

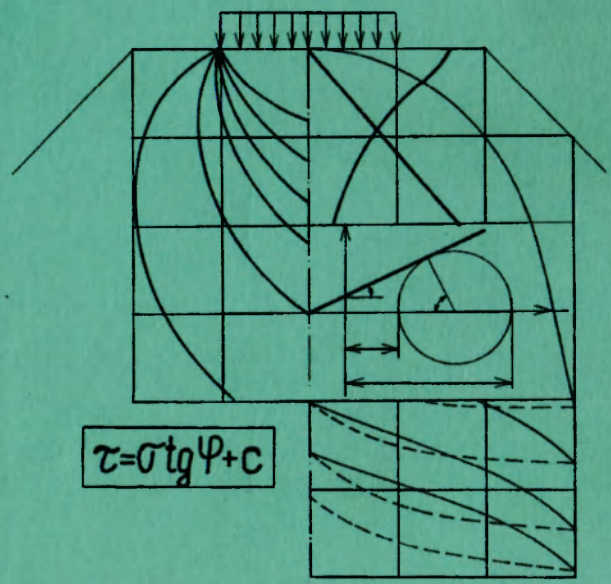
625

2375

Б12 БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

Ю.Г.Бабаскин

ДОРОЖНОЕ ГРУНТОВЕДЕНИЕ  
И МЕХАНИКА  
ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ДОРОГ



Минск 2002

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**Ю.Г.Бабаскин**

**ДОРОЖНОЕ ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА  
ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ДОРОГ**

**Курс лекций**

*Рекомендовано Редакционно-издательским советом  
Белорусского национального технического университета*

**Минск 2002**

УДК 625.731+625.731.2:624.131.4(075.8)

ББК 39.311

Б 12

Рецензенты:

Кафедра «Проектирование дорог» Белорусского национального технического университета; д-р техн. наук, проф. Н.П.Вырко

**Бабаскин Ю.Г.**

Б 12 Дорожное грунтоведение и механика земляного полотна дорог: Курс лекций / Ю.Г.Бабаскин. – Мн.: БНТУ, 2002. – 197 с.

ISBN 985-6529-62-X.

Цель данного издания – оказание методической помощи студентам специальностей J70 03 01 – «Автомобильные дороги», J70 03 02 – «Мосты, транспортные тоннели и метрополитены» при изучении дисциплины «Дорожное грунтоведение и механика земляного полотна дорог». Курс лекций содержит теоретический материал по региональной инженерной геологии, общему и региональному грунтоведению, механике грунтов и технической мелиорации и предполагает последовательное изучение вопросов, начиная от строения земной коры, инженерно-геологических особенностей территории Беларуси, характеристик минералов и основных видов горючих пород, образующих грунты, эндогенных и экзогенных процессов и явлений, влияющих на формирование антропогенного покрова, физических и механических свойств грунтов и заканчивая изучением инженерных задач, связанных с механикой земляного полотна дорог и укреплением грунтов в инженерных целях. Тематика пособия и количество представленных тем соответствуют разработанной учебной программе по дисциплине «Дорожное грунтоведение и механика земляного полотна дорог».

УДК 625.731+625.731.2:624.131.4(075.8)

ББК 39.311

ISBN 985-6529-62-X

© Бабаскин Ю.Г., 2002

## Введение

Представленный материал предназначен для изучения в высших учебных заведениях по специальностям J70 03 01 – «Автомобильные дороги», J70 03 02 – «Мосты, транспортные тоннели и метрополитены».

Основная цель изучаемой дисциплины заключается в ознакомлении с геологическими условиями района возведения сооружения, свойствами и категориями грунтов, особенностями их использования в дорожном и транспортном строительстве, основными вопросами механики грунтов.

Вопросы, связанные с изучением грунтов и рассмотрением их строительных свойств, изложены в определенной последовательности для наилучшего усвоения этой темы студентами.

Прежде чем рассмотреть понятие «грунт», необходимо изучить составляющие компоненты всех горных пород – минералы с их свойствами, структурой и особенностями. Минералы образуют горные породы – более крупные соединения, у каждого из которых – свое происхождение и возраст. С породами происходят эндогенные и экзогенные процессы, постгенетические преобразования. Только после рассмотрения вышеобозначенных вопросов можно приступить к изучению грунта как строительного материала. Поэтому разделы грунтоведения включают в себя подробное описание строительных свойств грунтов, их физических характеристик, классификации, показателей консистенции, наличия и форм воды в них, распространенности в региональных условиях Беларуси и т.д.

Следующий этап – решение инженерных задач, вытекающих из основных закономерностей механики грунтов. Строитель-дорожник должен иметь знания о прочности грунта, его деформируемости, возникновении и распределении напряжений в грунтовой толще под влиянием собственного веса и внешней нагрузки, процессах и принципах уплотнения однородных и слоистых грунтовых конструкций, реологических свойствах.

Дисциплина «Дорожное грунтоведение и механика земляного полотна дорог» включает два основных раздела: инженерную геологию и механику грунтов.

При решении вопросов, связанных со строительством дорожных сооружений, необходимо также знать особенности горных пород. До начала строительства на стадии выбора наилучшего варианта участка

и объективной оценки конкурирующих вариантов необходим широкий круг сведений о геологическом строении территории, геологических процессах, которые уже протекают или могут возникнуть в результате строительства, гидрогеологических условиях и т.д.

Эти вопросы и изучает *инженерная геология* – наука о геологической среде, ее рациональном использовании и охране в связи с инженерно-хозяйственной деятельностью человека.

Под *геологической средой* следует понимать любые горные породы и почвы, которые слагают верхнюю часть литосферы, рассматриваемые как многокомпонентные системы, находящиеся под воздействием инженерно-хозяйственной деятельности человека, что приводит к изменению природных геологических процессов и возникновению новых антропогенных процессов, изменяющих инженерно-геологические условия определенной территории.

*Антропогенными процессами* называются геологические процессы, возникшие в результате деятельности человека.

Инженерная геология как наука включает в себя следующие основные разделы: региональная инженерная геология, инженерная геодинамика, грунтоведение.

*Региональная инженерная геология* изучает:

типизацию и районирование территорий;  
щиты и плиты древних и молодых платформ.

*Инженерная геодинамика* изучает:

факторы, определяющие развитие геологических и антропогенных процессов;

эндогенные процессы и вызванные ими явления;

экзогенные процессы климатического характера, процессы выветривания, криогенные и посткриогенные, а также эоловые процессы;

экзогенные процессы водного характера, явления растворения, суффозии, размывания, заболачивания;

гравитационные или склоновые процессы, а также обвалы, осыпи, оползни, снежные лавины.

Одним из основных разделов инженерной геологии является *Грунтоведение*, которое, в свою очередь, подразделяется на три подраздела: общее грунтоведение, региональное грунтоведение, техническая мелиорация грунтов.

В соответствии с инженерно-геологической классификацией, предложенной Е.М.Сергеевым, В.А.Преклонским, В.Ф.Бабковым.

В.М.Безруком и другими исследователями, *грунтами* называют горные породы различного состава, свойств и происхождения, слагающие верхние слои земной коры, преимущественно затронутые процессами выветривания, а в самой верхней части – почвообразования.

Из грунтов сооружают плотины и земляное полотно автомобильных и железных дорог. Грунтовое основание воспринимает нагрузку инженерных сооружений. Грунт является средой, в которой располагаются тоннели, трубопроводы и кабели.

*Общее грунтоведение* изучает:

особенности состава и строения грунтов и почв;

наличие воды в грунтах;

структурные связи в грунтах;

грунты как многокомпонентные системы;

физические, физико-химические и физико-механические свойства грунтов;

особенности магматических, метаморфических и осадочных горных пород;

дисперсные и искусственные грунты.

*Региональное грунтоведение* рассматривает специфику залегания, свойств и особенностей грунтов, распространенных на изучаемой территории или в регионе строительства транспортного объекта.

*Техническая мелиорация грунтов* решает вопросы искусственного улучшения грунтов, изменения их свойств в соответствии с требованиями различных видов строительства.

*Дорожное грунтоведение* – наука, изучающая происхождение, состав, строение и свойства грунтов с точки зрения использования их в дорожном строительстве, а также в качестве основания при сооружении мостов и труб на автомобильных дорогах.

*Механика грунтов* – научная дисциплина, изучающая напряженно-деформированное состояние, прочность и устойчивость грунтов. В механике грунтов используются решения ряда задач теории упругости, пластичности, ползучести и фильтрации.

В данном издании в соответствии с вышеуказанной систематизацией представлены в кратком виде все разделы, которые необходимо усвоить при сооружении земляного полотна автомобильных дорог в региональных условиях Республики Беларусь. Представленный материал ориентирован на программу курса по специальностям J70 03 01, J70 03 02 и соответствует требованиям к изучению

дисциплин «Дорожное грунтоведение и механика земляного полотна дорог» и «Инженерная геология».

Автор выражает благодарность заведующему кафедрой «Строительство и эксплуатация дорог» д-ру техн. наук, проф. И.И.Леоновичу, директору инженерно-консалтингового центра республиканского унитарного предприятия «БелдорНИИ» д-ру техн. наук, проф. В.Н.Яромко за методическую помощь в подготовке издания и критические замечания, а также рецензентам – проф., д-ру техн. наук Н.П.Вырко и доц., канд. техн. наук И.К.Яцевичу за советы по улучшению содержания рукописи.

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

### 1.1. Краткая историческая справка

Впервые довольно точно измерил величину земного шара древнегреческий математик, астроном и географ Эратосфен Киренский (ок. 276-194 г. до н. э.) из египетского города Александрии. Он следом за Аристотелем считал, что Земля имеет форму шара.

Эратосфен сделал открытие, что в день летнего солнцестояния в Асуане, расположенном южнее Александрии, солнце освещало в полдень дно глубоких колодцев. В тот же полдень в Александрии, по измерениям Эратосфена, Солнце отстояло от зенита на  $7^{\circ}12'$ , что составляет  $1/50$  долю земной окружности. Отсюда Эратосфен заключил, что такую же долю окружности Земли составляет расстояние от Асуаны до Александрии. Измерить это расстояние в те времена можно было только по числу дней, которое тратили караваны верблюдов на переход между этими городами. Оно составляло 5000 греческих стадий – т.е. приблизительно 160 км. Следовательно, вся окружность Земли в 50 раз больше и должна составлять 40 000 км, что оказалось очень близким к современным расчетам.

О внутреннем строении Земли впервые высказал предположение греческий философ Эмпедокл (V век до н. э.), ссылаясь на процессы, происходящие на действующих вулканах. Эмпедокл изучал вулкан Этна, по склонам которого текли мощные потоки лавы. Он предпринял отчаянно смелое путешествие вглубь кратера и погиб в жерле вулкана.

## 1.2. Современные сведения о строении земного шара

Экваториальный радиус земного шара составляет 6 378,245 км, полярный – 6 356,863 км, т.е. Земля сплюснута на 42,764 км.

Расположение грунтовой толщи выветривания в общем строении Земли, по М.М.Филатову, показано на рис. 1.1 [2].

Земля имеет сложную форму *геоида*, центрально-симметричное строение и состоит из нескольких *геосфер*. Прежде всего, ее делят на три части: тонкую наружную кору; огромную мантию, занимающую 5/6 всей Земли по объему и 2/3 по массе; ядро в середине.

*Материковая кора* состоит из трех слоев: осадочного, гранитного и базальтового. Мощность *осадочного слоя* может достигать 15 км и больше; в некоторых местах этого слоя нет совсем. *Гранитный слой* назван так потому, что скорость сейсмических волн в нем такая же, как в граните. Он состоит из разных метаморфических и магматических пород (преимущественно гранитов и гнейсов) кристаллического сложения. Под ним залегает *базальтовый слой*, названный так в связи со скоростью сейсмических волн. Действительный состав этого слоя неизвестен. Слой земной коры от поверхности до мантии называют *литосферой*.

Если представить Землю в виде шара диаметром 4 м, то земная кора представляла бы оболочку толщиной около 1 см.

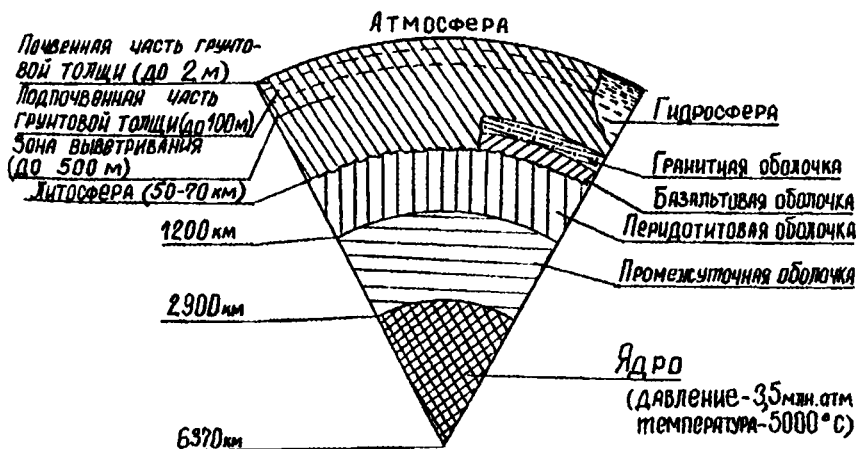


Рис. 1.1. Схема строения Земли по М.М.Филатову



Переходную зону от ядра к земной коре составляет очень мощная оболочка Земли – *мантия*, которая делится на верхнюю оболочку – перидотитовую и нижнюю – промежуточную. Между ними нет резкой границы. Условно она проходит на глубине 900...1200 км.

*Ядро* занимает 16% земного шара по объему и 31,5% по массе. Его делят на две части: внешнее и внутреннее ядро (субъядро). Поперечные волны сквозь внешнее ядро не проходят, следовательно, оно жидкое. В субъядре скорость сейсмических волн постоянная, поэтому считают, что оно твердое. Диаметр ядра – около 2500 км. Давление в нем достигает 3,5 млн. атм. Температура ядра 5000°C, а температура вытекающей из вулкана магмы – всего 1200...1400°C.

Плотность земного шара, равная 5,5, значительно превышает плотность горных пород (2,5...2,8), слагающих земную пору. При этом условии плотность центральной части должна равняться 12, т.е. быть близкой к плотности железа и никеля (Fe, Ni).

### 1.3. Геологическая хронология

*Геохронология* – это подразделение геологического времени на условные отрезки, имеющие определенные названия (эра, период, эпоха, век), и расположение их в определенном порядке [3].

Возраст Земли оценивается в 4,5...5,0 млрд. лет. Возраст первого материка приблизительно равен 4 млрд. лет. Жизнь на Земле зародилась примерно 2,3 млрд. лет назад. Среднегодовая температура поверхности земного шара тогда составляла 72°C. В эпоху господства пресмыкающихся (около 200 млн. лет назад) она была близка к 20°C. В настоящее время среднегодовая температура Земного шара равна 14,8°C.

За последние 500 тыс. лет земной шар испытал *четыре периода оледенения*. Последний раз ледник ушел 16 тыс. лет назад; его остатки мы видим в Гренландии и Антарктиде. Таяние льдов на этих материках ежегодно повышает уровень мирового океана на 2 мм.

Геологическое время Земли подразделяется на *пять эр*: архейскую, протерозойскую, палеозойскую, мезозойскую и кайнозойскую.

*Архейская эра* – древнейшая эра в геологической истории Земли, продолжавшаяся около 1 млрд. лет. Это – время формирования земной коры, появления на ней первой воды, накопления первых мощ-

ных толщ осадочных пород. На геологических картах архейская эра имеет обозначение AR.

**Протерозойская эра (PR)** продолжалась 600...800 млн. лет. Для нее характерен теплый тропический климат, обширное распространение моря, где происходило накопление известняков. Продолжалось наращивание земной коры; на ее поверхности со временем накапливались мощные вулканические и осадочные толщи.

**Палеозойская эра (PZ)** продолжалась 300...350 млн. лет. Ее подразделяют на периоды: 1) кембрийский (К); 2) ордовикский (О); 3) силурийский (S); 4) девонский (Д); 5) каменноугольный (С); 6) пермский (Р).

При палеозойской эре проявились две мощные складчатости: каледонская и герцинская. Климат палеозоя отличался, в основном, тропическими и субтропическими режимами, которые закончились резким похолоданием в пермский период. Породы палеозоя характеризуются, в основном, известняками, мергелями и доломитами. На континентальных платформах они представлены глинами, песками и рыхлыми песчаниками.

В силурийский период произошло мощное горообразование. Оно сопровождалось поднятием материков и обмелением морей. Образовалась каледонская складчатость.

В девонском периоде произошло резкое сокращение морских бассейнов и увеличилась поверхность суши.

В каменноугольный период началось наступление моря на сушу; древние каледонские горы сгладились. Большая часть Европейской равнины оказалась затопленной морем; образовались огромные заболоченные низины. Свое название период получил из-за обилия в его отложениях угля.

**Мезозойская эра (MZ)** продолжалась 50...250 млн. лет. Она включает три периода: 1) триасовый (Т); 2) юрский (J); 3) меловой (К). Это была эпоха относительного тектонического покоя, характеризовавшаяся теплым однообразным климатом. Среди континентальных отложений преобладали известняки, глинистые сланцы, озерные мергели и глинистые известняки.

В течение триасового периода происходило чередование сухих и влажных периодов, интенсивно протекала вулканическая деятельность.

Юрский период – время бурного развития такой группы пресмыкающихся, как динозавры, которые достигали 25 м в длину и массы свыше 60 т.

В конце мезозойской эры произошло мощное горообразование; размеры материков несколько увеличились.

**Кайнозойская эра (KZ)** – поздняя геологическая эра, которая началась примерно 0,25 млрд. лет назад и продолжается до современности. Она подразделяется на три периода: 1) *палеогеновый (Pg)*; 2) *неогеновый (N)*; 3) *четвертичный (Q)*, или *антропоген (A)*.

В эту эпоху главным определяющим событием было образование молодых океанов – Атлантического, Индийского, Северного Ледовитого; интенсивно проявилась альпийская складчатость, с которой связано рождение Альп, Кавказа, Крыма и других горных систем.

Палеоген отличался теплым, тропическим климатом, который при неогене сменился похолоданием. В настоящее время большие пространства суши Арктики и Антарктики покрыты мощной толщей льда, достигающей, например, в Гренландии до 3 км. За последний миллиард лет на Земле было четыре эпохи, когда лед занимал большую поверхность земного шара. В четвертом из этих периодов оледенения живем мы.

За последний миллион лет, как минимум, девять раз ледяные щиты надвигались на Северную Америку и Европу. Их толщина достигала 2 км.

Таким образом, в ходе эволюции земной коры возрастала ее неоднородность, что определило различия между океаническими и континентальными полушариями Земли (при этом проявился наиболее общий закон развития нашей планеты – усложнение вещественного состава и структуры земной коры), усиливалась дифференциация и разновременность протекания глубинных процессов в ходе геологической истории.

### Вопросы для самопроверки

1. Какова плотность горных пород земной коры?
2. Какова среднегодовая температура земного шара в настоящее время?
3. На сколько градусов происходит падение температуры магмы при ее поднятии от ядра до поверхности?

4. В какую эру входит четвертичный период?
5. Какова толщина внешнего слоя земной коры, сложенного осадочными породами?
6. Из каких периодов состоит палеозойская эра?
7. Каков полярный диаметр земного шара?
8. В каком геохронологическом периоде палеозойской эры произошло мощное горообразование?
9. В каком периоде произошло образование заболоченных низин?
10. Как называется период палеозойской эры, при котором наступило резкое похолодание?

## 2. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

### 2.1. Инженерно-геологическое районирование территорий

Инженерно-геологические условия оказываются одинаковыми на тех территориях, которые имеют одну и ту же или близкую историю геологического развития и находятся в одних и тех же природно-климатических зонах. Такие условия называются *региональными*.

Под *зональными* понимают закономерности развития геологических процессов, которые связаны с климатом и, в первую очередь, с тепло- и влагообменом.

Под *типизацией* территорий понимается выделение их отдельных частей, соответствующих определенным, заранее установленным типам регионов, характеризующимся наиболее общими признаками. Всего на Земле выделено примерно 80 инженерно-геологических типов территорий, для каждого из которых предусматривается единая методика изучения, единые инструкции по изысканиям, строительные нормы и другие нормативные документы.

В качестве самостоятельных инженерно-геологических единиц выделяют [4]:

- 1) регионы;
- 2) области;
- 3) районы;
- 4) подрайоны.

*Регионы* – это территории, выделяемые по геоструктурным признакам в результате анализа истории геологического развития данной территории за все доступное для нас время.

**Области** – это части регионов, имевшие различное развитие в новейшее время.

**Районы** – это территории, на которых отмечается однообразие геологического строения, выражающееся в одинаковой последовательности залегания горных пород, мощности и петрографическом составе.

В пределах одного района могут быть выделены инженерно-геологические *подрайоны*. Например, если часть района расположена в зоне вечной мерзлоты, она выделяется в подрайон. Кроме того, в пределах подрайона могут быть выделены *участки*, в пределах которых могут быть выделены *элементы*.

## 2.2. Щиты и плиты древних и молодых платформ

**Платформы** – это области земной коры, которым свойственна малая интенсивность тектонических движений и магматических проявлений, – например, Русская и Сибирская платформы. Для платформы характерны синеклизы, антеклизы и грабены.

**Синеклиза** – очень пологий прогиб земной коры в пределах платформы, имеющий в плане округлые или овальные очертания.

**Антеклиза** – обширное, пологое поднятие земной коры, т.е. противоположность синеклизе.

**Грабен** – участок земной коры, опущенный по крутым, нередко вертикальным разрывам относительно окружающих участков.

**Горст** – выступ, ограниченный крутыми разрывами – сбросами.

**Щиты** – участки антеклиз, испытывающие длительное поднятие; лишены покрова осадочных образований, а на поверхности залегают древнейшие метаморфические породы.

**Щиты древних платформ** (Балтийский, Украинский и др.) являются областями длительного поднятия и размыва. Они сложены преимущественно прочными породами с кристаллизационными связями, такими как гнейсы, граниты, кристаллические сланцы, кварциты, слагающие формации докембрийского возраста. Имеют осадочный чехол небольшой мощности.

**Щиты молодых платформ** (Казахстанский) отличаются от древних тем, что их фундамент сложен карбонатными формациями.

**Плиты древних платформ** – области с платформенным чехлом мощностью от сотен метров до нескольких километров. Породы,

слагающие эту мощную толщу, относятся к нескольким структурным этажам. Геологическое строение верхних горизонтов осадочной толщи зависит от структурных форм. В антеклизах преобладают плотные глины, алевролиты, песчаники; синеклизы сложены мезозойскими песчано-глинистыми отложениями; примером древних плит служат плиты Русской платформы: Воронежская антеклиза, Московская синеклиза и др.

*Плиты молодых платформ* характеризуются тем, что верхнюю часть их разреза слагают кайнозойские и, в первую очередь, четвертичные отложения значительной мощности. Их основной особенностью является незавершенность процессов литогенеза: породы не имеют кристаллизационных структурных связей. Пески обладают высокой пористостью, глины – пластичные и, как правило, набухающие. Типичным представителем плиты молодой платформы является Западная Сибирь.

Инженерно-геологическое районирование территории стран СНГ базируется на тектонической схеме, составленной А.А.Богдановым (1964 г.) и предусматривающей выделение следующих структурных единиц (рис. 2.1):

1. Древние докембрийские платформы (Русская и Сибирская).
2. Молодые эпипалеозойские плиты (Западно-Сибирская и Туранская).
3. Регионы байкальской складчатости (Байкальская, Таймырская).
4. Регионы каледонской складчатости (Алтае-Саянская, Западно-Казахстанская).
5. Регионы герцинской складчатости (Уральская, Восточно-Казахстанская, Тянь-Шаньская).
6. Регионы мезозойской складчатости (Верхоянская и др.).
7. Регионы альпийской складчатости юга (Карпатская, Крымская, Кавказская и др.).
8. Регионы альпийской складчатости востока (Камчатская, Сахалинская).

Таким образом, мы можем сделать заключение, что современные инженерно-геологические условия формировались на протяжении всей истории геологического развития регионов. Причем большое влияние на их развитие оказывали тектонические движения, их характер, направленность, интенсивность и постоянство.

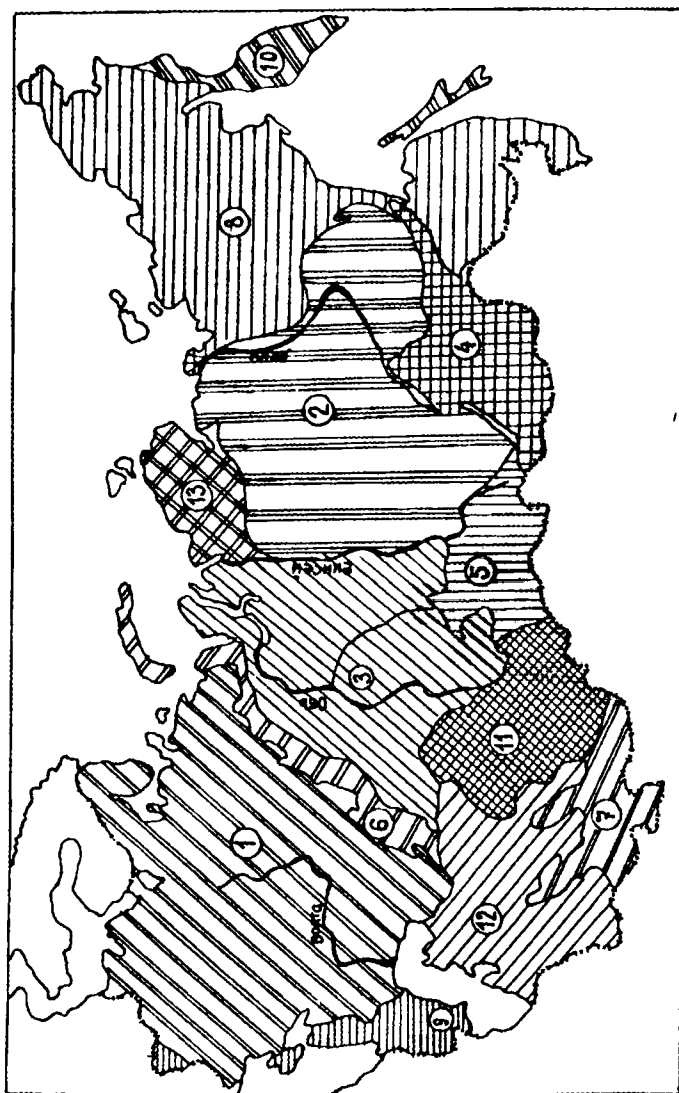


Рис. 2.1. Схема инженерно-геологического районирования (А.А.Богданов, 1964 г.):

- 1 – Русская платформа; 2 – Сибирская платформа; 3 – Западно-Сибирская плита; 4 – Забайкальская складчатая страна;
- 5 – Алтае-Саянская складчатая страна; 6 – Урало-Новоземельская горная страна; 7 – горно-складчатые сооружения Средней Азии; 8 – Тихоокеанская геосинклинальная область; 9 – Альпийская складчатость юга; 10 – Альпийская складчатость востока; 11 – Казахская складчатая страна; 12 – Туранская плита; 13 – Таймыро-Североземельская складчатая страна

### 2.3. Кристаллический фундамент Республики Беларусь

Республика Беларусь расположена на западе Восточно-Европейской (Русской) платформы, и только на Юге в ее пределы входит северная часть Украинского кристаллического щита.

Кристаллический фундамент залегает на глубине от нескольких метров до 6 километров и более. Открытые породы встречаются только на крайнем юге – в деревне Глушкевичи Гомельской области.

На кристаллическом фундаменте Республики Беларусь выделяются следующие структурные элементы:

- 1) Белорусская и Воронежская антеклизы;
- 2) Припятский прогиб;
- 3) Подляско-Брестская и Оршанская впадины;
- 4) Полесская, Латвийская, Жлобинская и Брагинско-Лоевская седловины.

Центральную и западную части региона занимает Белорусская антеклиза (рис. 2.2) – тектоническая структура с высоким (до +87 м) залеганием фундамента. Простираение свода этой структуры составляет в длину 350 км, в ширину – до 120 км. Наиболее приподнятый участок антеклизы выделяется как Центрально-Белорусский массив. На северной и восточной периферии массива располагаются Вилейский (250 км) и Бобруйский (130 км) погребенные выступы. Между Вилейским погребенным выступом и Центрально-Белорусским массивом в пределах Белорусской антеклизы выделяется Воложинский грабен протяженностью 170 км и шириной 50 км. Поверхность фундамента в пределах грабена залегает на глубинах до –0,4 км.

Припятский прогиб расположен между Белорусской и Воронежской антеклизмами и Жлобинской седловиной. Максимальная его длина – 280 км, ширина – 150 км. Припятский прогиб ограничен разломами. Брагинско-Лоевская седловина разграничивает Припятский и Днепровско-Донецкий прогибы. Она имеет ширину до 40 км и длину – до 60 км. Почти со всех сторон имеются разломные ограничения.

Жлобинская седловина отделяет Оршанскую впадину от Припятского прогиба и представляет собой перемычку между Белорусской и Воронежской антеклизмами. Длина седловины – около 50 км, ширина – 45 км. Фундамент в ее пределах расположен на отметках от –0,5 до –0,8 км.



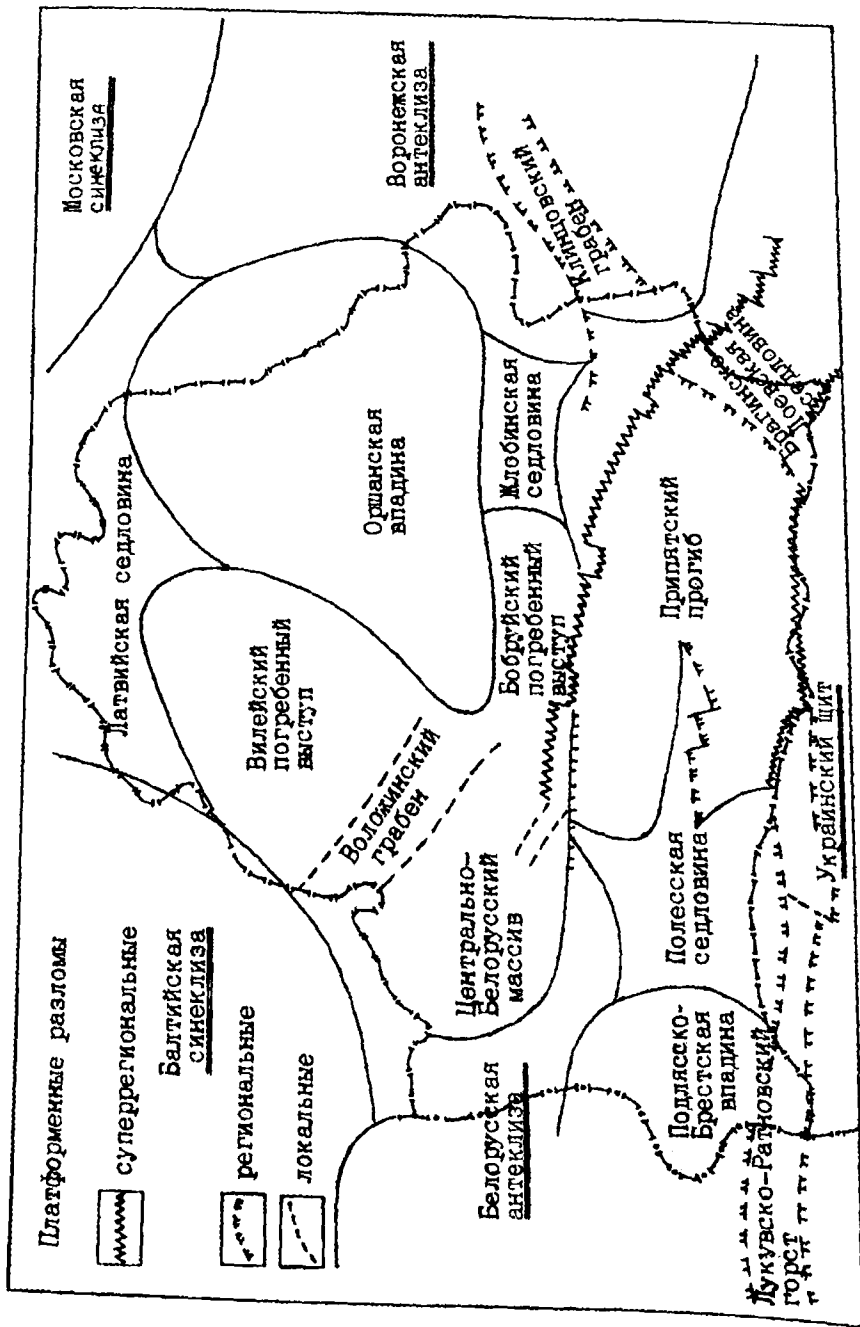


Рис. 2.2. Схема основных структурных элементов кристаллического фундамента Беларуси

Полесская седловина отделяет Подляско-Брестскую впадину от Припятского прогиба и в то же время разграничивает Белорусскую антеклизу и Украинский щит. Ее размеры – от 140 до 100 м, глубина залегания – 0,3 км.

Подляско-Брестская впадина с севера и юга ограничена разломами и имеет размер от 260 до 130 км. Поверхность фундамента погружается к западу от отметок –0,5 до 5,0 км.

Южнее Подляско-Брестской впадины расположен Лукувско-Ратновский горст шириной до 15 км.

Латвийская седловина отделяет Оршанскую впадину от Балтийской синеклизы и, вместе с тем, является областью неглубокого погружения фундамента между Белорусской антеклизой и Балтийским щитом. Центральная часть седловины имеет отметки, равные –0,7 км.

Оршанская впадина разделяет Белорусскую и Воронежскую антеклизы и ограничивается седловинами. В пределах впадины наблюдается постепенное погружение на северо-восток от отметок –0,8 км до –1,7 км.

Таким образом, строение поверхности кристаллического фундамента территории Беларуси достаточно разнообразно.

## 2.4. Основные особенности рельефа кровли антропогенного покрова

*Антропогенный покров* – это толща горных пород, на которую воздействует человек путем строительства и разработки полезных ископаемых.

Антропогенные отложения на территории Беларуси распространены повсеместно и имеют значительную мощность (300 м и более). Этот покров сформирован в результате надвигов пяти ледниковых покровов, приведших к накоплению до 90% объема антропогенного чехла.

Вертикальные зоны, входящие в антропогенный покров:

*первая зона:* глубина – 1...2 м; объект изучения – почвы; вид строительства – дорожное и аэродромное;

*вторая зона:* глубина – от 2 до 20 м; объект изучения – осадочные породы, преимущественно рыхлые; вид строительства – промышленное и гидротехническое;

*третья зона*: глубина – сотни метров; объект изучения – горные породы с преобладанием твердых разновидностей; вид строительства – тоннели, метро, разработка полезных ископаемых.

Высота дневной поверхности Беларуси (кровли антропогенного покрова) составляет в среднем 159 м над уровнем моря. Низменные пространства (3/5 территории) находятся на абсолютных отметках 100...150 м, равнинные – 150...220 м. Перепад дневной поверхности составляет 266 м (80 м – в долине реки Неман, 346 м – на горе Дзержинской). Рельеф характеризуется преобладанием плоских и пологоволнистых равнин речных долин.

*Северная часть Беларуси* (Белорусское Поозерье) относится к области ледниково-аккумулятивного рельефа, в формировании которого главную роль сыграл последний из покрывавших территорию Беларуси в антропогене ледников – Поозерский. Большую часть данной области занимает почти плоская Полоцкая низина, отметки которой составляют 130...150 м. Со всех сторон низину окружают холмистые гряды и возвышенности.

*Центральная часть республики* имеет наиболее высокое положение. От района Гродно – Волковыск в северо-восточном направлении простирается Белорусская гряда, созданная преимущественно Сожским ледником. В пределах данной гряды преобладают отметки 200...250 м. Наивысшей частью является Минская возвышенность, на которой выделяется гора Дзержинская. В северо-западном направлении расположена Ошмянская возвышенность (320 м). В западной части Белорусской гряды выделяются Гродненская (247 м), Волковыская (242 м), Слонимская (226 м), Новогрудская (323 м) возвышенности. На востоке республики расположена Оршанская возвышенность (212 м).

*Южная часть республики* включает Брестское, Припятское, Мозырское и Гомельское Полесье. В основном, поверхность Белорусского Полесья представляет пониженную заболоченную пологую слабоволнистую равнину. Над плоской поверхностью возвышаются многочисленные ледниковые гряды и холмы. Отметки поверхности не превышают 150...160 м. Для Белорусского Полесья характерны обширные болотные массивы.

## Вопросы для самопроверки

1. К какой структурной единице по тектонической схеме относится Беларусь?
2. Как называется участок земной коры, опущенный по крутым разрывам?
3. На какие инженерно-геологические единицы подразделяет горные породы зона вечной мерзлоты?
4. Какой щит относится к молодым платформам?
5. Чему равна плотность ядра земного шара?
6. Какое количество впадин имеется на кристаллическом фундаменте РБ?
7. Какая эра в геологическом времени самая продолжительная?
8. Какой структурный элемент кристаллического фундамента разделяет Белорусскую и Воронежскую антеклизы?
9. Какие разломы определяют Воложинский грабен?
10. Чему равнялась среднегодовая температура поверхности земного шара в период зарождения жизни на Земле?

## 3. ПОРОДООБРАЗУЮЩИЕ МИНЕРАЛЫ

### 3.1. Характеристика силикатов и алюмосиликатов

*Минералами* называются природные химические образования (соединения) или самородные элементы, являющиеся продуктами сложных физико-химических процессов, протекающих в земной коре.

В образовании минералов наиболее активно принимают участие следующие соединения:

- 1) кремнезем  $\text{SiO}_2$ ;
- 2) глинозем  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;
- 3) окись и закись железа  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;
- 4) окислы щелочноземельных и щелочных металлов  $\text{Mg}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$ .

*Породообразующими* называются минералы, входящие в состав большинства горных пород. К основным породообразующим минералам относятся силикаты и алюмосиликаты, которые по кристаллохимической структуре разделяются на пять групп:

1. *Островные силикаты* (отдельные кольца) – минералы группы оливина, граната и др. Могут быть представлены:

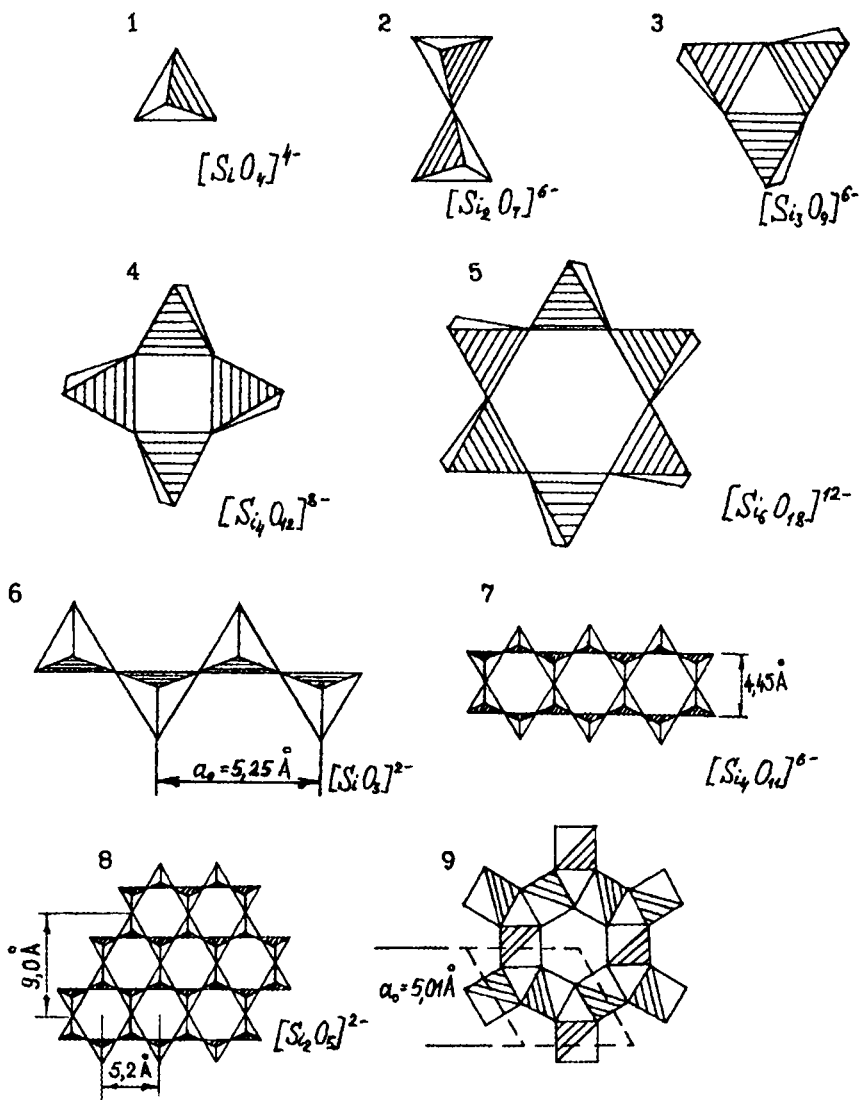


Рис. 3.1. Кремнекислородные радикалы силикатов и их структуры

- 1) единичным изолированным тетраэдром  $(Si_2O_7)^{4-}$  (рис. 3.1 (1));  
 2) диортогруппой  $(Si_2O_7)^{6-}$  (рис. 3.1 (2));

3) группой из трех тетраэдров, связанных в кольцо  $(Si_3O_9)^{6-}$  (рис. 3.1 (3));

4) группой из четырех тетраэдров, связанных в кольцо  $(Si_4O_{12})^{8-}$  (рис. 3.1 (4));

5) группой из шести тетраэдров, связанных в кольцо  $(Si_6O_{18})^{12-}$  (рис. 3.1 (5)), например: турмалин, берилл  $Be_2Al_3(Si_6O_{18})$ .

