грунта, колеблется от 2,4 до 2,8 т/м^3, удельный вес железосодержащих минералов достигает 4,0 т/м^3, а органических веществ 1,2–1,4 т/м^3.

Пластичностью называют способность грунта под действием внешних сил изменять свою форму без изменения объема. Глинистые грунты находятся в пластичном состоянии в пределах влажностей, характеризующих границу раскатывания и границу текучести. Границей раскатывания (пределом пластичности) ω_p называют весовую влажность (в процентах), при которой тесто, изготовленное из грунта и воды и раскатываемое в жгут толщиной 3 мм, начинает крошиться.

Границей (пределом) текучести ω_m называют весовую влажность теста, изготовленного из грунта и воды, при которой стандартный прибор – «балансирный конус» погружается под действием собственного веса 76 Г за 5 сек на глубину 10 мм. Угол конуса при вершине равен 30°.

Числом пластичности ω_n называют разность между границей текучести и границей раскатывания:

$$\omega_n = \omega_m - \omega_p$$

По числу пластичности грунты подразделяются следующим образом: супесь – 1–7; суглинок – 7–17; глина – более 17.

Консистенция связных грунтов в зависимости от содержания воды может меняться в значительных пределах – от текучей до твердой.

Количественное выражение консистенции глинистых грунтов определяется показателем консистенции:

$$B = \frac{\omega_e - \omega_p}{\omega_n}.$$

Таблица 1.2

Значения показателя В для глинистых грунтов

Консистенция грунта	***B***
Твердая	Менее 0
Полутвердая	0–0,25
Тугопластичная	0–0,50
Мягкопластичная	0,5–0,75
Текучепластичная	0,75–1,00
Текучая	Более 1,00

Консистенция глинистых грунтов может определяется также по пределу прочности цилиндрического образца (Н/см^2) при сжатии его вдоль оси до раздавливания.

Таблица 1.3

Предел прочности цилиндрического образца грунта

Консистенция грунта	**Предел прочности цилиндрического образца грунта, Н/см^2**
Очень мягкая	2,5
Мягкая	2,5–5,0
Среднежесткая	5,0–10,0
Жесткая	10,0–20,0
Очень жесткая	20,0–40,0
Чрезвычайно жесткая	Более 40,0

Липкость – способность грунта прилипать к различным предметам – свойственна большинству пластичных грунтов при достаточной влажности и малом содержании песка, т. е. для супеси, суглинков и глин.

Усилие, затрачиваемое при резании грунта на преодоление налипания грунта на режущий орган (сила налипания), определяется как:

$$P_л = p_л F,$$

где $p_л$ – удельное налипание, для глин $p_л$ = 7000–8000 Н/м^2 и для суглинков $p_л$ – 5000–7000 Н/м^2;

F – площадь поверхности соприкосновения рабочего органа машины с грунтом в м^2.

Водопроницаемостью называют способность грунта пропускать воду (дренировать). Водопроницаемость зависит от гранулометрического состава и объема пустот.

Разрыхляемостью называют способность грунта увеличиваться в объеме при разработке. При разрыхлении уменьшается объемный вес грунта. Коэффициент разрыхления $k_р$ характеризует отношение объема разрыхленного грунта к объему, который он занимал в естественном залегании. С течением времени разрыхленный грунт уплотняется, но сохраняет некоторую остаточную разрыхленность.

Средние значения коэффициента разрыхления $k_р$ колеблются в пределах 1,08–1,32, а коэффициент остаточного разрыхления – в пределах 1,01–1,09. Большие значения относятся к тяжелым грунтам. Коэффициенты разрыхления мерзлого грунта примерно соответствуют коэффициентам разрыхления взорванных скальных пород и колеблются в пределах 1,5–1,6. Чем больше при разрушении грунта размеры отдельных его кусков, тем меньше коэффициент $k_р$. Поэтому величина его уменьшается с увеличением рабочего органа машины и зависит от типа грунторазрабатывающего органа.

Сопротивление грунта сдвигу. В расчетах землеройных машин и их рабочих органов используют коэффициент внутреннего трения грунта $\varphi_2 = tg\ \varphi_2$ и коэффициент сцепления грунта С, обусловливающие сопротивляемость грунтов сдвигу.

Связность грунта зависит главным образом от его гранулометрического состава, влажности и плотности. В песках, даже влажных, связность проявляется в незначительной степени, и поэтому эти грунты относят к несвязным. Супеси

можно отнести к малосвязным грунтам. Связность особенно становится заметной у суглинков и глин, поэтому последние относят к грунтам связным.

В основу сопротивления грунтов сдвигу положен закон Кулона о прямолинейной зависимости предельного сопротивления грунта сдвигу τ от нормальных напряжений:

$$\tau = \sigma\, tg\varphi_2 + C = \sigma\, \varphi_2 + C,$$

где φ_2 – коэффициент внутреннего трения;

C – коэффициент сцепления грунта при сдвиге в Н/см^2;

σ – нормальные напряжения в Н/см^2.

Для грунтов, не обладающих сцеплением $C = O$ (например, сухие пески), указанная формула принимает вид:

$$\tau = \sigma\, \varphi_2.$$

Внутреннее трение грунтов характеризуется величиной угла внутреннего трения φ_2, тангенс которого равен коэффициенту внутреннего трения $tg\, \varphi_2 = \mu_2$.

Сопротивляемость грунта сдвигу зависит от скорости сдвига.

Для суглинистых грунтов угол внутреннего трения зависит от влажности и уменьшается с ее увеличением. Как показано на рис. 1.1, увеличение влажности более 10–12 % приводит к резкому уменьшению угла внутреннего трения. Сцепление грунта при одной и той же влажности повышается с повышением плотности, а при одинаковой плотности понижается с увеличением влажности (рис. 1.2).

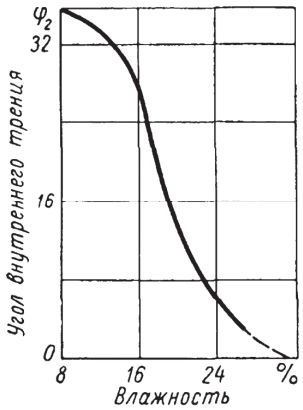


Рис. 1.1. Зависимость угла внутреннего трения от влажности

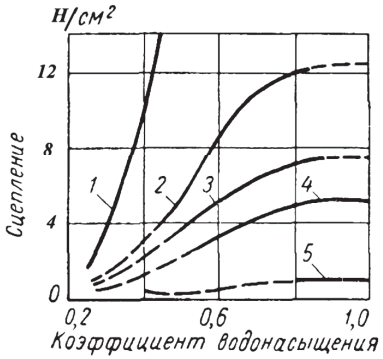


Рис. 1.2. Зависимость сцепления от коэффициента водонасыщения (степени уплотнения) и влажности: *1* – ω = 8,9 %; *2* – ω = 13,7; *3* – ω = 15,9; *4* – ω = 19,2; *5* – ω = 25,8 %

Предел уплотнения грунта при данной влажности в условиях механизированного уплотнения на производстве практически наступает при коэффициенте водонасыщения, равном единице. Коэффициент водонасыщения характеризует степень заполнения пор грунта водой.

Свойства грунтов в большей степени зависят от их состава и состояния.

Ориентировочные значения угла внутреннего трения φ_2 и коэффициента сцепления С для песчаных грунтов в зависимости от их плотности приведены в табл. 1.4, для глинистых грунтов – от их консистенции – в табл. 1.5, для растительных грунтов – от их влажности – в табл. 1.6. Объемный вес $\gamma_г$ принят в водонасыщенном состоянии.

Таблица 1.4

Характеристика песчаных грунтов в зависимости от их плотности

Грунт	**Вид грунта**			
	Средней плотности	**Плотный**	**Средней плотности**	**Плотный**
	$\gamma_г$ в т/м^3		**φ_2 в град**	
Мелкозернистый	1,92	2,0	27	30
Среднезернистый	1,94	2,0	28	32
Крупнозернистый	1,98	2,05	29	33
С гравием и галькой	2,0	2,10	30	35

Таблица 1.5

Характеристика глинистых грунтов в зависимости от их консистенции

Консистенция грунта	Глина			Суглинок			Супесь		
	$\gamma_г$ в Т/м^3	φ_2 в град	С в Н/см^2	$\gamma_г$ в Т/м^3	φ_2 в град	С в Н/см^2	$\gamma_г$ в Т/м^3	φ_2 в град	С в Н/см^2
Твердая	2,15	22	10,0	2,15	25	6,0	2,05	28	2,0
Полутвердая	210	20	6,0	2,10	23	4,0	2,00	26	1,5
Тугопластичная	205	18	4,0	2,00	21	2,5	1,95	24	1,0
Мягкопластичная	1,95	14	2,0	1,90	17	1,5	1,90	20	0,5
Текучепластичная	1,90	8	1,0	1,85	13	1,0	1,85	18	0,2
Текучая	1,80	6	0,5	1,80	10	0,5	1,80	14	0,0

Таблица 1.6

Характеристика растительного грунта в зависимости от их влажности

Состояние грунта	γ_2 в Т/м^3	φ_2 в град	С в Н/см^г
Мокрый	1,7	28–30	0,1
Влажный	1,6	30–45	0,5
Сухой	1,2–1,5	28–35	5,0

Угол естественного откоса. При отсыпке с некоторой высоты разрыхленный грунт откладывается в виде конуса. Угол у основания конуса называется углом естественного откоса φ_0.

Угол естественного откоса зависит от вида грунта и его влажности и обусловливается углом внутреннего трения φ_2 и коэффициентом сцепления C.

На откосе с углом φ_0 частица будет в равновесии, если:

$$G_ч \sin \varphi_0 \leq \mu 2 C_ч \cos \varphi_0 + CF,$$

где $G_ч$ – вес частицы грунта в кГ/см^3;

F – площадь соприкосновения частицы грунта с плоскостью откоса в см^2.

Устойчивость откоса обеспечена при нарушении сцепления, если:

$$\mu_2 = tg\, \varphi_2 \geq tg\, \varphi_2.$$

Если разрыхленный грунт лежит на горизонтальной плоскости, совершающей вертикальные колебания, то угол его естественного откоса будет меньше, чем на плоскости, находящейся в состоянии покоя. Этот угол в инженерной практике носит название угла естественного откоса в движении. Некоторые значения углов естественного откоса в покое приведены в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Углы естественного откоса насыпных грунтов в град

Грунт	Состояние грунта			Грунт	Состояние грунта		
	сухой	влажный	мокрый		сухой	влажный	мокрый
Гравий	40	40	35	Мелкий песок	25	30	20
Галька	35	45	25	Жирная глина	45	35	15
Крупный песок	30	32	27	Суглинок,	50	40	30
Песок средней	28	35	25	тощая глина			
крупности				Легкий суглинок	40	30	20
				Растительный грунт	40	35	25

Коэффициент трения грунта о сталь μ_1 зависит от вида и состояния грунта, а также от поверхности стали. Величина его колеблется от 0,25 до 1, увеличиваясь при неровной поверхности стали, и зависит от влажности грунта, нормального давления на грунт и характера сложения грунта (нарушенное, ненарушенное).