2. *Цепочечные силикаты* (одиночная одномерная цепочка) – пироксены: авгит, анстатит, гиперстен и др. (рис. 3.1 (6)).

3. *Ленточные силикаты и алюмосиликаты* (сдвоенная цепочка, лента) – амфиболы: роговая обманка и др. (рис. 3.1 (7)).

4. *Листовые (слоистые) силикаты и алюмосиликаты* (двухмерные) – слюды (мусковит, биотит), тальк, серпентин, каолинит и др. (рис. 3.1 (8)).

5. *Каркасные силикаты и алюмосиликаты* (трехмерные): кварц, полевые шпаты (ортоклаз, микроклин и др.), цеолиты (рис. 3.1 (9)).

Силикаты можно расположить в 2 ряда по признакам сжимаемости и степени выветривания (рис. 3.2).

#### По сжимаемости



#### По возрастающей степени выветривания

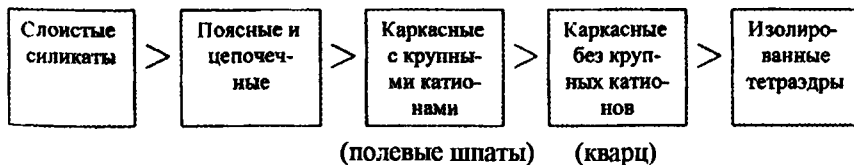


Рис. 3.2. Классификация силикатов

Атомы в кристаллах силикатов расположены закономерно наподобие узлов пространственной решетки. Благодаря этому минералы имеют вид правильных многогранников.

Если минералы не имеют внешних признаков правильного строения, их называют некристаллическими, или аморфными.

**Силикаты** представляют собой 1/3 всех известных минералов и составляют примерно 85% состава земной коры.

Наибольшее распространение и значение имеют следующие минералы.

**Полевые шпаты** – не растворимы в воде, характеризуются большой твердостью (6,0 по шкале Мооса), совершенной спайностью, стеклянным блеском. Различают два основных вида полевых шпатов: 1) калиево-натриевые (ортоклаз); 2) кальциево-натриевые (плагиоклаз). Ортоклазы входят в состав гранитов, гнейсов, сиенитов.

**Слюды** – сложные кислоты алюмосиликатов. Различают два основных вида: 1) биотит (черная слюда); 2) мусковит (белая слюда). Имеют совершенную спайность, твердость 2-3, стеклянный блеск, плотность 2,7...3,1 г/см<sup>3</sup>.

**Кальцит** – минерал вторичного происхождения. Цвет белый, блеск стеклянный, излом по спайности, плотность 2,7 г/см<sup>3</sup>, твердость 3, входит в состав мрамора, вскипает при действии 10%-ной соляной кислоты.

**Кварц** SiO<sub>2</sub>. Твердость 7, спайность отсутствует, излом раковинистый, плотность 3,5 г/см<sup>3</sup>.

**Бурый железняк или лимонит** (2Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 3H<sub>2</sub>O). Цвет коричневый, твердость 1...5,5, плотность 3,5 г/см<sup>3</sup>.

**Гипс** (CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O). Твердость 2, блеск стеклянный, слоистость весьма совершенная, плотность 2,3 г/см<sup>3</sup>.

Самый твердый минерал – алмаз – в 1000 раз тверже кварца и в 140 раз тверже корунда.

### 3.2. Первичные и вторичные минералы

В процессе химического выветривания верхние слои земной коры обогащаются различными соединениями, в результате чего минералы подразделяются на первичные и вторичные.

**Первичные** представляют собой минералы, полностью перешедшие в состав горных пород в неизменном виде. К ним относятся кварц, полевой шпат, слюды и др.

**Вторичные** образуются в процессе химических изменений первичных минералов. К ним относятся глинистые минералы, которые подразделяются на три основные группы: 1) каолинита; 2) монтмориллонита; 3) гидрослюды.

В *группу каолинита* входят минералы: каолинит, галлуазит и др. Они обладают прочной неподвижной кристаллической решеткой, небольшой набухаемостью при увлажнении и малой способностью к поглощению различных веществ. В основе структуры каолинита  $Al_2(OH)_4[Si_2O_5]^{000}$  [19] лежит листовая группировка кремнекислородных и алюмокислородных атомов (рис. 3.3).

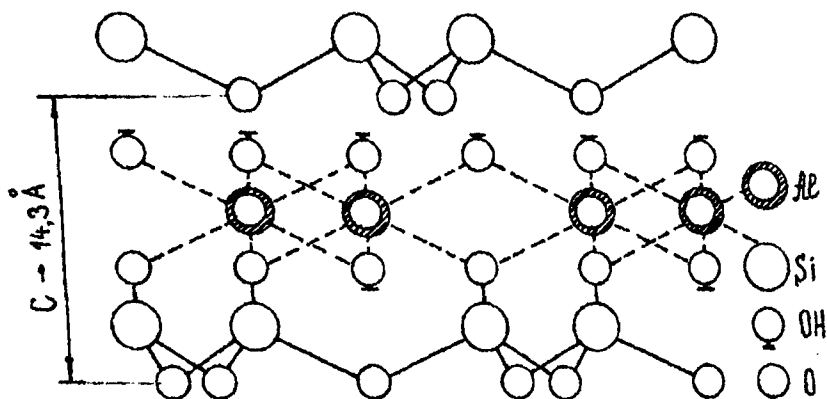


Рис. 3.3. Схематическое изображение структуры каолинита

Образование листа начинается атомами кислорода, потом следуют слой кремния, слои кислородных атомов с участием гидроксильных групп, слой атомов алюминия; завершается слоем гидроксильных групп. Такая структура создает структурный пакет. Элементарная ячейка сложена двумя пакетами. Два смежных пакета обращены друг к другу разноименными слоями, несущими противоположные заряды, — этим объясняется отсутствие способности набухать в одном направлении. При замораживании каолинит вспучивается в 10 раз больше, чем монтмориллонит.

В *группу монтмориллонита* входят минералы: монтмориллонит, бейделит и др. Монтмориллонит в отличие от каолинита характеризуется более высокими дисперсностью (раздробленностью) частиц, пластичностью и водопоглощением. При увлажнении грунтов, содержащих монтмориллонит, их объем может увеличиваться в 10...20 раз. Такие грунты при увлажнении приобретают чрезмерную липкость, сильное набухание и большую осадку при высыхании.

Пакет монтмориллонита  $\{(Mg_{0,33}Al_{1,67})(OH)_2[Si_2O_5]_2^{000}\} \cdot Na_{0,33}(H_2O)_4$  [19] (рис. 3.4) начинается и заканчивается слоями атомов кислоро-



да, за которыми идут слои атомов кремния, затем – слои кислородных атомов с участием гидроксильных групп; в центре располагается слой атомов алюминия.

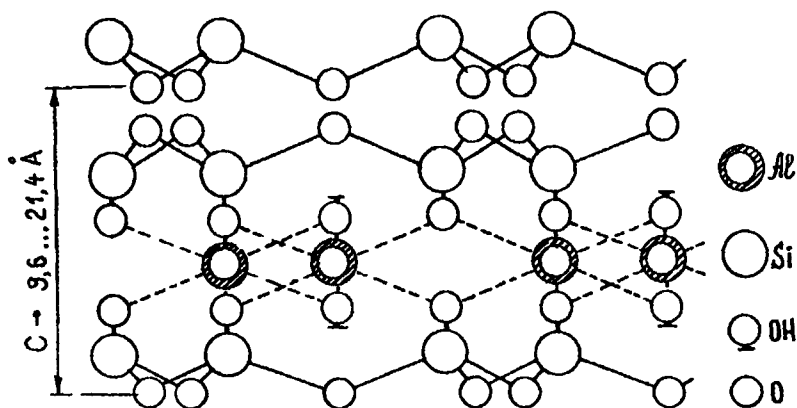


Рис. 3.4. Схематическое изображение структуры монтмориллонита

Пакеты обладают симметричным строением. Поскольку по их краям располагаются атомы кислорода, несущие отрицательный заряд, два соседних пакета будут отталкиваться друг от друга, и молекулы воды легче проникнуть между пакетами, чем внутрь структуры пакета.

*Гидрослюды* по своим свойствам занимают промежуточное положение между каолинитом и монтмориллонитом.

### Вопросы для самопроверки

1. Сколько сводных атомов имеет группа островных силикатов, составленная из четырех тетраэдров?
2. Нарисуйте кристаллохимическую структуру диортогруппы.
3. Структура какого минерала представлена каркасным силикатом?
4. Какой из минералов имеет наименьшую степень вывстривания?
5. Какой минерал, входящий в шкалу твердости Мооса, имеет в своем составе две молекулы воды?
6. Какое физическое свойство обуславливает отражение солнечного света?
7. Какая структура имеет наибольшее сопротивление сжатию?
8. Как называются минералы, не имеющие внешних признаков правильного строения?

9. К каким минералам относится такой представитель сложных кислот алюмосиликатов, как мусковит?

10. Назовите минерал, который способен увеличивать свой объем при замораживании.

## 4. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД

### 4.1. Основные подразделения пород по генетическим признакам

Под *генетическим подходом* следует понимать анализ геологической истории развития территории, сложенной изучаемыми горными породами. В основе генетического изучения горных пород лежит их подразделение на три основные группы:

- 1) магматические;
- 2) метаморфические;
- 3) осадочные.

*Горные породы* – минералогические образования, состоящие из одного или нескольких минералов, обладающие постоянным минералогическим составом и образующие земную кору.

Горные породы, сформировавшиеся в одних и тех же условиях и имеющие один и тот же геологический возраст, могут отличаться по своим свойствам, что объясняется постгенетическими преобразованиями.

### 4.2. Минералы, определяющие химический состав магматических пород

*Магматические горные породы* образовались в результате внедрения и остывания проникших из глубин в земную кору магматических масс (каменных расплавов) или излияния их на поверхность.

Химический состав магматических пород определяется составом минералов, образующих породы. Это – окислы и силикаты.

К *окислам* относится кварц  $\text{SiO}_2$ . *Силикаты* представляют собой сложные соединения элементов – Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, O, H – в виде различных солей кремниевых кислот. К силикатам относятся: полевые шпаты, слюды, роговая обманка, авгит и др.

### 4.3. Классификация магматических пород

Магматические породы по инженерно-геологической классификации относятся к скальным и являются хорошим основанием для сооружений. В земной коре различают около 600 разновидностей магматических горных пород.

Химический состав магматических пород определяется содержанием кремнезема  $\text{SiO}_2$ . По этому показателю магматические породы подразделяются на:

- 1) *кислые* ( $\text{SiO}_2 = 65 \dots 75 \%$ );
- 2) *средние* ( $\text{SiO}_2 = 52 \dots 65 \%$ );
- 3) *основные* ( $\text{SiO}_2 = 40 \dots 52 \%$ );
- 4) *ультраосновные* ( $\text{SiO}_2 < 40 \%$ ).

Классификация магматических пород (табл. 4.1) по содержанию  $\text{SiO}_2$  имеет практическое значение. Окраска от кислых к основным породам изменяется от светлой до темной в зависимости от содержания цветных минералов (роговой обманки, авгита, биотита) от 5...10% до 100%. Плотность также изменяется: у кислых 2,6...2,7 г/см<sup>3</sup>, у основных 2,8...3,1 г/см<sup>3</sup>.

Магматические породы подразделяются также по происхождению, условиям образования и залегания на: 1) глубинные (интрузивные); 2) излившиеся (эффузивные); 3) жильные (гипабиссальные).

*Интрузивные породы* образовались в результате замедленного остывания магмы. Для них характерна полнокристаллическая (зернистая) структура. К интрузивным породам относятся: граниты, сиениты, диориты, габбро.

*Эффузивный магматизм* проявляется в виде трещинных излияний на поверхность или вулканических извержений. В зависимости от скорости остывания магмы и выделения из нее газов возникают структуры эффузивных пород: 1) порфировая; 2) стекловатая; 3) пористая.

В *порфировой структуре* на фоне основной массы имеются отдельные крупные кристаллы, обычно – полевого шпата, что свидетельствует об относительно медленном остывании магматических масс.

*Стекловатая структура* образуется при быстром охлаждении магмы.

*Пористая структура* образуется при бурном выделении газов в процессе остывания излившейся магмы.

## Классификация магматических пород

Кислотность	Количество SiO <sub>2</sub> % по массе	Характеристика пород						Окраска	Минералогический состав, %		
		интрузивные			эффузивные				кварц	цветные минералы	
		Порода	Структура	Текстура	Порода	Структура	Текстура				Гипсисальные
Кислые	65...75	граниты	полнокристаллическая	массивная	кварцевые порфиры, липариты, обсеидиан, пемза	неполнокристаллическая, стекловатая	массивная	жильные граниты, пегматиты, графит-порфиры	15...40	40...60	5...10
Средние	52...65	сиениты	полнокристаллическая	массивная	порфиры, трахиты	порфировая	пузыристая	фиры, диорит-порфиры, габродиабазы	< 5	85...90	10...15
Основные	40...52	диориты	полнокристаллическая	массивная	порфиры, андезиты	неполнокристаллическая	массивная	габродиабазы	< 5	70	30
		габродиабазы	полнокристаллическая	массивная	диабазы	стекловатая	пористая		нет	50	50
Ультраосновные	< 40	дуниты, пегматиты, пироксениты	полнокристаллическая, порфировидная	массивная, пятнистая	базальты	неполнокристаллическая	массивная		нет	нет	100

К эффузивным породам относятся: кварцевые порфиры, обсидиан, пемза, порфириты, андезиты, базальты, диабазы.

**Жильные образования** – это трещины, заполненные магмой. Их мощность – от 1 до 3 км.

Магма изверженных пород застывает в виде различных по форме тел: 1) батолитов; 2) лакколитов; 3) различных жильных образований (рис. 4.1).

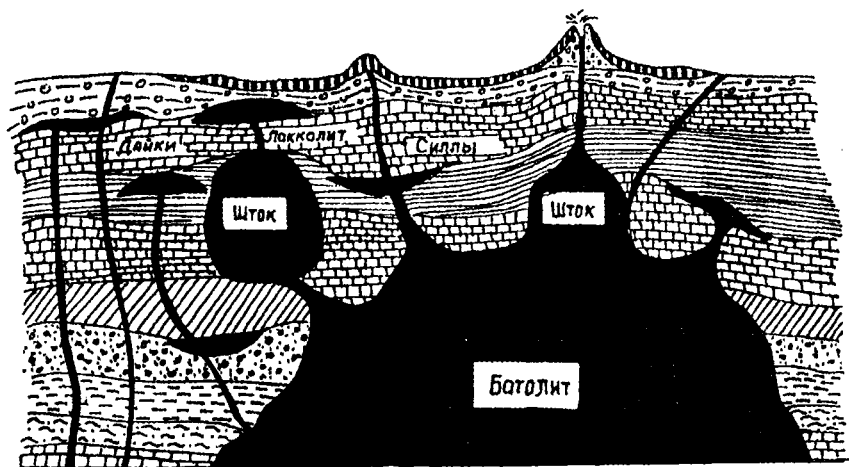


Рис. 4.1. Схема магматических тел

**Батолит** – большое по площади интрузивное тело (до 10000 км<sup>2</sup>), по глубине практически не ограниченное.

**Шток** – тот же батолит, но меньшего размера.

**Лакколит** – каравановидная интрузия, имеющая плоскую подошву, – например, гора Аю-Даг (Медведь-гора) в Крыму. Перевернутый лакколит называется **си́лла**.

**Дайки** – «вертикальные жилы» – могут быть наклонными и пересекать несколько пластов.

**Покровы** – застывшая магма, растекшаяся на поверхности Земли, образованная при трещинном излиянии.

#### 4.4. Характеристика важнейших представителей класса

**Граниты** – интрузивная полнокристаллическая порода из класса кислых. Прочность изменяется от 48 до 270 МПа.

К этому же классу кислых, но эффузивных, относятся *кварцевые порфиры, обсидиан, пемза*, имеющие структуру соответственно порфирированную, стекловатую и пузыристую стекловатую.

Граниты распространены на юге Украины и на Кольском полуострове.

*Сиениты* по внешнему признаку напоминают граниты, но отличаются отсутствием кварца и большим содержанием цветных минералов (10...15%, в то время как граниты содержат 5...10%). Относятся к классу интрузий. Распространены в области Украинского кристаллического щита и на Урале. Из сиенитов в древние времена выполняли скульптурные изваяния (например, сфинксы на берегу р. Невы в Санкт-Петербурге).

К тому же классу средних, но эффузивных, пород относятся *порфиры, трахиты* – эффузивные представители сиенитовой магмы.

К группе основных относятся: *габбро* – интрузивные и базальты – эффузивные. *Габбро* – порода со средней и крупнозернистой структурой темно-зеленого, иногда черного цвета. Особенно распространены на Украине и Урале. *Базальты* – эффузивные представители габбровой магмы. Структура от полнокристаллической до стекловатой в зависимости от мощности залежи. Распространены базальты в Восточной Сибири, на Кавказе и в Армении.

Дополнительный материал по данному разделу можно посмотреть в учебном пособии «Дорожное грунтоведение и механика земляного полотна дорог» [6].

### Вопросы для самопроверки

1. Как сказывается на плотности магматической породы увеличение содержания цветных минералов?
2. К какому классу относится магматическая порода, если содержание  $\text{SiO}_2$  в ней составляет 51%?
3. Как называется структура породы, если на фоне основной массы имеются отдельные крупные кристаллы?
4. На сколько групп разделяются горные породы по генетическим признакам?
5. Как называются магматические породы, образовавшиеся в глубине земной коры?

6. Какая эффузивная магматическая порода относится к группе основных?
7. Дайте определение горным породам.
8. Как называются магматические тела, имеющие каравасобразную форму?
9. Какую структуру имеет обсидиан?
10. К какому классу магматических пород относятся граниты?

## 5. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД

### 5.1. Метаморфизм и его природа

*Метаморфическими* называют горные породы магматического или осадочного происхождения, подвергшиеся воздействию большого давления, высокой температуры, минерализованных растворов и газов.

Различают три формы метаморфизма: контактный, динамо- и региональный.

*Контактный метаморфизм* проявляется под воздействием высокой температуры, газов и горячих растворов при прорыве магматических масс в толщу ранее отложившихся пород. Контактный метаморфизм выражается в оплавлении породы, что ведет к перекристаллизации и цементации.

*Динамометаморфизм* проявляется при воздействии на горные породы высокой температуры и огромных давлений, возникающих в процессе горообразования.

*Региональный метаморфизм* связан с погружением целых регионов земной коры на большие глубины в недра Земли, в области очень высоких температур.

Метаморфические породы практически водонепроницаемы и не растворяются в воде. По физико-механическим свойствам они близки к магматическим; отличие состоит в их анизотропности, обусловленной сланцеватостью.

Классификация метаморфических пород представлена в табл. 5.1.

## Классификация метаморфических пород

№ шп	Исходные породы	Вид метаморфизма			Строение и внешний вид	Текстура	Минеральный состав
		контактный	региональный	динамометаморфизм			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Известняк	Мрамор	-	-	Зернистокристаллическая белая, светло-серая порода, изредка сланцеватая или неяснооплисто-полосчатая текстура	Массивная	Кальцит, реже доломит, иногда примесь гранита
2	Кислые вулканические породы	Роговик амфиболовый	-	-	Мелкозернистая, очень крепкая порода темно-серого, темно-зеленого или черного цвета	Массивная беспорядочная	Плагиоклаз, амфибол, пироксен
3	Глинистый сланец	Роговик биотитовый	-	-	Мелкозернистая крепкая порода серого, буровато-серого, иногда розовато-серого цвета	Массивная беспорядочная	Кварц, биотит, магнетит, иногда полевой шпат, гранат
4	Песчаник	-	Кварцит	-	Мелкозернистая порода, иногда сливная (отдельные зерна нельзя различить), белого, желтого, красноватого цвета, блестящая на изломе, иногда сланцеватая, плитчатая	Массивная	Кварц
5	Гранит	-	Гнейс	-	Зернистокристаллическая серая или желтоватая порода, иногда с полосчатой, очковой или сланцеватой текстурой	Массивная гнейсовая	Кварц, микроклин, биотит, могут быть роговая обманка, пироксен, гранат



1	2	3	4	5	6	7	8
6	Основные и средние вулканические породы	-	Сланец	-	Мелкозернистая зеленая массивная порода с шелковистым блеском	Сланцеватая	Хлорит, актинолит, альбит
7	Габбро, диорит	-	Амфиболит	-	Зернистокристаллическая масса темно-зеленого или черного цвета, нередко заметен белый плагиоклаз	Массивная или сланцеватая	Роговая обманка зеленого или черного цвета, плагиоклаз
8	Известняк, глинистый сланец, скальная порода	-	-	Тектонические брекчии, мипониты	Угловатые обломки раздробленных первичных пород, сцентрированные той же мелко раздробленной породой	Сланцеватая, тонкополосчатая, очковая	Роговая обманка, микроклин, иногда полевой шпат, каолинит

## 5.2. Характеристика основных представителей метаморфических пород

Наиболее распространенной породой, образующейся при контактном метаморфизме, являются *роговики* – обычно – темные плотные породы, имеющие однородную структуру. Для них характерна полная перекристаллизация исходного материала.

При контактном метаморфизме образуется и *мрамор*. В отличие от других метаморфических пород он растворяется в воде, содержащей углекислоту. Сопротивление сжатию – 100 МПа.

Характерными представителями динамометаморфизма являются *тектониты* (катаклазиты, милониты) – раздробленные перестертые породы, сцементированные в различной степени. Все тектониты имеют высокую плотность, однако ниже первичных пород – гранитов, песчаников, алевролитов.

Среди пород регионального метаморфизма наиболее распространены гнейсы, кварциты, сланцы. Наиболее прочными являются *кварциты* – массивные породы различной зернистости, высокой прочности, морозоустойчивые. Пористость и водопоглощение составляют 0,2...0,3 %, сопротивление сжатию > 200 МПа.

*Гнейсы* – продукты метаморфизма осадочных пород. Их физико-механические свойства изменяются в широких пределах. Своеобразная очковая текстура снижает их прочность.

*Кристаллические сланцы* образуют самую разнообразную группу. Общими признаками, отличающими их от массивных метаморфических пород, являются слоистость и сланцеватость, которые снижают их морозостойкость и способствуют быстрому выветриванию.

## 5.3. Трещиноватость горных пород

Почти все горные породы поражены трещинами, которые сообщаются между собой, образуя целую сеть, обуславливающую трещиноватость толщи.

Трещины подразделяются на зияющие и выполненные.

*Зияющие* – это свободные трещины, не заполненные никаким продуктом, с шириной раскрытия – от долей миллиметра до нескольких метров.

*Выполненные* – это трещины, заполненные другими породами осадочного происхождения.

Для количественной оценки трещиноватости пород имеется *коэффициент трещиноватой пустотности*, представляющий собой отношение площади трещин в некотором сечении к самой площади сечения (%). В зависимости от этой величины различают породы с трещиноватостью:

- 1) слабой ( $K_{тр} = 2 \dots 5 \%$ );
- 2) средней ( $K_{тр} = 5 \dots 10 \%$ );
- 3) сильной ( $K_{тр} = 10 \dots 15 \%$ );
- 4) очень сильной ( $K_{тр} = 15 \dots 20 \%$ ).

В зависимости от происхождения все трещины горных пород подразделяются на три класса: формирования, деформации, выветривания.

*Трещины формирования* бывают двух видов: *отдельности*, которые возникают в условиях остывания магматических масс; *усадочные*, которые возникают в результате усадки глинистых пород.

К *трещинам деформации* относят трещины, возникающие на оползневых склонах в результате деформаций массивов.

*Трещины выветривания* представляют собой дальнейшее развитие ранее возникших трещин. К ним относятся трещины *сокращения, остывания, расширения* (при замерзании воды), *усыхания*.

### Вопросы для самопроверки

1. Какой минерал входит в состав мрамора?
2. В результате какого вида метаморфизма образовались гнейсы?
3. Какая метаморфическая порода является самой прочной?
4. Как называется вид метаморфизма, когда исходная порода опускается в области высоких температур?
5. Охарактеризуйте процесс метаморфизма.
6. Сколько существует форм метаморфизма?
7. Какая исходная порода лежит в основе гнейса?
8. Что такое анизотропность?
9. Какой вид метаморфизма связан с горообразованием?
10. Как подразделяются трещины по происхождению?

## 6. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

### 6.1. Происхождение осадочных пород

*Осадочными* называют горные породы, образующиеся при осаждении и накоплении продуктов физического и химического разрушения (выветривания) исходных пород с последующим уплотнением и цементацией.

Выветривание скальных пород начинается с разделения массива по трещинам на меньшие обломки. Воздействие воды, кислорода, углекислоты ведет к разрушению породы. В результате она превращается в скопление глинистых продуктов, обогащенных песком и более крупными обломками.

Образование осадочных пород происходит в четыре стадии:

- 1) физическое и химическое разрушение исходных горных пород;
- 2) перенос водой или воздухом продуктов разрушения;
- 3) отложение продуктов разрушения и накопление органических остатков жизнедеятельности микроорганизмов животного и растительного характера;
- 4) формирование пород из рыхлого осадка в процессе его уплотнения под давлением позже отложившихся и перекрывающих его масс (*диагенез*), а также различных физико-химических процессов, приводящих к цементации грунтов (*эпигенез*).

В зависимости от природных условий, при которых происходило формирование осадочных пород, они могут быть морского или континентального происхождения.

По происхождению осадочные породы подразделяются на три основные группы: обломочные, органогенные, химические (табл. 6.1).

К *обломочным* относят породы, образовавшиеся из твердых продуктов выветривания горных пород, оставшихся на месте своего накопления, отложившихся в результате переноса водой или воздухом. Характерной особенностью обломочных пород является повышенная пористость, достигающая до 40% и более, тогда как пористость магматических пород не превышает 1...3%. Обломочные породы можно подразделить на две основные категории: *собственно обломочные* и *глинистые*. Каждая из этих категорий подразделяется на *рыхлые* и *цементированные*.

## Классификация осадочных пород

Группы	Вид	Сцементи- рован- ность	Название породы				
			Обло- мочные	Собст- венно обло- мочные	Рыхлые	Глыбы, валуны	Щебень, галька
Сцемен- тирован- ные	Брекчи – неокатанные обломки Конгломерат – окатанные обломки				Песчаник	Алевролиты	
Глини- стые	Рыхлые	Супеси		Суглинки		Глины	
	Сцемен- тирован- ные	Аргиллиты					
Орга- ноген- ные	Карбонатные		Известняк	Доломит	Мел	Мергель	
	Кремнистые		Опока		Диатомит		
Химические			Ангидрит	Гипс	Каменная соль		

*Органогенные* породы образовались в водосмах в результате деятельности разнообразных организмов. К ним относятся известняк, доломит, мел, мергель, диатомит и т.д.

*Химические* осадочные породы образовались путем естественного выпаривания из морских или озерных вод растворенных в них солей. К продуктам этой группы относят ангидрит, гипс, каменную соль.

## 6.2. Петрографический состав осадочных пород

*Петрография* – наука, изучающая свойства горных пород, их происхождение, изменение, минералогический и химический состав, строение, условия залегания.

По величине обломков осадочные породы подразделяют на следующие основные группы:

- 1) *крупнообломочные (псефитовые)* с частицами более 2 мм;
- 2) *песчаные (неоммитовые)* с частицами от 2 до 0,05мм;
- 3) *пылеватые (алевритовые)* с частицами от 0,05 до 0,005 мм;
- 4) *глинистые (пелитовые)* с частицами менее 0,005 мм.

По форме обломков различают породы, в которых частицы могут быть:

- 1) угловатыми (неокатанными);
- 2) округло-угловатыми (полуокатанными);
- 3) округло-полированными (окатанными).

В зависимости от размеров частиц и характера их поверхности гранулометрические элементы подразделяются на:

- 1) крупнообломочные (частицы крупнее 2 мм):
  - а) *валун* (поверхность окатанная), *глыба* (поверхность неокатанная) размером  $> 200$  мм;
  - б) *галька* (окатанная), *щебень* (неокатанная) размером от 10 до 200 мм;
  - в) *гравий* (окатанная), *дресва* (неокатанная) размером от 2 до 10 мм;
- 2) песчаные (частицы от 2 до 0,05 мм);
- 3) пылеватые (частицы от 0,05 до 0,005 мм);
- 4) глинистые (частицы меньше 0,005 мм).

К рыхлым глинистым породам относятся:

- 1) супеси с содержанием глинистых частиц размером менее 0,005 мм от 3 до 10 %;
- 2) суглинки – от 10 до 30 %;
- 3) глины – более 30 %.

Таким образом, петрографический состав обломков, как и степень их окатанности, – самый разнообразный. Они могут состоять из магматических и метаморфических пород.

По минералогическому составу осадочные породы подразделяют на:

- 1) *мономинеральные*, состоящие более чем на 90 % из одного минерала (кварцевые песчаники, кварцевые алевролиты);
- 2) *олигомиктовые* (малосмешанные), в которых один из минералов составляет 60...90 % и один-два других образуют смесь (например: кварцполевошпатовые песчаники: кварца 60...70 %, полевых шпатов 20 %);
- 3) *полимиктовые* (сильносмешанные), – когда порода состоит из смеси обломков различных минералов, среди которых нет преобладающих.

### 6.3. Грунты и их классификация

*Грунт* – это любая горная порода или почва, слагающая верхний слой земной коры, изучаемая как многокомпонентные системы и изменяющаяся во времени.

Стандарт Республики Беларусь 943-93 «Грунты. Классификация» включает в себя рассмотрение следующих классов грунтов:

- 1) с жесткими структурными связями (класс скальных грунтов);
- 2) без жестких структурных связей (класс нескальных грунтов).

Поскольку для основания транспортных сооружений и получения дорожно-строительных материалов в Республике Беларусь, в основном, используются грунты без жестких структурных связей, рассмотрим их классификацию с позиции СТБ 943-93. Она предусматривает разделение свойств грунтов на типы, виды и разновидности.

**Тип** – это разделение грунтов по петрографическому, гранулометрическому составам и числу пластичности.

**Вид** – это разделение по структуре, текстуре, степени неоднородности, содержанию заполнителей и органических веществ.

**Разновидность** – это разделение по физическим, механическим и химическим свойствам.

Классификация крупнообломочных грунтов представлена в табл. 6.2.

Таблица 6.2

### Классификация крупнообломочных грунтов

Тип	Вид	Разновидность
По гранулометрическому составу: валунный грунт (при преобладании неокатанных частиц – глыбовый) – масса частиц крупнее 200 мм – более 50%	По составу и содержанию заполнителя: с песчаным заполнителем – при его содержании более 40%; с пылевато-глинистым заполнителем – при его содержании более 30% (состав заполнителя устанавливается после удаления из образца грунта частиц крупнее 2 мм)	1. По степени влажности $S_r$ : маловлажный, $0 < S_r \leq 0,5$ ; влажный, $0,5 < S_r \leq 0,8$ ; водонасыщенный, $0,8 < S_r \leq 1$
галечниковый грунт (при преобладании неокатанных частиц – щебенистый) – масса частиц крупнее 10 мм – более 50%		2. По степени засоленности $D_{sal}$ , %: незасоленный – при содержании песчаного заполнителя менее 40% или пылевато-глинистого – менее 30%, $D_{sal} < 2$ при содержании песчаного заполнителя 40% и более, $D_{sal} < 0,5$ при содержании пылевато-глинистого заполнителя 30% и более, $D_{sal} < 5$ засоленный – значение $D_{sal}$ больше указанного для незасоленного грунта
гравийный грунт (при преобладании неокатанных частиц – дресвяный) – масса частиц крупнее 2 мм – более 50%		

Согласно стандарту, песок – это горная порода, в гранулометрическом составе которой масса частиц крупнее 2 мм составляет менее 50%, а число пластичности  $I_p < 1$ . Песчаные грунты классифицируются только по виду и разновидности (табл. 6.3).

Пылевато-глинистые грунты классифицируются по типу, виду и разновидности (табл. 6.4).

Таблица 6.3

Классификация песчаных грунтов

Вид	Разновидность
<p>1. По гранулометрическому составу:</p> <p>гравелистый – масса частиц крупнее 2 мм – более 25 %;</p> <p>крупный – масса частиц крупнее 0,5 мм – более 50 %;</p> <p>средний – масса частиц крупнее 0,25 мм – более 50 %;</p> <p>мелкий – масса частиц крупнее 0,1 мм – более 75 %;</p> <p>пылеватый – масса частиц крупнее 0,1 мм – менее 75%</p> <p>2. По показателю максимальной неоднородности <math>U_{\max}</math>:</p> <p>однородный, <math>U_{\max} &lt; 4</math>;</p> <p>среднеоднородный, <math>4 \leq U_{\max} \leq 20</math>;</p> <p>неоднородный, <math>20 &lt; U_{\max} \leq 40</math>;</p> <p>повышенной неоднородности <math>U_{\max} &gt; 40</math></p> <p>3. По относительному содержанию органического вещества <math>I_{\text{ом}}</math>:</p> <p>без примеси органического вещества, <math>I_{\text{ом}} \leq 0,03</math>;</p> <p>с примесью органического вещества, <math>0,03 &lt; I_{\text{ом}} \leq 0,1</math></p>	<p>1. По прочности:</p> <p><math>q_c</math> (ГОСТ 20069-81);</p> <p><math>P_d</math> (ГОСТ 19912-81);</p> <p><math>V</math> (ГОСТ 19912-81)</p> <p>2. По степени влажности:</p> <p><math>S_r</math> – как разновидность крупнообломочного грунта</p> <p>3. По степени засоленности <math>D_{\text{sal}}</math>, %:</p> <p>незасоленный, <math>D_{\text{sal}} &lt; 0,5</math>;</p> <p>засоленный, <math>D_{\text{sal}} \geq 0,5</math></p>



## Классификация пылевато-глинистых грунтов

Тип	Вид	Разновидность
<p>По числу пластичности <math>I_p</math>, %:</p> <p>супесь, <math>1 \leq I_p \leq 7</math></p> <p>суглинок, <math>7 \leq I_p \leq 17</math></p> <p>глина, <math>I_p &gt; 17</math></p>	<p>1. По содержанию включений по массе:</p> <p>с галькой (щебнем) либо с гравием (дресвой) при содержании соответствующих частиц крупнее 2 мм 15...25 %; галечниковый (щебенистый) либо гравелистый (дресвяный) при содержании соответствующих частиц крупнее 2 мм 26...50 %</p> <p>2. По относительному содержанию органического вещества <math>I_{om}</math>:</p> <p>без примесей органического вещества, <math>I_{om} \leq 0,05</math>; с примесью органического вещества <math>0,05 &lt; I_{om} \leq 0,1</math></p> <p>3. По коэффициенту пористости <math>e</math>:</p> <p>низкопористые, <math>e \leq 0,8</math>;</p> <p>высокопористые, <math>e &gt; 0,8</math></p>	<p>1. По прочности:</p> <p><math>q_c</math> (ГОСТ 20069-81);</p> <p><math>R_d</math> (ГОСТ 19912-81)</p> <p>2. По показателю текучести <math>I_L</math> (консистенции):</p> <p>супесь твердая, <math>I_L &lt; 0</math>;</p> <p>супесь пластичная, <math>0 \leq I_L \leq 1</math>;</p> <p>супесь текучая, <math>I_L &gt; 1</math>;</p> <p>суглинок и глина:</p> <p>твердые, <math>I_L &lt; 0</math>;</p> <p>полутвердые, <math>0 \leq I_L \leq 0,25</math>;</p> <p>тугопластичные, <math>0,25 &lt; I_L \leq 0,5</math>;</p> <p>мягкопластичные, <math>0,5 &lt; I_L \leq 0,75</math>;</p> <p>текучепластичные, <math>0,75 &lt; I_L \leq 1</math>;</p> <p>текучие, <math>I_L &gt; 1</math></p> <p>3. По относительной просадочности:</p> <p>непросадочный, <math>\epsilon_{sd} &lt; 0,01</math>;</p> <p>просадочный, <math>\epsilon_{sd} \geq 0,01</math></p> <p>4. По относительному набуханию:</p> <p>ненабухающий, <math>\epsilon_{sw} &lt; 0,04</math>;</p> <p>слабонабухающий, <math>0,04 \leq \epsilon_{sw} \leq 0,08</math>;</p> <p>средненабухающий, <math>0,08 \leq \epsilon_{sw} \leq 0,12</math>;</p> <p>сильнонабухающий, <math>\epsilon_{sw} &gt; 0,12</math></p> <p>5. По степени засоленности <math>D_{sal}</math>, %; супесь и суглинок:</p> <p>незасоленный, <math>D_{sal} &lt; 5</math></p> <p>засоленный, <math>D_{sal} \geq 5</math></p>

Обломочные грунты характеризуются следующими показателями:

1. Степень влажности (ГОСТ 5180-84)

$$S_r = \frac{W}{W_{\max}}, \quad (6.1)$$

где  $W$  – естественная влажность грунта;

$W_{\max}$  – полное водонасыщение грунта, т.е. заполнение всех пор водой, причем из породы удален под вакуумом воздух.

2. Число пластичности (ГОСТ 5180-84)

$$I_p = W_L - W_p, \quad (6.2)$$

где  $W_L$  – влажность, соответствующая границе текучести;

$W_p$  – влажность, соответствующая границе раскатывания.

3. Показатель текучести (ГОСТ 5180-84)

$$I_L = \frac{W - W_p}{W_L - W_p}, \quad (6.3)$$

где показатели – такие же, как в предыдущих формулах.

4. Относительная просадочность (ГОСТ 23161-78)

$$\varepsilon_{sl} = \frac{\Delta h_{sl}}{h}, \quad (6.4)$$

где  $\Delta h_{sl}$  – уменьшение высоты образца;

$h$  – первоначальная высота образца.

5. Относительное набухание без нагрузки (ГОСТ 24143-80)

$$\varepsilon_{sw} = \frac{\Delta h_{sw}}{h}, \quad (6.5)$$

где  $\Delta h_{sw}$  – увеличение высоты образца.

## 6. Коэффициент пористости (ГОСТ 5180-84)

$$e = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{ТВ}}} = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}, \quad (6.6)$$

где  $V_{\text{пор}}$  – объем пор грунта;

$V_{\text{ТВ}}$  – объем твердой фазы грунта;

$\rho_s$  – плотность частиц грунта;

$\rho_d$  – плотность сухого грунта.

## 7. Показатель максимальной неоднородности (ГОСТ 12536-79)

$$U_{\text{max}} = d_{50} \cdot \frac{d_{95}}{d_5}, \quad (6.7)$$

где  $d_5$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{95}$  – диаметры частиц, содержащихся в грунте соответственно в количестве 5, 50, 95%.