Коэффициент трения стали по грунтам нарушенной структуры, составляет приблизительно 2/3 величины коэффициента трения по грунтам ненарушенной структуры.

Влажность грунта является наиболее существенным фактором, влияющим на коэффициент трения. При изменении влажности от воздушно-сухого состояния до максимальной капиллярной влагоемкости коэффициент трения о сталь может уменьшиться в 2 раза и более.

Коэффициент трения грунта о сталь в зависимости от влажности:

$$\varphi_1 = f_0 \frac{ln\omega}{A},$$

где ω – влажность грунта в %;

f_0 и A – постоянные параметры: для суглинка $f_0 = 1{,}01$, $A = 4{,}08$;

для глины $f_0 = 0{,}95$, $A = 5{,}33$.

Между коэффициентами внутреннего трения μ_2 и коэффициентом трения грунта о сталь μ_1 имеется примерная зависимость:

$\mu_1 = 0{,}75\ \mu_2$, т. е. $tg\varphi_1 = 0{,}75 tg\ \varphi_2$.

Коэффициентом бокового расширения μ_3 называется отношение относительной деформации бокового расширения к относительной деформации сжатия образца.

Если сжимать грунт в условиях невозможности бокового расширения, например в сосуде с жесткими стенками, сжимающая

сила, уплотняя грунт, вызывает давление грунта на боковые стенки, ограничивающие расширение грунта.

Увеличение сжимающего давления вызывает ответное увеличение бокового давления; отношение приращения бокового давления dq к приращению сжимающих давлений dp характеризуется коэффициентом бокового давления ξ, т. е.:

$$\xi = \frac{dq}{dp}.$$

Коэффициент бокового давления можно рассматривать как относительно постоянную характеристику грунта.

Коэффициент бокового давления ξ связан с коэффициентом бокового расширения грунта μ_3.

$$\mu_3 = \frac{\xi}{1+\xi}.$$

Значения коэффициентов бокового давления ξ и коэффициентов бокового расширения μ_3 для типичных грунтов приведены в табл. 1.8.

Таблица 1.8

Значения коэффициентов ζ и μ_3

Грунт	**Состояние грунта**					
	Сухой		**Влажный**		**Насыщенный**	
	ζ	μ_3	ζ	μ_3	ζ	μ_3
Пески	0,4	0,29	0,45	0,31	0,45	0,31
Суглинки	0,5	0,33	0.55	0,37	0.60	0,38
Глины	0,6	0,38	0,7	0,41	0,7	0,41

Коэффициент бокового давления увеличивается с возрастанием коэффициента трения насыпного грунта о стенки, например, ковша землеройной машины при копании. В предельном случае, когда коэффициент трения о стенки равен коэффициенту внутреннего трения $\mu_1 = \mu_2$, коэффициент бокового давления:

$$\xi = \frac{1}{1+2\varphi_2}.$$

Модуль деформации грунта аналогичен модулю упругости однородных тел (металла и др.), однако между ними имеются и существенные различия, которые заключаются в следующем:

1) модуль деформации грунта определяется по общей деформации (обратимой и необратимой);

2) модуль деформации одного и того же грунта изменяется при колебании влажности и плотности грунта;

3) поскольку деформация грунтов имеет нелинейный характер, модуль деформации может характеризовать грунт в малых интервалах напряжений.

Несмотря на указанные выше условности, считают, что кривая сопротивления грунта вдавливанию штампа при определении модуля деформации является основной характеристикой прочности грунта при расчетах толщины дорожных одежд.

Модуль деформации грунта *E* принято определять по кривой сопротивления грунта вдавливанию цилиндрического штампа:

Модуль деформации грунта аналогичен модулю упругости однородных тел (металла и др.), однако между ними имеются и существенные различия, которые заключаются в следующем:

4) модуль деформации грунта определяется по общей деформации (обратимой и необратимой);

5) модуль деформации одного и того же грунта изменяется при колебании влажности и плотности грунта;

6) поскольку деформация грунтов имеет нелинейный характер, модуль деформации может характеризовать грунт в малых интервалах напряжений.

Несмотря на указанные выше условности, считают, что кривая сопротивления грунта вдавливанию штампа при определении модуля деформации является основной характеристикой прочности грунта при расчетах толщины дорожных одежд.

Модуль деформации грунта *E* принято определять по кривой сопротивления грунта вдавливанию цилиндрического штампа:

Модуль деформации грунта аналогичен модулю упругости однородных тел (металла и др.), однако между ними имеются и существенные различия, которые заключаются в следующем:

7) модуль деформации грунта определяется по общей деформации (обратимой и необратимой);

8) модуль деформации одного и того же грунта изменяется при колебании влажности и плотности грунта;

9) поскольку деформация грунтов имеет нелинейный характер, модуль деформации может характеризовать грунт в малых интервалах напряжений.

Несмотря на указанные выше условности, считают, что кривая сопротивления грунта вдавливанию штампа при определении модуля деформации является основной характеристикой прочности грунта при расчетах толщины дорожных одежд.

Модуль деформации грунта E принято определять по кривой сопротивления грунта вдавливанию цилиндрического штампа:

$$E = \alpha \frac{\sigma D}{\lambda},$$

где α – поправочный коэффициент, учитывающий форму и жесткость штампа (обычно $\alpha = 1{,}25$);

σ – напряжение по поверхности грунта под штампом в кГ/см^г;

D – диаметр штампа в см;

λ – осадка в см.

Сопротивление грунта вдавливанию определяется коэффициентом сопротивления смятию p_0 – нагрузкой на 1 см^2, под действием которой опорная поверхность погружается на 1 см. Допускаемой нагрузкой $p_д$ считается такая, которая вызывает погружение не более чем на 6–12 см. Величина эта несколько меняется в зависимости от размеров опорных частей, но это изменение меньше степени точности определения указанного коэффициента.

Значения p_0 и $p_д$ приведены в табл. 1.9.

Таблица 1.9

Коэффициенты сопротивления смятию p_0 и допускаемые нагрузки для ходовых частей машин $p_д$

Род и состояние грунтов	**p_0, Н/см^2**	**$p_д$, Н/см^2**
Заболоченный грунт	0,5–1,0	4,0–6,0
Мокрая глина, рыхлый песок, пашня	1,2–1,5	8,0–10,0
Крупный песок, влажная средняя глина	2,0–3,0	20,0–40,0
Средняя глина и плотная глина влажная	3,0–4,5	40,0–60,0
Плотная глина средней влажности, мергель	5,0–6,0	60,0–70,0
и лесс влажные	7,0–11,0	80,0–100
Плотная глина, мергель и лесс сухие	11,0–13,0	110–150

Сопротивление грунта резанию обычно характеризуется удельным сопротивлением чистого резания *(k* в *Н/м^2),* т. е. усилием, отнесенным к единице площади поперечного сечения вырезаемого пласта грунта.

Величина k меняется в больших пределах, так как зависит от режима работы, параметров рабочего органа и следующих параметров грунта: объемного веса, углов внутреннего и внешнего трения, удельной силы сцепления. Перечисленные параметры грунта в основном определяются его гранулометрическим составом, влажностью, плотностью и температурой.

А. Н. Зеленин предложил оценивать принадлежность грунта к той или иной категории по числу ударов Су ударника ДорНИИ (рис. 1.3).

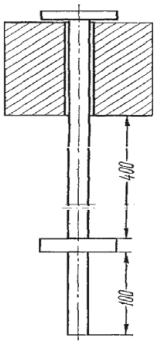


Рис. 1.3. Ударник ДорНИИ

Груз 2,5 кГ падает с высоты 400 мм и ударяется о буртик наконечника, производя за один удар работу, равную 1 кГм. Наконечник сделан в виде цилиндрического стержня высотой (длиной) 100 мм с площадью поперечного сечения, равной 1 см^2. Число ударов С, необходимое для погружения наконечника в грунт, равно 1–30 для немерзлых грунтов и 30–360 для мерзлых, суглинистых и глинистых грунтов в диапазоне температур от –1 до –15°.

1.2. Общие сведения о мерзлых грунтах

Мерзлыми грунтами называют грунты, имеющие отрицательную температуру, в которых хотя бы часть содержащейся воды превратилась в лед, цементирующий частицы грунта. Мерзлые грунты представляют собой много компонентную систему, состоящую из твердой фазы (скелета грунта и льда), жидкой (незамерзающей воды) и газообразной (паров и газов). Они отличаются высокой механической прочностью и абразивностью, что в основном и определяет сложность их разработки.

Многолетнемерзлые (вечномерзлые) грунты покрывают на земном шаре 25 % суши. Грунты сезонно-мерзлые характеризуются среднегодовой температурой выше 0 °С и в зимнее время составляют около 90 % территории РФ. Глубина их промерзания достигает в ряде случаев 2,5–3 м.

Физические и механические (деформационные и прочностные) свойства грунтов проявляются при воздействии внешних нагрузок от рабочих органов и движителей машин. Применительно к землеройным машинам практический интерес представляют прочностные свойства грунтов, характеризующие их сопротивление разрушению рабочими органами.

Наиболее полно отражает характеристику грунтов в любом сложном напряженном состоянии так называемый паспорт прочности, представляющий собой график функциональной зависимости касательных и нормальных напряжений, соответствующих прочности данного грунта под действием внешних сил. Такой паспорт прочности получают по результатам прочностных испытаний грунтов при одноосном сжатии и растяжении и испытаний в условиях неравномерного объемного напряженного состояния.

Построение паспортов прочности представляет значительные трудности, поэтому в ряде случаев ограничиваются результатами испытаний по определению пределов прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$, растяжении $\sigma_р$ и сдвиге τ.

Скальные грунты имеют наиболее высокую прочность. Наивысший прочностью при одноосном сжатии обладают нефриты ($\sigma_{сж}$ = 550 МПа), базальты (450 МПа), железистые кварциты (до 320 МПа). Прочность осадочных грунтов не превышает 200 МПа. При одноосном растяжении предел прочности скальных грунтов не превышает 10–15 МПа. Сопротивление то скальных грунтов сдвигу (сцеплению) составляет (0,09–0,15) $\sigma_{сж}$.

Прочность скальных грунтов уменьшается с увеличением размера составляющих частиц и насыщения водой. Существенно уменьшается прочность с увеличением пористости и трещиноватости.

Сопротивляемость скальных грунтов разрушению зависит от увеличения скорости нагружения: чем слабее грунт, тем относительно больший прирост прочности.

Нескальные грунты в немерзлом состоянии имеют существенно меньшую прочность. В общем случае они представляют собой трехфазную среду из воды, воздуха и частиц грунта (грунтового скелета). Прочность этих грунтов определяется структурными связями между частицами и зависит от плотности, степени водонасыщения, формы частиц и химико-минералогического состава. При одноосном сжатии прочность высушенных глинистых грунтов может быть высокой ($\sigma_{сж}$ = 3–30 МПа). С ростом влажности и уменьшением плотности прочность резко снижается и становится близкой к нулю. С увеличением дисперсности прочность глинистых грунтов в немерзлом состоянии, как правило, возрастает.