## 8. Относительное содержание органического вещества (ГОСТ 23740-79)

$$I_{\text{ом}} = \frac{m_{\text{ом}}}{m_d}, \quad (6.8)$$

где  $m_{\text{ом}}$  – масса органического вещества;

$m_d$  – масса сухого грунта.

## 9. Степень засоленности

$$D_{\text{sal}} = \frac{m_{\text{sal}}}{m_d} \cdot 100, \quad (6.9)$$

где  $m_{\text{sal}}$  – масса солей в грунте (легкорастворимых: хлоридов, бикарбонатов, карбоната натрия, сульфата магния и натрия; среднерастворимых: гипса и ангидрита).

## 10. Прочность осадочных грунтов оценивается:

1) сопротивлением при статическом зондировании  $q_c$  (ГОСТ 20069-81);

2) сопротивлением при динамическом зондировании  $P_d$  (ГОСТ 19912 81);

3) скоростью ударно-вибрационного зондирования V (ГОСТ 19912-81).

Следует иметь в виду, что по всем трем показателям оценивается прочность только песчаных грунтов, за исключением гравелистого песка, который оценивается показателями  $R_d$  и V, а пылевато-глинистые грунты классифицируются по  $q_c$  и  $R_d$ .

### Вопросы для самопроверки

1. Как называется процесс формирования пород из рыхлого осадка под воздействием уплотнения и цементации?

2. К какому типу относится грунт, имеющий неокатанную форму частиц и размер от 10 до 200 мм?

3. Какой трещиноватостью характеризуется порода при отношении площади трещин к площади сечения, равном девяти?

4. На сколько стадий можно разбить процесс образования осадочных пород?

5. К какому виду относится песок, если масса частиц крупнее 0,25 мм составляет 65%?

6. К какому виду относится грунт, если лабораторные исследования пылевато-глинистых грунтов позволили получить коэффициент пористости, равный 0,7?

7. К какому типу относится грунт, имеющий неокатанную форму частиц от 10 до 200 мм?

8. К какой разновидности относится грунт, если его степень влажности равна 0,6?

9. К какому виду относится пылевато-глинистый грунт, если содержание частиц от 2 до 10 мм составляет 26%?

10. Напишите формулу для определения консистенции грунта.

### 7. ЭНДОГЕННЫЕ И ГРАВИТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ВЫЗВАННЫЕ ИМИ ЯВЛЕНИЯ

*Эндогенными* называют процессы, происходящие в недрах Земли, которые проявляются в виде вулканических извержений, землетрясений, наступления на сушу и отхода морей, изменения высотного положения континентов.

*Гравитационные геологические процессы* обусловлены силой земного притяжения.

При развитии любых геологических процессов должен существовать так называемый *обязательный фактор*, без которого рассматриваемый геологический процесс не может возникнуть.

Таким обязательным фактором может быть:

- 1) для эндогенных процессов – внутриземной термодинамический режим;
- 2) для гравитационных процессов – напряженное состояние породы или среды;
- 3) для экзогенных процессов – наличие воды или температуры.

### 7.1. Тектонические движения земной коры

*Тектонические движения* связаны с явлениями: 1) морской трансгрессии; 2) дрейфа континентов; 3) радиальных и тангенциальных движений земной коры.

*Морская трансгрессия* – это затопление морем пониженных участков суши. *Регрессия* – отступление моря.

Примерно 100 млн. лет назад южная часть европейской территории СНГ (вплоть до Москвы) была затоплена Меловым морем. Между Европой и Америкой была суша, которая сейчас покрыта Атлантическим океаном.

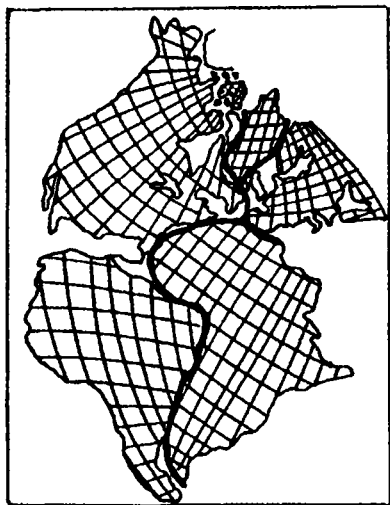


Рис. 7.1. Совпадение береговых линий континентов

*Дрейф континентов* – это крупномасштабные горизонтальные перемещения континентальных блоков. В начале XX в. А. Вегенер выдвинул теорию о совпадении береговых линий Западной Африки и восточной части Южной Америки. Он полагал, что оба эти континента некогда образовывали единый континент. В последующем этот континент раскололся, и материк Америки начал свое смещение в западном направлении (рис. 7.1).

При определенных условиях из недр Земли в зоны разрывов устремляются расплавы, расталкивающие плиты и вызывающие их

смещение. Дрейф Америки осуществляется в западном направлении со скоростью 15 мм/год. Другой континент – Австралия – смещается в восточном направлении со скоростью 70 мм/год.

Тектонические явления, выражающиеся в сложной и разнообразной деформации земной коры, по форме движения можно подразделить на вертикальные (радиальные) и горизонтальные (тангенциальные).

*Вертикальные тектонические движения* представляют собой сменяющие друг друга медленные подъемы и опускания тех или иных участков земной коры. Скорость этих движений достигает 5...15 мм/год. Примеры мест, связанных с поднятием земной коры: район Курска и Донбасса поднимается со скоростью 3...5 мм/год; Кривой Рог и предгорье Карпат – 10 мм/год, Урал – 4...6 мм/год, Памир за последние 10 тыс. лет поднялся на 500...800 м. Примеры мест, связанных с опусканием земной коры: район между Москвой и Ленинградом опускается со скоростью 1,5 мм/год, нижнее течение Немана – 2...4 мм/год, побережье Черного моря в районе Одессы – 5 мм/год, в районе Колхидской низменности – 2 мм/год.

Движения земной коры вызывают образование гигантских разломов длиной в тысячи километров. На дне Тихого океана известны глубоководные океанистические впадины: Марианский желоб – 11022 м, Тонга (восточнее Австралии) – 10822 м, Филиппинский желоб – 10497 м, Кермадек (близ Новой Зеландии) – 10047 м. На дне Атлантического океана располагается Южно-Сандвичев желоб (8428 м), Индийского океана – Яванский желоб (7450 м).

*Горизонтальные (тангенциальные) тектонические движения* приводят к смятию земной коры, образованию складчатых структур. Таково происхождение Уральского и Кавказского хребтов. В области Альп смещение направлено в сторону Мюнхена со скоростью 10 мм/год. Калифорнийское побережье США перемещается со скоростью 5 мм/год.

Тектонические движения земной коры можно подразделить на дислокационные и колебательные.

*Дислокационным движениям* предшествует медленное перераспределение напряжений в земной коре, в результате которого возникают зоны и очаги повышенных и пониженных напряжений. Когда эти напряжения превысят прочность породы, начинаются дислокационные движения, вначале – в форме пластических деформаций, а затем – разрывных.

**Колебательные движения** вызваны сейсмичностью, физической природой которой связана с внутренними и внешними механическими импульсами – ударами, толчками, взрывами, возбуждающими в сплошной среде упругие волны.

Внутренние и внешние механические импульсы могут возникать вследствие:

1) разрядки упругих напряжений, вызванных взрывами, соударениями и трением между блоками земной коры;

2) тепловых взрывов в верхней зоне мантии, связанных с пластическими движениями, обуславливающими нарастание температуры до критического уровня;

3) провалов пещер, горных обвалов и лавин.

Распространяясь с большей или меньшей скоростью, зависящей от силы удара, характера среды, волны вызывают сотрясение в разных участках земной коры.

Скорость распространения сейсмических волн различна в продольном и поперечном направлениях. В твердых породах продольные волны распространяются со скоростью 4...6 км/с, поперечные – 3...4 км/с. В менее плотных породах скорость распространения заметно снижается: в известняках – около 2 км/с, в рыхлых породах – не более 1,0 км/с. В водной среде сейсмические колебания распространяются со скоростью 1000 км/ч, т.е. в три раза медленнее, чем в рыхлых породах.

## 7.2. Явления, вызванные гравитационными процессами

В результате *гравитационных геологических процессов*, обусловленных силой земного притяжения, происходит отрыв, скалывание либо пластическое течение породы.

К гравитационным явлениям относятся: обвалы, осыпи, оползни, сели и снежные лавины.

**Обвал** – это отделение от массива крупного блока горных пород на крутом обрывистом склоне, происходящее вследствие потери устойчивости под влиянием различных факторов. Обвалы происходят на склонах, монолитность которых нарушена трещинами. Примером катастрофического обвала может служить событие 1911 года, когда на Памире обрушилось свыше 2,2 млрд. м<sup>3</sup> породы. В результате р. Бартанг оказалась перекрытой дамбой длиной 5 км и

высотой 700 м. Образовалось Сарезское озеро длиной 80 км и глубиной 500 м. Так же возникло озеро Рица на Кавказе.

**Осыпи** – это накопления, образующиеся при скатывании со склонов обломков пород различных размеров. Характерной особенностью осыпей является их подвижность. По подвижности они подразделяются на *действующие, затухающие и неподвижные*.

**Оползни** – это скользящее смещение горных пород на склонах под воздействием собственного веса и подземных вод. Устойчивость склонов нарушается при наличии таких факторов, как увеличение активных сдвигающих сил, уменьшение сил сопротивления или одновременное воздействие обоих факторов.

Оползающий массив находится под воздействием двух моментов: вращающего (сдвигающего)  $M_{сд}$  и удерживающего  $M_{уд}$ .

Коэффициент устойчивости склона или откоса равен отношению суммы моментов удерживающих сил  $M_{уд}$  к сумме моментов сдвигающих сил  $M_{сд}$ :

$$K = \frac{\sum M_{уд}}{\sum M_{сд}}. \quad (7.1)$$

Считается, что склон устойчив при коэффициенте устойчивости  $K = 1,25 \dots 1,5$ .

Если склон сложен из однородных грунтов, расчет его устойчивости производится *методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения* (КЦПС), из разнородных грунтов, – *методом горизонтальных сил Маслова-Берера*.

По методу КЦПС степень устойчивости определяется способом моментов массива, ограниченного криволинейной поверхностью скольжения, приближающейся к круговой кривой. Расчет сводится к нахождению центра наиболее опасной кривой скольжения, для которой коэффициент устойчивости имеет минимальное значение. Центр такой кривой определяется по *методу шведского ученого Фелениуса* (рис. 7.2).



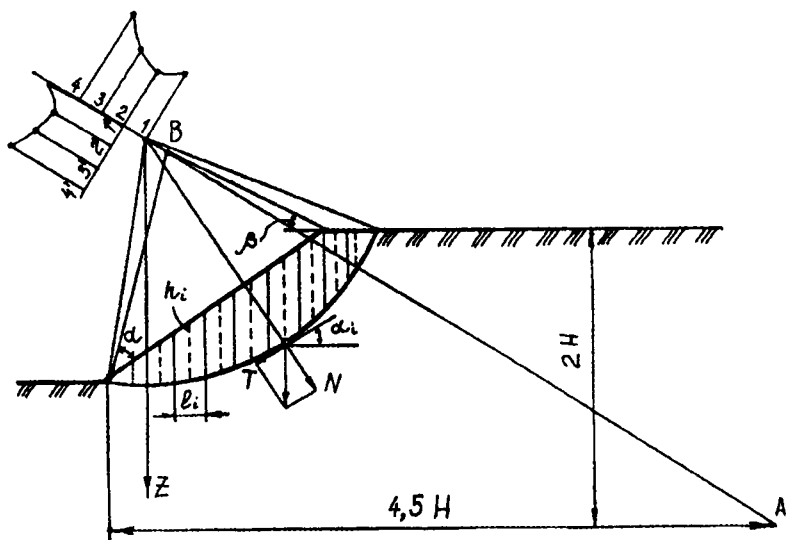


Рис. 7.2. Схема для определения центра наиболее опасной кривой скольжения

Для нахождения центра наиболее опасной кривой скольжения опускаем из нижней точки откоса перпендикуляр на расстояние, равное  $H$ , где  $H$  – высота откоса. От полученной точки проводим горизонтальный луч, на котором через расстояние, равное  $4,5 H$ , получаем точку  $A$ . Таким образом, точка  $A$  находится на глубине, равной  $2 H$ . Из характерных точек откоса (верхней и нижней) проводим 2 луча под углами  $\alpha$  и  $\beta$ . Значение этих углов в зависимости от крутизны заложения откоса принимается по табличным величинам [7]. Пересечение этих лучей даст нам точку  $B$ . Соединяем точки  $A$  и  $B$  прямой, и на ней произвольно выбираем 4 точки (1, 2, 3, 4), каждая из которых последовательно становится центром кривой скольжения. Радиусом, равным расстоянию от выбранной точки (1, 2, 3, 4) до нижней точки откоса, проводим круговую кривую. Полученный массив разбиваем на блоки вертикальными линиями шириной  $1 \dots 2$  м и определяем вес каждого блока:

$$P_i = F_i \cdot \rho_i, \quad (7.2)$$

где  $F_i$  – площадь блока;

$$F_i = l_i \cdot h_i,$$

где  $l_i$  – ширина блока;  
 $h_i$  – средняя высота;  
 $\rho_i$  – плотность грунта.

На каждый блок действуют две силы:  
*удерживающая*

$$N = P_i f_i \cdot \cos \alpha_i + c l_i; \quad (7.3)$$

*сдвигающая*

$$T = P_i \cdot \sin \alpha_i, \quad (7.4)$$

где  $P_i$  – вес блока;

$f_i = \text{tg } \varphi_i$  – коэффициент внутреннего трения грунта;

$\varphi_i$  – угол внутреннего трения грунта;

$\alpha_i$  – угол наклона к горизонту поверхности скольжения в пределах выделенного отсека;

$c$  – сцепление грунта;

$l_i$  – длина кривой скольжения в пределах отсека.

Для каждого отсека моменты сдвигающих и удерживающих сил определяются из выражения

$$M_{уд i} = N \cdot R; \quad (7.5)$$

$$M_{сд i} = T \cdot R. \quad (7.6)$$

Коэффициент устойчивости определяется из выражения

$$K = \frac{\sum M_{уд i}}{\sum M_{сд i}} = \frac{R \left( \sum_{i=1}^{i=n} P_i \cdot \text{tg } \varphi \cdot \cos \alpha_i + \sum_{i=1}^{i=n} C_i l_i \right)}{R \sum_{i=1}^{i=n} P_i \sin \alpha_i}.$$

Упрощаем формулу, применив следующие обозначения:

$$\cos \alpha_i = 1.$$

Сдвигающую силу заменяем моментом всех блоков относительно центра вращения:

$$\sum P_i \sin \alpha_i \rightarrow \sum P_i X_i,$$

где  $X_i$  – плечо от оси до центра тяжести блока.

$\sum_{I=1}^{i=n} C_i l_i$  при однородном грунте выражаем через длину всей дуги скольжения  $C_{wL}$ , где

$$L = \frac{\pi R \alpha}{180}. \quad (7.7)$$

Сокращаем  $R$ .

В окончательном виде коэффициент устойчивости равен

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} P_i \operatorname{tg} \varphi + C_w \cdot L}{\sum_{i=1}^{i=n} P_i X_i}. \quad (7.8)$$

*Сели* – это временные грязекаменные потоки, насыщенные твердыми материалами, которые могут изливаться с огромной силой из мест с высокими геодезическими отметками в равнины и долины. По характеру движения сели подразделяют на *связные, или структурные, и текучие, или турбулентные*; по условиям образования – на *ливневые и гляциальные* (возникающие в результате разрушения берегов высокогорного озера). Геологические условия способствуют формированию водокаменных, грязекаменных и грязевых селей.

*Снежные лавины* – это обрушение больших масс снега, причем большое количество снега не является обязательным условием для возникновения лавины. Необходима перекристаллизация снега. Упругость пара над разными по форме снежинками различна, вследствие чего мелкие кристаллы исчезают, а крупные растут, округляя свои формы. Возгонка паров от нижних слоев в верхних приводит к разрыхлению снега.

По характеру движения выделяют: *снежные осовы (оползни), лотковые и прыгающие лавины.*

## Вопросы для самопроверки

1. Как называется процесс отступления моря и поднятия участков суши?
2. В какой среде распространение сейсмических волн осуществляется со скоростью 1000 км/ч?
3. Приведите пример радиального опускания поверхности Земли.
4. Какой континент смещается в восточном направлении со скоростью 70 мм/год?
5. Какие моменты преобладают при устойчивом откосе?
6. Какой параметр определяется по методу Фелениуса?
7. Напишите формулу для определения коэффициента устойчивости откоса.
8. Какой обязательный фактор ведет к возникновению гравитационных процессов?
9. Что предшествует дислокационным движениям земных масс?
10. Как образуются гляциальные сели?

## 8. ЭКЗОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ КЛИМАТИЧЕСКОГО И ВОДНОГО ХАРАКТЕРА И ВЫЗВАННЫЕ ИМИ ЯВЛЕНИЯ

### 8.1. Явления, вызванные экзогенными процессами климатического характера

*Экзогенными* называются процессы, происходящие на поверхности земного шара под воздействием солнечной энергии, климатических факторов, действия воды, температуры и давления. Все экзогенные процессы подразделяются на процессы климатического и водного характера.

К экзогенным процессам *климатического характера* относятся: выветривание, криогенные и эоловые процессы.

*Выветриванием* называется процесс разрушения и изменения состава, а также состояния горных пород на месте их залегания под воздействием физических явлений, химических процессов и деятельности различных организмов. Различают виды выветривания: физическое, или механическое, химическое, биологическое, или органическое.

Под *физическим выветриванием* понимают возникновение температурных напряжений, вызываемое колебаниями температур и водой, попавшей в трещины и развивающей боковое давление при замерзании.

Скорость процесса физического выветривания можно определить из выражения

$$H \cong a\sqrt{t-t_0} \text{ при } t_0 < t \leq t_{\max}, \quad (8.1)$$

где  $H$  – мощность зон выветривания;

$a$  – эмпирический коэффициент, численно равный средней скорости выветривания в метрах за 1-й год;

$t$  – время на данный момент после начала выветривания;

$t_0$  – время появления первых признаков выветривания;

$t_{\max}$  – время, необходимое для формирования молодой коры.

По скорости процесс выветривания можно разделить на стадии:

1) интенсивного выветривания – период, когда формируется 50% мощности коры выветривания;

2) замедленного, – когда мощность увеличивается до 80%;

3) затухающего, – когда формируется максимальная мощность.

*Химическое выветривание* происходит под действием газов, содержащихся в атмосфере, а также воды с растворенными в ней солями и газами.

В *биологическом выветривании* существенную роль играет воздействие микроорганизмов и растительности, которое приводит к образованию почвенного слоя.

*Криогенные процессы* связаны с отрицательными температурами на поверхности Земли. *Криолитозона* – это область развития мерзлых пород, имеющих нулевую или отрицательную температуру в течение ряда лет. Площадь распространения многолетнемерзлых пород составляет до 25% всей суши земного шара и около 47% площади России. Для криолитозоны характерны: льдистость, наледи, полигонально-жильные образования, криогенная десерпция и солифлюкация.

*Льдистость* образуется при замерзании воды во влажных, но не водонасыщенных породах; заполняет поры, не нарушая их структуры. Переход такого льда в жидкую фазу не вызывает избыточного увлажнения.

*Наледи* образуются при послойном замерзании воды на поверхности в результате многократного излияния вод подземных источников.

*Полигонально-жильные образования* возникают на основе морозобойного растрескивания пород. Создается сетка трещин, которая заполняется водой, а затем замерзает.

*Криогенная десертция* (сползание) происходит в результате пучения, направленного по нормали к поверхности, а движение при оттаивании – под воздействием силы тяжести, по вертикали (рис. 8.1).

*Солифлюкция* – медленное течение почв – происходит в результате оттаивания льдонасыщенных дисперсных грунтов, что приводит к утрачиванию структурных связей.

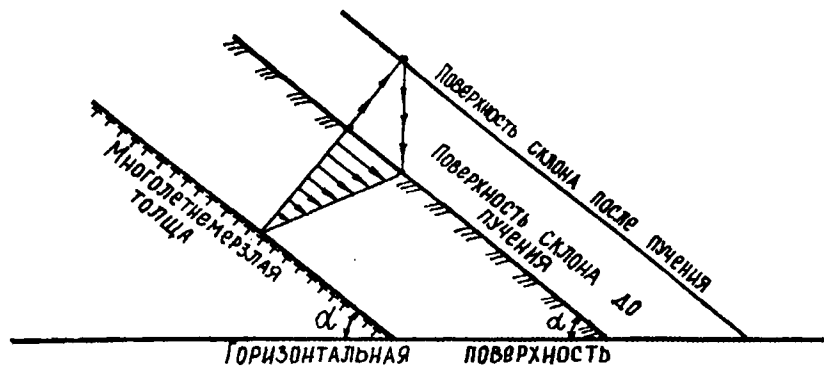


Рис. 8.1. Схема криогенной десертции

К экзогенным процессам климатического характера относятся также *эоловые* процессы, т. е. процессы, происходящие под действием силы ветра. К эоловым процессам разрушительного характера относятся: *дефляция* и *коррозия*.

*Дефляция* (выдувание) заключается в том, что от пород под воздействием ветра отрываются и уносятся частицы.

*Коррозия* (обтачивание) – когда песчаные частицы, ударяясь о твердые породы, перетирают, сверлят и обтачивают их поверхность.

*Эоловые аккумуляции* могут быть представлены барханами и дюнами. Когда материал, переносимый ветром, осаждается на земной поверхности, аккумулируется, возникают барханы, а если осаждение происходит на морских отмелях, – образуются дюны.



б) исключительно трудноразмываемые (магматические и метаморфические породы).

Процесс размыва горных пород называют *эрозией*. Донная эрозия приводит к оврагообразованию.

**Заболачивание** – это процесс насыщения увлажненных участков земной поверхности органическими веществами, приводящий к образованию торфа.

**Торфы** – волокнистые сильно сжимаемые водонасыщенные грунты в виде органоминеральной части, возникшие в результате гумификации. Накапливаются в болотах из отмерших растительных остатков, подвергшихся неполному разложению (оторфовыванию) в условиях повышенной влажности и затрудненного доступа воздуха. Различаются по степени разложения.

**Болотом** считается избыточно увлажненный участок земной поверхности, покрытый слоем торфа глубиной не менее 30 см в неосушенном и 20 см – в осушенном виде (Всесоюзная конференция по болотному кадастру, 1934 г.).

Болото может образоваться двумя путями:

- 1) при напске воды на данный участок из окружающих мест и застое в течение вегетационного периода;
- 2) при превышении осадков над испарением и недостаточном стоке.

В соответствии со СНиП 2.05.02-85 различают три типа болот:

**1-й тип** – болота, заполненные болотными грунтами, прочность которых в природном состоянии обеспечивает возможность возведения насыпи высотой до 3 м без возникновения процесса бокового выдавливания слабого грунта;

**2-й тип** – болота, содержащие в пределах болотной толщи хотя бы один слой, который может выдавливаться при некоторой интенсивности возведения насыпи высотой до 3 м, но не выдавливается при меньшей интенсивности возведения насыпи;

**3-й тип** – болота, содержащие в пределах болотной толщи хотя бы один слой, который при возведении насыпи высотой до 3 м выдавливается независимо от интенсивности возведения насыпи [8].

Болота подразделяются на низинные, верховые и переходные (К.А.Всбер, 1908 г.).

**Низинные болота** характеризуются сильной обводненностью, высокой степенью разложения торфа (30...40%) и зольностью 8...12%.



*Верховым болотам* свойственна слабая обводненность и степень разложения (5...15%). Зольность торфа составляет 1,5...3,5%.

*Переходные болота* занимают промежуточное положение. Зольность торфа – 4...7% при степени разложения 20...35%.

В Беларуси болота занимают 2,5 млн. га (табл. 8.1), что составляет 12,4% ее территории [9]. Преобладают низинные болота на юге республики. Верховые распространены в северной части. В настоящее время болотообразование протекает слабо из-за уменьшения количества осадков, увеличения температуры воздуха, усиления испарения, вырубки леса, обмеления рек и осушения болот.

Таблица 8.1

Распределение болот по областям  
(по А.П.Пидопличко, 1961 г.)

Показатели	Брестская	Витебская	Гомельская	Гродненская	Минская	Могилевская	Всего
Заторфованность территории, %	20,2	9,4	11,9	7,0	15,8	8,2	12,4
Средняя глубина торфа, м	1,49	2,45	1,76	2,18	1,91	1,98	1,88
Запасы торфа, млн. м <sup>3</sup>	5986	6152	4993	1965	7715	2477	29289
Распред. болот, %:							
верховые	0,7	35,5	12,6	2,9	10,6	29,6	13,5
переходные	6,1	4,3	4,6	1,6	4,7	5,0	4,8
низинные	93,2	60,2	82,8	95,5	84,7	65,4	81,7

### Вопросы для самопроверки

1. На какие виды разделяются экзогенные процессы?
2. Что такое выветривание?
3. Какую часть земного шара занимает криолитозона?
4. Чем отличаются друг от друга десерпция и солифлюкция?
5. Опишите процесс формирования дюн.

6. Напишите реакцию перехода растворимых карбонатов в нерастворимые бикарбонаты.

7. Что такое контактная суффозия?

8. К каким породам по размываемости относятся суглинки?

9. К какому типу относится болото, сплошь заполненное торфами, подстилаемое плотным грунтом?

10. Какая область Республики Беларусь является наиболее заторфованной?

## 9. ГРУНТ КАК МНОГОКОМПОНЕНТНАЯ СИСТЕМА

Составляющими фазами грунта являются:

1) твердая – минеральная и органическая части горных пород;

2) жидкая – содержащиеся в пустотах природные воды;

3) газообразная – газы в пустотах породы.

*Твердая фаза* образуется при разрушении горных пород и минералов, поэтому твердые частицы имеют различную форму, состав и размеры. С уменьшением размеров частиц возрастает удельная поверхность грунта и усиливается проявление физико-химических сил, действующих на поверхности данных частиц.

*Жидкая фаза* включает воду, заполняющую промежутки между твердыми минеральными частицами с растворенными минеральными солями. Важнейшим показателем физико-химической природы грунтовых вод является *показатель концентрации водородных ионов* – *pH*. Показатель pH характеризует соотношение свободных ионов  $H^{+1}$  и  $OH^{-1}$ . В зависимости от этого характер реакции будет:

1) нейтральным – при  $H^{+1} = OH^{-1}$ , чему соответствует  $pH = 7$ ;

2) щелочным – при  $H^{+1} < OH^{-1}$ , чему соответствует  $pH > 7$ ;

3) кислым – при  $H^{+1} > OH^{-1}$ , чему соответствует  $pH < 7$ .

Следует отметить, что pH может изменяться от 1 до 13.

*Газообразная фаза* соприкасается с жидкой и растворяется в ней, вступая при этом во взаимодействие с твердыми частицами.

Обычное состояние грунта – трехфазное, однако он может находиться и в двухфазном состоянии, когда промежутки между твердыми частицами целиком заполнены водой. В таком состоянии находятся грунты, расположенные ниже уровня грунтовых вод. Искусственным путем грунт можно представить и в однофазном состоянии, если из него удалить воду и поместить под вакуум.

Все горные породы различаются по:

- 1) минералогическому составу;
- 2) состоянию;
- 3) структурным и текстурным особенностям.

Под *минералогическим составом* понимают относительное содержание различных минералов, выраженное в процентах к весу.

*Состояние* характеризуется плотностью, влажностью и др.

Под *структурой* подразумевается внутреннее строение горной породы, обусловленное величиной и формой минералов, а также характером связей между отдельными элементами.

*Текстура* определяет внешний облик породы (массивность, однородность, слоистость, пористость).

### 9.1. Структура грунтов

Размеры, форма и взаимное расположение зерен в грунтах может быть разнообразным и зависеть от состава материнской породы. Зерна могут быть шарообразными или угловатыми. Поверхность зерен может быть гладкой или шероховатой. Пространство между частицами называют *порами*.

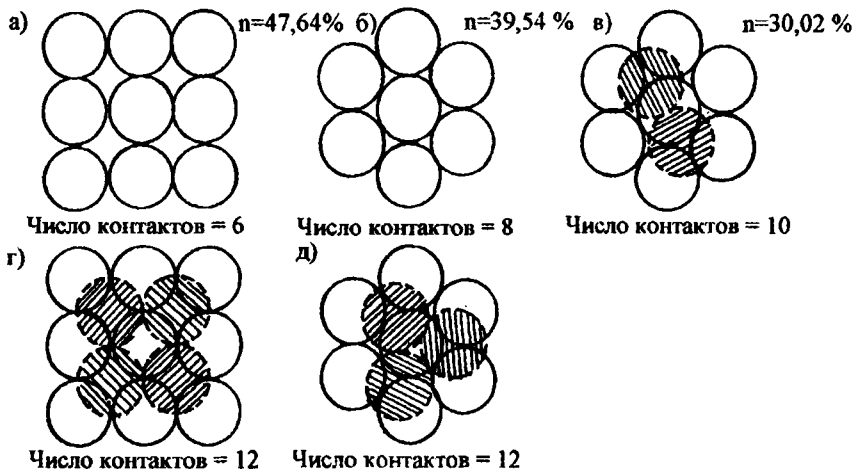


Рис. 9.1. Возможные комбинации расположения шаров:  
а – статически неустойчивая укладка; б, в, г – статически устойчивая (наиболее вероятная); д – статически устойчивая (редчайшая)

По плотности укладки зерен различают: плотную и рыхлую раздельно-зернистую структуры. Плотная структура характеризуется минимальной пористостью.

Приняв допущения, что грунт представлен шарообразными частицами одного размера, можно вывести пять теоретически возможных взаиморасположений этих частиц, при которых пористость изменяется от «max» до «min» (рис. 9.1).

В каждом из перечисленных случаев есть одно из двух соотношений между диаметром шара и вписанной в пространство между шарами окружностью (рис. 9.2):

$$\frac{D}{D_1} = 2,4; \quad \frac{D}{D_2} = 6,4. \quad (9.1)$$

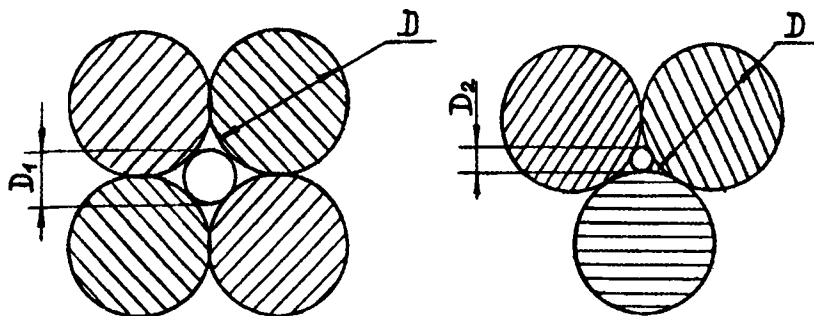


Рис. 9.2. Соотношение между диаметром шара и цилиндрической порой

Хотя поперечное сечение поровых каналов принимают круглым, в действительности их геометрическая форма приближается к треугольнику. По длине они также изменяются и имеют сужения и расширения. Но поскольку в вершинах треугольника нет движения фильтрационного потока воды из-за образования застойных зон и пленок молекулярно связанной воды, поры считают цилиндрическими. Наиболее распространенные значения пористости для различных грунтов представлены в табл. 9.1.

## 9.2. Значение пористости грунтов

Структуру рыхлых обломочных и песчаных грунтов называют *раздельно-зернистой*, глинистых – *агрегатной*. Последняя отлича-

ется от отдельно-зернистой тем, что отдельные гранулометрические элементы в глинистых грунтах соединены вместе и образуют более крупные и сложные агрегаты. В зависимости от величины агрегатов различают *микро-, макро- и мезоагрегатную структуры*.

Таблица 9.1

Значение пористости грунтов

Наименование пород	Пористость пород, %		
	минимальная	максимальная	наиболее распространенная
Гравелистые	19	55	22...38
Песчаные	20	81	26...48
Лессовые	34	64	36...50
Иловатые	35	90	38...70
Глины	22	91	32...60

Агрегаты, в свою очередь, подразделяются на монодисперсные и полидисперсные.

*Монодисперсные агрегаты* образуются, если слагающие породу частицы относительно одинаковы по размерам. Такие структуры часто называют губчатыми, или ячеисто-хлопьевидными. Они образуются благодаря процессу коагуляции.

*Коагуляция* – это слипание частиц в дисперсных системах, ведущее к уменьшению их числа и увеличению их массы.

*Полидисперсные агрегаты* образуются при наличии частиц песчаных, пылеватых и глинистых, а образовавшаяся при этом структура называется сложной каркасной.

В породах между частицами существуют структурные связи. Их можно разделить на кристаллизационные, конденсационные и коагуляционные.

*Кристаллизационные связи* возникают по мере охлаждения магмы. В кристаллической решетке минералов связь между положительными и отрицательными ионами – химическая. Кристаллизационные структурные связи хрупки и при разрушении не восстанавливаются.

*Конденсационные связи* возникают в процессе эпигенеза, т.е. выделения из порового пространства различных химических веществ, играющих роль цемента между минеральными частицами.

*Коагуляционные связи возникают* при осаждении в водоемах тонкодисперсных и коллоидных частиц. Они проявляются у глинистых пород при наличии физически связанной воды за счет сил межмолекулярного взаимодействия (сил Ван-дер-Ваальса).

### Вопросы для самопроверки

1. Из скольких компонентов состоит грунт?
2. Каким соотношением между свободными ионами характеризуется нейтральная среда?
3. Какими параметрами характеризуется состояние грунта?
4. Нарисуйте комбинацию шаров при пористости, равной 30,02%.
5. Каково соотношение между частицей и порой при числе контактов частиц, равном 8?
6. Какие грунты имеют наибольшую пористость?
7. Что собой представляют поры грунта?
8. Какую структуру образуют глинистые частицы?
9. Что такое процесс коагуляции?
10. Дайте характеристику конденсационным структурным связям.

## 10. ДИСПЕРСНЫЕ ГРУНТЫ

### 10.1. Гомогенные и гетерогенные системы

Процессы физического, химического и биологического выветривания обуславливают постепенное накопление в толще грунтов все более мелких частиц, в результате чего такие грунты приобретают свойства дисперсных систем.

*Дисперсными* называют системы, состоящие из двух или более веществ, распределенных одно в другом.

Грунт при увлажнении представляет собой дисперсную систему, где дисперсионной средой является вода, в объеме которой распределены твердые минеральные частицы грунта – дисперсная фаза.

Дисперсные системы подразделяются на однофазные (гомогенные) и многофазные (гетерогенные).

*Однофазными (гомогенными)* называются системы, в которых в любой точке внутри занимаемого ими пространства физические свойства остаются постоянными (например: растворы, газ, дым, туман).

*Многофазными (гетерогенными)* называются системы, состоящие из различных фаз, взаимодействующих между собой по поверхности раздела. Грунты представляют собой многофазную дисперсную систему.

Для таких систем большое значение имеет степень дисперсности, характеризуемая удельной поверхностью, которая представляет собой отношение величины суммарной поверхности частиц к занимаемому ими объему.

## 10.2. Коллоиды и коллоидные системы (мицеллы)

*Коллоиды* – это тела, превышающие размер отдельных молекул вещества, но, вместе с тем, во много раз меньшие частиц, способных осаждаться в воде под действием силы тяжести.

Дисперсные системы, в которых преобладает дисперсионная среда, носят название *коллоидных растворов (систем)*. Для существования коллоидной системы необходимо поддержание таких условий, при которых бы сохранялась некоторое время достигнутая степень дисперсности, в противном случае может произойти растворение частиц либо их слипание и выпадение в осадок. Поэтому коллоиды могут находиться в двух состояниях: золя и геля.

*Гелем* называется твердое вещество, образующееся в результате выпадения в осадок из коллоидного раствора твердой дисперсной фазы, т.е. коагуляции.

*Золям* называют систему, представляющую собой жидкость, в которой рассеяны коллоидные частицы грунта.

Коллоидные системы разделяются на две группы: обратимые и необратимые.

*Обратимой* является система, в которой осадок при соприкосновении с водой снова переходит в золь, *необратимой* – в которой осадок не переходит в золь.

Процесс перехода сухого осадка в золь называется *пептизацией*.

Процессы коагуляции и пептизации связаны с наличием электрического заряда в коллоидных частицах – мицеллах (рис. 10.1).

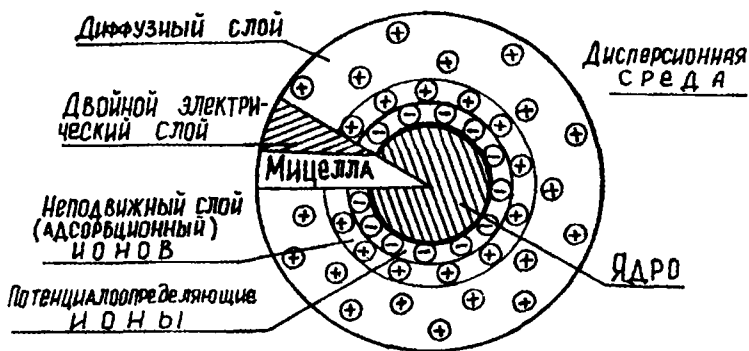


Рис. 10.1. Схема строения частицы отрицательно заряженного коллоида

*Мицелла* состоит из ядра, на поверхности которого находится неподвижный слой положительно или отрицательно заряженных ионов — *внутренняя обкладка*. Этот слой определяет электрический заряд, вследствие чего частица притягивает из окружающей среды противоположно заряженные ионы. Этот слой носит название *адсорбционного*. Адсорбционный слой и внутренняя обкладка образуют неподвижную часть двойного электрического слоя. Далее вокруг частицы располагается *диффузный* слой ионов, состоящий из противоположно заряженных ионов и молекул окружающей среды.

Коллоидные системы, способные связывать воду на поверхности твердых частиц дисперсной фазы, носят название *гидрофильных*; коллоидные системы, частицы которых слабо взаимодействуют с водой, т.е. отталкивают воду, — *гидрофобных*. Грунтовые коллоиды преимущественно относятся к гидрофильным.

### 10.3. Поглотительная способность грунтов

Свойство грунтов поглощать из водных растворов содержащиеся в них вещества называют *поглотительной (адсорбционной) способностью*.

Процесс поглощения грунтом состоит из нескольких совместно протекающих процессов (физических, химических, биологических), в результате которых происходит изменение состава, состояния и свойств грунтов. Различают: механическую, физическую, химическую, физико-химическую и биологическую поглотительные способности грунтов.



**Механическая поглотительная способность** позволяет задерживать частицы, взвешенные в фильтрующейся через них воде. Такое поглощение наблюдается, когда размеры фильтрующихся частиц больше размеров пор или мелкие частицы попадают в замкнутые или искривленные поры, в результате чего происходит их заиливание.

**Физическая поглотительная способность** дает возможность поглощать из водных растворов или суспензий некоторые вещества вследствие молекулярного взаимодействия, возникающего между ними и грунтовыми частицами. При физическом поглощении поглощаемое вещество химически не взаимодействует с грунтовыми частицами, при этом оно располагается только на поверхности частиц или же распределяется по всему объему, образуя твердый раствор. В первом случае процесс называется *адсорбцией* (поверхностное физическое поглощение), во втором *абсорбцией* (объемное физическое поглощение).

Физическое поглощение грунтов связано с наличием свободной поверхностной энергии на поверхности грунтовых частиц, соприкасающихся с водой или водным раствором, и явлениями поверхностного натяжения. Вещества, понижающие поверхностное натяжение и повышающие концентрацию раствора, вызывают явление *положительной адсорбции*, а вещества, повышающие поверхностное натяжение и уменьшающие концентрацию раствора, – *отрицательной адсорбцией*. При положительной адсорбции поглощаются молекулы растворенного вещества, при отрицательной – растворителя (молекулы воды). Следовательно, образование связанной воды в грунтах определяется их физической поглотительной способностью. Адсорбция молекул воды из атмосферы приводит к образованию гигроскопических водных пленок на поверхности грунтовых частиц. Адсорбция органических соединений из битумных материалов придаст грунтам несмачиваемость водой, т.е. гидрофобность.

**Химическая поглотительная способность** грунтов способствует образованию нерастворимых или малорастворимых соединений при взаимодействии грунта с растворенными в воде веществами. Образовавшиеся нерастворимые соединения выпадают из раствора в осадок и примешиваются к твердой фазе грунта. При химическом поглощении в отличие от физического поглощаемое вещество взаимодействует с поглощающими его частицами, образуя новое соединение.