Прочность глин на разрыв существенно меньше 0,1 МПа. С ростом крупности частиц грунта прочность на разрыв снижается. Наибольшая прочность сдвигу наблюдается у переуплотненных сцементированных глинистых грунтов.

На сопротивление сдвигу нескальных грунтов существенное влияние оказывает также длительность времени разрушения. Кратковременная прочность глинистых грунтов при сдвиге на 15 % выше длительной прочности. Кратковременная прочность одноосному сжатию выше длительной на 24 %.

Мерзлые грунты имеют существенно более высокую прочность, чем немерзлые, вследствие цементирующего воздействия льда. Лед, являясь основным компонентом, обусловливает особенности мёрзлого грунта.

Согласно современным представлениям, мерзлый грунт рассматривают как упругопластично-вязкую среду, прочностные характеристики которой в первую очередь зависят от температуры, влажности, гранулометрического состава.

Вязкие свойства обусловлены перемещением во времени минеральных частиц, течением кристаллов льда и пленок незамерзшей воды. Наличие у мерзлых грунтов вязких свойств не позволяет однозначно использовать для землеройных машин имеющиеся литературные данные по прочности, полученные для оценки их свойств применительно к сооружению оснований и фундаментов.

При разработке твердомерзлых грунтов рыхлителями время отделения элементов стружки составляет, как правило, менее 1 с. В этом интервале нагружения

свойства мерзлого грунта претерпевают существенные изменения: предел прочности в 5–15 раз превышает предел длительной прочности, увеличивается хрупкость и склонность к разрушению от растягивающих напряжений.

Во ВНИИстройдормаше был проведен комплекс исследований кратковременной прочности мерзлых грунтов в зависимости от относительной скорости деформирования (v = 0,01 ч÷10 с$^{-1}$), температуры, влажности и гранулометрического состава применительно к работе рыхлителей с учетом кратковременности и динамичности воздействия рабочего органа.

Установлено, что при повышении скорости деформирования (уменьшении времени нагружения) увеличивается сопротивление мерзлых грунтов сжатию и растяжению, причем в большей мере глинистых грунтов (рис. 1.4). Одновременно существенно изменяется характер разрушения образцов от пластического к ярко выраженному – хрупкому (рис. 1.5).

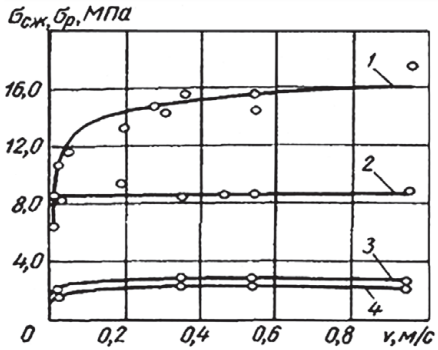


Рис. 1.4. Зависимость сопротивления мёрзлого суглинка (влажность ω = 21,2 %) и песка (влажность ω = 15–18 %) температурой –10 °С одноосному сжатию и растяжению от скорости деформирования:
1, *2* – сжатие; *3*, *4* – растяжение суглинка и песка, соответственно

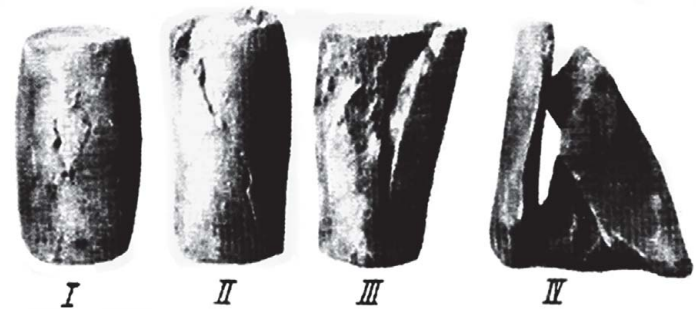


Рис. 1.5. Виды разрушения мерзлой супеси влажностью 11 % температурой – (2 ± 0,5) °С при скоростях, см/с, деформирования:
I–IV – соответственно 0,15; 1,0; 3,8; 95,2

Нагружение с большими скоростями сопровождается разрушением образцов глинистых грунтов с деформированием столбчатых призм в направлении действия усилия, характерный; для продольного разрыва хрупких материалов.

Значительное качественное изменение разрушения образцов от пластического к хрупкому отражается и на характере диаграммы разрушения: с увеличением скорости деформирования возрастает предел пропорциональности, и при хрупком разрушении он совпадает с пределом прочности (рис. 1.6). При одноосном растяжении во всех случаях разрыв происходит хрупко, без заметных пластических деформаций и сохраняется прямая пропорциональная зависимость относительной деформации и напряжения. Результаты испытаний приведены в табл. 1.10.

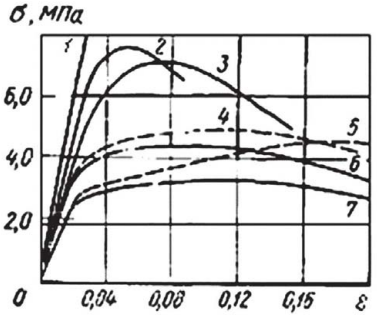


Рис. 1.6. Диаграммы сжатия при скорости деформирования:
1–3 – 38,1; 11,1; 7 см/с; *4*, *6* – при 0,72 см/с; *5*, *7* – при 0,15 см/с;
1 – хрупкое разрушение; *2*, *3*, *4* – упругопластическое разрушение;
5 – пластическое деформирование; *6* и *7* – то же, что *4* и *5*,
с учетом поперечной деформации образца

Одним из основных факторов, влияющих на прочность мерзлого грунта, как при кратковременном, так и при длительном действии нагрузки, является отрицательная температура (рис. 1.7).

При понижениях температуры грунта от 0 до –20 °С – наиболее типичной, для работы рыхлителей, наблюдается увеличение прочностных характеристик грунта с уменьшающейся интенсивностью. Наиболее резко сопротивление разрушению повышается в момент перехода грунта из немерзлого состояния в пластично-мерзлое (переходное состояние от немерзлого грунта к твердомерзлому). Пластично-мерзлые грунты обладают повышенной вязкостью, липкостью и вследствие этого их трудно разрабатывать.

Большое влияние на прочность мерзлых грунтов оказывает влажность, за критерий оценки которой принята весовая влажность (отношение массы – воды к массе сухого грунта). В зависимости от вида напряженно-деформированного состояния и скорости деформирования кратковременная сопротивляемость мерзлых грунтов при увеличении влажности изменяется по-разному.

Таблица 1.10

Предел кратковременной прочности (МПа) при сжатии $\sigma_{сж}$ и растяжении $\sigma_р$, сцепление τ_0 и угол внутреннего трения $\rho_т$ (градус) мерзлого грунта

Мерзлый грунт	влажность, %	Температура грунта, °С.											
		–1				–5				–10			
		$\sigma_{сж}$	$\sigma_р$	τ_0	$\rho_т$	$\sigma_{сж}$	$\sigma_р$	τ_0	$\rho_т$	$\sigma_{сж}$	$\sigma_р$	τ_0	$\rho_т$
Песок	5	1,25	0,12*	0,19	56	2,23	0,40	0,47	44	3,01	0,59	0,67	42
	10	1,96	0,32*	0,40	46	3,38	0,66	0,75	42	5,05	0,93	1,08	43
	15	3,4	0,44*	0,61	50	5,44	1,01	1,17	43	6,88	1,34	1,52	42
	18-20	5,21	0,62	0,90	51	9,19	1,34	1,76	48	10,87	1,66	2,12	47
Супесь $W_П = 6,55$	5	1,36	0,20	0,26	48	2,49	0,31	0,44	51	2,89	0,49	0,60	45
	10	3,22	0,62*	0,71	43	6,64	0,92	1,24	50	7,49	1,06	1,41	49
	17	5,19	0,77	1,01	48	11,36	1,52*	2,06	50	13,58	2,23	2,75	46
Суглинок	20	2,55	0,87	0,75	29	7,84	1,92	1,94	37	10,57	2,09	2,35	42
	30	4,18	1,23	1,13	33	8,13	2,16	2,10	35	12,13	2,23	2,60	44
	41	5,58	1,15	1,27	41	10,03	2,26	2,38	39	13,31	2,40	2,83	44
	70	6,83	0,94	1,27	49	12,09	1,60	2,20	50	14,37	2,06	2,72	49
Глина $W_П = 26,6$	20	2,05	0,55	0,53	35	4,96	1,14	1,19	39	6,41	2,01	1,80	32
	30	2,17	0,84	0,68	27	5,63 8,32	1,55	1,48	35	7,65	2,11	2,01	35
	48	3,81	1,40	1,16	28	10,56	2,16	2,12	36	10,62	2,58	2,62	38
	70	5,45	1,17	1,26	40		1,40	1,92	50	13,20	2,05	2,60	47

*Значения $\sigma_р$ получены при растяжении образцов косвенным методом.

Примечание. $W_П$ – число пластичности.

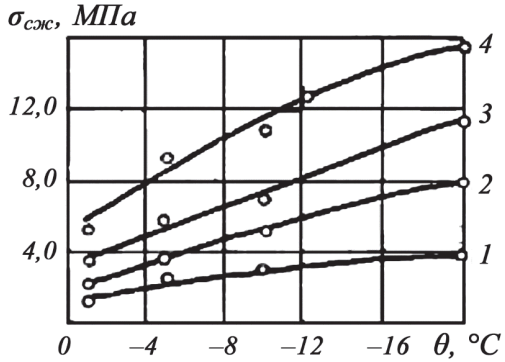


Рис. 1.7. Зависимость кратковременной прочности мерзлого песка от температуры при влажности:
1 – 5 %; *2* – 10 %; *3* – 15 %; *4* – 20 %

Сопротивление кратковременному растяжению мерзлые глинистых грунтов при увеличении влажности вначале возрастает до полной влагоемкости (т. е. влажности, теоретически соответствующей полному заполнению пор водой), а затем уменьшается, приближаясь при сильном переувлажнении к прочности льда (рис. 1.8).