**Физико-химическая (обменная) поглотительная способность** позволяет грунтам поглощать некоторое количество ионов из водного раствора, окружающего грунтовую частицу, с одновременным выделением в него эквивалентного количества ионов, входящих в состав адсорбционных пленок или участвующих в строении кристаллической решетки. При обработке глинистого грунта раствором  $\text{CaCl}_2$  часть ионов кальция исчезает из раствора, но при этом обнаруживаются другие катионы:  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , суммарное количество которых эквивалентно количеству исчезнувшего  $\text{Ca}^{++}$  (рис. 10.2).

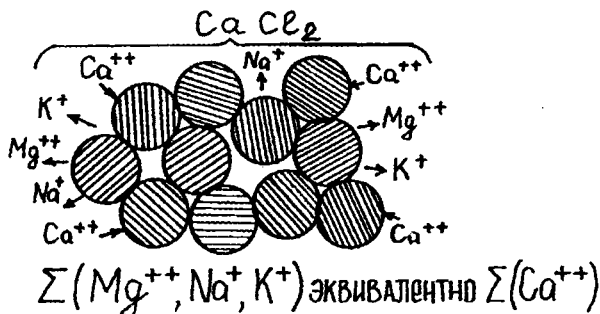
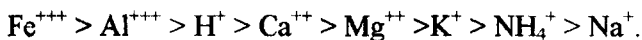


Рис. 10.2. Схема физико-химической поглотительной способности

Относительная способность того или иного иона вытеснять адсорбированные ионы, а самому занимать его место, определяется энергией поглощения:



**Биологическая поглотительная способность** – это обогащение грунта веществами, накапливаемыми в процессе жизнедеятельности макро- и микроорганизмов.

### Вопросы для самопроверки

1. Дайте характеристику гетерогенной системе.
2. Как называется частица, большая молекулы, но меньшая частиц, способных осаждаться в воде под действием силы тяжести?
3. Что такое дисперсная система?
4. На сколько групп разделяются коллоидные системы?
5. Что такое процесс пептизации?

6. Начертите схему мицеллы.
7. Что такое гидрофильные частицы?
8. Сколько Вы знаете видов поглощательной способности грунтов?
9. В результате какой поглощательной способности происходит заиливание грунта?
10. Объясните схему физико-химической поглощательной способности.

## 11. ВОДА В ГРУНТАХ

### 11.1. Происхождение подземных вод

Благодаря энергии Солнца с поверхности Земли в атмосферу ежегодно поднимается  $> 500$  тыс. км<sup>3</sup> воды. Только с поверхности океана испаряется 411 тыс. км<sup>3</sup> воды, из них  $2/3$  в виде атмосферных осадков возвращается обратно в океан, а  $1/3$  уносится ветром на сушу (рис. 11.1).

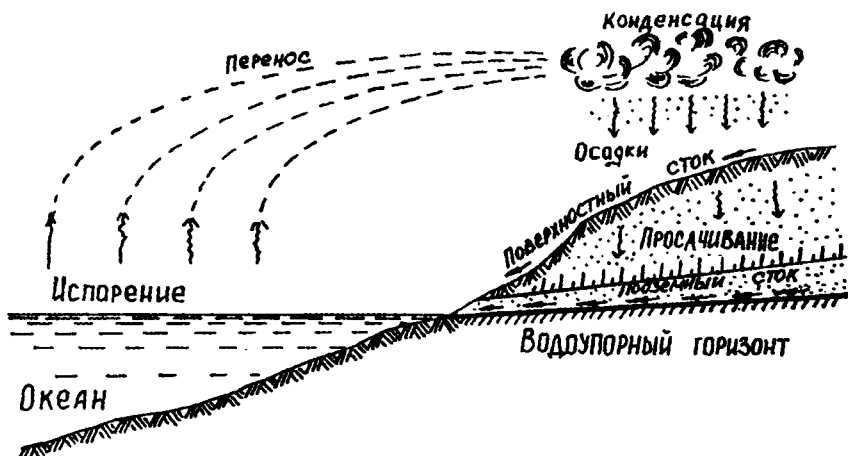


Рис. 11.1. Схема круговорота воды в природе

Моря, озера, реки занимают 71% площади Земли. Если бы вода была распределена по поверхности Земли равномерно, она бы покрыла земной шар слоем 2700 м. Примерно  $1/50$  часть суши занимают озера с пресными и солеными водами. Во всех озерах нашей планеты в 5,0 тыс. раз меньше воды, чем в океанах и морях, а в ре-

ках ее в три раза больше, чем в озерах. Объем суши, поднимающейся над уровнем моря, составляет лишь 1/18 объема океана. К *подземным водам* относятся все воды земной коры, находящиеся ниже поверхности земли и дна поверхностных водоемов и водотоков. Подземные воды заполняют свободные пустоты в горных породах.

По происхождению подземные воды подразделяются на инфильтрационные, конденсационные, седиментационные, ювениальные.

*Инфильтрационные воды* возникают вследствие выпадения атмосферных осадков.

*Конденсационные воды* связаны с процессами пополнения подземных вод в пустынных областях за счет конденсации паров воды, содержащихся в воздухе.

*Седиментационные воды* возникают за счет отжатия воды из горных пород при их уплотнении.

*Ювениальные воды* проникают в поверхностные горизонты земной коры из недр Земли.

Поверхностная зона земной коры подразделяется на две зоны – аэрации и насыщения.

*Зона аэрации* характеризуется заполнением пустот и пор в породах воздухом. В этой зоне различаются следующие горизонты: 1) с почвенной влагой; 2) с временными, обычно сезонными, водами; 3) капиллярной оболочки.

*Горизонт почвенной влаги* характеризуется отсутствием в нем свободной воды. В толще грунта вода может находиться в следующих состояниях: водяного пара, гигроскопическом, пленочном, гравитационном (свободном), твердом (в виде льда).

*Парообразная вода* находится в зоне аэрации в порах, не занятых водой, и движется вследствие различия упругости паров.

*Гигроскопическая вода* прочно связана с поверхностью частиц. Она не может передвигаться с частицы на частицу и переходит в пар, лишь отрываясь от частицы.

*Пленочная вода* образует на поверхности частиц пленку, толщина которой зависит от состава и крупности частиц. Пленочная вода передвигается с частицы на частицу из участков с большей толщиной пленки в участки с меньшей.

*Свободная гигроскопическая вода* в зоне аэрации находится в виде капиллярно-подвешенной воды либо медленно передвигается вниз (просачивается) и доходит до уровня грунтовых вод.

*Горизонт капиллярной оболочки* связан с грунтовыми водами, и породы здесь находятся в состоянии капиллярного насыщения. Капиллярная вода является переходным типом между связанной и свободной. Она передвигается в капиллярных порах снизу вверх под влиянием подъемной силы, развивающейся в вогнутом мениске. Такая вода подразделяется на капиллярно-подвешенную и собственно капиллярную. Капиллярно-подвешенная вода не сообщается с уровнем грунтовых вод и удерживается капиллярными силами. Собственно капиллярная сообщается с уровнем грунтовых вод.

В *зоне насыщения* породы находятся в состоянии полного водонасыщения. Подземные воды в зоне насыщения подразделяются на *грунтовые (безнапорные), карстовые, артезианские (напорные)*.

## 11.2. Положения уровня стояния грунтовых вод

Грунтовые воды образуют первый от поверхности постоянно существующий водоносный горизонт, в основании которого залегают глинистые водоупорные породы. Сверху грунтовые воды ограничены свободной поверхностью, называемой *зеркалом*, которая разграничивает пласт породы на две зоны – аэрации и насыщения. Наличие свободной поверхности грунтовых вод определяет их безнапорный характер. Когда зеркало горизонтальное, грунтовые воды образуют *грунтовый бассейн*. Однако чаще всего поверхность грунтовых вод имеет наклон, и образуется *поток грунтовых вод*, который определяется расположением гидроизогипс (рис. 11.2).

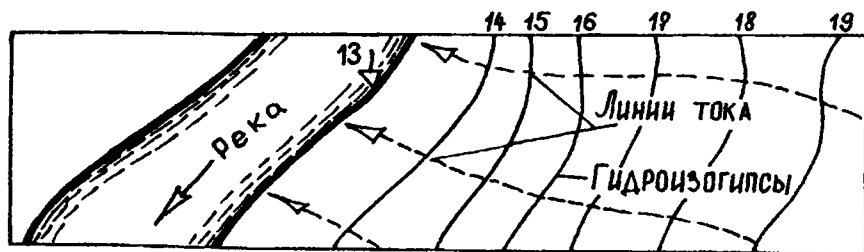


Рис. 11.2. Схема течения подземных вод

*Гидроизогипсы* – это горизонталы, соединяющие точки верха водоупорной породы с одинаковыми уровнями. Течение грунтовых вод происходит по нормали к гидроизогипсам. Грунтовые воды пи-

таются за счет инфильтрации в толщу атмосферных осадков вод из рек, озер и водохранилищ и подпитывания напорными водами из более глубоких горизонтов.

Схематическая норма залегания уровня грунтовых вод на территории Беларуси в соответствии с РСН 14-76 приведена на рис. 11.3.

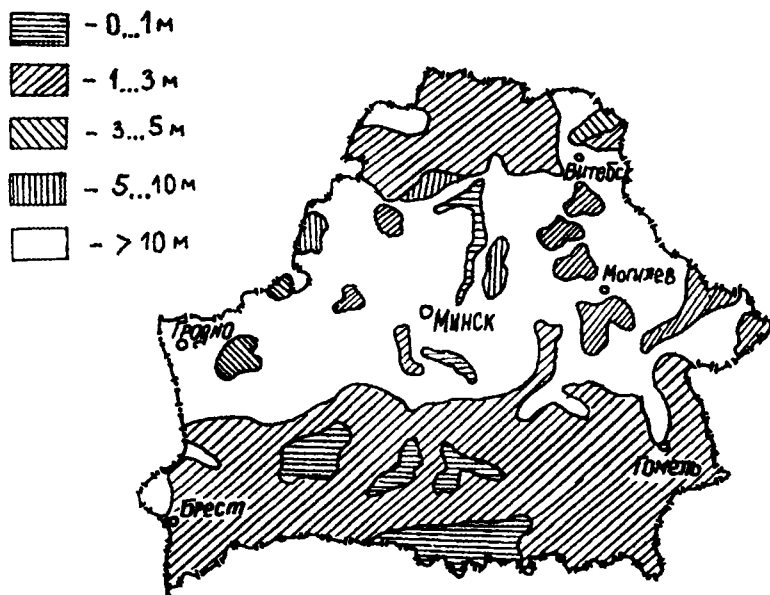


Рис. 11.3. Схематическая карта залегания уровня грунтовых вод

### Вопросы для самопроверки

1. Какие воды относятся к подземным?
2. На какие виды подразделяются подземные воды по происхождению?
3. Что представляет собой зона аэрации?
4. В каких состояниях может находиться вода в толще грунта?
5. Как передвигается плесочная вода?
6. Что такое капиллярно-подвешенная вода?
7. На какие зоны разграничивается пласт породы зеркалом грунтовых вод?
8. Что такое гидрозогипса?

9. Какова максимальная и минимальная глубина залегания грунтовых вод в Беларуси?

10. Как происходит движение гигроскопической воды?

## 12. ФОРМЫ СВЯЗЕЙ ВОДЫ В ГРУНТАХ

В зависимости от характера связи со скелетом грунта вода, содержащаяся в грунтах, подразделяется на:

- 1) парообразную;
- 2) воду, химически или физически связанную;
- 3) свободную, которую можно подразделить, в свою очередь, на капиллярную, иммобилизованную и гравитационную;
- 4) воду в твердом состоянии.

*Парообразная вода* под влиянием изменения температуры и давления может переходить в капельно-жидкое состояние, т.е. конденсироваться.

*Химически связанная вода* – это вода, входящая в состав минералов. Она подразделяется на конституционную, кристаллизационную и цеолитную.

*Конституционная вода* – это вода, входящая в состав кристаллической решетки минералов в виде ионов  $H^+$  и  $OH^-$ , участвующая в их строении. Например:  $Ca(OH)_2$ .

*Кристаллизационная вода* – это вода в строго определенном количестве, участвующая в строении минералов, в виде молекул воды. Например, гипс  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ .

*Цеолитная вода* – это часть кристаллизационной воды, которая может выделяться и вновь поглощаться без разрушения кристаллической решетки. Цеолиты – это водные алюмосиликаты, общая формула которых:  $(Na_2Ca)OAl_2O_3 \cdot nSiO_2 \cdot mH_2O$ , причем  $m$  может изменяться от 1 до 8 [11].

*Физически связанная вода* – это вода, удерживаемая на поверхности минеральных частиц силами, имеющими электрическую природу (рис. 12.1).

Минеральная частица заряжена отрицательно, а молекула воды представляет собой диполь, заряженный положительно на одном и отрицательно – на другом конце молекулы. При соприкосновении твердой минеральной частицы с водой возникают электромолекулярные силы, которые притягивают диполи воды к поверхности частицы

с огромной силой. По мере удаления от частицы эти силы убывают и становятся близкими к нулю. Самые близкие к частице слои (1-3 ряда молекул) образуют пленки *прочносвязанной воды*, что сопровождается энергетическим эффектом с выделением до 42 Дж на 1 г воды. Следующие слои молекул воды будут связываться все меньшими силами по мере удаления и образуют слой *рыхлосвязанной воды*.

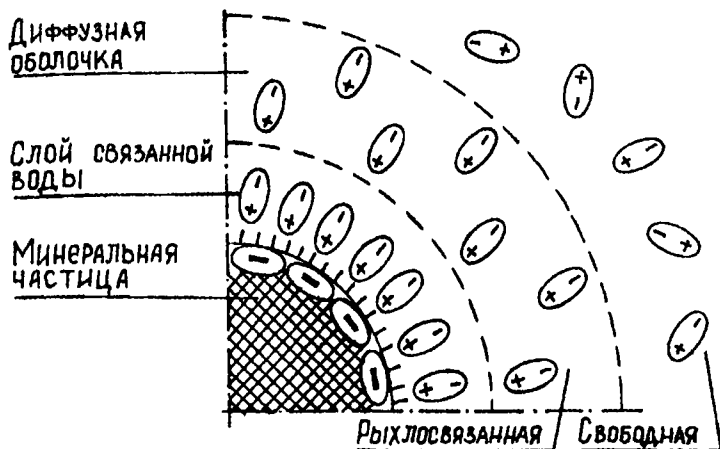


Рис. 12.1. Схема электромолекулярного взаимодействия минеральной частицы с водой

Свободная вода не подвержена действию молекулярных сил. Иногда она может быть заключена в замкнутых пустотах и находиться в состоянии покоя. Такую воду называют *иммобилизованной*.

## 12.1. Влагоемкость и водопроницаемость

*Влагоемкостью* называют способность вмещать и удерживать в себе определенное количество воды при возможности свободного ее вытекания под действием силы тяжести.

По степени влагоемкости горные породы подразделяются на:

- 1) очень влагоемкие (торф, глина, суглинки);
- 2) слабовлагоемкие (супеси, мелкозернистые пески);
- 3) невлагоемкие (скальные, крупнозернистые пески).

Различают влагоемкость: капиллярную, максимально молекулярную и гигроскопическую.



**Капиллярная влагоемкость** характеризуется влажностью грунта, соответствующей полному заполнению капиллярных пор водой. Максимальную высоту и скорость поднятия воды определяют в специальных приборах – капилляриметрах Г.Н.Каменского. Предельная высота подъема воды (в м) для различных типов грунтов составляет:

песок крупнозернистый – 0,02...0,03;

песок среднезернистый – 0,12...0,35;

песок мелкозернистый – 0,35...1,2;

супесь – 1,2...3,5;

суглинок – 3,5...6,5;

глина – 6,5...12,0.

**Максимальная молекулярная влагоемкость** – это максимальное количество пленочной воды (включая гигроскопическую), удерживаемое грунтом. Для чистых песков она составляет 3...4%, для глинистых – до 39...41%. Определяется методами центрифугирования, влагоемких сред и высоких колонн.

**Метод центрифугирования** заключается в удалении из образца избытка воды путем воздействия на нее центробежной силы, развиваемой центрифугой.

**Метод влагоемких сред** основан на удалении из образца грунта воды с помощью гидрофильного материала.

**Метод высоких колонн** заключается в удалении избытка воды путем свободного истечения ее из образца грунта, помещенного в стеклянную трубку.

**Гигроскопическая влагоемкость** – это количество воды, поглощаемое грунтом с выделением тепла. Для чистых песков она составляет доли процента, для глинистых доходит до 18%. Гигроскопическая влагоемкость определяется путем высушивания образца грунта до постоянного веса при температуре 105°C.

**Водопроницаемостью** грунта называется его способность пропускать через свою толщу воду. Она характеризуется коэффициентом фильтрации, определяемым по ГОСТ 25584-90. Формула для определения коэффициента фильтрации

$$K_{10} = \frac{864 \cdot h}{t \cdot T} \cdot \varphi \left( \frac{S}{H_0} \right), \text{ м/сут,} \quad (12.1)$$

где 864 – переводной коэффициент из см/с в м/сут ;

$h$  – высота образца, см;

$t$  – время падения уровня воды, с;

$T = (0,7 + 0,03 T_{\phi})$  – температурная поправка;

$T_{\phi}$  – фактическая температура, °С;

$S$  – наблюдаемое падение уровня воды в пьезометре, см;

$H_0$  – начальный напор, см;

$\varphi \left( \frac{S}{H_0} \right)$  – безразмерный коэффициент, определяемый по таблицам.

## 12.2. Водопоглощение и водонасыщение

Способность грунтов поглощать воду характеризуется водопоглощением и водонасыщением.

*Водопоглощением* называется способность грунта поглощать (впитывать) и удерживать воду при обычных условиях.

*Водонасыщение* – это способность грунта максимально поглощать воду при вакууме или под давлением (до 150 атм.)

Количественно водопоглощение соответствует объему широких открытых пор, а водонасыщение – объему всех открытых пор. Отношение величины водопоглощения к величине водонасыщения называется *коэффициентом водонасыщения*. Он определяет, какую часть общего объема пор составляют широкие поры, а также является косвенным показателем морозостойкости грунтов. Если коэффициент водонасыщения – меньше 0,8, грунт является морозостойким, т.к. при замерзании вода может увеличиваться в объеме за счет узких пор, оставшихся не заполненными ею. Если коэффициент водонасыщения – больше 0,8, грунт неморозостоек, и происходит его пучение.

### Вопросы для самопроверки

1. Что такое химически связанная вода и как она подразделяется?
2. Какая вода входит в состав гипса?
3. Объясните схему электромолекулярного взаимодействия минеральной частицы с водой.
4. Дайте характеристику иммобилизованной воды.
5. Какие грунты относятся к слабовлагосмким?

6. Какими методами можно определить максимальную молекулярную влагоемкость?

7. Напишите формулу для определения коэффициента фильтрации песчаного грунта.

8. Что такое водонасыщение и чем оно отличается от водопоглощения?

9. Что показывает коэффициент водонасыщения?

10. Каким образом коэффициент водонасыщения характеризует морозостойкость породы?

## 13. ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТОВ

### 13.1. Физические свойства грунтов

Физические свойства грунтов можно подразделить на общие физические, физико-механические, водные и тепловые.

К *общим физическим свойствам* относятся плотность частиц сухого и влажного грунта, пористость, удельная поверхность.

К *физико-механическим свойствам* относятся прочность и деформативность, пластичность, липкость, усадка, набухание, связность.

К *водным свойствам* грунтов относятся водоудерживающая, водопропускная (водопроницаемость) и водоподъемная (капиллярная) способности.

*Тепловые свойства* грунта выражаются через теплоемкость, теплопроводность и теплопоглощительную способность.

Все физические характеристики грунта можно разделить на два класса:

*I класс* – показатели прочности и деформируемости грунтов, определяемые на образцах с ненарушенной структурой;

*II класс* – показатели, характеризующие состав и состояние грунта, определяемые на образцах нарушенной структуры.

Главными показателями второго класса являются состав, состояние и показатели консистенции глинистых грунтов.

*Состав* грунтов характеризуется минералогическим, петрографическим, химическим и гранулометрическим составами.

*Состояние* грунтов характеризуется влажностью, плотностью и пористостью.

**Консистенция** – это показатель числовой характеристики состояния глинистой породы по влажности. Определяется по выражению, приведенному в 6.3 для показателя текучести.

### 13.2. Понятие о зерновом и микроагрегатном составе грунтов

**Зерновым составом** называется относительное содержание по массе частиц грунта различной крупности, выраженное в процентах к общей массе сухого грунта.

В зависимости от размеров частицы грунта разделяют на отдельные группы, называемые **фракциями**. Для определения состава грунта необходимо провести **гранулометрический анализ**, заключающийся в разделении грунта на фракции, каждая из которых включает все частицы между установленными для данной фракции минимальным и максимальным размерами. Затем фракции взвешивают и рассчитывают процентное содержание в общей массе навески.

**Микроагрегатный состав** отражает степень агрегирования грунта и характеризует структурные связи в нем. Понятие микростроения относится к глинистым лессовым породам, содержащим глинистые минералы и органическое вещество в виде гумуса. Такие частицы редко существуют изолированно, обычно они образуют микроагрегаты различной прочности. Поэтому перед производством гранулометрического анализа необходимо эти агрегаты разрушить.

Способы определения гранулометрического состава объединяются в две группы: прямые и косвенные.

**Прямые способы** объединяют методы непосредственного измерения частиц. К ним относятся: ситовой, пипеточный и метод А.Н. Сабанина.

**Ситовой метод** применяется для частиц диаметром  $> 0,1$  мм. Он заключается в просеивании грунта через набор стандартных сит с различной величиной отверстий.

**Пипеточный метод** основан на учете скорости падения частиц в жидкой среде. Применяется для определения в пылеватых и глинистых грунтах фракций:

0,05...0,01 мм;

0,01...0,005 мм – пылеватые частицы;

0,005...0,001 мм;

$< 0,001$  мм – глинистые частицы.

По закону *Стокса* перемещение шарообразных частиц в воде под влиянием силы тяжести составляет

$$V = cr^2 = \frac{2}{9}gr^2 \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\eta} \right), \quad (13.1)$$

где  $c$  – константа Стокса;

$r$  – радиус частицы, см;

$\rho_s$  – плотность частиц грунта, г/см<sup>3</sup>;

$\rho_w$  – плотность жидкости ( $\rho_{\text{воды}} = 1$ ), г/см<sup>3</sup>;

$\eta$  – вязкость жидкости (для воды  $\eta = 1 \dots 1,1$ ), пуазы.

Из грунта готовят суспензию. Затем с определенной глубины через различные промежутки времени отбирают пробы, высушивают и взвешивают. Зная массу и размер отобранных частиц, вычисленных по длительности отстаивания суспензии и глубине взятия пробы, производят расчет содержания частиц во всем объеме.

*Метод А.Н.Сабанина* (метод отмучивания) применяется для определения фракций:

> 0,5 – крупный песок;

0,5...0,25 мм – средний песок;

0,25...0,1 мм – мелкий песок;

0,1...0,05 мм – пылеватый песок;

0,05...0,01 мм;

< 0,01 мм – пыль.

Этот метод также основан на разделении по скорости падения частиц. Его технология следующая: взмучивание – отстаивание – сливание. Таким образом удаляются частицы, не осевшие на дно сосуда. Метод А.Н.Сабанина отличается от пипеточного тем, что взмучивание и сливание производятся многократно, а в пипеточном – только один раз.

*Косвенные методы* заключаются в оценке состава грунта по косвенным признакам. К ним относятся ареометрический, метод С.И.Рутковского и визуальный.

*Ареометрический метод* основан на измерении ареометром плотности отстаиваемой суспензии. Чем больше твердых взвешенных частиц в суспензии, тем выше ее плотность. Метод пригоден для анализа глинистых грунтов.

*Метод С.И.Рутковского* позволяет выделить три основные группы фракций: песчаную, пылеватую и глинистую.

Содержание песчаной фракции определяется методом отмучивания, заключающимся во взбалтывании грунта в столбике воды определенной высоты. Отмучивание производится до тех пор, пока вода над грунтом не станет прозрачной. Содержание глинистой фракции устанавливается по величине набухания глинистых частиц в воде. Зависимость между объемом анализируемого грунта и величиной набухания выражается формулой

$$Г = 22,67 \cdot Н, \%, \quad (13.2)$$

где  $Г$  – содержание глинистых частиц, %;

$Н$  – прирост объема грунта на  $1 \text{ см}^3$  первоначально взятого объема грунта.

Содержание пылеватых частиц определяется по разности между 100% и суммой процентов песчаной и глинистой фракций.

*Визуальный метод* основан на субъективной оценке качеств грунта в результате глазомерного обследования и сравнения отдельных свойств с типовыми.

### Вопросы для самопроверки

1. Какие свойства грунтов относятся к общезфизическим?
2. Какие показатели характеризуют состояние грунта?
3. Чем отличаются зерновой и микроагрегатный составы?
4. Каким прямым методом определяется гранулометрический состав, если частицы имеют размер  $> 0,1 \text{ мм}$ ?
5. Напишите закон Стокса и расшифруйте его составляющие.
6. Чем отличается метод А.Н.Сабанина от пипеточного?
7. Какие методы относятся к косвенным?
8. Как называется метод, основанный на измерении плотности грунтового раствора?
9. Как определить пылеватые фракции грунта методом С.И.Рутковского?
10. В чем заключается визуальный метод?

## 14. ПОКАЗАТЕЛИ ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВ ГРУНТОВ

### 14.1. Плотность грунтов

В соответствии со строительными нормами СН 528-80 для характеристики грунта применяются следующие виды плотности: плотность грунта, плотность сухого грунта и плотность частиц грунта.

*Плотность грунта* – масса единицы его объема. Этот показатель характеризует грунт во влажном состоянии. В численном выражении представляет собой отношение массы влажного грунта к его объему, включая поры, заполненные водой и воздухом:

$$\rho = \frac{m_1 - m_0 - m_2}{V}, \text{ г/см}^3, \quad (14.1)$$

где  $m_1$  – масса грунта с кольцом и пластинками, г;

$m_0$  – масса кольца, г;

$m_2$  – масса пластинок, г.

Определяется эта характеристика по методике, изложенной в ГОСТ 5180-84, с помощью режущего кольца. Плотность дисперсных грунтов колеблется в пределах от 1,2 до 2,4 г/см<sup>3</sup>.

Показатель  $\rho$  применяется при расчетах:

- 1) устойчивости склонов и откосов;
- 2) давления земли на подпорную стенку;
- 3) величины осадки сооружений;
- 4) допустимого давления на грунт и др.

*Плотность сухого грунта* – это отношение массы сухого грунта (исключая массу воды в его порах) к занимаемому этим грунтом объему (включая имеющиеся в грунте поры):

$$\rho_d = \frac{\rho}{(1 + 0,01W)}, \text{ г/см}^3, \quad (14.2)$$

где  $\rho$  – плотность грунта, г/см<sup>3</sup>;

$W$  – влажность грунта, %.

Наиболее вероятные значения максимальной плотности сухого грунта для различных категорий:

песка – 1,8 г/см<sup>3</sup>;

супеси – 1,7...2,0 г/см<sup>3</sup>;

суглинка – 1,5...1,8 г/см<sup>3</sup>;

глины – 1,5 г/см<sup>3</sup>.

**Плотность частиц грунта** – это масса единицы объема твердых частиц грунта. Определяется из выражения

$$\rho_s = \frac{m_3}{m_3 + m_4 + m_5} \cdot \rho_w, \text{ г/см}^3, \quad (14.3)$$

где  $m_3$  – масса сухого грунта, г;

$m_4$  – масса пикнометра с водой, г;

$m_5$  – масса пикнометра с грунтом и водой, г;

$\rho_w$  – плотность воды,  $\rho_w = 1,0 \text{ г/см}^3$ .

Плотность частиц грунта определяется пикнометрическим методом по ГОСТ 5180-84.

Средние значения плотности частиц отдельных видов грунтов приведены в табл. 14.1.

Таблица 14.1

Наиболее вероятные значения плотности частиц грунта

Грунты	Среднее значение $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	Наиболее часто встречающиеся $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	Грунты	Среднее значение $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	Наиболее часто встречающиеся $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>
Пески	2,66	2,65...2,67	Глины	2,74	2,71...2,76
Супеси	2,70	2,68...2,72	Чернозём	2,50	2,40...2,60
Суглинки	2,71	2,69...2,73	Торф	1,60	1,50...1,80

## 14.2. Пористость грунтов

**Пористость** – это отношение объема пор в грунте к общему объему, занимаемому грунтом. Пористость может быть выражена через плотность частиц и плотность сухого грунта:

$$n = \left( 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \right) \cdot 100, \% \quad (14.4)$$



Численные значения пористости для различных видов грунтов приведены в табл. 9.1. Для одного и того же грунта пористость не является постоянной величиной. Она зависит от взаимного расположения в нем частиц и микроагрегатов и уменьшается при увеличении давления на грунт.

При инженерных расчетах вместо пористости используется *коэффициент пористости*, представляющий собой отношение объема пор к объему твердой фазы, выраженное в долях единицы или через плотность грунта:

$$e = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{T}}}; \quad e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}, \quad (14.5)$$

где  $V_{\text{пор}}$  – суммарный объем всех пор,  $\text{см}^3$ ;

$V_{\text{T}}$  – объем твердой фазы грунта,  $\text{см}^3$ ;

$\rho_s$  – плотность частиц грунта,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;

$\rho_d$  – плотность сухого грунта,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Классификация песков по плотности представлена в табл. 14.2.

Таблица 14.2

Классификация песков по плотности

Наименование песчаных грунтов	Плотность сложения грунтов		
	плотные	средней плотности	рыхлые
Пески гравелистые, крупные и средней крупности	$e < 0,55$	$0,55 \leq e \leq 0,70$	$e > 0,70$
Пески мелкие	$e < 0,60$	$0,60 \leq e \leq 0,75$	$e > 0,75$
Пески пылеватые	$e < 0,60$	$0,60 \leq e \leq 0,80$	$e > 0,80$

При оценке пригодности песчаных грунтов в качестве основания инженерных сооружений определяют относительную плотность, которую вычисляют по формуле

$$D = \frac{e_{\text{max}} - e}{e_{\text{max}} - e_{\text{min}}} = \frac{n_{\text{max}} - n \cdot (100 - n_{\text{min}})}{(n_{\text{max}} - n_{\text{min}}) \cdot (100 - n)}, \quad (14.6)$$

где  $\rho_{\max}$ ;  $e_{\max}$  – пористость и коэффициент пористости в самом рыхлом состоянии;

$\rho$ ;  $e$  – пористость и коэффициент пористости в естественном состоянии;

$\rho_{\min}$ ;  $e_{\min}$  – пористость и коэффициент пористости в самом плотном состоянии.

В зависимости от относительной плотности песок классифицируют следующим образом:

$D < 0,33$  – рыхлый;

$0,33 \leq D \leq 0,67$  – средней плотности;

$0,67 \leq D \leq 1,00$  – плотный.

Степень уплотнения грунтов в дорожном строительстве оценивают с помощью *коэффициента стандартного уплотнения*, представляющего собой отношение плотности сухого грунта в его естественном залегании к плотности того же грунта при стандартном уплотнении:

$$K_y = \frac{\rho_d}{\rho_{d \max}}. \quad (14.7)$$

В настоящее время при применении высокоэффективных машин для уплотнения плотность грунта в насыпи земляного полотна автомобильной дороги получают большую, чем в резерве. Если при приемке земляных работ обмер производят по объему грунта в выемке или в резерве, необходимо использовать *коэффициент относительного уплотнения* грунта, представляющий собой отношение плотности сухого грунта в насыпи  $\rho_{d \text{нас}}$  к тому же показателю в резерве  $\rho_{d \text{рез}}$ :

$$K_{\text{отн } y} = \frac{\rho_{d \text{нас}}}{\rho_{d \text{рез}}}. \quad (14.8)$$

Численные значения коэффициента относительного уплотнения приведены в табл. 14 СНиП 2.05.02-85.

### 14.3. Влажность грунтов

**Влажность** – это количество воды, содержащейся в порах грунта, выраженное в % от массы грунта, высушенного до постоянной массы при температуре 105°C:

$$W = \frac{m_6 - m_7}{m_7 - m_8} \cdot 100, \% \quad (14.9)$$

где  $m_6$  – масса бюксы с влажным грунтом, г;

$m_7$  – масса бюксы с сухим грунтом, г;

$m_8$  – масса пустой бюксы.

Определенную таким путем влажность называют *весовой*, а способ ее определения – *весовым*. Общая влажность, которую имеют грунты в естественном залегании, называют *естественной* влажностью. В естественных условиях естественная влажность не всегда соответствует полной влагоемкости. Поэтому для характеристики физического состояния грунтов помимо абсолютной влажности необходимо знать степень заполнения пор водой. Для этого определяют *степень влажности*:

$$S_r = \frac{W}{W_{\max}}, \quad (14.10)$$

где  $W$  – естественная влажность грунта;

$W_{\max}$  – полное водонасыщение.

По степени влияния на физико-механические свойства грунта различают влажность недостаточную, оптимальную, избыточную и вредную (рис. 14.1).

*Недостаточная влажность* колеблется от гигроскопической до максимальной молекулярной влагоемкости.

*Оптимальная влажность* находится в интервале между максимальной молекулярной влагоемкостью и границей раскатывания.

При уплотнении грунта, имеющего оптимальную влажность, получают максимальную плотность.

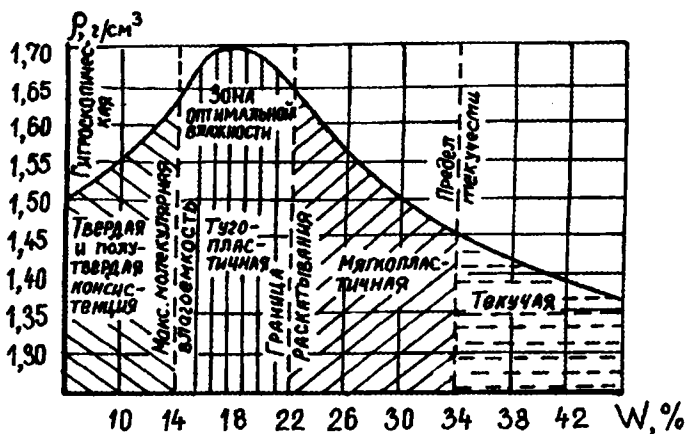


Рис. 14.1. Изменение консистенции и плотности суглинистого грунта

Значения оптимальной влажности приведены в табл. 14.3.

Таблица 14.3

Значения оптимальной влажности

Грунты	Значения оптимальной влажности (% массы грунта)
Крупноблочные: щебеночные	3...5
дресвяные	5...7
Песчаные: гравелистые	4...6
крупные	6...8
средней крупности	7...9
Песчаные мелкие и пылеватые, мелкие одномерные	8...10
Супеси	8...14
Суглинки легкие	12...16
Суглинки тяжелые	16...22
Глины	18...26

*Избыточная влажность* колеблется от предела раскатывания до предела текучести. При этой влажности грунт приобретает повышенную липкость.

*Опасная (вредная) влажность* соответствует влажности выше предела текучести.

#### 14.4. Методы определения

Метод определения плотности всех грунтов, кроме пылевато-глинистых, называется методом режущего кольца. Тот же показатель, но для пылевато-глинистых или склонных к крошению грунтов, определяется путем взвешивания в воде парафинированных образцов.

Плотность сухого грунта определяется расчетным путем.

Плотность частиц грунта для всех видов, кроме набухающих, определяется пикнометрическим методом с водой. Этот же показатель для набухающих грунтов определяется пикнометрическим методом с нейтральной жидкостью. Методы определения всех видов плотности проводятся в соответствии с ГОСТ 5180-84.

В полевых исследованиях плотность и влажность можно определять методами радиоизотопных измерений (ГОСТ 23061-90).

Существуют методы, разработанные БелдорНИИ: метод статической пенетрации и метод динамического зондирования.

Для оценки плотности грунтов земляного полотна может служить устройство для ультразвукового прозвучивания (УКБ-1М, УК-10П), основанное на различной скорости прохождения ультразвуковых волн в зависимости от плотности грунта.

Влажность определяется весовым методом путем высушивания образца до постоянной массы (ГОСТ 5180-84). В полевых условиях применяется почвенный влагомер АМ-11, представляющий собой динамомашину, которая разряжается на угольной датчик влажности.

#### Вопросы для самопроверки

1. Сколько видов плотности характеризует грунты земляного полотна?
2. Что характеризует плотность частиц грунта?
3. В каких расчетах применяется плотность грунта?
4. Назовите наиболее часто встречающиеся значения плотности частиц грунта для супеси.

5. Чем отличается пористость от коэффициента пористости?
6. Напишите формулу для определения относительной плотности.
7. Как характеризует степень уплотнения коэффициент стандартного уплотнения?
8. Чем отличаются показатели влажности и степени влажности?
9. Нарисуйте и объясните график изменения плотности суглинистого грунта в зависимости от влажности.
10. Назовите методы определения плотности грунта.

## 15. КОНСИСТЕНЦИЯ ГРУНТОВ

### 15.1. Характерная влажность и пластичность грунтов

В зависимости от степени увлажнения глинистые грунты могут находиться в твердом, пластичном или текучем состоянии.

*Пластичностью* грунта называется способность его деформироваться под действием внешнего давления без разрыва сплошности массы.

Глинистые грунты обладают пластичностью только в пределах определенной влажности. При уменьшении влажности они становятся полутвердыми или твердыми, при увеличении из пластического состояния переходят в текучее.

Для установления способности грунтов принимать пластичное состояние определяют границы текучести и раскатывания.

*Граница текучести* характеризует влажность, при которой грунт из пластического состояния переходит в текучее. Ее следует определять как влажность пасты, приготовленной из исследуемого грунта, при которой балансирный конус погружается под действием собственного веса за 5 с на глубину 10 мм (ГОСТ 5180-84).

*Граница раскатывания* соответствует влажности, при которой грунт находится на границе перехода из твердого состояния в пластичное. На границе раскатывания он содержит преимущественно связанную воду. Сущность метода определения этой границы состоит в определении возможности раскатывания увлажненного глинистого грунта в жгут толщиной 3 мм.

Границу текучести и границу раскатывания называют *верхним и нижним пределами пластичности*.

Разность между значениями влажностей, соответствующих пределу текучести и раскатывания, называют *числом пластичности*:

$$I_p = W_L - W_p . \quad (15.1)$$

По СТБ 943-93 пылевато-глинистые грунты подразделяются по числу пластичности на:

супесь –  $1 \leq I_p \leq 7$ ;

суглинок –  $7 < I_p \leq 17$ ;

глина –  $I_p > 17$ .

## 15.2. Связанность, липкость и усадка грунтов

*Связанность* грунтов – способность сопротивляться внешнему усилию, стремящемуся разъединить частицы грунта. По этому признаку грунты разделяют на связные (глина, суглинки, супеси) и не связные (пески, крупноблочные грунты).

*Липкость* грунтов – способность прилипать к поверхности различных предметов, – в частности, рабочих органов дорожных машин. Липкость выражается в Па при измерении усилия, необходимого для отрывания прилипшего предмета от поверхности грунта.

Липкость грунтов обуславливается силами взаимодействия, возникающими между молекулами связанной воды и поверхности соприкасающегося с грунтом предмета.