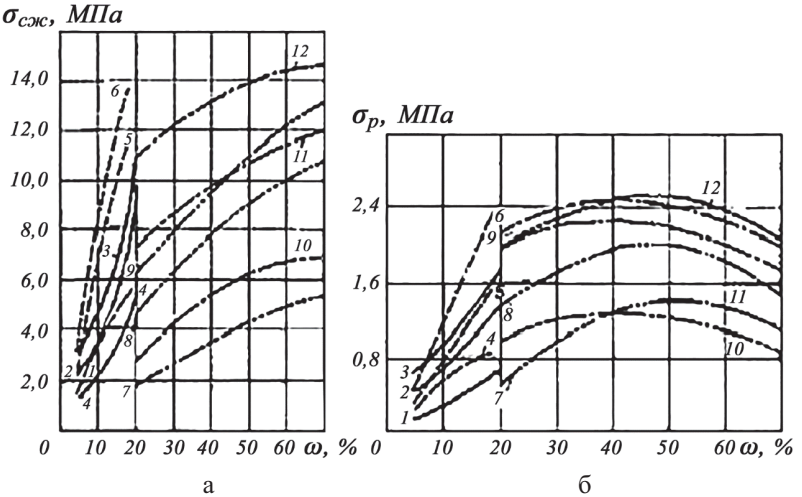
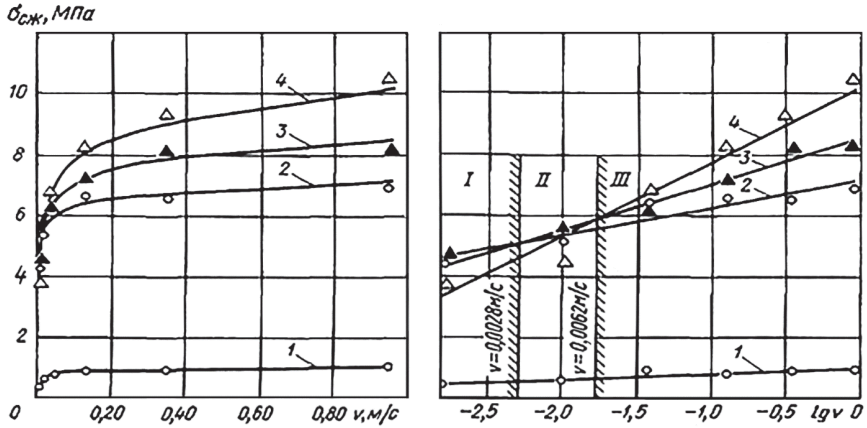


Рис. 1.8. Зависимость кратковременной прочности мерзлых грунтов от влажности:
а – при одноосном сжатии; *б* – при одноосном растяжении;
при температуре –1 °С (кривые *1*, *4*, *7*, *10*); при температуре –5 °С (кривые *2*, *5*, *8*, *11*); при температуре –10 °С (кривые *3*, *6*, *9*, *12*);
1–3 – песок; *4–6* – супесь; *7–9* – глина; *10–12* – суглинок

Для песчаных грунтов с повышением влажности прочность при растяжении непрерывно возрастает, имея наибольшее значение при избыточной влажности. Сопротивление различных мерзлых грунтов кратковременному сжатию при увеличении влажности во всех случаях повышается без проявления ярко выраженного максимума. При одноосном сжатии прочность песчаного грунта при избыточной влажности близка к прочности льда. При повышении влажности сопротивляемость глинистых грунтов одноосному сжатию также непрерывно увеличивается и при влагонасыщении выше полной значительно превышает прочность льда.

Таким образом, зависимость прочности при одноосном сжатии от влажности глинистых грунтов при кратковременном нагружении отличается от зависимости при длительном нагружении.

Последний факт подтвержден специальным экспериментом, выполненным с образцами мерзлой супеси влажностью 5–20 % в интервале относительных скоростей нагружения 0,015–9,5 $с^{-1}$ (рис. 1.9), Полученные графики функции $\sigma_{сж}$ (v) свидетельствуют об изменении соотношения прочности при одноосном сжатии водонасыщенной супеси влажностью 11; 15; 20 %. При переходе от области I ($\sigma_{20} < \sigma_{15} < \sigma_{11}$) к области II ($\sigma_{20} \sim \sigma_{15} \sim \sigma_{11}$) и далее к области III ($\sigma_{20} > \sigma_{15} > \sigma_{11}$) (индекс в обозначении соответствует влажности).



а б

Рис. 1.9. Зависимость прочности мерзлой супеси при одноосном сжатии от скорости деформирования:
а – общие координаты; *б* – полулогарифмические координаты;
1–4 – при влажности 5, 11, 15, 20 %, соответственно

Приведенные данные убедительно показывают, что характер связи $\sigma_{сж}$ (ω) при кратковременном разрушении глинистого грунта не является инвариантным и существенно изменяется с ростом скорости деформирования.

Ветвь спада зависимости при увеличении скорости смещается в область водонасыщенного грунта. В результате смещения максимума эмпирическая линия регрессий $\sigma_{сж}$ (ω) в заданном интервале ω = 5–20 % при больших скоростях деформирования приближается к возрастающей линейной.

Прочность мерзлых грунтов существенно зависит от гранулометрического состава.

Сопротивляемость глинистых грунтов длительным внешним нагрузкам по мере повышения количества высокодисперсных частиц, как правило, меньше, чем сопротивляемость песчаных при одинаковых температуре и степени насыщения пор льдом. При более быстрых деформациях соотношение сопротивлений глинистых грунтов и песчаных при одноосном сжатии изменяется вследствие большего влияния скорости деформации на прочностные показатели глинистых грунтов по сравнению с песчаными.

Полученные значения кратковременной прочности мерзлых грунтов с учетом поперечной деформации образцов позволили уточнить и сравнить прочностные свойства грунтов различного гранулометрического состава. Для сравнительного анализа приняты грунты с коэффициентом водонасыщенности $J = 1$. При этом данные гранулометрического состава приведены к общему показателю – коэффициенту λ, численно равному отношению количества пылеватых и глинистых частиц к общей сумме фракций, меньших 1 мм (рис. 1.7). Наибольшую кратковременную прочность при сжатии имеет супесь. При дальнейшем увеличении количества пылеватых и глинистых частиц прочность снижается, причем в большей мере при температуре –10 и –5 °С и в меньшей – при температуре –1 °С. Прочность наиболее крупнозернистого материала (мерзлого песка) несколько меньше, чем супеси и суглинка, и при соответствующей температуре приближается к прочности льда.

Сравнение кратковременных сопротивлений растяжению мерзлых грунтов в зависимости от гранулометрического состава (см. рис. 1.10, кривые *1*, *2*, *3*) показывает, что увеличение количества дисперсных частиц ведет к повышению прочности при растяжении супеси и еще в большей мере – суглинка и глины по отношению к песку.

Взаимное расположение слагающих элементов мерзлого грунта, т. е. его строение, является одним из основных факторов, влияющих на прочностные характеристики. В процессе промерзания влажные глинистые грунты приобретают криогенное строение, связанное с появлением в них льда не только в виде цемента, но и в виде включений и прослоек. При этом образуется специфическая криогенная текстура, характеризуемая неоднородностью строения и обусловленная взаимным расположением и отношением включений льда и агрегатов минеральных частиц.

Наличие нескольких типов криогенных текстур (массивной, слоистой, сетчатой и корковой) дифференцирует прочностные свойства мёрзлых грунтов и является одной из основных причин их анизотропии.

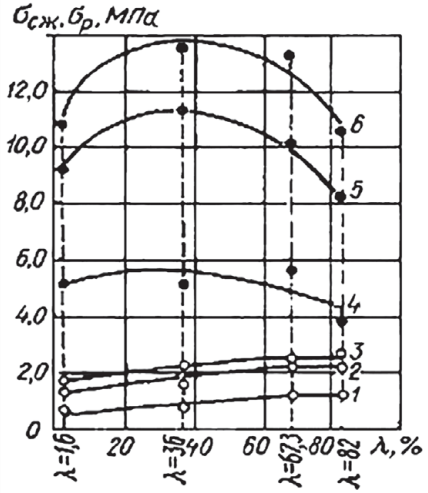


Рис. 1.10. Зависимость кратковременной прочности мерзлых грунтов от гранулометрического состава. При температуре –1 °С (кривые *1*, *4*); при температуре –5 °С (кривые *2*, *5*); при температуре –100 °С (кривые *3*, *6*); *1–3* одноосное растяжение; *4–6* одноосное сжатие

При быстром сдвиге наибольшее сопротивление разрушению в направлении, перпендикулярном прослойкам льда, проявляют грунты сетчатой и слоистой текстуры. Сопротивления грунта сдвигу снижаются при массивной текстуре. Еще меньшее сопротивление грунтов слоистой текстуры при сдвиге вдоль прослоек, если зона сдвига проходит по контакту с ледяными прослойками.

При растяжении характер зависимости прочности слоистых мерзлых грунтов от направления разрушающей нагрузки изменяется. Наибольшую сопротивляемость разрыву проявляют грунты при направлении нагрузки вдоль прослоек льда и наименьшую – при направлении нагрузки поперек прослоек. При сжатии наблюдается обратное явление.

1.3. Классификация грунтов по трудности разработки и методы определения их в полевых условиях

Классификация грунтов по трудности разработки землеройными машинами представляет определенную сложность ввиду значительного многообразия и изменчивости прочностных характеристик. С накоплением фактические данные о свойствах грунтов оказалось возможным классифицировать их по одному характерному показателю – прочности, хорошо коррелирующемуся с сопротивляемостью грунта разрушению рабочими органами землеройных машин.

Одной из наиболее общих явилась классификация горных пород (грунтов) М. М. Протодъяконовым на десять категорий (I–X) по коэффициенту крепости (прочности) – обобщенному показателю их сопротивляемости разрушению (табл. 1.11).

Таблица 1.11

Классификация грунтов по коэффициенту крепости

Категория	Наименование	Степень прочности	Коэфф. крепости (прочности)
I	Наиболее крепкие кварциты и базальты	Высшая	20
II	Гранитные породы, кварцевый порфир, очень крепкий кремнистый сланец, менее крепкие кварциты, крепкие песчаные известняки	Очень крепкие	15
III	Плотный гранит, менее крепкие песчаники и известняки, кварцевые рудные жилы, крепкий конгломерат, очень крепкие железные руды	Крепкие	10
Il Ia	Некрепкий гранит, крепкий мрамор, доломит, колчеданы	»	8
IV	Обыкновенный песчаник, железные руды	Довольно крепкие	6
IVa	Песчаные сланцы, сланцевые песчаники	То же	5
V	Крепкий глинистый сланец, некрепкий песчаник и известняк, мягкий конгломерат	Средние	4
Va	Разнообразные сланцы, плотный мергель	»	3
VI	Мягкий сланец, известняк, мел, гипс, мерзлый грунт, антрацит, обыкновенный мергель, разрушенный песчаник	Довольно мягкие	2
VI a	Щебенистый грунт, разрушенный сланец, слежавшаяся галька и щебень, отвердевшая глина	То же	1,5
VII	Плотная глина, мягкий каменный уголь, глинистый грунт	Мягкие	1
VIII a	Легкая песчанистая глина, лесс, гравий	»	0,8
VIII	Растительная земля, торф, легкий суглинок, сырой песок	Землянистые	0,6
XI	Песок, осыпи, мелкий гравий, насыпанная земля	Сыпучие	0,5
X	Плывуны, болотистый грунт, разжиженные грунты	Плывучие	0,3

Коэффициент крепости является интегральной численной характеристикой прочностных свойств горных пород. За единицу крепости скальных грунтов (I–VI категории) принята прочность кубика породы, имеющего сопротивление одноосному сжатию 10 МПа. Для нескальных грунтов (VIa–X категории) коэффициент прочности определен в виде:

$$f = \left(\frac{\tau_0}{\sigma_{сж}}\right) + tg\rho_т,$$

где угол внутреннего трения ρ_m = 9–60°.

Нескальные грунты, имеющие коэффициент крепости f < 2, относятся к довольно мягким породам. Их разработку осуществляют землеройными машинами: экскаваторами, бульдозерами, скреперами, грейдер-элеваторами без предварительного рыхления.