Липкость начинает проявляться при влажности, несколько превышающей влажность границы раскатывания, и достигает максимума при влажности, несколько меньшей границы текучести (рис. 15.1)

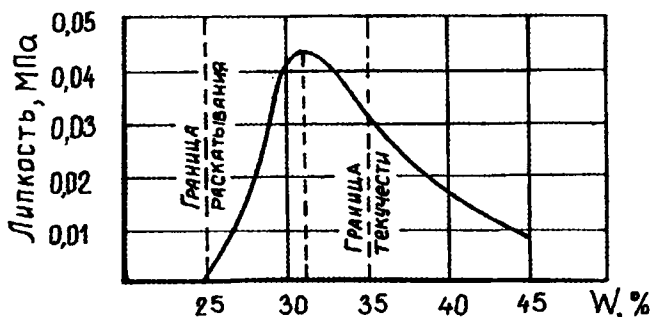
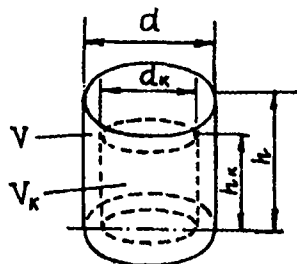


Рис. 15.1. График зависимости липкости глинистого грунта от влажности

**Усадка грунта** – способность влажных грунтов уменьшать свой объем при высыхании. При усадке происходит не только механическое уплотнение грунта, но и перераспределение его химических компонентов. Величину усадки принято характеризовать по уменьшению линейных размеров или объема образца (рис. 15.2):



$$\varepsilon_h = \frac{h - h_k}{h};$$

$$\varepsilon_d = \frac{d - d_k}{d}; \quad (15.2)$$

$$\varepsilon_v = \frac{V - V_k}{V}.$$

Рис. 15.2. Схема усадки образца по высоте, диаметру и объему

Характеристики усадки грунта определяются по относительной деформации в условиях свободной трехосной деформации при высыхании грунта. За показатели, характеризующие усадку грунта, принимаются величины усадки по высоте, диаметру или объему.

Согласно СТБ 943-93, пылевато-глинистые грунты подразделяются на разновидности по относительной просадочности  $\varepsilon_{sl}$ :

непросадочный  $\varepsilon_{sl} < 0,01$ ;

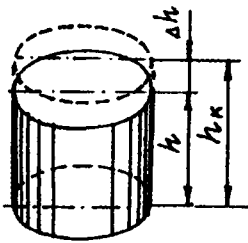
просадочный  $\varepsilon_{sl} \geq 0,01$ .

### 15.3. Набухание грунтов и вызванные им явления

**Набухание грунтов** – это их способность увеличивать свой объем при увлажнении. Набухание присуще глинистым грунтам, в особенности – состоящим из такого глинистого минерала, как монтмориллонит, и в меньшей степени – каолинит.

Набухание характеризуется относительной деформацией в условиях, исключающих возможность бокового расширения при насыщении грунта водой или химическим раствором (рис. 15.3), по ГОСТ 24143-80:





$$\varepsilon_{sw} = \frac{\Delta h}{h} = \frac{h_k - h}{h}. \quad (15.3)$$

Рис. 15.3. Схема набухания грунта без возможности бокового расширения

Следует учитывать, что в глинистых грунтах с нарушенной структурой набухание больше, чем с ненарушенной.

Согласно СТБ 943-93, пылевато-глинистые грунты имеют разновидности по относительному набуханию без нагрузки  $\varepsilon_{sw}$ . Грунт считается:

- ненабухающим – при  $\varepsilon_{sw} < 0,04$ ;
- слабонабухающим – при  $0,04 \leq \varepsilon_{sw} \leq 0,08$ ;
- средненабухающим – при  $0,08 < \varepsilon_{sw} \leq 0,12$ ;
- сильнонабухающим – при  $\varepsilon_{sw} > 0,12$ .

*Относительное набухание* есть отношение *абсолютного набухания* к начальной высоте образца. Определяется на приборе ПНЗ-2 с помощью индикаторов.

С набуханием грунтов в дорожном строительстве связано такое явление, как пучинообразование.

*Пучины* – сложный процесс, включающий увеличение объема грунта за счет подтока и замерзания воды, заполнившей поры грунта, с одновременным набуханием глинистых минералов, приводящий к деформациям дорожных одежд и земляного полотна, который проявляется во взбулгаривании и потере ровности покрытия. Во время зимнего взбулгаривания прочность грунта увеличивается (рис. 15.4).

При весеннем повышении температур вода, находящаяся в порах грунта, оттаивает и перенасыщает грунт, что ведет к потере его прочности. Под действием статической и динамической нагрузок в этом месте происходит осадка грунта, ведущая к образованию проломов в дорожных одеждах. Морозоустойчивость дорожной конструкции на территории Республики Беларусь будет обеспечена, если общая толщина одежды из материалов, не изменяющих прочностных свойств при промерзании, будет не менее:

50 см – на юге республики;  
 70 см – в центральной части;  
 80...90 см – в северных районах.

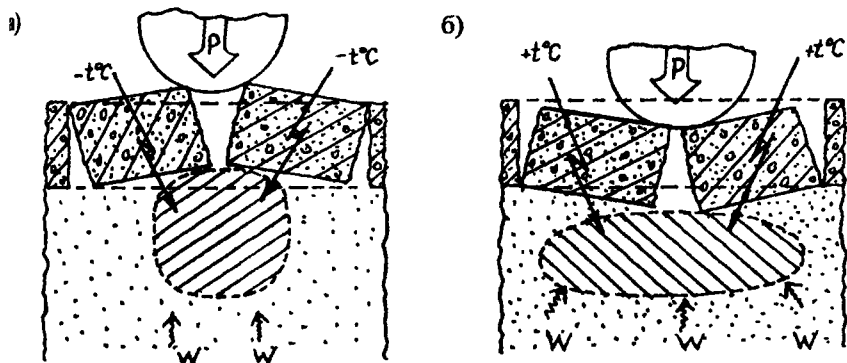


Рис. 15.4. Схема образования проломов на дорожной конструкции:  
 а) зимнее взбултривание; б) весеннее оттаивание

Характеристикой морозного пучения является *относительное морозное пучение*, представляющее собой отношение величины пучения к глубине промерзания грунта:

$$k_{\text{пуч}} = \frac{\Delta h}{Z} \cdot 100, \% \quad (15.4)$$

где  $\Delta h$  – высота пучения, см;

$Z$  – глубина промерзания, см.

В обычных условиях величина морозного пучения составляет примерно 10% от глубины промерзания.

Величину морозного пучения глинистых грунтов можно определить по формуле В.М.Соколовой:

$$\Delta h = m \cdot (W - k_B \cdot W_p) \cdot Z, \text{ см}, \quad (15.5)$$

где  $m$  – эмпирический коэффициент пучинистости (для супеси  $m = 0,25$ , суглинков  $m = 0,20 \dots 0,22$ , глин  $m = 0,15$ );

$W$  – естественная влажность в долях единицы;

$k_b$  – поправочный коэффициент, принимаемый по СН 91-60 для температуры  $-4^{\circ}\text{C}$ , при которой льдообразование наиболее интенсивно;

$W_p$  – влажность на границе раскатывания;

$Z$  – глубина промерзания, см.

При влажности грунта, достигающей максимальной молекулярной влагоемкости ( $0,46 W_L$ ), пучения пылеватой супеси и пылеватого суглинка не наблюдается.

При влажности менее оптимальной ( $0,62 W_L$ ) пучение не превышает 1%, и грунт считается непучинистым.

При относительной влажности ( $0,63 \dots 0,76$ )  $W_L$  для пылеватых супесей и ( $0,62 \dots 0,72$ )  $W_L$  для пылеватых суглинков относительное морозное пучение достигает предельно допустимых значений.

### Вопросы для самопроверки

1. Что характеризует пластичность грунта?
2. Как определяется граница текучести?
3. Чему равно число пластичности для суглинков?
4. При каком значении влажности липкость имеет максимальное значение?
5. К какой категории по связности относятся пески?
6. Дайте характеристику усадке грунта.
7. За счет чего происходит набухание грунта?
8. Что такое пучина?
9. Какой должна быть максимальная толщина дорожной одежды в центральных регионах республики?
10. Напишите выражение для определения относительного морозного пучения.

## 16. ТИПЫ ГРУНТОВ, РАСПРОСТРАНЕННЫХ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

### 16.1. Подразделение грунтов по происхождению

По происхождению и условиям формирования грунты бывают двух видов: континентального и морского отложения.

*К грунтам континентального отложения* относятся элювиальные, дслювиальные, аллювиальные, ледниковые и эоловые отложения (рис. 16.1).

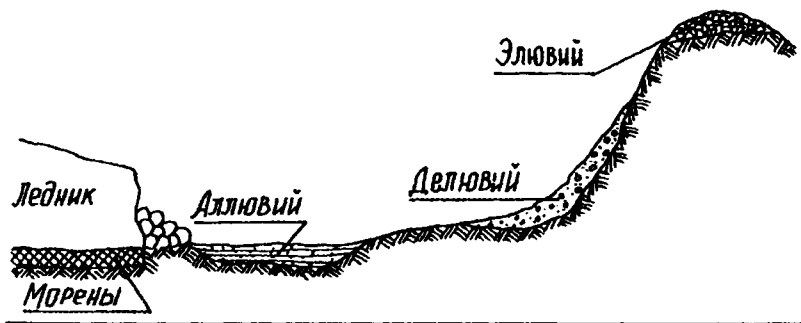


Рис. 16.1. Схема образования грунтов

*Элювиальные* отложения залегают на месте своего первоначального образования и отличаются угловатой неокатанной формой частиц.

*Делювиальные* отложения располагаются на склонах тех же возвышенностей, где они возникли в результате перемещения под воздействием силы тяжести, дождевых и снеговых вод.

*Аллювиальные* отложения переносятся водными потоками на значительные расстояния от мест их первоначального залегания. Этим отложениям свойственны слоистость, чередование песчаных и глинистых слоев.

*Ледниковые* отложения возникли в результате действия ледникового покрова. Основные виды грунтов этого происхождения состоят из моренных, водно-ледниковых и озерно-ледниковых отложений.

*Морены* представляют собой отложения из обломков горных пород различной крупности, скапливающихся в придонной части ледника и уплотненных его весом. Различают морены конечные и основные.

*Конечные морены* представлены валунами, гравием, галечниками и песками.

*Основные морены* представлены суглинками и супесями с включениями валунов, гальки, гравия.

*Водно-ледниковые (флювиогляциальные)* отложения – это отложения рек и потоков, которые образовались в результате таяния ледников. К ним относятся разнозернистые пески, супеси и пылеватые суглинки.

*Озерно-ледниковые* отложения представлены ленточными глинами, суглинками и супесями. Они характеризуются слоистостью, обусловленной сезонными отложениями.

Эоловые отложения являются продуктами физического выветривания горных пород пустынных областей, переносимыми воздушными потоками. Особенностью этих отложений является значительное содержание в них пыли.

Грунты морского отложения образуются на дне морей за счет материала, переносимого водными потоками.

## 16.2. Грунты Беларуси

Общая площадь Беларуси – 207,49 тыс. км<sup>2</sup>. 31,5% от общей территории занимают пахотные земли, 16,7% – естественные кормовые угодья, 35,2% – леса и кустарники; остальная территория, включая населенные пункты, составляет 16,6%. Таким образом, общее количество земель, используемых в сельскохозяйственном производстве, достигает 48,2%. Почвоподстилающие породы на территории Беларуси представлены в табл. 16.1 [9].

Таблица 16.1

Почвоподстилающие породы на территории РБ

№ пп	Породы	Площадь территории, %	Распространенность в областях
1	2	3	4
1	Глины и тяжелые суглинки моренные	1	Витебская
2	Глины и тяжелые суглинки озерно-ледниковые	1	Витебская
3	Морены конечные	5	Витебская, Гродненская, Минская
4	Морены основные	5	Витебская, Гродненская, Минская
5	Лессы и лессовидные суглинки и супеси озерно-ледниковые и водно-ледниковые	19	во всех, кроме Брестской
6	Супеси песчанистые водно-ледниковые	15	повсеместно
7	Пески тонкозернистые озерно-ледниковые	1	Витебская
8	Пески слабвалунные водно-ледниковые	14	повсеместно

1	2	3	4
9	Пески аллювиальные	10	Брестская, Гомельская
10	Пески дюнные (золотые)	1	Гомельская
11	Торф низинного типа: переходного  верхового	17 3  2	Брестская, Гомельская центральная и северная часть республики северная часть респуб- лики
12	Остальные породы (мел, мергель, известняки делювиального отложения)	6	в основном Витебская и Брестская

Поскольку грунты используются в дорожном строительстве в качестве основания коммуникационных конструкций для сооружения земляного полотна и сырья для получения дорожно-строительных материалов, они имеют специфическую классификацию по гранулометрическим элементам (табл. 16.2) и по основным видам – песчаным и глинистым (табл. 16.3) [12].

Таблица 16.2

## Гранулометрические элементы грунтов

Название	Размер частиц, мм	Разновидность	Размер частиц, мм
Валун (окатанный) и глыба	> 200	крупный средний мелкий	> 800 800...400 400...200
Галька (окатанная) и щебень	200...10	крупная галька (щебень) галька (щебень) мелкая галька (щебень)	200...100 100...60 60...40
Гравий (окатанный) и дресва	10...2	гравий мелкий гравий	10...4 4...2
Песок	2...0,05	грубый крупный средний мелкий тонкий	2...1 1...0,5 0,5...0,25 0,25...0,1 0,1...0,05
Пыль	0,05...0,005	крупная (грубая) мелкая (тонкая)	0,05...0,01 0,01...0,005

## Классификация глинистых грунтов

Тип глинистого грунта	Число пластичности	Разновидность по зерновому составу	Содержание песчаных частиц, % по массе
Супесь	1...4	легкая крупная	> 50% частиц размером 2...0,25 мм
	4	легкая	> 50
	4...7	пылеватая	20...50
	4...7	тяжелая пылеватая	< 20
Суглинок	7...12	легкий	> 40
	7...12	легкий пылеватый	< 40
	12...17	тяжелый	> 40
	12...17	тяжелый пылеватый	< 40
Глина	17...27	песчанистая	> 40
	17...27	пылеватая	< 40
	> 27	жирная	не нормируется

Классификация песчаных грунтов представлена в СТБ 943-93. По дорожно-строительной классификации основных категорий грунтов их расположение в укрупненном количественном составе на территории республики представлено на рис. 16.2.



Рис. 16.2. Диаграмма распространности основных видов грунтов на территории РБ

Теоретически в дорожном строительстве можно использовать все грунты, однако для отдельных их типов следует предусматривать конструктивные и технологические мероприятия по регулированию водно-теплового режима. Поэтому на практике грунты имеют ограничения при использовании в дорожных конструкциях.

*Крупнообломочные и песчаные грунты* характеризуются хорошей водопроницаемостью. Их применяют как дренирующий материал, гранулометрические добавки или заполнители цементобетона или асфальтобетона. Песок гравелистый, крупный и средней крупности относится к непучинистым грунтам, а мелкий песок с содержанием частиц мельче 0,05 мм менее 15% – к пучинистым.

*Песчаные пылеватые грунты* мало связаны в сухом состоянии, а при увлажнении плавут. Кроме того, они относятся к категории чрезмерно пучинистых грунтов. Поэтому для устройства земляного полотна их применять нельзя.

*Супесчаные грунты* устойчивы в сухом и влажном состоянии. Широко используются для возведения земляного полотна.

*Пылеватые супеси* в сухом состоянии сильно пылят, а при увлажнении плавут, склонны к образованию пучин. В дорожном отношении весьма неблагоприятны.

*Суглинистые грунты* отличаются связанностью и незначительной водопроницаемостью. Заметно проявляются пластичность, липкость и набухание. В земляном полотне могут применяться, но требуют защитных мер.

*Суглинистые пылеватые грунты* являются чрезмерно пучинистыми, поэтому могут применяться только в сухих местах с принятием мер против избыточного увлажнения.

*Глинистые грунты* являются очень пучинистыми, и поэтому не рекомендуются для применения в дорожных сооружениях.

### 16.3. Дорожно-климатическое районирование Беларуси

Формирование грунтовых условий, наличие и активность гидрогеологического режима на данной территории, в первую очередь, зависят от климатических условий региона, влияющих на скорость выветривания и формирование почвенного покрова. Следовательно, наличие определенных видов грунтов связано с климатическими условиями. В дорожном строительстве вся территория СНГ разде-



лена на пять дорожно-климатических зон [13]. Для европейской части границами этих зон являются следующие:

**Первая зона** (вечной мерзлоты) расположена севернее линии Мончегорск – Сухая Тунгуска.

**Вторая зона** (избыточного увлажнения) расположена к югу от границ первой зоны и ограничена линией Львов – Житомир – Нижний Новгород.

**Третья зона** (переменного увлажнения) включает лесостепную зону к югу от границ второй зоны до линии Кишинев – Харьков – Оренбург.

**Четвертая зона** (недостаточного увлажнения) расположена к югу от границ второй зоны до линии Степанакерт – Волгоград.

**Пятая зона** (засушливая) находится к югу от границ четвертой зоны.

В каждой климатической зоне следует различать западную и восточную части, граница между которыми проходит по линии Архангельск – Астрахань. Для западной части в установленных пределах принимаются меньшие значения прочностных показателей, для восточной – большие.

В пределах второй дорожно-климатической зоны по РСН 14-76 на территории Беларуси выделены три климатических района (рис. 16.3).

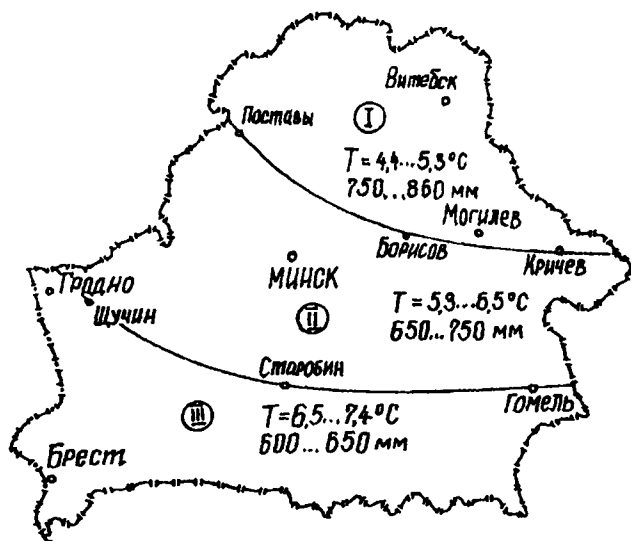


Рис. 16.3. Дорожно-климатическое районирование РБ

**Первый район** – северный, влажный. Расположен севернее линии Поставы – Борисов – Кричев. Климат прохладный, средняя годовая температура воздуха 4,4...5,3°C, годовое количество осадков – 750...860 мм.

**Второй район** – центральный, умеренно-влажный. Расположен к югу от границ первого до линии Щучин – Старобин – Гомель. Климат мягкий, средняя годовая температура 5,3...6,5°C, годовое количество осадков – 650...750 мм.

**Третий район** – южный, неустойчиво влажный, климат теплый, средняя годовая температура 6,5...7,4°C, годовое количество осадков – 600...650 мм.

### Вопросы для самопроверки

1. На какие виды по происхождению подразделяются континентальные отложения?
2. Какие грунты относятся к конечным моренам?
3. Какую площадь составляет территория Беларуси?
4. Назовите размер такого гранулометрического элемента, как крупный гравий.
5. Чему равно число пластичности для тяжелого суглинка?
6. Какая область республики является наиболее заторфовой?
7. Дайте характеристику применимости пылеватых супесей в дорожном строительстве.
8. В какую дорожно-климатическую зону входит Республика Беларусь?
9. На сколько районов подразделяется Беларусь по климатическим условиям?
10. Сколько разновидностей пыли вы знаете?

## 17. ПОЧВЫ БЕЛАРУСИ

### 17.1. Почвообразовательный процесс

Поверхностные слои рыхлых горных пород, измененные совместным влиянием двух одновременно протекающих процессов – выветривания и почвообразования, – называются *почвой*. На образование почвы оказывают влияние климат, материнская порода, возраст породы, растительность, животный мир, рельеф местности.

**Почвообразовательный процесс** представляет собой сложный комплекс процессов, под действием которых горная (материнская) порода изменяется и приобретает новые свойства, в том числе основное – плодородие, т.е. способность давать урожай.

Внешними признаками почв являются цвет, структура, сложение.

**Цвет** почв связан с их химическим и минералогическим составом. Черный цвет указывает на большое содержание органических веществ (гумуса или торфа). При содержании гумуса менее 5% черная окраска переходит в темно-серую. Белесый цвет свидетельствует о процессах выщелачивания и вымывания. Светлая окраска говорит о накоплении тонкопесчаных и пылеватых частиц. Красноватый цвет свидетельствует о присутствии железистых соединений.

**Гумус** – это составная часть почвы, образовавшаяся в результате персгнивания различных растительных остатков и их разложения при активном участии грибов, насекомых, бактерий и т.п.

**Структура.** Почвы являются монолитными образованиями и, как правило, распадаются на структурные агрегаты. Макроструктура почв делится, по С.А.Захарьеву, на три типа: кубовидные, призмовидные и плитовидные.

**Сложение** почвы определяется ее уплотненностью. Различают сложение:

- 1) связанное, без пор, характерное для глин и суглинков;
- 2) рассыпчатое, которым обладают почвы, лишенные всякой структуры;
- 3) пористое, типичное для лессов.

## 17.2. Почвенные зоны и их характеристика

В почвоведении существуют законы, определяющие образование почв в зависимости от климатических факторов региона. Такими законами являются следующие:

1. **Закон горизонтальных почвенных зон**, сформулированный Н.М.Сибирцевым. Согласно этому закону, основные типы почв распределены на земной поверхности зонально, т.е. полосами.

Наиболее важными почвенными зонами являются:

1). **Тундрово-арктическая зона.** Ее возраст – наиболее молодой. Это – зона вечномерзлых грунтов. Почвы обычно заболочены в связи с большой влажностью и слабой испаряемостью. Процесс разложения органических веществ происходит очень медленно. Тундро-

вые почвы характеризуются большой рыхлостью, быстрой размокаемостью и большой усадкой при высыхании.

2). *Таежно-лесная зона*. Основные почвы – подзолистые и дерново-подзолистые, широко распространены заболоченные. На севере граничит с зоной тундры, на юге ограничена линией Чернигов-Орел.

3). *Лесостепная зона*. Основные почвы – серолесные и выщелоченные черноземы. В северной части преобладают подзолистые, в южной – мощные черноземы. Южная граница – Кишинев – Харьков.

4). *Степная (черноземная) зона*. Черноземы разделяются на ряд подтипов: деградированный (северный), выщелоченный, мощный, обыкновенный, южный. Мощность гумусового горизонта колеблется от 25 до 150 см (иногда 200 см). Содержание гумуса – от 3% (супесчаные черноземы) до 20% (черноземы на глинах). Южная граница – Одесса – Ростов-на-Дону.

5). *Полупустынная зона*. Почвы – каштановые и бурые.

6). *Пустынная зона*. Сероземы, барханные пески, засоленные грунты.

2. *Закон вертикальных почвенных зон*, сформулированный В.В. Докучаевым, заключающийся в том, что по мере поднятия от уровня моря до вершин высоких гор наблюдается ряд вертикальных почвенных зон. Закономерность смены почвенных зон – такая же, как при перемещении с юга на север, – например, от степной зоны к тундрово-арктической.

### 17.3. Типы почв Беларуси

Почвы Беларуси можно объединить в шесть групп:

- 1) дерновые;
- 2) дерново-подзолистые;
- 3) подзолисто-болотные;
- 4) дерново-болотные;
- 5) болотные;
- 6) пойменные (аллювиальные).

*Дерновые почвы* мало распространены и занимают всего около 0,5% территории. Имеют мощный перегнойный горизонт (30...70 см), содержащий 2,5...6% гумуса. По плодородию почвы стоят на первом месте.

*Дерново-подзолистые почвы* занимают около 60% площади республики и покрывают почти все выпуклые (положительные) эле-

менты рельефа. Эти почвы характеризуются наличием почвенного горизонта светло-серого цвета мощностью около 25 см. Общая мощность дерново-подзолистых почв колеблется от 1 до 1,5...2,5 м. Этим почвам свойственно низкое (1,5...2%) содержание гумуса.

**Подзолисто-болотные почвы** занимают около 13% территории республики. Они формируются под воздействием подзолистого, дернового и болотного процессов почвообразования. Строение почвенного профиля у них – такое же, как у дерново-подзолистых почв, но в каждом горизонте обычно имеются признаки болотного процесса. Эти почвы характеризуются высокой кислотностью, сильной выщелоченностью, повышенным содержанием гумуса.

**Дерново-болотные почвы** встречаются в виде пятен и полос и приурочены к низинам с близкой грунтовой водой. Они часто располагаются на периферии болот низинного типа. Занимают около 2% территории. Содержат много гумуса (3...10% и более). При сильном заболачивании сверху может сформироваться слой торфа мощностью до 30...50 см.

**Болотные почвы** встречаются по всей территории, но больше всего распространены в Полесье. Занимают примерно 22% площади. Обилие болотных почв объясняется особенностями рельефа, близким залеганием грунтовых вод, большим количеством атмосферных осадков, малой испаряемостью, наличием большого числа озер.

**Пойменные почвы** формируются в речных долинах, заливаемых паводковыми водами, после стекания которых на поверхности поймы остается тонкий слой наилка из органических и минеральных частиц. Учитывая, что на территории Беларуси располагается около 4000 озер с общей площадью зеркала более 10 км<sup>2</sup> и протекает свыше 3 тыс. рек общей протяженностью более 50 тыс. км, аллювиальные почвы занимают около 2% территории республики.

Территория Беларуси делится на **четыре почвенных округа**:

1. Витебско-Полоцкий: почвы дерново-подзолистые, часто заболоченные, имеют пониженную кислотность.

2. Оршанско-Могилевский: почвы дерново-подзолистые, подстилаемые пылевато-суглинистыми и реже – супесчаными грунтами, имеют повышенную кислотность.

3. Минско-Гродненский: почвы дерново-подзолистые, развитые, на лессовидных суглинках, характеризуются высокой кислотностью.

4. Полесский: почвы подзолисто-болотные и дерново-болотные.

## Вопросы для самопроверки

1. Что представляет собой почвообразовательный процесс?
2. Что является внешним признаком почв?
3. Назовите законы почвенных зон.
4. Перечислите наиболее важные почвенные зоны.
5. В какую почвенную зону входит Беларусь?
6. Перечислите основные группы почв Беларуси.
7. Какой вид почв по плодородию стоит на первом месте в республике?
8. Дайте характеристику дерново-подзолистых почв.
9. Какое количество озер и рек располагается на территории республики?
10. Перечислите основные почвенные округа республики.

## 18. ВОДНО-ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ГРУНТОВ

### 18.1. Влияние температуры на тепловой режим грунтов

*Водно-тепловым режимом грунтов* называется совокупность природных факторов, влияющих на распределение в них влажности и температуры.

Теплофизическими свойствами грунта являются: теплоемкость, теплопроводность и теплоустойчивость.

*Теплоемкостью* называется способность грунта аккумулировать или отдавать тепловую энергию при теплообмене. Теплота, сообщенная грунту, расходуется, согласно первому закону термодинамики, на изменение его внутренней энергии и на работу, связанную с расширением грунта. Сообщение грунту теплоты вызывает повышение его температуры.

Различают объемную и удельную теплоемкость.

*Объемная теплоемкость* численно равна количеству тепла, необходимого для изменения температуры единицы объема грунта на  $1^{\circ}\text{C}$ , и выражается следующим образом:

$$C_v = \rho_d \cdot C_d, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}, \quad (18.1)$$

где  $\rho_d$  – плотность сухого грунта,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$C_d$  – удельная теплоемкость грунта,  $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ .

**Удельная теплоемкость** грунта численно равна количеству тепла, необходимого для изменения температуры единицы его массы на  $1^\circ\text{C}$ :

$$C_T = C_s + \frac{W}{100} \cdot C_w; \quad (18.2)$$

$$C_M = C_s + \frac{W_{\text{нз}}}{100} \cdot C_w - \frac{W - W_{\text{нз}}}{100} \cdot C_{\text{л}}, \quad (18.3)$$

где  $C_T$ ,  $C_M$  – удельная теплоемкость грунта в талом и мерзлом состоянии,  $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ ;

$C_s$  – удельная теплоемкость частиц грунта, равная:

щебень, гравий –  $C_s = 837 \text{ Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ ;

песок –  $C_s = 711 \text{ Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ ;

супесь –  $C_s = 753 \text{ Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ ;

суглинок –  $C_s = 795 \dots 837 \text{ Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ ;

глина –  $C_s = 879 \dots 921 \text{ Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ ;

$C_w$ ,  $C_{\text{л}}$  – удельная теплоемкость воды и льда (зависит от температуры);

$W$  – весовая влажность, %;

$W_{\text{нз}}$  – среднее содержание незамерзшей воды в процессе промерзания, %.

**Теплопроводность** – это способность грунта проводить тепло от нагретых его участков к более холодным. Она оценивается коэффициентом теплопроводности, представляющим собой величину, равную количеству тепла, проходящую за единицу времени через нормальное к направлению теплового потока сечение грунта площадью  $1 \text{ м}^2$ .

**Теплоустойчивость** – это способность грунта сохранять свои прочностные и деформативные свойства при повышении температуры окружающей среды.

**Морозостойкость** грунтов – это способность сопротивляться воздействию отрицательных температур. Она оценивается изменением прочности грунтов после определенного числа циклов замораживания и оттаивания.

Промерзание грунтов в Беларуси наступает во второй половине ноября или в первой декаде декабря. Скорость промерзания составляет 1,2...2,8 см/сут. За *продолжительность зимнего периода* принимают количество суток с момента наступления осенью среднесуточной температуры воздуха ниже  $-5^{\circ}\text{C}$  до  $0^{\circ}\text{C}$  весной. Расчетная глубина промерзания песчаного грунта может быть определена по строительным нормам РСН 14-76 (рис. 18.1).

С увеличением в грунте количества дисперсных частиц температура его замерзания понижается. Глинистый грунт с обычной влажностью (30...40%) замерзает при температуре от  $-1^{\circ}\text{C}$  до  $-2^{\circ}\text{C}$ , а песок с 10%-ной влажностью – при температуре  $-0,5^{\circ}\text{C}$ . Поэтому и глубина промерзания грунтов неодинакова для различных их типов.

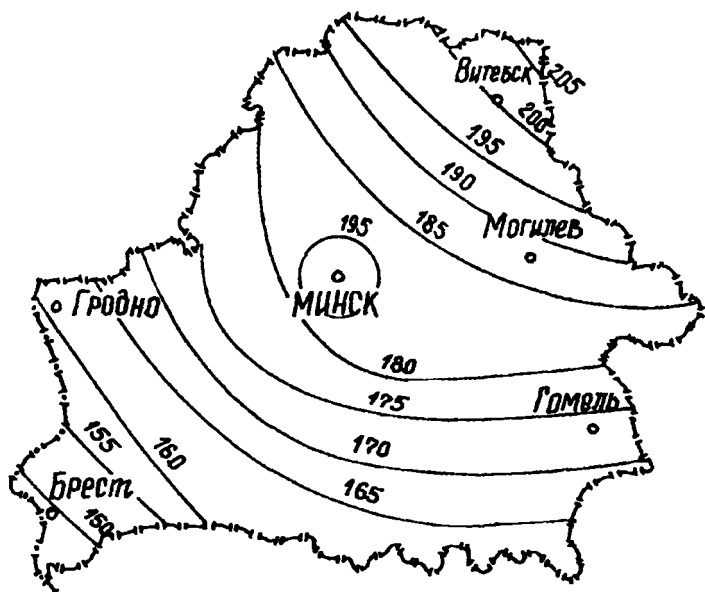


Рис. 18.1. Схема промерзания песчаных грунтов в нулевых местах

Чем выше теплопроводность грунта, тем больше его глубина промерзания. Влажность сначала способствует понижению температуры в грунте, т.к. увеличивает температуропроводность, но при достижении некоторого предела является тормозом. Это связано с тем, что при замерзании воды выделяется теплота льдообразования.



Следовательно, при большей влажности грунта выделяется больше теплоты, поэтому скорость и глубина промерзания при большей влажности будут меньше, чем при малой.

На скорость и глубину промерзания существенно влияние оказывают время образования и высота снежного покрова. Если последний образуется до промерзания, скорость промерзания уменьшается в 2 раза по сравнению с промерзанием грунта при отсутствии снегового покрова. К концу зимы грунт на оголенном участке промерзает в 3...4 раза глубже, чем на участках, покрытых снегом. Промерзание грунта замедляется при установлении снежного покрова высотой 10 см и более.

Глубину промерзания грунта можно определить без учета притока тепла с нижних талых слоев по формуле Стефана

$$Z = \sqrt{\frac{2\lambda T \cdot t}{q \cdot W}}, \text{ м}, \quad (18.4)$$

где  $Z$  – глубина промерзания, м;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности грунта в мерзлом состоянии, ккал/м·ч·град;

$T$  – средняя отрицательная температура за период промерзания, °С;

$t$  – длительность процесса промерзания, ч;

$q$  – скрытая теплота льдообразования, принимаемая равной 80 ккал на 1 кг замерзающей воды;

$W$  – количество замерзающей воды в 1 м<sup>3</sup> грунта, кг.

## 18.2. Водный режим грунтов

Водный режим в условиях естественного залегания грунтов подразделяется на промывной, непромывной и выпотной.

*Промывной режим* характеризуется ежегодным промачиванием грунтовой толщи до уровня грунтовых вод.

*Непромывной режим* характеризуется отсутствием сквозного промачивания толщи выше уровня грунтовых вод.

*Выпотной режим* характеризуется превышением испарения над количеством осадков.

Для второй дорожно-климатической зоны характерен промывной водный режим.

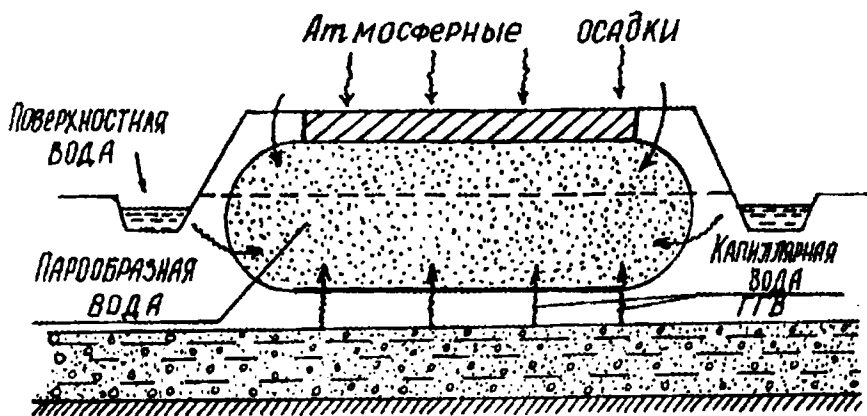


Рис. 18.2. Источники увлажнения грунтов

В зависимости от приведенных на схеме (рис. 18.2) источников увлажнения грунтов земляного полотна автомобильной дороги существует три схемы расчета количества влаги, накопившейся в земляном полотне за зимний период.

1. Сухие места с обеспеченным стоком поверхностных вод, глубоким залеганием грунтовых вод и относительно малым количеством осадков.

Накопление влаги в верхних слоях происходит за счет перераспределения ее запасов в зоне отрицательных температур без дополнительного притока воды из других слоев.

Количество влаги определяется по формуле Н.А.Пузакова

$$Q_1 = \frac{2k(W_0 - W_1)}{\sqrt{a_0} - \sqrt{a_1}} \cdot \sqrt{2T}, \quad (18.5)$$

где  $k$  – коэффициент молекулярной влагопроводимости грунта,  $\text{см}^2/\text{сут}$ ;

$W_0$  – молекулярная влагоемкость грунта;

$W_1$  – гигроскопическая влажность грунта;

$a_0$  – климатический параметр, определяющий наибольшую глубину проникновения в грунт изотермы  $0^\circ\text{C}$  в продолжение зимы,  $\text{см}^2/\text{сут}$ ;

$a_1$  – то же изотермы  $-3^\circ\text{C}$ ,  $\text{см}^2/\text{сут}$ ;

$T$  – продолжительность промерзания.

2. Районы с достаточным количеством осадков и затрудненным стоком воды.

Накопление влаги в зоне отрицательных температур происходит за счет перемещения пленочной и капиллярно-подвешенной воды:

$$Q_2 = 1,15 \cdot (W_{oc} - W_0) \sqrt{k_t \cdot T}, \quad (18.6)$$

где  $W_{oc}$  – осенняя влажность грунта;

$k_t$  – коэффициент капиллярной влагопроводимости грунта, см<sup>2</sup>/сут.

3. Постоянно сырые места с близким расположением уровня грунтовых вод с необеспеченным водостоком.

Накопление влаги в зоне отрицательных температур происходит за счет перемещения капиллярной воды от уровня грунтовых вод, причем путь фильтрации потока капиллярной воды постоянно уменьшается с увеличением глубины промерзания.

### Вопросы для самопроверки

1. Назовите теплофизические свойства грунта.
2. Каким выражением связаны объемная и удельная теплоемкость грунта?
3. Что такое морозостойкость?
4. Какова расчетная глубина промерзания грунта в районе г. Минска в соответствии с РСН 14-76?
5. По какой формуле можно определить глубину промерзания грунта?
6. При какой температуре замерзает глинистый грунт?
7. Чему равна скрытая теплота льдообразования?
8. Перечислите водные режимы грунта в естественном залегании.
9. Каковы источники увлажнения грунтов?
10. Чему равна скорость промерзания грунтов в условиях Беларуси?

## 19. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕХАНИКИ ГРУНТОВ

*Механика грунтов* – это наука о сопротивлении грунтов нагрузкам и деформациям и о способах регулирования физико-механических свойств грунтов.

Начало рождения механики грунтов положил в 1773 г. французский инженер Ш.Кулон, который предложил теорию давления грунтов на подпорные стенки. В 1854 г. другой французский ученый А.Дарси положил начало изучению фильтрационных свойств грунтов, обосновав закон ламинарной фильтрации.

Для описания основных закономерностей механики грунтов существуют зависимости, в основе которых лежат уравнения теоретической механики и механики деформируемых сплошных тел. Основные закономерности механики грунтов представлены в табл. 19.1.

Таблица 19.1

### Основные закономерности механики грунтов

№ пп	Свойство	Закономерность	Основные показатели	Практическое применение в механике грунтов
1	Сжимаемость	Закон уплотнения	Коэффициент сжимаемости	Расчет осадок сооружений
2	Структурно-фазовая деформируемость	Принцип линейной деформируемости	Модуль деформации, Модуль упругости	Определение напряжений и деформаций грунтов
3	Контактная сопротивляемость сдвигу	Условия прочности	Коэффициент внутреннего трения и сцепления	Расчет предельной устойчивости, прочности и давления на ограждения
4	Водопроницаемость	Закон ламинарной фильтрации	Коэффициент фильтрации	Прогноз скорости осадок водопроницаемых грунтовых оснований

#### 19.1. Закономерности сжимаемости грунтов

*Сжимаемость грунта* – это способность изменять свое строение (упаковку твердых частиц) под влиянием внешних воздействий за счет уменьшения пористости. Пористость уменьшается за счет местных сдвигов частиц и перераспределения мелких частиц в поры более крупных. На перемещение минеральных частиц влияет наличие оболочек воды, способствующей или противодействующей этим перемещениям.

При воздействии на грунт усилия он сжимается в направлении большего из действующих напряжений и расширяется в перпендикулярных ему направлениях (рис. 19.1).

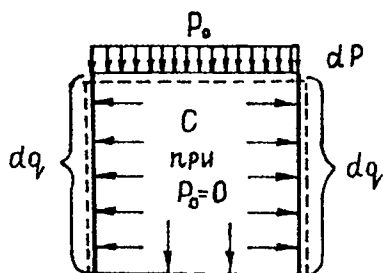


Рис. 19.1. Схема сжимаемости грунта

Величина *бокового давления* характеризуется коэффициентом бокового давления  $\xi$ , который представляет собой отношение приращения бокового давления  $dq$  к приращению сжимаемого усилия  $dp$ :

$$\xi = \frac{dq}{dp} . \quad (19.1)$$

Для песков  $\xi \cong 0,25 \dots 0,37$ ; суглинков  $\xi \cong 0,6$ ; глин  $\xi \cong 0,7 \dots 0,82$ .

Интегрируя вышеприведенное выражение, получим

$$q = p\xi + C , \quad (19.2)$$

где  $C$  – постоянная интегрирования, равная боковому давлению грунта на стенку до приложения внешней нагрузки ( $p_0 = 0$ ).

Если грунт в начальный период находится в рыхлом порошкообразном состоянии, то, пренебрегая влиянием собственного веса грунта, можно считать, что  $C = 0$ , а следовательно,

$$q = \xi p . \quad (19.3)$$

При укладке сухого грунта с интенсивным послойным уплотнением создается первоначальное боковое давление на стенки  $C = q_0$ :

$$q = \xi p + q_0 . \quad (19.4)$$

При передаче нагрузки на уплотненный влажный связный грунт капиллярное давление препятствует деформациям бокового расширения  $C = -p_k$ . В этом случае

$$q = \xi p - p_k. \quad (19.5)$$

Сжимаемость грунта в условиях невозможности бокового расширения характеризуется кривой, которая выражает зависимость между коэффициентом пористости и давлением на грунт (рис. 19.2), называемой *компрессионной кривой*.

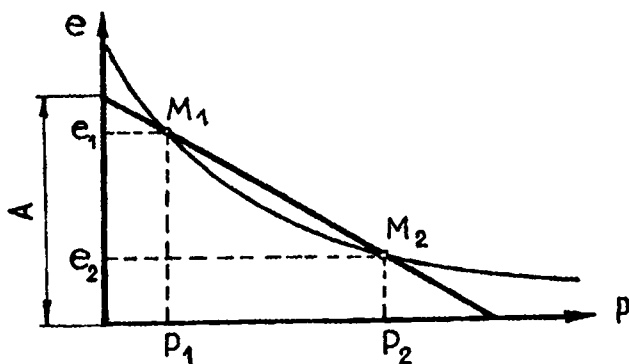


Рис. 19.2. Компрессионная кривая

Если давление на грунт изменяется в малых пределах  $0,1 \dots 0,3$  МПа, то на небольшом участке компрессионной кривой  $M_1M_2$  криволинейная зависимость может быть заменена прямой линией.

Обозначим коэффициент пористости и давление в точке  $M_1$  через  $e_1$  и  $P_1$ , а в точке  $M_2$  – через  $e_2$  и  $P_2$ . Тогда рассматриваемая прямая выразится уравнением

$$e = aP = A, \quad (19.6)$$

где  $e$  – коэффициент пористости при давлении  $P$ ;

$A$  – величина, измеряемая отрезком, отсекаемым прямой линией на оси ординат;

$a$  – коэффициент сжимаемости, равный

$$\alpha = \operatorname{tg} \alpha = \frac{e_1 - e_2}{P_2 - P_1}, \text{ МПа}^{-1}. \quad (19.7)$$

Таким образом, коэффициент сжимаемости равен отношению изменения коэффициента пористости к величине действующего давления.

**Закон уплотнения** гласит, что при небольших изменениях уплотняющих давлений изменение коэффициента пористости прямо пропорционально изменению давления:

$$e_1 - e_2 = a(P_2 - P_1). \quad (19.8)$$

При снятии нагрузки с уплотненного грунта происходит замедленное частичное восстановление его первоначального объема, вначале – за счет упругих деформаций, а затем – при поступлении воды в грунт в результате его набухания (рис. 19.3).

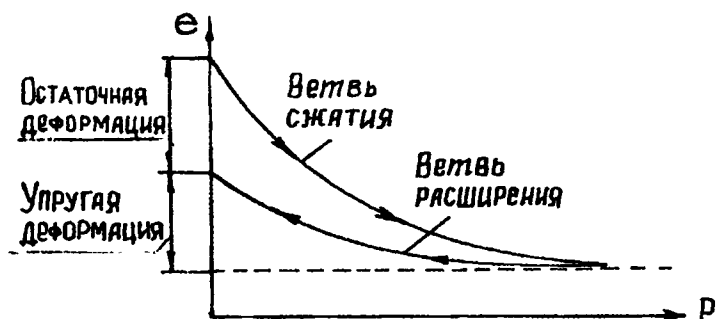


Рис. 19.3. Ветви сжатия и расширения компрессионной кривой

Поэтому компрессионная кривая состоит не только из ветви сжатия (нагрузки), но и из ветви расширения (разгрузки).

В зависимости от величины коэффициента сжимаемости степень сжимаемости грунтов можно представить в следующем виде (табл. 19.2).

## Характеристика сжимаемости грунта

Коэффициент сжимаемости $a$	Модуль осадки $e_p$ , мм/м	Сжимаемость грунта
< 0,001	< 1	практически несжимаем
0,001...0,005	1...5	слабая
0,005...0,01	5...20	средняя
0,01...0,1	20...60	повышенная
> 0,1	> 60	сильная

При расчете осадок сооружений Н.Н.Маслов предложил по данным компрессионных испытаний вычислять *модуль осадки*:

$$e_p = 1000 \cdot l_0 = 1000 \cdot \frac{\Delta h}{h}, \quad (19.9)$$

где  $e_p$  – модуль осадки, мм/м;

$l_0$  – относительная деформация (рис. 19.4), определяемая из выражения (19.10) и равная отношению абсолютной величины сжатия образца  $\Delta h$  к его первоначальной высоте  $h$ ,

$$l_0 = \frac{\Delta h}{h}. \quad (19.10)$$

Под модулем осадки понимают величину осадки (в мм) слоя грунта мощностью 1 м под данной нагрузкой. Степень сжимаемости грунтов по величине модуля осадки представлена в табл. 19.2.

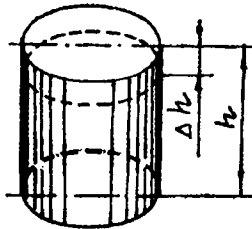


Рис. 19.4. Деформация образца в результате сжимаемости



## 19.2. Методы определения сжимаемости грунтов

Сущность метода определения сжимаемости грунта заключается в наблюдении за величиной линейного обжатия образца грунта под нагрузкой, что достигается на приборах одометрах и стабилометрах.

Одометр позволяет получить компрессионную кривую. Для этого образец грунта помещают в жесткую металлическую обойму и совершают осевое обжатие. В этих приборах поле напряжений внутри образца искажается трением грунта о стенки прибора. Для получения надежных показаний необходимо, чтобы диаметр образца в 4...5 раз превышал его высоту.

В стабилометрах образец грунта помещают в тонкую резиновую оболочку. Пространство между жесткими боковыми стенками и оболочкой заполняют водой. Измеряя манометром давление, возникающее в воде при действии вертикальной нагрузки, можно определить боковое давление.

### Вопросы для самопроверки

1. Перечислите основные закономерности механики грунтов.
2. Что такое сжимаемость грунтов?
3. Напишите выражение для определения бокового давления предварительно уплотненного грунта.
4. Чему равен коэффициент сжимаемости грунта?
5. Сформулируйте закон уплотнения.
6. Сколько ветвей имеет компрессионная кривая?
7. Дайте характеристику модуля осадки.
8. Что такое относительная деформация?
9. На каких приборах определяют сжимаемость грунта?
10. Чем отличается стабилометр от одометра?

## 20. ПРИНЦИП ЛИНЕЙНОЙ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ

### 20.1. Деформационные свойства грунтов

*Деформационные свойства* характеризуют поведение грунта под нагрузками, не превышающими критические, и, следовательно, не приводящими к разрушению образца.

При малых изменениях давлений (0,1...0,3 МПа) зависимость между деформациями и напряжениями может приниматься линейной.

**Принцип линейной деформируемости** заключается в том, что при небольших изменениях давлений грунты можно рассматривать как линейно деформируемые тела.

Этот принцип справедлив для грунтов средней уплотненности, поскольку для слабых грунтов необходимо исходить из нелинейной зависимости между деформациями и напряжениями. Деформации грунтов протекают не мгновенно, а развиваются в течение некоторого времени. При кратковременном воздействии на грунт нагрузок продолжительность нахождения грунта в напряженном состоянии бывает существенно короче того времени, которое необходимо для полного протекания деформации. Поэтому однократное кратковременное приложение большей нагрузки эквивалентно длительному воздействию меньшей нагрузки (рис. 20.1).

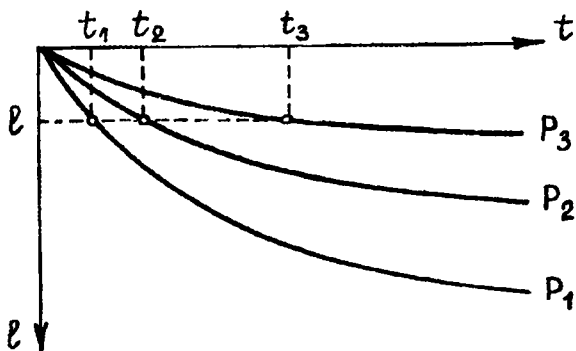


Рис. 20.1. Зависимость величины деформации от времени приложения нагрузки

Деформация грунта  $l$  от тяжелой нагрузки  $P_1$  за короткое время  $t_1$  равно деформации от длительного действия намного меньшей нагрузки  $P_3$ . Поэтому в средней части взлетно-посадочных полос аэродромов, где самолет при пробеге движется с высокой скоростью, строят более тонкие покрытия, чем на концевых участках.

Повторяющиеся многократно прилагаемые на короткое время к грунту нагрузки вызывают в нем накопление деформаций (рис. 20.2).

График показывает постепенное уменьшение величины остаточных и упругих деформаций от каждого повторного цикла нагрузки — раз-

грузки, объясняемое постепенно возрастающим уплотнением грунта, причем остаточные деформации уменьшаются быстрее, чем упругие.

Кривые упругой деформации грунта, получаемые при разгрузке, не совпадают с кривыми деформации при нагружении, образуя *петли гистерезиса*.

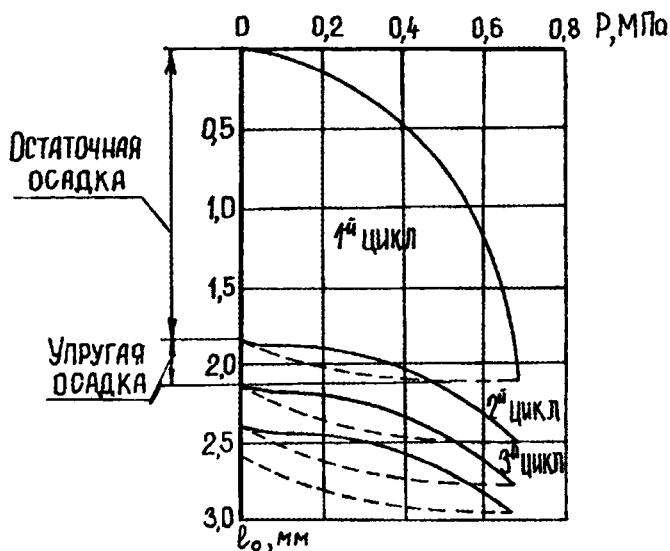


Рис. 20.2. Изменение величин деформаций для многократно прикладываемой нагрузки

## 20.2. Показатели деформационных свойств грунта

Деформационные свойства грунта характеризуются такими показателями, как модуль деформации и модуль упругости.

**Модуль деформации** — характеристика деформируемости грунта, выражающая отношение сжимающего напряжения к вызываемой им относительной деформации:

$$E_{\text{общ}} = \frac{\sigma}{l_0}, \quad (20.1)$$

где  $\sigma$  — сжимающее (нормальное) напряжение, МПа;

$l_0$  — относительная деформация, мм.

Относительная деформация может быть продольной и поперечной. Взаимосвязь между ними устанавливает коэффициент Пуассона.

*Коэффициент Пуассона* есть отношение относительной поперечной деформации (расширения) к относительной продольной деформации (сжатию) грунта. Для песков этот коэффициент равен 0,29; для суглинков – 0,35; для глин – 0,41.

Модуль общей деформации используется при расчетах осадки сооружений, т.е. при действии статических нагрузок, – например, осадка основания под опорами мостов и путепроводов, под насыпью земляного полотна.

*Модуль упругости* – характеристика деформируемости грунта, выражающая отношение сжимающего напряжения к вызываемой им упругой деформации:

$$E_y = \frac{\sigma}{l_y} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{P \cdot D(1 - \nu^2)}{l_y}, \text{ МПа}, \quad (20.2)$$

где  $l_y$  – упругая деформация (рис. 20.3), мм;

$\frac{\pi}{4}$  – поправочный коэффициент при испытании жестким штампом;

$D$  – диаметр штампа, мм;

$P$  – давление на образец, МПа;

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

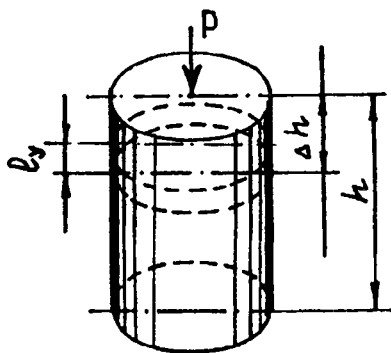


Рис. 20.3. Схема, иллюстрирующая упругую деформацию

Современные методы определения толщины дорожных одежд предусматривают полное восстановление их прогибов после проезда колеса автомобиля, поэтому расчеты ведут исходя из модулей упругости грунтов земляного полотна.

Из формул (20.1), (20.2) видно, что  $E_y > E_{\text{общ}}$ , поскольку  $l_0 > l_y$ . Для линейнодеформируемых тел модуль упругости равен модулю деформации и не зависит от напряжения.

Однако для большинства горных пород значения модуля упругости и модуля общей деформации являются переменными и зависят от величины и продолжительности действия нагрузки.

Между модулями деформации и упругости существуют различия:

1) модуль деформации отражает и упругие, и пластические деформации, не разделяя их;

2) в связи с преобладанием у грунтов остаточных деформаций модуль деформации относится только к возрастанию давления на грунт (к ветви нагрузки);

3) модуль деформации и модуль упругости зависят от влажности и степени уплотнения и изменяются в широких пределах;

4) поскольку деформации грунтов имеют нелинейный характер и закон Гука применим к ним только при малых значениях давлений, постоянные значения модулей деформации и упругости могут быть приняты лишь в узком интервале напряжений.

### Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте принцип линейной деформируемости .
2. Что такое деформационные свойства грунта?
3. Как влияют длительность и величина прилагаемой нагрузки на деформацию грунта?
4. Что характеризует график в виде петли гистерезиса?
5. Какими показателями характеризуются деформационные свойства грунта?
6. Что отражает коэффициент Пуассона?
7. Напишите выражение для определения модуля упругости.
8. Что такое упругая деформация?
9. Какой из модулей больше – упругости или деформации, и почему?
10. В чем различие между модулем деформации и модулем упругости?

## 21. УСЛОВИЯ ПРОЧНОСТИ ГРУНТОВ

В результате действия внешних нагрузок в земляном полотне возникают деформации сжатия и сдвига. Действующие напряжения в точке контакта двух грунтовых частиц раскладываются на две составляющие:

1) нормальное напряжение  $\sigma$ , действующее перпендикулярно к рассматриваемой площадке контакта;

2) касательное напряжение  $\tau$ , действующее в плоскости площадки (рис. 21.1).

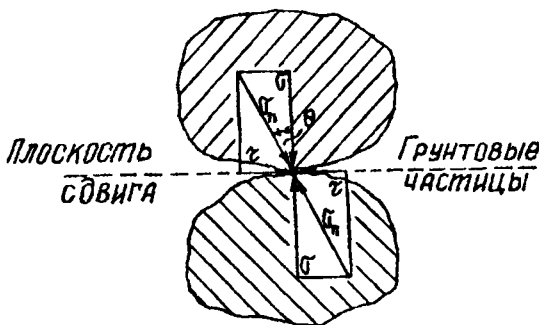


Рис. 21.1. Напряжения, действующие в зоне контакта грунтовых частиц

Имея две составляющие, всегда можно получить результирующее напряжение или полное  $\sigma_n$ , воздействующее на рассматриваемую площадку. Угол отклонения  $\sigma_n$  от нормальной величины  $\sigma$  обозначим через  $\theta$ . Можно записать:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\tau}{\sigma}. \quad (21.1)$$

*Условие прочности* заключается в том, что любой массив грунта считается устойчивым, пока сдвигающие напряжения не вызовут в нем смещение частиц, т.е. должно выполняться условие

$$\tau \leq f(\sigma). \quad (21.2)$$

Условия соответствуют плоской задаче, если напряжения распределяются в одной плоскости, а в перпендикулярном направлении равны нулю или постоянны.

Рассмотрим абстрактную точку грунтового массива, в которой возникают напряжения под действием равномерно распределенной нагрузки  $P_0$  (рис. 21.2).

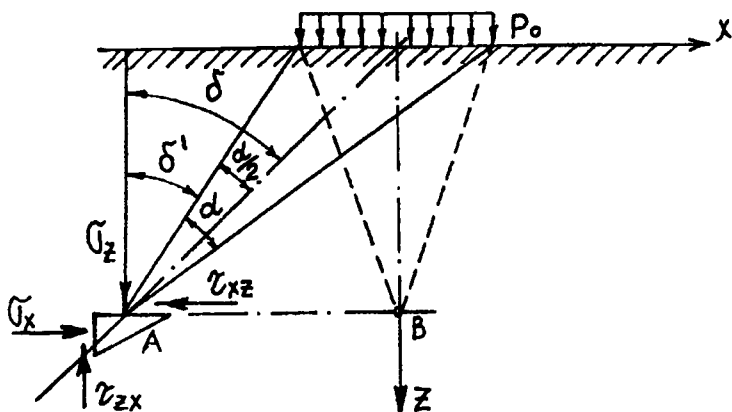


Рис. 21.2. Схема к определению напряжений от действия равномерно распределенной нагрузки в условиях плоской задачи

Через центр равномерно распределенной нагрузки проводим вертикальную ось  $Z$  и горизонтальную  $X$ . Рассматриваемая точка не лежит ни на одной из них. В условиях плоской задачи могут возникнуть напряжения только в двух взаимно перпендикулярных областях. На горизонтальную плоскость действуют напряжения  $\sigma_z$  и  $\tau_{xz}$ , на вертикальную –  $\sigma_x$  и  $\tau_{zx}$ . Угол, составленный двумя лучами, соединяющими рассматриваемую площадку с равномерно распределенной нагрузкой, называется углом видимости  $\alpha$ . Угол, составленный биссектрисой угла  $\alpha$  с вертикалью, обозначим через  $\delta$ ; угол, составленный крайним лучом с вертикалью, – через  $\delta'$ .

Составляющие напряжений в условиях плоской задачи определяются из выражений

$$\begin{cases} \sigma_z = \frac{P_o}{\pi} (\alpha + \sin \alpha \cdot \cos 2\delta); \\ \sigma_x = \frac{P_o}{\pi} (\alpha - \sin \alpha \cdot \cos 2\delta); \\ \tau_{xz} = \tau_{zx} = \frac{P_o}{\pi} \sin \alpha \cdot \sin 2\delta. \end{cases} \quad (21.3)$$

Теперь переместим рассматриваемую точку А в точку В, расположенную на вертикальной оси при неизменной вертикальной координате. Для точки В изменяется значение углов:

$$\delta' = -\frac{\alpha}{2}; \quad (21.4)$$

$$\delta = \frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha}{2} = 0.$$

Таким образом, если рассматриваемая точка будет лежать на оси Z, то  $\delta = 0$ ,  $\cos 0 = 1$ ,  $\sin 0 = 0$ . При подстановке значений составляющих формулы для определения главных напряжений примут вид

$$\begin{cases} \sigma_z = \frac{P_o}{\pi} (\alpha + \sin \alpha), \\ \sigma_x = \frac{P_o}{\pi} (\alpha - \sin \alpha), \\ \tau_{xz} = \tau_{zx} = 0. \end{cases} \quad (21.5)$$

Напряжения  $\sigma_z$  и  $\sigma_x$  будут характеризоваться как главные взаимно перпендикулярные. И поскольку они не равны между собой, то представляют оси эллипса, наклон которого зависит от угла видимости. Величина эллипса будет зависеть от его удаления от центра прикладываемой нагрузки (рис. 21.3).



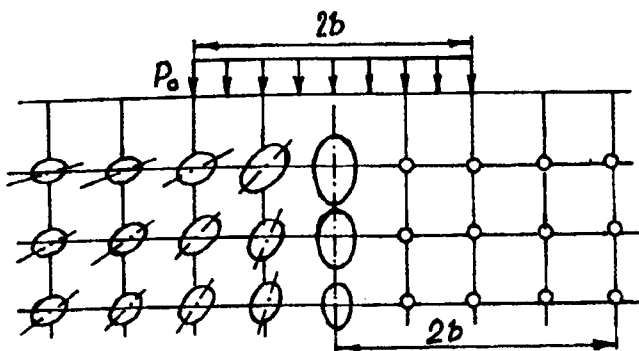


Рис. 21.3. Эллипсы главных напряжений

Как видно из рис. 21.3, главные напряжения, а следовательно, и эллипсы, построенные на них, уменьшаются с глубиной рассмотрения точки грунтового массива и по мере удаления от вертикальной оси.

### 21.1. Теория прочности Мора

В основу теории прочности Мора положено то обстоятельство, что функция  $f(\sigma)$  определяет положение площадок скольжения по отношению к направлениям главных напряжений в данной точке.

В случае плоской задачи строится круг напряжений (круг Мора), диаметр которого равен разности главных напряжений в данной точке. Круг Мора вычерчивается в прямоугольной системе координат. Для его выполнения применяют следующие условия:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &> \sigma_3; \\ OO_1 &= (\sigma_1 + \sigma_3)/2; \\ R &= (\sigma_1 - \sigma_3)/2. \end{aligned} \quad (21.6)$$

От начала координат  $\tau = f(\sigma)$  откладываем значения  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  (рис. 21.4). Из точки  $O'$  проводим окружность радиусом  $R$ . Любая точка  $M$  на окружности характеризует напряженное состояние грунта в плоскости, проходящей через рассматриваемую точку.

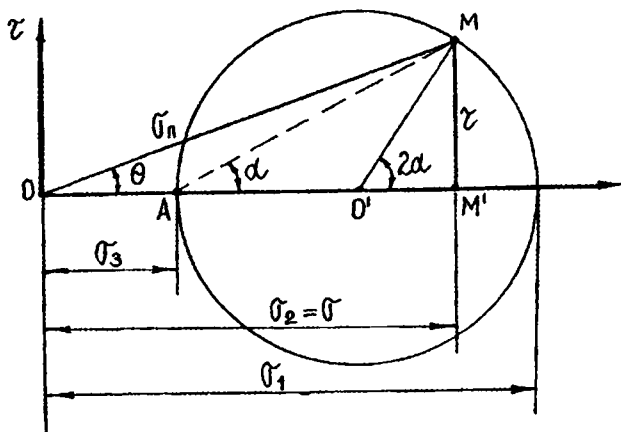


Рис. 21.4. Построение круга Мора

Здесь угол  $\alpha$  – угол наклона рассматриваемой площадки к главной;  $2\alpha$  – центральный угол наклона.

Нормальное напряжение определяется из выражения

$$\sigma = \sigma_2 = OO' + O'M' = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\alpha; \quad (21.7)$$

касательное напряжение равно

$$\tau = MM' = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\alpha. \quad (21.8)$$

Максимальные касательные напряжения соответствуют следующим углам:

$$\begin{aligned} \sin 2\alpha = 1; \quad 2\alpha = \frac{\pi}{2}; \quad \alpha = 45^\circ; \\ \sin 2\alpha = -1; \quad 2\alpha = \frac{3\pi}{2}; \quad \alpha = 135^\circ. \end{aligned} \quad (21.9)$$

Следовательно, максимальные касательные напряжения направлены под углом  $45^\circ$  к главным напряжениям.

Полное результирующее напряжение на рассматриваемой площадке может быть определено из выражения

$$\sigma_{\Pi} = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}. \quad (21.10)$$

Угол наклона полного напряжения к нормали равен

$$\theta = \arctg(\tau/\sigma). \quad (21.11)$$

Угол  $\theta$  максимален, когда ОМ касательна к кругу.

Зависимость сопротивления сдвигу  $\tau$  от нормального давления  $\sigma$  на экспериментальных графиках изображается линией, близкой к прямой (рис. 21.5), которая может быть описана уравнением

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi, \quad (21.12)$$

где  $\varphi$  – угол наклона прямой к оси абсцисс, характеризующий угол внутреннего трения грунта;

$c$  – отрезок пересечения прямой и оси ординат, характеризующий сцепление между частицами.

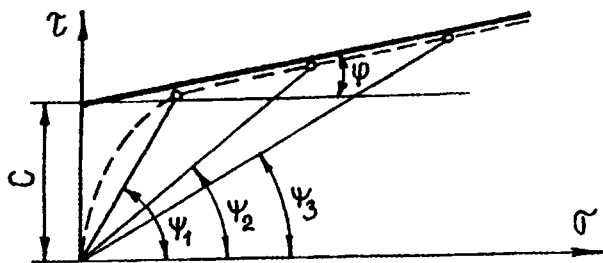


Рис. 21.5. График зависимости касательного напряжения от нормального, построенный по экспериментальным данным ( $\psi$  – угол сдвига)

Для различных грунтов значения составляющих  $c$  и  $\operatorname{tg} \varphi$  находятся в различных соотношениях. По этому признаку грунты делятся на три группы:

1. Грунты, в которых внутреннее трение значительно превосходит сцепление и последним можно пренебречь, т.е.  $c = 0$ . К этой группе относятся *пески всех видов и любой влажности*.

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi. \quad (21.13)$$

Выражение (21.13) представляет собой закон Кулона для сыпучих грунтов. Этот закон в 1773 году вывел французский физик Шарль Огюстен Кулон (1736-1806).

Закон Кулона формулируется следующим образом: предельное сопротивление сыпучих грунтов сдвигу есть сопротивление трению, прямо пропорциональное нормальному давлению.

Графически этот закон для сыпучих грунтов может быть изображен в виде графика (см. рис. 21.6).

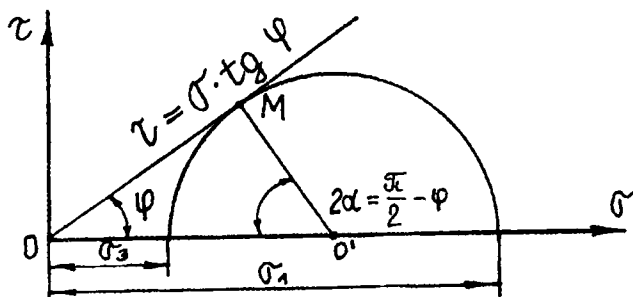


Рис. 21.6. Графическое изображение закона Кулона для сыпучих грунтов

2. Грунты, обладающие как трением, так и сцеплением, причем каждый член уравнения имеет существенное значение. К этой группе относятся все супеси, жесткие и скрытопластичные глины и пылеватые пески.

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + C. \quad (21.14)$$

Это выражение носит название закона Кулона для связных грунтов. Он формулируется следующим образом: предельное сопротивление связных грунтов сдвигу при завершённой их консолидации есть функция первой степени от сжимающего напряжения.

Графически этот закон изображается зависимостью (см. рис. 21.7).

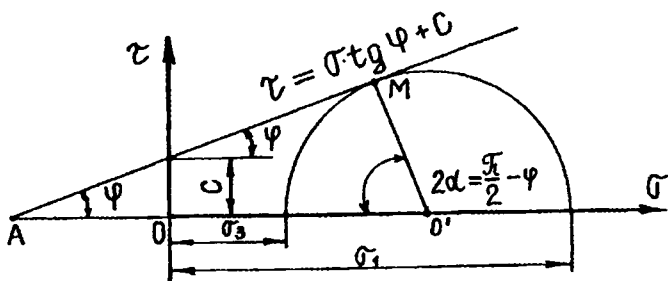


Рис. 21.7. Графическое изображение закона Кулона для связных грунтов

3. Грунты, имеющие преимущественно сцепление. К ним относятся *тугопластичные глины, суглинки и все мерзлые грунты.*

$$\tau = C. \quad (21.18)$$

Графически эта зависимость изображается горизонтальной прямой (рис. 21.8).

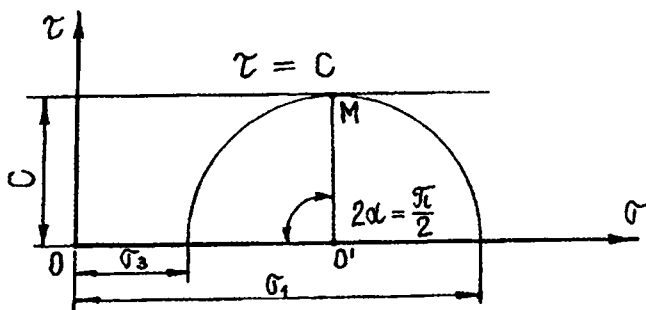


Рис. 21.8. Графическое изображение закона Кулона для пластичных и мерзлых грунтов

## 21.2. Условия прочности для сыпучих и связных грунтов

Найдем предельное соотношение между  $\sigma$  и  $\tau$  для каждого и перечисленных случаев с соблюдением условия прочности:

1. Для первой группы – *песков всех видов и любой влажности* (рис. 21.6)

$$OO' = \sigma_3 + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2}; \quad (21.16)$$

$$\sin \varphi = \frac{O'M}{OO'} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \cdot \frac{2}{(\sigma_1 + \sigma_3)}. \quad (21.17)$$

Отсюда

$$\sin \varphi = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 + \sigma_3)}. \quad (21.18)$$

Это выражение носит название *условия прочности сыпучих тел*, или *условия Ренкина* (английского ученого, сформулировавшего его в 1856 г.).

2. Для второй группы – *супесей, жестких и скрытопластичных глин, пылеватых песков* (рис. 21.7)

$$O'M = R = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2};$$

$$AO' = AO + OO' = C \operatorname{ctg} \varphi + \sigma_3 + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} = C \operatorname{ctg} \varphi + \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2}; \quad (21.19)$$

$$O'M = AO' \sin \varphi; \quad (21.20)$$

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} = \sin \varphi \left( C \operatorname{ctg} \varphi + \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} \right). \quad (21.21)$$

Отсюда

$$\sin \varphi = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2C \operatorname{ctg} \varphi + \sigma_1 + \sigma_3}. \quad (21.22)$$

Это выражение носит название *условия прочности для связных фунтов*, или *условия Ренкина-Мора*.

3. Для третьей группы – *тугопластичных глин, суглинков и всех мерзлых грунтов* (рис. 21.8) – исходим из условия прочности Ренкина-Мора, разлагая котангенс:

$$\sin \varphi = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2C \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} + (\sigma_1 + \sigma_3)}; \quad (21.23)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \sin \varphi \left[ 2C \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} + (\sigma_1 + \sigma_3) \right]; \quad (21.24)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2C \cos \varphi + \sin \varphi (\sigma_1 + \sigma_3); \quad (21.25)$$

$$\text{при } \varphi = 0, \cos \varphi = 1, \sin \varphi = 0 \quad (21.26)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2C; \quad (21.27)$$

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} = C \approx \tau_{\max}. \quad (21.28)$$

Зависимость (21.28) носит название *условия прочности Кулона*.

### 21.3. Сопrotивляемость связных грунтов сдвигу

Н.Н.Маслов в своих работах [3, 14] предложил оценивать степень прочности грунта соотношением воздействующего на грунт касательного напряжения  $\tau$  и действующей сопротивляемости грунта сдвигу  $S_p$ . Связь между этими характеристиками описывает *коэффициент запаса прочности*

$$K_{\text{зап}} = \frac{S_p}{\tau}. \quad (21.29)$$

В зависимости от соотношения основных составляющих различают три состояния:

1) *состояние необеспеченной прочности (запредельное состояние)*, оценивающееся выражением

$$K_{\text{зап}} = \frac{S_p}{\tau} < 1,0 \text{ при } \tau > S_p; \quad (21.30)$$

2) *состояние предельного равновесия*

$$K_{\text{зап}} = \frac{S_p}{\tau} = 1,0 \text{ при } \tau = S_p; \quad (21.31)$$

3) *состояние обеспеченной прочности (допредельное состояние)*, оценивающееся выражением

$$K_{\text{зап}} = \frac{S_p}{\tau} > 1,0 \text{ при } \tau < S_p. \quad (21.32)$$

Все эти три состояния оценивают прочность связных грунтов.

Для оценки прочности сыпучих грунтов рассмотрим систему напряжений, действующих в зоне контакта двух частиц (рис. 21.1). Как было сказано, тангенс угла  $\theta$  представляет собой отношение касательного напряжения к нормальному, т.е.

$$\text{tg } \theta = \frac{\tau}{\sigma}. \quad (21.33)$$

Отсюда

$$\tau = \sigma \text{ tg } \theta. \quad (21.34)$$

Выразим главные напряжения через полное результирующее  $\sigma_{\Pi}$ :

$$\sigma = \sigma_{\Pi} \cos \theta; \quad (21.35)$$

$$\tau = \sigma_{\Pi} \sin \theta.$$

Подставляем эти значения в первоначальное выражение (21.33):



$$\sigma_n \sin \theta = \sigma_n \cos \theta \operatorname{tg} \varphi ; \quad (21.36)$$

$$\frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \operatorname{tg} \varphi ; \quad (21.37)$$

$$\operatorname{tg} \theta = \operatorname{tg} \varphi ; \quad (21.38)$$

$$\theta = \varphi . \quad (21.39)$$

Учитывая, что угол  $\theta$  может изменяться в пределах

$$0 \leq \theta \leq \theta_{\max} , \quad (21.40)$$

можно записать:

$$\theta_{\max} = \varphi$$

и сформулировать условие предельного состояния сыпучего грунта.

*Степень устойчивости сыпучего грунта* определяется соотношением угла наибольшего отклонения  $\theta_{\max}$  и угла внутреннего трения  $\varphi$ .

Прочность грунта, исходя из этого условия, может нарушиться при самом незначительном давлении, косо приложенном к площадке.

На основании этого выражения можно так сформулировать три состояния для сыпучих грунтов:

1) состояние необеспеченной прочности (запредельное)

$$\varphi < \theta_{\max} ; \quad (21.41)$$

2) состояние предельного равновесия

$$\varphi = \theta_{\max} ; \quad (21.42)$$

3) состояние обеспеченной прочности (допредельное)

$$\varphi > \theta_{\max} . \quad (21.43)$$

Н.Н.Маслов, рассмотрев состояния прочности для связных и сыпучих грунтов, на основании показателя сопротивляемости сдвигу

предложил оценивать прочность горной породы и вместо касательного напряжения в законе Кулона оперировать сопротивляемостью сдвига  $S_p$ . Кроме того, он предложил рассматривать сцепление как показатель, характеризующий жесткое структурное сцепление  $C_c$  и связность породы водно-коллоидной природы и обратимого характера при влажности  $W - C_w$ .

В результате была выведена *формула Н.Н.Маслова*

$$S_p = \sigma \operatorname{tg} \varphi + C_w + C_c, \quad (21.44)$$

где  $S_p$  – сопротивление грунта сдвигу;

$C_w$  – связность грунта при влажности  $W$ ;

$C_c$  – жесткое структурное сцепление.

Следует отметить, что связность присуща несцементированным глинистым породам и имеет обратимый характер.

Структурное сцепление придает породе определенную жесткость и твердость и объясняется наличием в породе жестких связей.

Исходя из вышеприведенного выражения можно заключить, что *сопротивляемость породы сдвигу* зависит от: сил внутреннего трения, зависящих от величины нормального напряжения; связности породы и структурного сцепления.

В соответствии с формулой Н.Н.Маслова глинистые грунты можно подразделить на три вида:

- 1) жесткие;
- 2) скрытопластичные;
- 3) пластичные.

В *жестких глинистых грунтах* связность  $C_w$  намного меньше структурного сцепления  $C_c$ . В этом случае угол внутреннего трения  $\varphi$  в слабой степени зависит от степени увлажнения. Сопротивляемость сдвигу жестких глинистых грунтов выражается зависимостью

$$S_p = \sigma \operatorname{tg} \varphi + C_c \text{ при } C_w = 0. \quad (21.45)$$

В *скрытопластичных глинистых грунтах* наряду с силами внутреннего трения большую роль играет связность  $C_w$  и мень-

шую – структурное сцепление  $C_c$ . Общая сопротивляемость сдвигу зависит от степени увлажнения:

$$S_p = \sigma \operatorname{tg} \varphi + C_w + C_c. \quad (21.46)$$

График этой зависимости отличается от предыдущей тем, что зависимости имеют свое значение для каждой определенной влажности (рис. 21.9).

В *пластичных глинистых грунтах* силы трения между частицами равны нулю и, следовательно, коэффициент трения и угол трения имеют нулевые значения. В этих грунтах отсутствует структурное сцепление:

$$S_p = C_w \text{ при } C_c = 0 \text{ и } \varphi = 0. \quad (21.47)$$

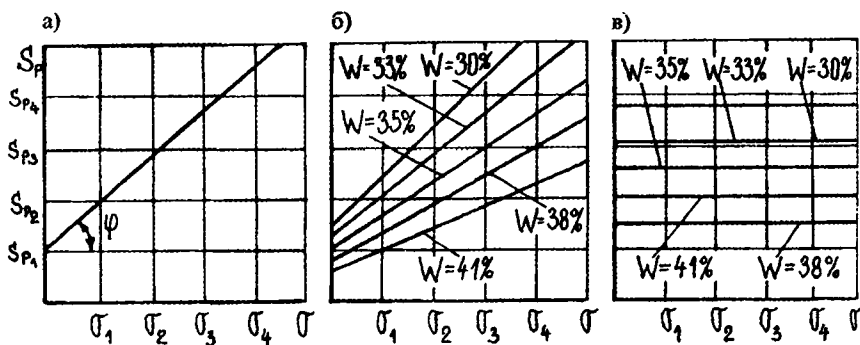


Рис. 21.9. Графики зависимости сопротивляемости сдвигу для глинистых грунтов: а – жестких; б – скрытопластичных; в – пластичных

### Вопросы для самопроверки

1. Какие напряжения действуют в зоне контакта грунтовых частиц?
2. При каком условии грунтовый массив считается устойчивым?
3. Как изменяются главные напряжения по мере удаления от прикладываемой нагрузки?
4. Какие условия применяются для построения круга Мора?
5. Напишите законы Кулона для сыпучих и связных грунтов.
6. Выведите формулу, характеризующую условие Ренкина для сыпучих тел.

7. Что представляет собой коэффициент запаса прочности?  
 8. Какие состояния прочности Вы знаете для связных и сыпучих грунтов?  
 9. Напишите и объясните формулу Н.Н.Маслова.  
 10. Нарисуйте графики зависимости сопротивляемости сдвигу для глинистых грунтов.

## 22. ЗАКОН ЛАМИНАРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Грунты представлены частицами различной крупности, а поры – каналами, имеющими переменное сечение и переплетающимися между собой. Поэтому при изучении фильтрации в основу положен статистический метод.

Фильтрация в грунтах, имеющих естественное залегание, зависит от двух основных параметров: гранулометрического состава и вязкости жидкости, а в грунтах нарушенного строения – дополнительно от степени их уплотненности. Для тугопластичных и полутвердых глин требуется наличие начального градиента, после преодоления которого начинается движение воды.

В грунтах естественного залегания движение воды возможно при наличии определенного напора, который может быть вызван: 1) расположением точек грунта от нулевого уровня; 2) внешним давлением от сооружения, вызываемым отжатием воды из основания; 3) расположением источника нагнетания жидкости в грунт. Скорость напорного движения грунтовых вод зависит: 1) от размеров пор грунта; 2) сопротивлений по пути фильтрации; 3) величины действующих напоров.

Если линии токов воды нигде не пересекаются друг с другом, такое движение называется *ламинарным*; при наличии пересечений и завихрений движение будет *турбулентным* (рис. 22.1).

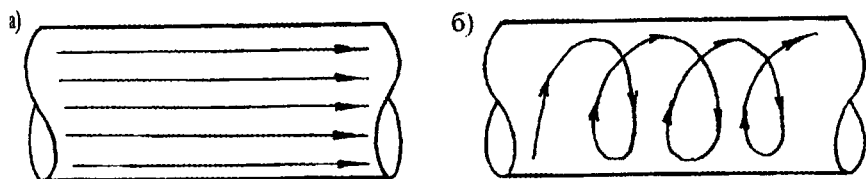


Рис. 22.1. Режимы движения воды:  
 а – ламинарное, б – турбулентное

Рассмотрим течение грунтовых вод при наличии гидравлического градиента, представляющего собой отношение разности геодезических отметок изогипс к расстоянию между этими отметками (рис. 22.2):

$$I = \frac{H_1 - H_2}{L}, \quad (22.1)$$

где  $H_1$  и  $H_2$  – геодезические отметки гидроизогипс водоупорного слоя;

$L$  – расстояние между отметками.

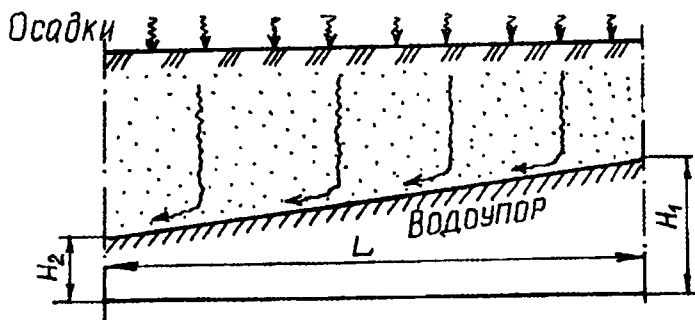


Рис. 22.2. Схема движения грунтовых вод

В грунтах движение воды принято принимать как ламинарное, которое происходит с тем большей скоростью, чем больше гидравлический градиент.

Французский ученый А. Дарси в 1885 г. сформулировал закон ламинарной фильтрации, согласно которому скорость фильтрации  $V_{\phi}$ , или расход воды в единицу времени через площадь поперечного сечения грунта, прямо пропорциональна гидравлическому градиенту:

$$V_{\phi} = K_{\phi} \cdot I, \quad (22.2)$$

где  $K_{\phi}$  – коэффициент фильтрации, равный скорости фильтрации при градиенте, равном единице.

Коэффициент фильтрации для песчаных грунтов определяется в соответствии с изменением №1 к ГОСТ 25584-90 на приборе СоюздорНИИ.

Для приближенных расчетов можно использовать формулу

$$K_{\phi} = 1000 d_{10}^2, \quad (22.3)$$

где  $d_{10}$  – действующий диаметр, определяемый по суммарной кривой гранулометрического состава, мм.

Фильтрация воды в вязких глинистых грунтах имеет свои особенности, вызванные малыми размерами пор и вязким сопротивлением водно-коллоидных пленок, обволакивающих минеральные частицы грунтов. Чем тоньше водно-коллоидные пленки, что имеет место у уплотненных глинистых грунтов, тем большее сопротивление они оказывают напорному движению воды.

Фильтрация воды в вязких глинистых грунтах начинается лишь при достижении градиентом напора некоторой начальной величины, преодолевающей внутреннее сопротивление движению, оказываемое водно-коллоидными пленками.

*Закон ламинарной фильтрации для глин* примет вид

$$V_{\phi} = K_{\phi} (I - I_0), \quad (22.4)$$

где  $I_0$  – начальный градиент напора для глин, колеблется в пределах от 10 до 70, причем значения тем выше, чем больше влажность и степень уплотнения грунта.

Графически закон ламинарной фильтрации для песчаных и глинистых грунтов представлен на рис. 22.3.



Рис. 22.3. Зависимость между скоростью фильтрации и гидравлическим градиентом

Средние ориентировочные значения коэффициента фильтрации для различных пород представлены в табл. 22.1.

Таблица 22.1

Ориентировочные значения коэффициента фильтрации

№ пп	Водопроницаемость породы	$K_f$ , м/сут
1	Практически водонепроницаемые (глина, монолитные скальные породы)	$< 5 \cdot 10^{-5}$
2	Весьма слабо водопроницаемые (суглинки, тяжелые супеси)	$5 \cdot 10^{-3}$
3	Слабоводопроницаемые (супеси, слаботрещиноватые глинистые сланцы, песчаники, известняки)	0,5
4	Водопроницаемые (тонкозернистые и мелкозернистые пески, трещиноватые скальные породы)	5
5	Хорошо водопроницаемые (среднезернистые пески, скальные породы с повышенной трещиноватостью)	50
6	Сильноводопроницаемые (крупнозернистые, гравелистые пески, галечники, сильнотрещиноватые скальные породы)	$> 500$

Вопросы для самопроверки

1. Какую форму и сечение имеют грунтовые поры?
2. При каких условиях возможно движение воды в грунтах естественного и нарушенного строения?
3. Что представляет собой ламинарный режим течения жидкости?
4. Объясните сущность гидравлического градиента.
5. Сформулируйте закон Дарси для песчаных и глинистых грунтов.
6. Изобразите графически зависимость между скоростью фильтрации и гидравлическим градиентом для песчаных и глинистых грунтов.
7. Что необходимо для начала фильтрации в глинистых грунтах?
8. Что препятствует движению воды в глинистых грунтах?
9. Какие породы относятся к слабоводопроницаемым?
10. Каково среднее ориентировочное значение коэффициента фильтрации у мелкозернистых песков?

## 23. НАПРЯЖЕНИЯ В ГРУНТАХ

### 23.1. Понятие о величине напряжения

Давление от нагрузки, приложенной к поверхности грунтового массива, передается в грунте частицами через точки контакта, распределяясь по мере углубления в грунт на все большую площадь (рис. 23.1).

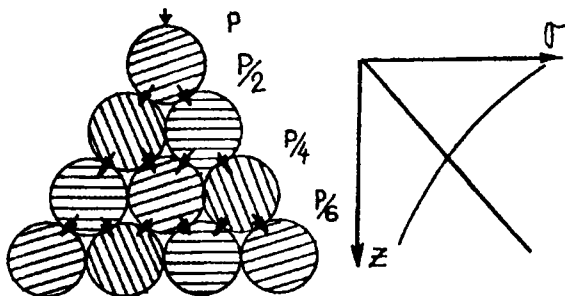


Рис. 23.1. Модель контактов отдельных частиц

Представим себе модель грунта в виде пирамиды. Нагрузка, приложенная к верхней частице, передается на нижние в соответствии с числом контактов, причем величина давления на нижние частицы от внешней нагрузки будет постоянно уменьшаться. Теперь рассмотрим ту же модель, но уже без нагрузки  $P$ , учитывая давление от частиц, расположенных сверху. Легко убедиться, что в этом случае давление на все нижележащие частицы от вышележащих будет постоянно увеличиваться по мере заглубления.

Действующие в грунтах реальные силы, приложенные к отдельным грунтовым частицам, заменяют воображаемыми. Величину этих сил, отнесенных к единице площади сечения, принимают за *величину напряжений в грунте*.

На земляное полотно автомобильных дорог действуют динамические и статические нагрузки от подвижного состава и собственный вес грунта.

Наибольшие напряжения возникают по вертикали, проходящей через ось симметрии нагрузки. Как видно из эпюр, напряжения (рис. 23.2) от внешней нагрузки с глубиной затухают, а от собственного веса – возрастают.



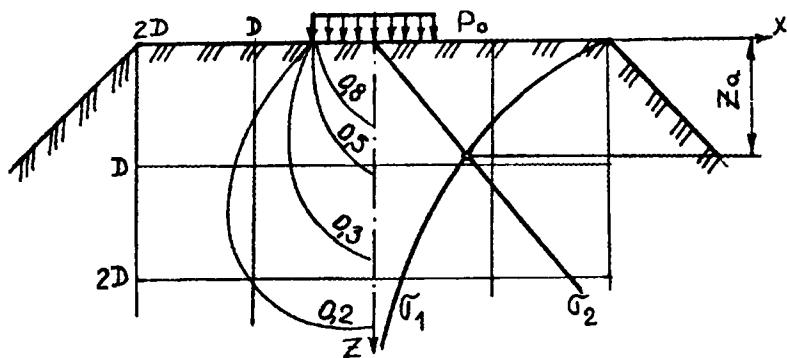


Рис. 23.2. Эпюры напряжений в земляном полотне

Объем грунта, в котором напряжения от внешней нагрузки больше напряжений от собственного веса, называют глубиной активной зоны;

$$Z_a = 1,36 \sqrt[3]{\frac{kP_0}{\rho}}, \quad (23.1)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий напряжения в полотне;

$P_0$  – нагрузка;

$\rho$  – плотность грунта.

Глубина активной зоны для автомобильных дорог составляет 1,6... 1,8 м.

Если  $Z > Z_a$ , решающую роль в напряженно-деформируемом состоянии играет собственный вес грунта, если  $Z < Z_a$ , – внешняя нагрузка.

Для характеристики напряженного состояния грунтового массива используют следующие напряжения (рис. 23.3):

$\sigma_z$  – вертикальное нормальное напряжение;

$\sigma_y, \sigma_x$  – горизонтальные нормальные напряжения, действующие соответственно в направлении осей  $y$  и  $x$ ;

$\tau_{xy}$  и  $\tau_{yx}$  – касательные напряжения, действующие по граням параллельно оси  $z$ ;

$\tau_{zx}$  и  $\tau_{xz}$  – то же параллельно оси  $y$ ;

$\tau_{yz}$  и  $\tau_{zy}$  – то же параллельно оси  $x$ .

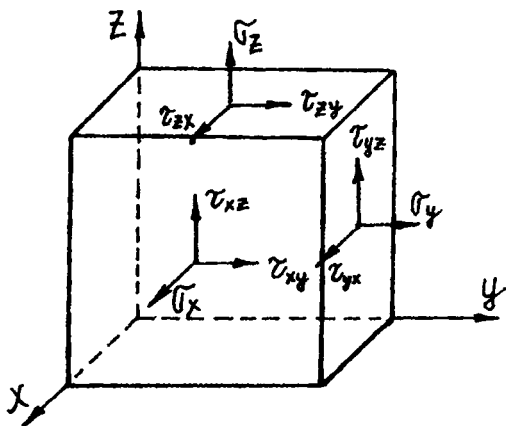


Рис. 23.3. Напряженное состояние элементарного кубика грунта

### 23.2. Определение напряжений в однородных грунтах

На основании принципа линейной деформируемости грунт при малых нагрузках подчиняется *закону Гука*, устанавливающему связь между напряжением  $\sigma$  и модулем деформации  $E_{\text{общ}}$  с учетом относительной деформации  $l_0$

$$\sigma = E_{\text{общ}} \cdot l_0. \quad (23.2)$$

Для вывода выражения по определению напряжения примем посылат (рис. 23.4).

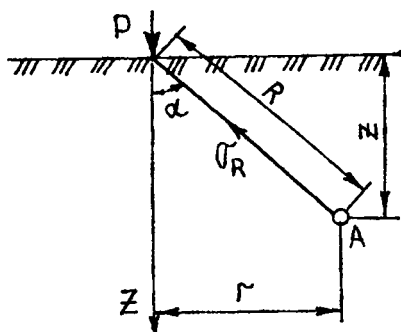


Рис. 23.4. Схема действия сосредоточенной силы

**Постулат.** Напряжение  $\sigma_R$  пропорционально  $\cos \alpha$  и обратно пропорционально квадрату расстояния от точки приложения сосредоточенной силы  $R^2$ . Таким образом,

$$\sigma_R = A \cdot \frac{\cos \alpha}{R^2}, \quad (23.3)$$

где  $A$  – коэффициент, определяемый из условия равновесия.

Для составления условия равновесия проведем через точку  $A$  (рис. 23.4) полушаровое сечение с центром в точке приложения нагрузки (рис. 23.5)

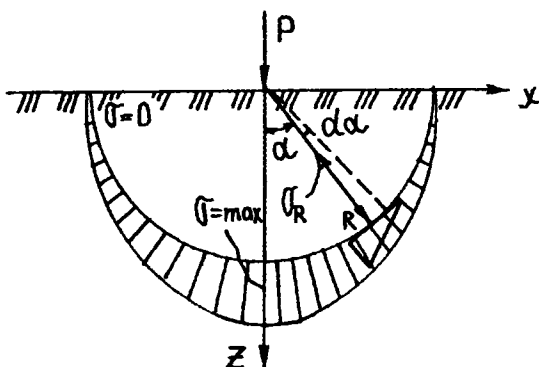


Рис. 23.5. Эпюра напряжений на полушаровом сечении

Нормальные напряжения будут изменяться от  $O - Y$  ограничивающей плоскости до максимума по оси  $Z$ .

Условие равновесия заключается в том, что сумма проекций всех сил на вертикальную ось равна нулю, т.е.

$$P - \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma_R \cos \alpha \cdot dF = 0, \quad (23.4)$$

где  $dF$  – поверхность элементарного шарового пояса, равная

$$dF = 2\pi \cdot (R \cdot \sin \alpha) \cdot (R \cdot d\alpha). \quad (23.5)$$

Подставляем эту величину в начальное уравнение и получаем

$$P - \int_0^{\frac{\pi}{2}} A \frac{\cos \alpha}{R^2} \cdot \cos \alpha \cdot 2\pi(R \cdot \sin \alpha) \cdot (R \cdot d\alpha) = 0; \quad (23.6)$$

$$P - \int_0^{\frac{\pi}{2}} A \frac{\cos^2 \alpha}{R^2} \cdot 2\pi R^2 \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha = 0; \quad (23.7)$$

$$P - 2\pi A \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha = 0. \quad (23.8)$$

Проинтегрировав и подставив пределы, получим

$$P - \frac{2}{3} A \pi = 0, \quad (23.9)$$

откуда коэффициент  $A$  равен

$$A = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{\pi}. \quad (23.10)$$

Подставив это выражение в постулат, получаем

$$\sigma_R = \frac{3P \cos \alpha}{2\pi R^2}. \quad (23.11)$$

Эта формула выведена Жозефом Буссинеском в 1886 г. В формуле  $\alpha$  – угол, составленный радиус-вектором с вертикалью, проходящей через точку приложения  $P$ .

Из формулы Ж.Буссинеска могут быть получены выражения для определения напряжений по площадкам, перпендикулярным коор-

динатным осям XYZ (рис. 23.3), т.е. применительно к пространственной задаче (рис. 23.6):

$$\sigma_R^1 = \sigma_R \cdot \cos \alpha, \text{ т.к. } \cos \alpha = \frac{z}{R}. \quad (23.12)$$

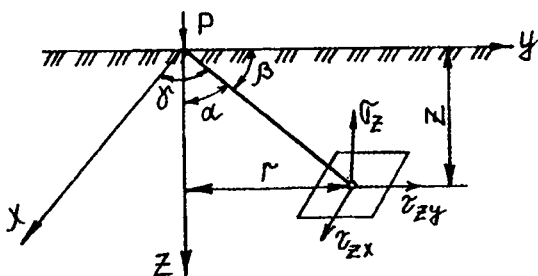


Рис. 23.6. Схема действия сосредоточенной силы для пространственной задачи

Подставив в вышеприведенную формулу значение  $\sigma_R$  по формуле Ж.Буссинеска и  $\cos \alpha$ , получим

$$\sigma_R^1 = \frac{3P \cos \alpha}{2\pi R^2} \cdot \frac{z}{R} = \frac{3P \cdot z^2}{2\pi \cdot R^4}. \quad (23.13)$$

Исходя из полученного выражения могут быть определены  $\sigma_z$ ,  $\sigma_{zy}$  и  $\tau_{zx}$ :

$$\begin{cases} \sigma_z = \sigma_R^1 \cos \alpha; \cos \alpha = \frac{z}{R}; \\ \sigma_{zy} = \sigma_R \cos \beta; \cos \beta = \frac{y}{R}; \\ \sigma_{zx} = \sigma_R^1 \cos \gamma; \cos \gamma = \frac{x}{R}. \end{cases} \quad (23.14)$$

В результате получим вертикальное нормальное напряжение

$$\sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi R^5} \quad (23.15)$$

и касательные напряжения

$$\tau_{zy} = \frac{3P\gamma z^2}{2\pi R^5}; \quad (23.16)$$

$$\tau_{zx} = \frac{3P\alpha z^2}{2\pi R^5}. \quad (23.17)$$

Аналогичным образом могут быть выведены выражения для  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yx}$ .

Выражению для вертикальных нормальных напряжений может быть придан более удобный вид. Учитывая, что  $R = \sqrt{z^2 + r^2}$ , получим

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi z^2} \cdot \frac{1}{\left|1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right|^{5/2}} = \frac{KP}{z^2}. \quad (23.18)$$

Величина безразмерного множителя  $K$ , зависящего от отношения  $\left(\frac{r}{z}\right)$ , может быть определена по таблице [15].

### 23.3. Расчет напряжений для плоской и пространственной задачи

Все инженерные задачи, решаемые при строительстве автомобильных дорог и коммуникационных сооружений, могут быть отнесены к плоской и пространственной задачам.

При определении напряжений под длинными ленточными фундаментами, дорожными насыпями, плотинами постоянного сечения, основаниями подпорных стенок решается *плоская задача*, т.е. принимается допущение, что напряжения распределяются в одной плоскости, а в перпендикулярном к ней направлении равны нулю.

Рассмотрим порядок расчета напряжений под ленточными фундаментами и дорожными насыпями.

1. *Нагрузка, равномерно распределенная по ширине полосы (ленточный фундамент).*

Как было изложено в разд. 21, составляющие напряжений в условиях плоской задачи могут быть определены из выражений

$$\begin{cases} \sigma_z = \frac{P}{\pi} \cdot (\alpha + \sin\alpha \cdot \cos 2\delta); \\ \sigma_x = \frac{P}{\pi} \cdot (\alpha - \sin\alpha \cdot \cos 2\delta); \\ \tau_{xz} = \tau_{zx} = \frac{P_0}{\pi} \cdot \sin\alpha \cdot \sin 2\delta. \end{cases} \quad (23.19)$$

После расчета известных значений углов и замены их коэффициентами предыдущая группа выражений может принять вид

$$\begin{cases} \sigma_z = K_z \cdot P; \\ \sigma_x = K_x \cdot P; \\ \tau_{xz, zx} = K_{xz, zx} \cdot P, \end{cases} \quad (23.20)$$

где  $K_z$ ,  $K_x$ ,  $K_{xz, zx}$  – коэффициенты влияния, определяемые по таблицам в зависимости от величины относительных координат  $\frac{z}{b}$ ;  $\frac{x}{b}$ .

По вышеприведенным формулам строят эпюры распределения напряжений по горизонтальным и вертикальным сечениям.

2. *Нагрузка, распределенная по трапеции (давление дорожных насыпей и плотин).*

Формула для определения нормального напряжения с учетом замены расчетной части через коэффициент  $K_0$  имеет вид

$$\sigma_z = K_0 \cdot P, \quad (23.21)$$

где  $K_0$  – коэффициент, определяемый по графику Остерберга в зависимости от отношений  $\frac{a}{z}$ ;  $\frac{\alpha}{z}$  (рис. 23.7);

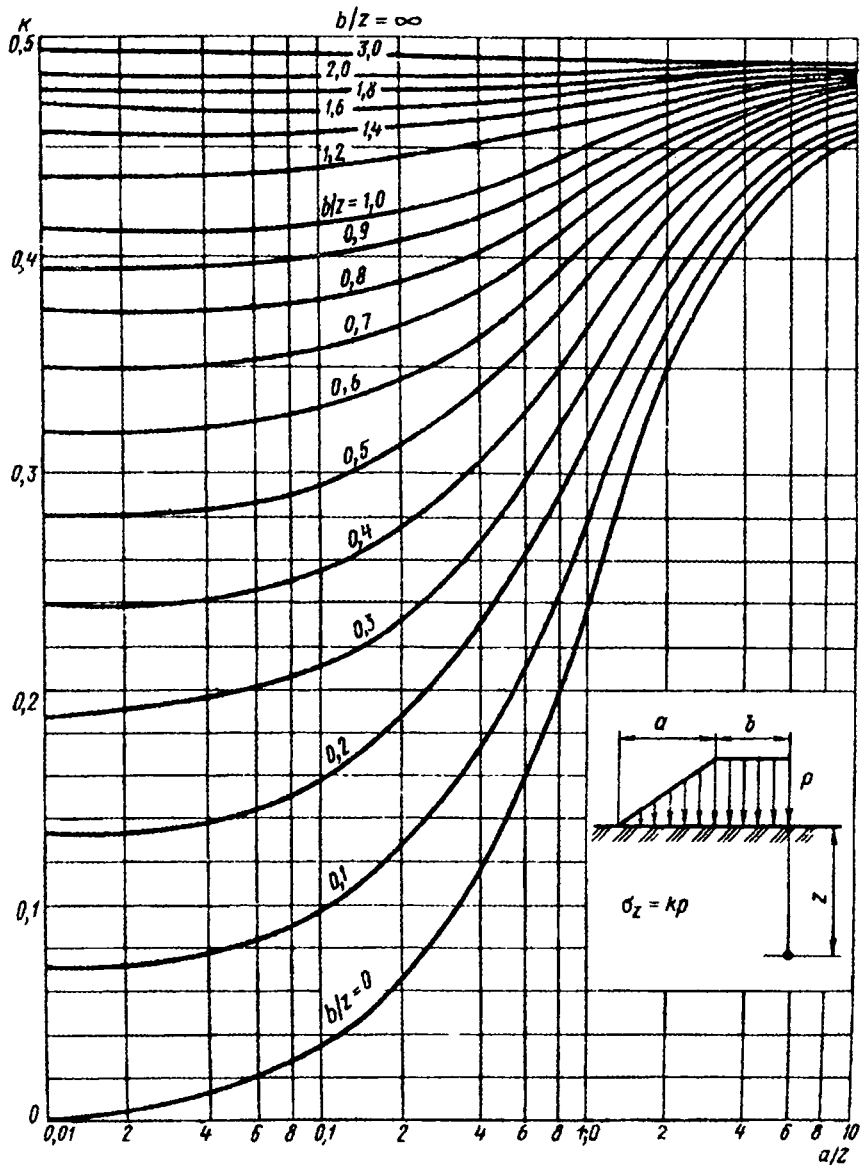


Рис. 23.7. Номограмма для определения вертикальных нормальных напряжений в грунте при нагрузке от насыпи



$a$  – проекция линии откоса на горизонтальную плоскость;  
 $b$  – половина ширины насыпи поверху;  
 $z$  – глубина определения направления от нижней плоскости откоса;  
 $P$  – давление на грунт в центральной части насыпи.

Следует учитывать, что вертикальные сжимающие напряжения для условий плоской задачи распространяются на большую глубину ( $\approx$  до  $6b$ ), чем в случае пространственной задачи ( $\approx$  до  $4b$ , где  $b$  – половина ширины распределенной нагрузки).

При определении напряжений в грунтах под нагрузками, распределенными по ограниченной площади (башмаки колонн, опоры мостов, колеса и гусеницы транспортных средств), решается *пространственная задача*.

Рассмотрим порядок расчета напряжений под нагрузкой, равномерно распределенной по кругу и по прямоугольной площадке.

1. *Нагрузка, равномерно распределенная по кругу* (опоры мостов).

Вертикальные нормальные напряжения по оси  $z$ , проходящей через центр круга (рис. 23.8):

$$\sigma_z = P(1 - \cos^3\beta) = K_1 \cdot P, \quad (23.22)$$

где  $\beta$  – угол, образуемый вертикальной осью и прямой, соединяющей рассматриваемую точку  $A$  с любой точкой на окружности;

$K_1 = (1 - \cos^3\beta)$  – определяется по таблицам [15] в зависимости от соотношения  $\frac{z}{r}$ .

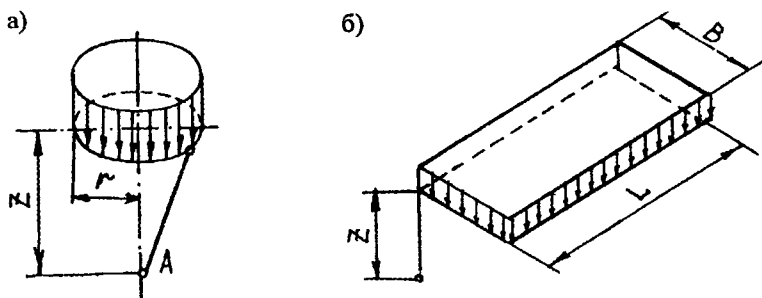


Рис. 23.8. Расчетные схемы пространственных задач:  
 а – при нагрузке, распределенной по кругу; б – при нагрузке, распределенной по прямоугольной площадке

2. Нагрузка, равномерно распределенная по прямоугольной площадке (опоры искусственных сооружений, башмаки колонны) (рис. 23.8).

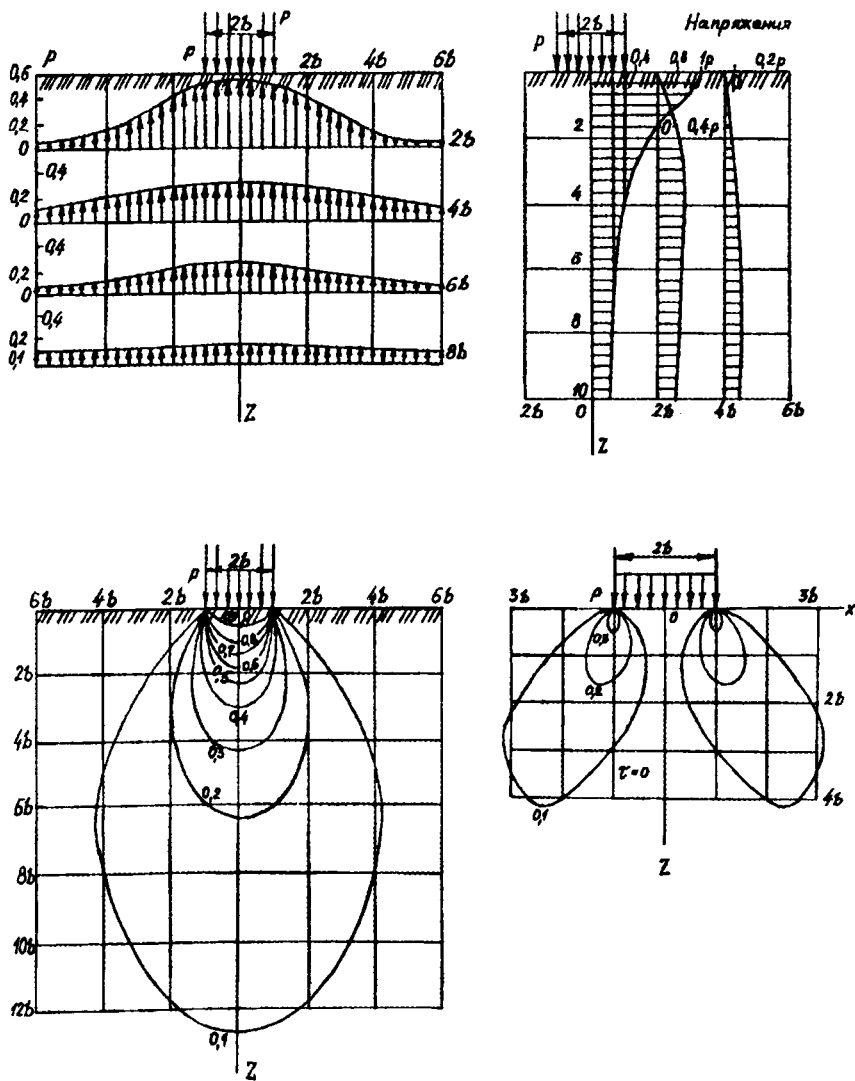


Рис. 23.9. Кривые распределения напряжений

Напряжение по вертикали, проходящей через угол площадки:

$$\sigma_z = K_2 \cdot P, \quad (23.23)$$

где  $K_2$  – коэффициент, определяемый по таблицам [15] в зависимости от соотношений  $\frac{Z}{B}$ ;  $\frac{L}{B}$ ;

$L$  – большая,  $B$  – меньшая стороны загруженного прямоугольника;  
 $Z$  – глубина рассматриваемой точки.

#### 23.4. Кривые распределения напряжений

Для характеристики напряженного состояния грунтового массива используются кривые распределения напряжений, представляющие собой геометрические места точек, в которых эти напряжения имеют одинаковое значение.

На практике наибольшее распространение получили следующие эпюры распределения напряжений:

- 1) кривые распределения вертикальных нормальных напряжений по горизонтальному сечению  $\sigma_z$  при  $z = \text{const}$ ;
- 2) кривые распределения вертикальных нормальных напряжений  $\sigma_z = \text{const}$ ;
- 3) кривые распределения вертикальных нормальных напряжений по глубине при постоянном расстоянии от оси действия нагрузки  $\sigma_z$  при  $x = \text{const}$ ;
- 4) кривые равных касательных напряжений  $\tau_{\max} = \text{const}$  (рис. 23.9).

#### 23.5. Распределение напряжений в неоднородных грунтах

Влияние неоднородности грунтовых напластований проявляется при разности модулей смежных слоев более чем в 2...3 раза. Такие условия могут возникнуть, когда деформируемость грунтов возрастает с глубиной; в случае залегания анизотропных грунтов или грунтов подстилаемых недеформируемым слоем; у многослойных систем.

Профессор Г.И.Покровский в 1936 году предложил *метод эквивалентного слоя*, который дает возможность при определении напряжений привести любую многослойную систему к однослойной.

Сущность метода заключается в замене более жесткого слоя фиктивным эквивалентным слоем грунта такой толщины, чтобы напряжения грунтового основания оставались одинаковыми (рис. 23.10).

Высота эквивалентного слоя

$$h_{\text{ЭКВ}} = h_1 \sqrt[3]{\frac{E_M}{E_{\text{ГР}}}}, \quad (23.24)$$

где  $h_1$  – толщина жесткого слоя;

$E_M$  и  $E_{\text{ГР}}$  – модули деформации материала жесткого слоя и подстилающего грунта.

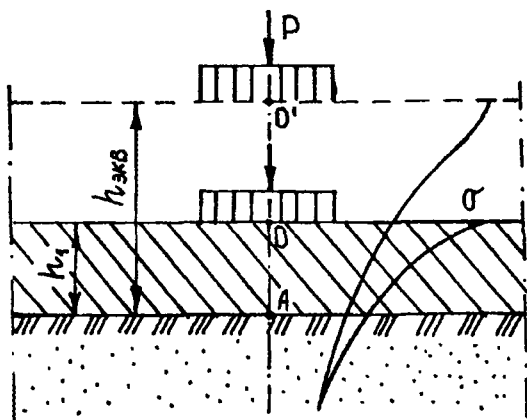


Рис. 23.10. Схема метода эквивалентного слоя

Напряжения в грунтах определяют из выражения

$$\sigma_z = \frac{P_0}{1 + \left(\frac{h_{\text{ЭКВ}}}{d}\right)^2}, \quad (23.25)$$

где  $P_0$  – удельное давление колеса автомобиля на поверхность дороги;

$d$  – диаметр круга, равновеликого по площади отпечатку следа колеса автомобиля.

## Вопросы для самопроверки

1. Что такое напряжение в грунтах?
2. Какие напряжения с глубиной затухают, а какие возрастают?
3. Сформулируйте закон Гука.
4. Напишите формулу Ж.Буссинеска.
5. Каков принцип решения пространственной задачи?
6. По какой задаче рассчитываются напряжения от нагрузки, распределенной по трапеции?
7. Что собой представляет график Остерберга?
8. Как определить напряжения под прямоугольной плитой?
9. Какие Вы знаете наиболее распространенные кривые распределения напряжений?
10. Как определяются напряжения в неоднородных грунтах?

## 24. ТЕОРИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ ГРУНТА

### 24.1. Деформация грунта при возрастании нагрузки

При приложении к грунту нагрузок в нем происходит процесс уплотнения, приводящий к осадке сооружения. Такие условия отвечают 1-й фазе работы грунта в *условиях обеспеченной прочности* (рис. 24.1), называемой *фазой уплотнения*.

При дальнейшем увеличении нагрузки начинается прогрессирующее *нарастание осадки*, а в красных зонах происходит локальное нарушение прочности грунта (2-я фаза). Нагрузка, соответствующая границе между 1-й и 2-й фазами, называется *предельной* ( $P_3 = P_{пр}$ ).

При достижении  $P_5 = P_{кр}$  наступает *критическая нагрузка* (3-я фаза), при которой преобладающее влияние имеют сдвигающие напряжения  $\tau$ . Эта фаза называется *фазой сдвигов*. Рост осадок значительно опережает увеличение внешней нагрузки, поэтому зависимость между деформациями и напряжениями имеет нелинейный характер. Последующее увеличение нагрузки сопровождается *пластическими, или прогрессирующими деформациями*.

Место приложения нагрузки (к поверхности грунта или углубленной в грунт) оказывает влияние на вид и распределение напряжений. При приложении нагрузки к поверхности зоны пластических деформаций они достигают этой поверхности. Под заглублен-

ным фундаментом граничные линии замкнуты, не выходят на поверхность, а пластические деформации возникают при большей нагрузке, чем в первом случае (рис. 24.2).

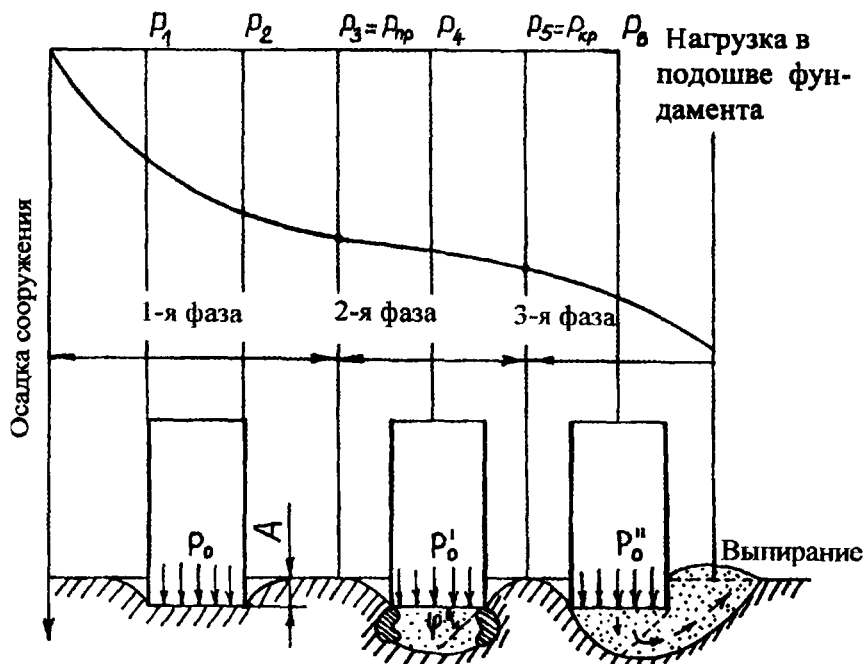


Рис. 24.1. Стадии осадки сооружения

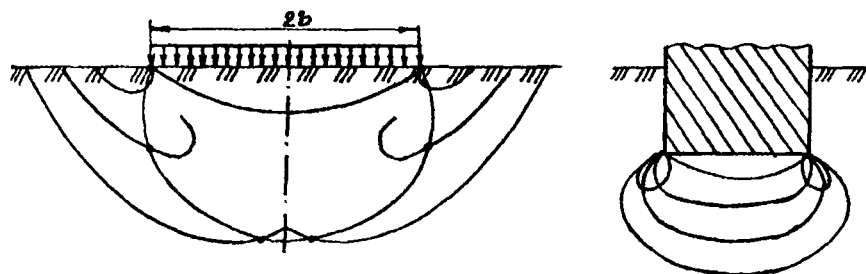


Рис. 24.2. Граничные линии под нагрузками, приложенными к поверхности и к заглубленному фундаменту

Места возникновения зон пластических деформаций зависят от распределения нагрузки на поверхности грунта (рис. 24.3).

В конце процесса уплотнения под нагрузкой начинает формироваться жесткое ядро, которое работает подобно клину, разжимающему грунт в стороны и обуславливающему значительные осадки. В дальнейшем ядро остается неизменным. При таком состоянии преобладают боковые смещения частиц, формируются непрерывные поверхности скольжения, и толщина грунта теряет устойчивость.

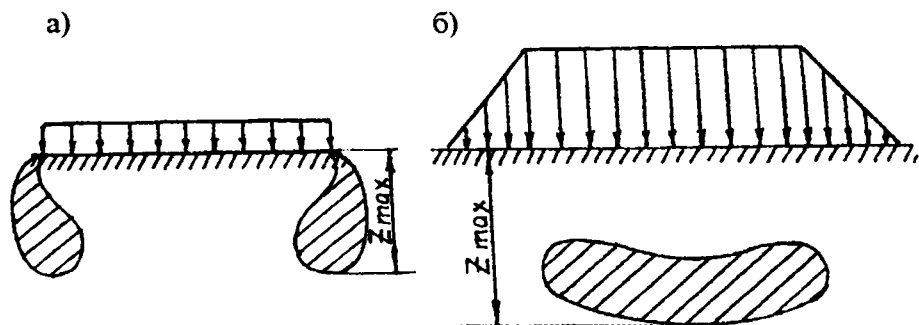


Рис. 24.3. Места возникновения зон пластических деформаций:  
 а – при равномерно распределяемой нагрузке;  
 б – при трапецидальной нагрузке

## 24.2. Понятие о безопасной нагрузке

Под **безопасной нагрузкой**  $P_{без}$  понимают нагрузку, определенную со значительным запасом, и поэтому допустимую для данного сооружения. Безопасная нагрузка соответствует максимальной нагрузке на поверхности грунтового массива, при которой в рассматриваемой толще не возникают зоны предельного равновесия. При проектировании земляного полотна на слабых основаниях его устойчивость может быть оценена коэффициентом безопасности

$$K_{без} = \frac{P_{без}}{P_{расч}},$$

где  $P_{без}$  – безопасная нагрузка, Па;

$P_{расч}$  – нагрузка от веса насыпи, Па.

К слабым грунтам относятся илистые и водонасыщенные глинистые, которые при давлении до 0,3 МПа имеют модуль деформации 5 МПа и относительную влажность  $> 0,8$ .

Если деформация захватывает весь слой слабого грунта, который начинает отжиматься в стороны, распределение давления на этот грунт производится по эпюре, имеющей вид треугольника, трапеции, равновеликой насыпи и имеющей высоту  $P_{\max} = P_{\text{без}}$  (рис. 24.4).

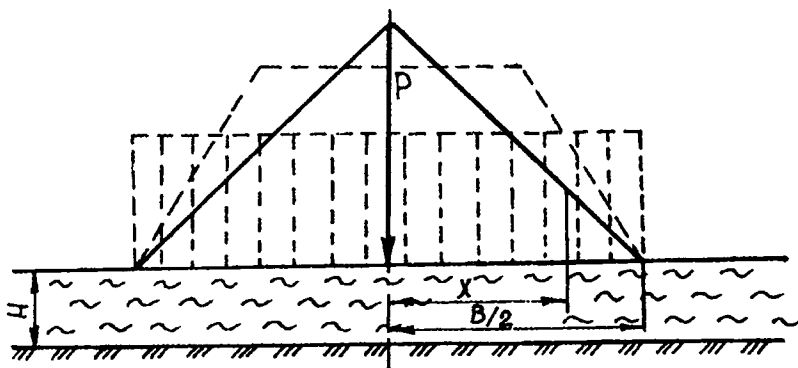


Рис. 24.4. Схема к расчету устойчивости насыпи на слабом основании

Безопасную нагрузку определяют для каждого слоя толщи грунта по формуле Н.Н.Маслова. Для равномерно распределенной нагрузки безопасная величина может быть определена из выражения

$$P_{\text{без}} = \pi C, \quad (24.1)$$

где  $C$  – сцепление грунта.

Для треугольной нагрузки

$$P_{\text{без}} = 4C. \quad (24.2)$$

Расчет величины расчетной нагрузки производят для двух случаев:

1. Темп отсыпки насыпи превышает скорость осадки.

В этом случае расчетная нагрузка определяется из выражения

$$P_{\text{расч}} = \rho(H_p + S), \quad (24.3)$$



где  $\rho$  – плотность грунта;

$H_p$  – расчетная высота насыпи;

$S$  – осадка насыпи.

2. Интенсивность отсыпки насыпи соответствует скорости осадки

В этом случае расчетная нагрузка определяется из выражения

$$P_{\text{расч}} = \rho(H_p + H_b) + \rho_{\text{взв}}(S - H_{\text{ГВ}}), \quad (24.4)$$

где  $H_{\text{ГВ}}$  – расстояние от поверхности грунта до уровня грунтовых вод;

$\rho_{\text{взв}}$  – плотность ниже уровня грунтовых вод;

$H_b$  – толщина условного слоя грунта, заменяющего вес верхнего строения, принимается равной 0,7 м;

$$H_p = H + H_b + H_{\text{экв}}, \quad (24.5)$$

где  $H$  – высота насыпи;

$H_{\text{экв}}$  – толщина эквивалентного слоя грунта,

$$H_{\text{экв}} = \frac{\sigma}{\rho}, \quad (24.6)$$

где  $\sigma$  – величина расчетных нормальных напряжений в подошве насыпи от временной нагрузки. При ширине земляного полотна 10 м  $\sigma = 12 \cdot 10^3$  Па; при 12 м  $\sigma = 1 \cdot 10^4$  Па; при 15 м  $\sigma = 8 \cdot 10^5$  Па.

Если коэффициент безопасности  $K_{\text{без}} > 1$ , то насыпь, возведенную на торфяном основании, можно считать устойчивой. Если  $K_{\text{без}} < 1$ , необходимо провести расчет, учитывающий трение грунта, форму насыпи и мощность слабого слоя.

### 24.3. Повышение степени прочности грунта

Как было доказано в 21.3, *степень прочности* сыпучего грунта определяется соотношением угла наибольшего отклонения  $\theta_{\text{max}}$  и угла внутреннего трения  $\varphi$ . Равенство этих углов характеризуется состоянием предельного равновесия. Следовательно, для этого состояния условие Ренкина (см. 21.2) может быть записано в виде

$$\sin\theta_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}. \quad (24.7)$$

Рассмотрим варианты повышения прочности грунта. На любой глубине от поверхности грунтовой толщи, — например,  $z$ , — грунт находится под воздействием вышележащих слоев грунта, перекрывающих данный горизонт. Эта масса создает давление, вызывающее в грунте величину напряжения  $\sigma_{\text{пр}}$ :

$$\sigma_{\text{пр}} = \rho_{\text{ср}} \cdot z, \quad (24.8)$$

где  $\rho_{\text{ср}}$  — средняя плотность грунта.

В этом случае используется *принцип наложения главных напряжений*, согласно которому в любой точке, расположенной на глубине  $z$ , помимо главных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  действует  $\sigma_{\text{пр}}$ . В этом случае условие прочности Ренкина можно представить в виде

$$\sin\theta_{\max} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_{\text{пр}}) - (\sigma_3 + \sigma_{\text{пр}})}{(\sigma_1 + \sigma_{\text{пр}}) + (\sigma_3 + \sigma_{\text{пр}})}. \quad (24.9)$$

Подставив вместо  $\sigma_{\text{пр}}$  его значение, получим

$$\sin\theta_{\max} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2\rho_{\text{ср}} \cdot z}. \quad (24.10)$$

Знаменатель этого выражения увеличивается по мере заглубления  $z$ , что ведет к уменьшению  $\theta_{\max}$  и одновременно повышает степень прочности грунта, обеспечивая условие  $\theta_{\max} < \varphi$  (допредельное).

Теперь рассмотрим ту же задачу, но под фундаментом, заглубленным в грунт на величину  $h_3$ . Известно, что заглубление фундаментов является одним из наиболее простых и эффективных мероприятий по повышению несущей способности грунта. При заглублении фундамента  $\sigma_{\text{пр}}$  будет иметь вид

$$\sigma_{\text{пр}} = \rho_{\text{ср}} (z + h_3). \quad (24.11)$$

В этом случае предыдущее выражение будет иметь вид

$$\sin \theta_{\max} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2\rho_{\text{cp}}(z + h_3)}. \quad (24.12)$$

Следовательно, и в этом случае можно сделать вывод, что величина заглубления еще больше снижает угол  $\theta_{\max}$ , чем в первом случае, что дает возможность соблюсти условие  $\varphi > \theta_{\max}$ .

Первые два варианта касались сыпучих, т.е. песчаных грунтов, для которых  $C = 0$ . В большинстве же случаев грунты обладают некоторым сцеплением, что необходимо учитывать при оценке устойчивости основания сооружения. Для этого воспользуемся искусственным приемом: заменим сцепление в грунте дополнительными силами внутреннего трения за счет некоторого нового дополнительного заглубления  $h_c$ . Тогда

$$C = \rho_{\text{cp}} \cdot h_c \cdot \text{tg} \varphi, \quad (24.13)$$

где  $\varphi$  – коэффициент внутреннего трения грунта.

Отсюда

$$h_c = \frac{C}{\rho_{\text{cp}} \cdot \text{tg} \varphi}. \quad (24.14)$$

Тогда условие прочности сыпучих тел с учетом собственной массы грунта, заглубления сооружения и сцепления примет вид

$$\sin \theta_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2\rho_{\text{cp}}(z + h_3 + h_c)}. \quad (24.15)$$

На основании приведенных доказательств можно сделать вывод, что степень прочности грунта может быть повышена за счет увеличения заглубления фундамента и наличия сцепных свойств грунта.

## Вопросы для самопроверки

1. Назовите фазы работы грунтового основания под возрастающей нагрузкой.
2. Как распределяются напряжения в земляном полотне под нагрузкой, приложенной к поверхности?
3. Нарисуйте схему с обозначением места пластических деформаций под трапецидальной нагрузкой.
4. Что понимают под безопасной нагрузкой?
5. При каком значении  $K_{без}$  насыпь на слабом основании можно считать устойчивой?
6. В чем заключается принцип наложения главных напряжений?
7. Как определить безопасную величину для треугольной нагрузки?
8. Каким образом можно повысить прочность грунта?
9. Как определить расчетную нагрузку, если темп отсыпки насыпи превышает скорость осадки?
10. Напишите формулу для условия прочности Ренкина с учетом заглубления фундамента и сцепных свойств грунта.

## 25. УПЛОТНЕНИЕ ГРУНТОВ

### 25.1. Теоретические предпосылки

Изменение пористости дисперсных грунтов под влиянием нагрузки называют *уплотнением*. Различают уплотнение грунтов:

1) при кратковременном воздействии динамических нагрузок (механическое уплотнение);

2) при длительном действии постоянной статистической нагрузки (консолидация).

Существует практический предел повышения плотности грунта. Он наступает, когда под действием нагрузки происходит максимальное сближение элементарных частиц грунта, сопровождающееся процессом частичного разрушения агрегатов. В результате максимального уплотнения создается минимальная и относительно однородная пористость массы взаимно заклинившихся элементарных частиц.

*Максимальная плотность* для данного вида грунта может быть определена из выражения

$$\rho_{\max} = \frac{\rho_s \left(1 - \frac{V_a}{100}\right)}{1 + \frac{\rho_s W_{\text{опт}}}{\rho_w \cdot 100}}, \text{ г/см}^3, \quad (25.1)$$

где  $\rho_s$  – плотность частиц грунта, г/см<sup>3</sup>;

$V_a$  – содержание воздуха в грунте при оптимальной влажности:  
в супеси 6...8%; суглинках 3...4%; глинах 4...5%;

$W_{\text{опт}}$  – оптимальная влажность, %;

$\rho_w$  – плотность воды в грунте.

При искусственном уплотнении грунта вода при ее оптимальном содержании в нем играет роль смазки, уменьшающей трение между частицами. При влажности выше оптимальной не только уменьшается плотность вследствие раздвижки частиц, но и существенно понижается прочность высушенных образцов.

Выделяют две стадии уплотнения:

*для песков:*

1) в интервале нагрузок 0,1...10,0 МПа – плотная упаковка за счет переориентации частиц;

2) в интервале нагрузок > 10,0 МПа – уплотнение за счет растрескивания и дробления зерен;

*для глин:*

1) уплотнение в интервале нагрузок 5,0...10,0 МПа в результате удаления свободной и рыхлосвязанной воды;

2) деформация кристаллических структур минеральных частиц (эта стадия начинается при нагрузках 10...20 МПа и характеризуется упругими деформациями).

## 25.2. Уплотнение однородного грунта

Уплотнение грунта приводит к его осадке, поэтому рассмотрим вычисление осадок по формулам *теории линейнодеформируемых тел*.

Вертикальная деформация элементарного объема линейнодеформируемого грунта (рис. 25.1) толщиной  $dz$ , расположенного на глубине  $z$  от поверхности массива, равна

$$ds = \frac{dz}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)], \quad (25.2)$$

где  $E$  – модуль деформации грунта;

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – нормальные напряжения, действующие на рассматриваемый элементарный объем;

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

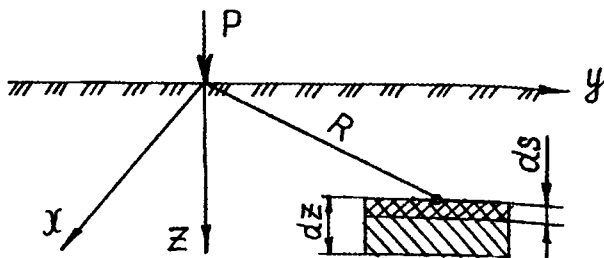


Рис. 25.1. Схема к расчету вертикальной деформации

Взяв интеграл этого выражения относительно глубины сжатия, получим

$$S = \frac{1}{E} \int_z^0 [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \cdot dz. \quad (25.3)$$

Подставив значения  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  в (25.3), по формуле Буссинеска и проинтегрировав выражение, получим

$$S = \frac{P(1-\nu^2)}{2\pi E} \cdot \left( \frac{2}{R} + \frac{1}{1-\nu} \cdot \frac{z^2}{R^3} \right). \quad (25.4)$$

Это выражение характеризует *осадку для любой точки однородного грунта*. Однако следует учитывать, что горизонтальные напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  быстро падают с увеличением глубины, т.е. уменьшаются значительно быстрее, чем нормальные вертикальные напряжения  $\sigma_z$ . В вышеприведенной формуле расстояние от точки приложения силы  $P$  до рассматриваемой точки массива

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

Для точек, расположенных на поверхности грунта, при  $z = 0$  полученное выражение примет вид

$$S = \frac{P(1-\nu^2)}{\pi ER} = \frac{P}{\pi C_y R}, \quad (25.5)$$

где  $S$  – осадка грунтового массива под жестким штампом, м;

$P$  – нагрузка, кН;

$R$  – расстояние рассматриваемой точки грунтового массива от точки приложения силы  $P$ , м;

$C_y$  – коэффициент упругого полупространства,  $\text{Н/м}^2$ ,

$$C_y = \frac{E_y}{1-\nu^2}, \quad (25.6)$$

где  $E_y$  – модуль упругости грунта, Па;

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

Полученное выражение выведено для осадки поверхности грунта, причем оно справедливо для точек, расположенных на некотором удалении от места приложения  $P$ , поскольку при  $R = 0$   $S$  обращается в бесконечно большую величину.

На основании последнего выражения выведены формулы для осадок гибких и жестких загруженных площадок.

Осадка гибкой круглой площадки радиусом  $R$  (колесо автомобиля) в центре

$$S_0 = \frac{2P_0 R}{C_y}; \quad (25.7)$$

на окружности

$$S_R = \frac{4P_0 R}{\pi C_y}, \quad (25.8)$$

где  $P_0$  – равномерно распределенная нагрузка по гибкой круглой площадке.

### 25.3. Уплотнение массива, включающего несколько пластов

Общую осадку неоднородного грунта по глубине находят суммированием деформаций отдельных слоев, в пределах которых модуль деформации может быть принят постоянным. В этом случае криволинейную эпюру распределения напряжений заменяют ступенчатой, ведя расчет в пределах каждого слоя. В общем виде

$$S = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)}{E_i} \quad (25.9)$$

При уплотнении грунта происходит его сжимаемость без возможности бокового расширения, следовательно, поперечное сечение остается постоянным, а изменяется лишь величина осадки, которая отражается на изменении коэффициента пористости. Поэтому справедливо выражение

$$\frac{1}{1+e_1} H_1 = \frac{1}{1+e_2} H_2, \quad (25.10)$$

где  $H_1$  и  $e_1$  – толщина рассматриваемого слоя и коэффициент пористости грунта до деформации;

$H_2$  и  $e_2$  – после деформации.

Отсюда

$$H_2 = H_1 \frac{1+e_2}{1+e_1}. \quad (25.11)$$

Величина осадки составит

$$S = H_1 - H_2 = H_1 - H_1 \frac{1+e_2}{1+e_1} = H_1 \frac{e_1 - e_2}{1+e_1}. \quad (25.12)$$

При определении осадок на насыпных грунтах необходимо учитывать нелинейность деформации, характеризуемую компрессион-



ной кривой, которая выражается логарифмической кривой. После упрощения этого эмпирического уравнения профессор Н.Н.Иванов получил выражение

$$e_2 = e_1 - \frac{2,3}{B} \lg P, \quad (25.13)$$

где  $e_2$  – коэффициент пористости при нагрузке  $P$ ;

$e_1$  – коэффициент пористости при  $P = 0,001$  МПа (для мелких песков и супесей  $e_1 = 0,4 \dots 0,5$ ; для суглинков и глин  $e_1 > 0,65$ );

$B$  – безразмерный коэффициент, характеризующий сжимаемость грунта и не зависящий от нагрузки (для мелких песков и супесей  $B = 25 \dots 75$ ; для суглинков и глин  $B = 10 \dots 15$ ).

Подставляем это уравнение в величину осадки и получаем, что общая осадка определяется как сумма осадок отдельных слоев:

$$S = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{2,3 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1} \cdot H_i}{B(1 + e_1)}, \quad (25.14)$$

где  $H_i$  – толщина слоя.

Это выражение выведено для осадки многослойного грунтового массива, получаемой в результате уплотнения.

#### 25.4. Уплотнение грунтов при воздействии вибрационных и ударных нагрузок

Воздействие колебаний на грунт снижает его сопротивление нагрузкам. При вибрировании внутреннее трение в грунтах может настолько снизиться, что грунт будет вести себя как вязкая жидкость. В этом случае предметы с плотностью, большей, чем у грунта, при вибрировании будут погружаться в грунт, а более легкие – всплывать на его поверхность. При действии вибрации на несвязные грунты происходит их уплотнение.

Зная начальный коэффициент пористости  $e_1$  в основании дорожных одежд и коэффициент пористости  $e_2$ , который может получить

грунт в результате длительного динамического воздействия, можно вывести *модуль виброкомпрессионного уплотнения*

$$e_{pдин} = 1000 \cdot \frac{e_1 - e_i}{1 + e_1} \quad (25.15)$$

Эффективность методов трамбования перед уплотнением грунтов катками на пневмошинах можно рассматривать на примере данных, помещенных в табл. 25.1.

Таблица 25.1

Уплотнение грунтов трамбованием и дорожными катками

Грунт	Предел прочности грунта при сжатии, уплотнении, МПа	
	катками на пневмошинах	трамбующими машинами с диаметром ударной части 70...150 см
Несвязные и мало-связные (песчаные, супесчаные)	0,3...0,4	0,3...0,7
Средней связности (суглинки)	0,4...0,6	0,7...1,2
Высокой связности (тяжелосуглинистые)	0,6...0,8	1,2...2,0
Весьма связные (глинистые)	0,8...1,0	2,0...2,3

### 25.5. Стандартное уплотнение грунта

Сущность метода стандартного уплотнения грунта заключается в послойном уплотнении грунта в стальном сосуде определенных размеров при помощи падающей гири.

Впервые инженер Р.Проктор в 1933 году предложил ставший впоследствии стандартным метод определения оптимальной влажности и максимальной плотности. Позже эти испытания стали называть «по Проктору». В настоящее время в западных странах применяется метод, разработанный Американской ассоциацией госу-

дарственных служащих автомобильных дорог, называемый методом AASHO. Характеристика приборов, применяемых в методах стандартного уплотнения различных стран, приведена в табл. 25.2 [16].

Таблица 25.2

Характеристика приборов для уплотнения грунтов

Характеристика оборудования	Метод Союздорнии	AASHO		Инженерные войска США	Британский стандарт	Стандарт Германии
		Стандартный	Модифицированный			
Форма, мм диаметр, мм	100	102	102	152	105	100
Высота формы, мм	127	116	116	114	115,5	120
Трамбовка масса, кг	2,5	2,49	4,54	4,54	4,50	4,50
Высота падения, мм	300	305	457	457	450	450
Количество слоев	3	3	5	5	5	5
Число ударов на слой	40	25	25	25	25	25

Вопросы для самопроверки

1. Что такое консолидация грунта?
2. Напишите формулу для определения максимальной плотности грунта.
3. Какие Вы знаете стадии уплотнения песка и глины?
4. Напишите формулу для определения осадки в любой точке однородного грунта.
5. В чем заключается метод определения осадки при уплотнении многослойного грунтового массива?
6. Какой метод трамбования или уплотнения дорожными катками наиболее эффективен для глин?

7. Что представляет собой модуль виброкомпрессионного уплотнения?
8. Кто впервые изобрел метод стандартного уплотнения?
9. Как называется отечественный метод стандартного уплотнения?
10. Чем отличается метод СоюздорНИИ от модифицированного AASHO?

## 26. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ

### 26.1. Понятие о реологии

*Реология* – это наука, изучающая протекание деформаций различных материалов во времени под действием приложенных к ним сил.

*Релаксацией* грунтов называется постепенное уменьшение напряжений в результате перехода при длительном действии нагрузок упругих деформаций в пластические.

При быстром возрастании нагрузки сопротивление грунта будет наибольшим, и в нем будут преобладать упругие деформации; при медленном возрастании внешних сил сопротивление грунта станет меньшим, и он будет проявлять свойства ползучести.

*Ползучестью* грунтов называется нарастание деформации во времени при действии на грунт постоянной нагрузки.

Различают: *затухающую (установившуюся)* и *незатухающую (прогрессирующую)* ползучести (рис. 26.1).

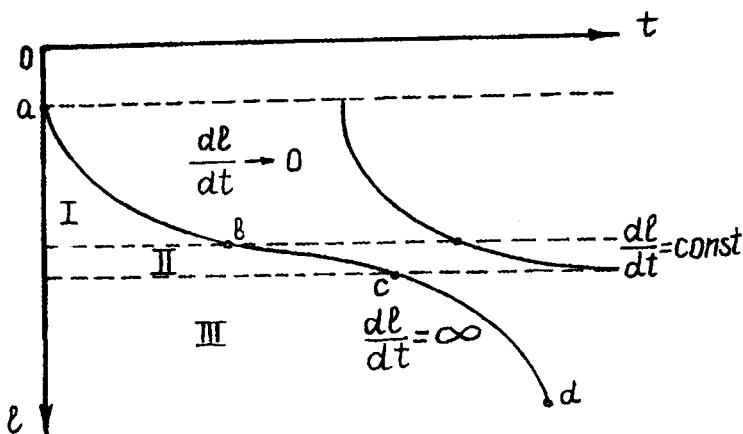


Рис. 26.1. Кривая ползучести

На кривой ползучести кроме мгновенной деформации  $oa$  следует различать три стадии:

- 1) отрезок  $ab$  – неустановившаяся, или затухающая ползучесть;
- 2) отрезок  $bc$  – установившаяся ползучесть, или пластическое течение с постоянной скоростью деформирования;
- 3) отрезок  $cd$  – прогрессирующее течение со всевозрастающей скоростью деформирования.

На первой стадии (*затухающей ползучести*) происходит закрытие существующих микротрещин, увеличение числа контактов, более плотная упаковка грунтовых частиц, уменьшение объема грунта, т.е. его уплотнение.

На второй стадии (*пластично-вязкого течения*) происходит лишь перестройка структуры при неизменном объеме грунта.

На третьей стадии (*прогрессирующего течения*) увеличивается объем грунта и уменьшается общее его сопротивление из-за появления новых микротрещин, что приводит грунт к хрупкому разрушению или вязкому течению, сопровождающемуся выдавливанием в стороны от нагруженной поверхности.

На основании рассмотренной кривой ползучести различают характерные показатели грунта: мгновенную, временную и длительную прочности (рис. 26.2).

**Мгновенная прочность** ( $R_{сж0}$ ) – это прочность, соответствующая мгновенному сопротивлению грунта в самом начале загрузки.

**Временная прочность** ( $R_{сж t}$ ) – это прочность, изменяемая во времени.

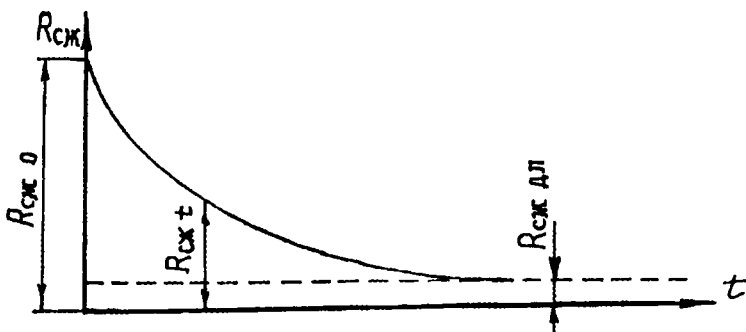


Рис. 26.2. Кривая длительной прочности

**Длительная прочность** ( $R_{сж\text{ дл}}$ ) – это прочность наименьшего предела при релаксации напряжений, ниже которых сопротивление грунта постоянно.

## 26.2. Деформация ползучести глинистых грунтов

Переход глинистых грунтов в состояние ползучести возможен лишь при превышении сдвигающими напряжениями  $\tau$  некоторого предела, называемого *порогом ползучести*.

Под *порогом ползучести* понимают такое касательное напряжение, при котором деформация ползучести резко интенсифицируется. Порог ползучести можно выразить уравнением (рис. 26.3)

$$\tau_{\text{lim}} = \sigma \cdot \text{tg}\varphi + c. \quad (26.1)$$

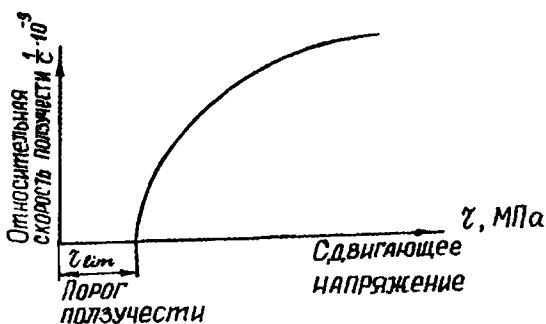


Рис. 26.3. Зависимость скорости ползучести от сдвигающего напряжения

На основании формулы Н.Н.Маслова (21.3) сформулированы критерии ползучести:

1) немедленное разрушение грунта:

$$\tau > \sigma \cdot \text{tg}\varphi + c_w + c_c; \quad (26.2)$$

2) деформация ползучести отсутствует:

$$\tau < \sigma \cdot \text{tg}\varphi + c_c; \quad (26.3)$$

3) прочность грунта обеспечивается на весь период работы сооружения:

$$\begin{cases} \tau > \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c_c; \\ \tau < \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c_w + c_c. \end{cases} \quad (26.4)$$

Поскольку ползучесть характерна для глинистых грунтов, которые в соответствии с формулой Н.Н.Маслова подразделяются на жесткие, скрытопластичные и пластичные, дадим характеристику этих грунтов по наличию или отсутствию порога ползучести.

*Жесткие глинистые породы (аргиллиты)* обладают повышенной твердостью и прочностью. Для них угол внутреннего трения  $\varphi \neq 0$ ; связность  $c_w = 0$ ; структурное сцепление  $c_c \neq 0$ ; ползучесть отсутствует. Характерной формой сдвига является скол.

*Пластичные глинистые породы* характеризуются прочностью и сопротивляемостью сдвигу, обусловливаемыми силами внутренней связности. Для этой категории грунтов параметры следующие:  $\varphi \neq 0$ ;  $c_w \neq 0$ ;  $c_c \neq 0$ ; очень характерна ползучесть; порог ползучести  $\tau_{\text{lim}} = 0$ .

*Скрытопластичные глинистые породы* по своим свойствам занимают промежуточное положение между пластичными и жесткими породами. В соответствии с наличием сил внутреннего трения  $\varphi \neq 0$  и сил структурного сцепления  $c_c \neq 0$  они характеризуются порогом ползучести  $\tau_{\text{lim}} > 0$ .

Вторым показателем, характеризующим процесс ползучести, является *коэффициент вязкости грунта*, представляющий собой коэффициент пропорциональности между активной частью сдвигающего напряжения и скоростью деформации:

$$\eta = \frac{\tau - \tau_{\text{lim}}}{v_z} \cdot H_{\text{ср}}, \frac{\text{с} \cdot \text{г}}{\text{см}^2} \text{ (пуазы)}, \quad (26.5)$$

где  $\tau$  – общее сопротивление грунта сдвигу, МПа;

$\tau_{\text{lim}}$  – порог ползучести, МПа;

$H_{\text{ср}}$  – средняя высота образца, м;

$v_z$  – скорость деформации, м/с.

Коэффициент вязкости грунта используется для определения *скорости вязкого течения*. По Ньютону, скорость вязкого течения  $v_z$  на некоторой глубине  $z$  от поверхности деформируемого слоя мощностью  $H$  при постоянном значении приложенного к его поверхности и не изменяющегося по глубине касательного напряжения  $\tau$  и при постоянном во времени значении коэффициента вязкости грунта  $\eta$  определяется выражением

$$v_z = \frac{\tau}{\eta}(H - Z), \text{ м/с.} \quad (26.6)$$

### Вопросы для самопроверки

1. Дайте характеристику реологии.
2. Чем отличается явление релаксации от понятия реологии?
3. Что такое ползучесть?
4. Сколько известно видов ползучести?
5. Нарисуйте кривую ползучести и обозначьте все ее виды.
6. Дайте характеристику временной прочности.
7. Объясните сущность порога ползучести.
8. Выразите через формулу Н.Н.Маслова отсутствие ползучести.
9. Какие глинистые грунты характеризуются порогом ползучести?
10. Что такое коэффициент вязкости грунта?

## 27. ДЕФОРМАЦИЯ ГРУНТА ПОД КОЛЕСОМ АВТОМОБИЛЯ И ОТВАЛОМ БУЛЬДОЗЕРА

*Террамеханика* – раздел механики грунтов, изучающий сопротивление поверхностных слоев грунта образованию колес катящимся колесом.

Деформация грунта при качении колеса происходит под действием приложенных к колесу (рис. 27.1):

- 1) вертикальной силы веса  $Q$ ;
- 2) горизонтального тягового усилия  $F$  (на ведомых колесах);
- 3) вращающего момента  $M$  (на ведущих колесах).



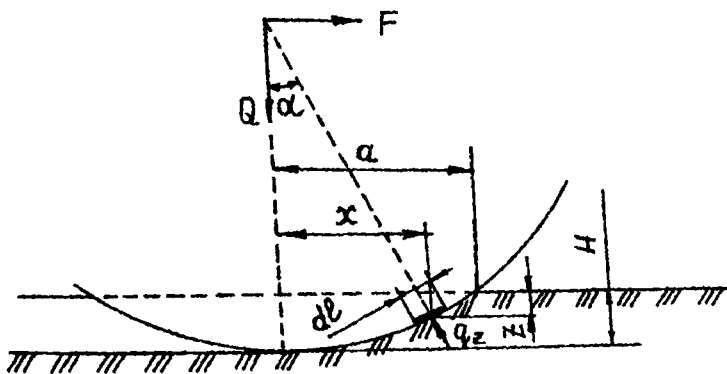


Рис. 27.1. Схема к определению глубины колеи

### 27.1. Сопротивление грунта деформированию под катящимся колесом

На находящуюся на глубине  $z$  элементарную полоску колеса  $dl$  шириной  $B$  действует реактивное усилие

$$R_a = q_z \cdot B \cdot dl. \quad (27.1)$$

Тогда вертикальная проекция реакции грунта будет равна

$$R_{a_z} = q_z \cdot B \cdot \cos \alpha \cdot dl, \quad (27.2)$$

где  $\alpha$  – угол, составляемый направлением реактивного усилия с вертикалью.

Суммарное сопротивление грунта вдавливанию колеса при качении

$$Q = \int_0^a q_z \cdot B \cdot \cos \alpha \cdot dl, \quad (27.3)$$

где  $q_z$  – сопротивление грунта смятию, определяемое по эмпирической зависимости Бернштейна-Летошневца:

$$q_z = q_{z_0} \left( \frac{z}{z_0} \right)^\eta, \quad (27.4)$$

где  $q_{z_0}$  – сопротивление грунта на глубине  $z_0$ , принимаемой равной 1 см;

$\eta$  – параметр, характеризующий возрастание сопротивления грунта сжатию с увеличением глубины колеи; колеблется от 0 до 1 (для рыхлых сухих грунтов  $\eta = 1$ ).

Подставляем значение  $q_z$  и, проинтегрировав выражение, получаем

$$Q = q_{z_0} \cdot B \left( 1 - \frac{\eta}{3} \right) H^\eta \sqrt{D \cdot H}, \quad (27.5)$$

где  $H$  – глубина колеи.

Аналогично суммирование горизонтальных проекций реактивного сопротивления грунта дает

$$F = \frac{q_{z_0} \cdot B \cdot H^{\eta+1}}{(\eta+1)}. \quad (27.6)$$

Таким образом, реактивное усилие является равнодействующей горизонтального тягового усилия и вертикальной силы веса и направлено под углом к вертикали. Этот угол изменяется в зависимости от сопротивления качению, оказываемого грунтом. Эти усилия создают в грунте поля напряжения, которые складываются и образуют поле напряжений, создаваемое в грунте катящимся ведомым или ведущим колесом (рис. 27.2).

Поле напряжений, создаваемое в грунте катящимся ведущим колесом, складывается из напряжений, вызываемых системами сил:

1) горизонтальных, возникающих от давления колеса на грунт при поступательном движении;

2) вертикальных, возникающих от нагрузки и собственного веса колеса;

3) сил сцепления с грунтом по площади контакта (из-за крутящего момента).

Для ведомого колеса имеют место только две первые системы сил.

Образование колеи при качении колеса может быть представлено как деформация сжатия при кратковременном воздействии создаваемого колесом поля напряжений, перемещающегося со скоростью движения. Поскольку продолжительность воздействия колеса меньше времени, необходимого для протекания полной деформации грунта, при повторных проходах глубина колеи возрастает.

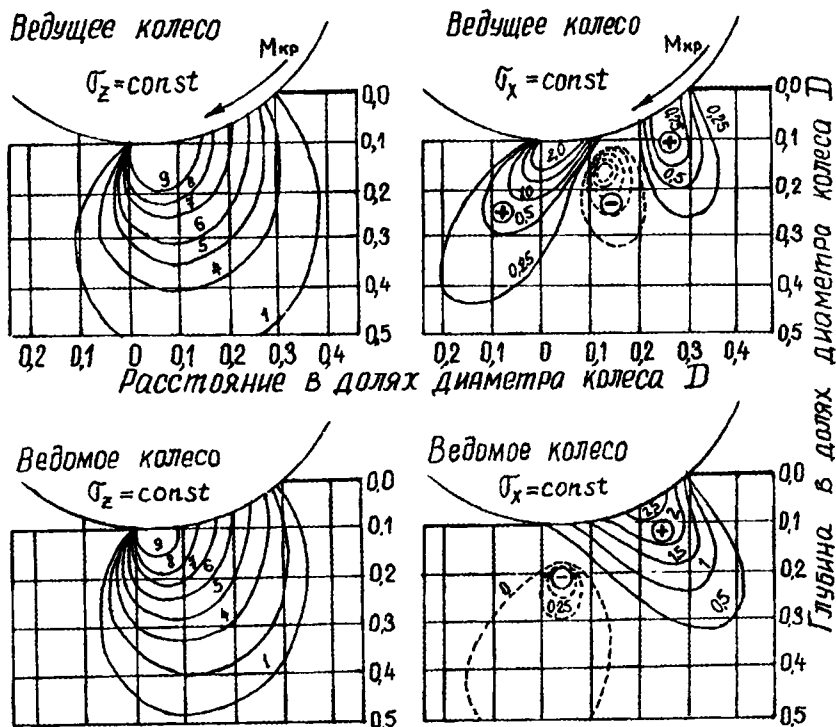


Рис. 27.2. Изолинии равных напряжений в грунте, деформирующемся под катящимся колесом

## 27.2. Сопротивление грунтов резанию

При взаимодействии рабочих органов землеройных машин с грунтом в зоне их силового воздействия в грунте возникает сложное напряженное состояние (рис. 27.3).

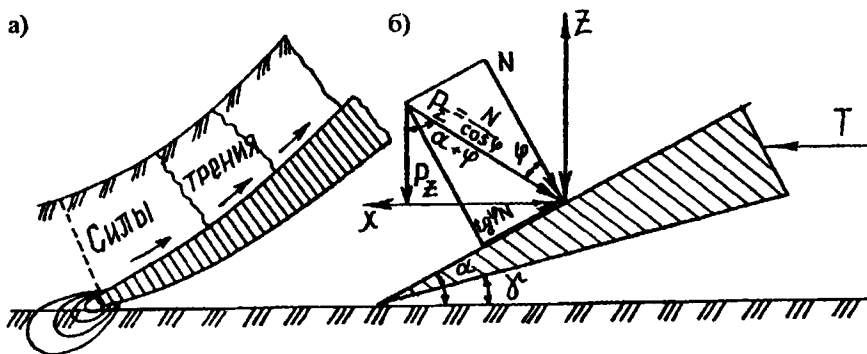


Рис. 27.3. Схема резания грунта:  
 а) деформация грунта; б) схема сопротивления резанию

В зоне контакта режущего органа с грунтом возникает концентрация напряжений, сопровождающаяся пластическими деформациями, приводящими к отделению от массива грунта элемента стружки – так называемого *тела скольжения*.

В зависимости от влажности, степени уплотнения и связанности характер деформации грунта различен:

- 1) твердый сухой или мерзлый грунт откалывается кусками;
- 2) связный или задернованный грунт подрезается в виде изгибающегося пласта.

У песков сопротивление возрастает при увеличении влажности до полной капиллярной влагоемкости. У связных грунтов сопротивление снижается при влажности, равной максимальной молекулярной влагоемкости.

Сопротивление грунтов резанию можно рассмотреть при взаимодействии на грунт плоского клина (рис. 27.3, б) с углом резания  $\alpha$  и задним углом  $\gamma$ , исключая трение задней грани о грунт.

Если допустить, что движение клина – установившееся, а сам клин – абсолютно острый, то на его рабочую поверхность будут действовать только две силы:

- 1) равнодействующая нормальных сил  $N$ ;
- 2) сила трения  $\operatorname{tg}\varphi \cdot N$ .

Эти силы могут быть сведены к одной суммарной силе

$$P_{\Sigma} = \frac{N}{\cos \varphi}, \quad (27.7)$$

которая отклонена от нормали к рабочей поверхности клина на угол трения  $\varphi$ . Проецируя  $P_{\Sigma}$  на оси X и Z, получим горизонтальную силу резания

$$P_x = P_{\Sigma} \cdot \sin(\alpha + \varphi) = \frac{N}{\cos \varphi} \cdot \sin(\alpha + \varphi) \quad (27.8)$$

и вертикальную силу резания

$$P_z = P_{\Sigma} \cdot \cos(\alpha + \varphi) = \frac{N}{\cos \varphi} \cdot \cos(\alpha + \varphi). \quad (27.9)$$

Сила  $P_x$  определяет необходимое тяговое усилие  $T = P_x$  и называется *силой резания*.

Вертикальная сила  $P_z$  изменяет свою величину и направление в зависимости от угла резания, угла трения грунта о металл и величины затупления режущей кромки. Найдем отношение

$$\frac{P_z}{P_x} = \operatorname{ctg}(\alpha + \varphi). \quad (27.10)$$

При углах резания  $\alpha < 90^\circ - \varphi$  вертикальная составляющая  $P_z$  усилия резания направлена вниз, в результате чего происходит затягивание клина в грунт.

При углах  $\alpha > 90^\circ - \varphi$  вертикальная составляющая  $P_z$  действует вверх, выталкивая клин в сторону дневной поверхности.

### Вопросы для самопроверки

1. Что изучает террамеханика?
2. Под действием каких сил происходит деформирование грунта при качении колеса?
3. Напишите формулу Бернштейна-Летошнева.

4. Из каких напряжений складывается поле напряжений, создаваемое катящимся колесом?

5. Почему глубина колес возрастает при повторных проходах колеса?

6. Чем отличаются изолинии равных напряжений у ведомого и ведущего колеса?

7. Каков характер деформации грунта под действием отвала землеройной машины у влажного песка?

8. Объясните понятие угла резания.

9. Нарисуйте схему воздействия сил на отвал от режущего клина.

10. При каких углах резания будет происходить затягивание клина в грунт?

## 28. МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ МЕЛИОРАЦИИ

### 28.1. Понятие о методах технической мелиорации

*Техническая мелиорация* – это наука, изучающая и разрабатывающая методы искусственного изменения свойств горных пород в соответствии с требованиями различных видов строительства.

Развитие методов технической мелиорации грунтов идет по двум направлениям:

1) *поверхностные методы* улучшения грунтов с нарушенным строением используются в целях укрепления грунтов для дорожно-го, аэродромного и гидротехнического строительства;

2) *глубинные методы* укрепления грунтов в массиве с ненарушенным строением с инъектированием различных растворов или вязко-жидких веществ используются в целях укрепления грунтов для гражданского и гидротехнического строительства.

В технической мелиорации используются два основных понятия: 1) укрепление грунтов; 2) стабилизация грунтов.

*Укреплением грунтов* называют ряд последовательных технологических операций, обеспечивающих в результате воздействий на грунт добавок вяжущих и других веществ высокую прочность и длительную устойчивость как в сухом, так и в водонасыщенном состоянии.

*Стабилизация грунтов* означает сохранение присущих им природных особенностей.

## 28.2. Классификация методов технической мелиорации

Выделяют три основные группы методов технической мелиорации: 1) физико-механические; 2) физико-химические; 3) химические.

**Физико-механические методы** основаны на механическом воздействии нагрузки на грунт и образуют две группы: механические и физические.

### 1. Механические методы:

1). *Механическое уплотнение дисперсных грунтов статистическими и динамическими нагрузками:*

1) гравитационное уплотнение рыхлых отложений:

а) наземное уплотнение способом нагрузки песком, гравием, галькой мощностью 2...3 м для обжатия рыхлых водонасыщенных торфов;

б) подводное гравитационное уплотнение при строительстве морских и речных сооружений на глинистых илах путем отсыпки песка;

2) уплотнение грунтов укаткой с помощью самоходных или прицепных катков от 5 до 10 т и более с гладкими кулачковыми вальцами, на пневматических шинах;

3) уплотнение грунтов трамбованием, осуществляемое последовательными ударами падающего груза (трамбовками) массой от 1 до 4 т;

4) уплотнение массива грунтов сваями, осуществляемое за счет уменьшения пористости породы вокруг свай, погруженных в грунт (набивные сваи представляют собой последовательное уплотнение снизу вверх грунта внутри полой трубы с одновременным ее поднятием).

2). *Сейсмическое уплотнение грунтов (энергией взрыва):*

1) уплотнение грунтов глубинными внутренними взрывами, осуществляемое за счет обжатия грунта под действием взрывной волны; применяется при создании в глинистых грунтах подземных емкостей для хранения жидкостей и газов;

2) уплотнение подводными взрывами, которые могут быть поверхностными и глубинными; применяется для уплотнения водонасыщенных песчаных грунтов.

3). *Виброуплотнение грунтов:*

1) поверхностное виброуплотнение, осуществляемое с помощью вибрирующей плиты; уплотнение оснований и одежды дорог и аэродромов, песчаных подушек, дамб, плотин, насыпей (на глубину от 20 см до 5...7 м);

2) глубинное гидровиброуплотнение, осуществляемое импульсной подачей воды, для уплотнения оснований под фундамент, отдельных участков насыпных плотин (давление в грунте составляет несколько тысяч атмосфер; обязательное условие – подача воды под вибратор).

4). *Обезвоживание грунта (осушение)*, осуществляемое самотечным дренажом, гидродинамическим дренажом, электроосмотическим методом и электровакуумированием.

5). *Водонасыщение грунтов*, применяемое для устранения просадочности лессов.

## 2. Физические методы:

1). *Электрохимическое закрепление* – т.е. упрочнение пород с помощью постоянного электрического тока напряжением 60, 110 или 220 В, эффективное для водонасыщенных глинистых, илистых и плавунных грунтов с  $K_f < 0,1$  м/сут (в качестве анода применяется алюминий или железо, катода – медь, алюминий, железо):

1) электрообработка грунтов без введения химических добавок, применяемая при осушении котлованов на грунтах с  $K_f < 0,0015$  м/сут (по периметру забиваются аноды (трубы) и катоды (иглофильтры));

2) электролитическая обработка грунтов путем нагнетания раствора 17%-го хлористого кальция через аноды в грунты с  $K_f$  от 0,01 до 0,005 м/сут (сила тока – 145 А при напряжении 120 В);

3) электросиликатизация грунтов путем введения раствора силиката натрия в качестве химической добавки для упрочнения плавунных и лессов (в грунт через перфорированные трубы нагнетается раствор силиката натрия с хлористым кальцием или без него. Коэффициент фильтрации грунтов  $K_f = 0,1 \dots 0,001$  м/сут. Раствор обволакивает частицы грунта, заполняет поры и под воздействием отвердителя превращается в гель).

2). *Термическое уплотнение* – т.е. упрочнение грунтов с помощью поля положительных температур:

1) глубинный обжиг – термическое упрочнение грунтов с ненарушенным строением (прогрев осуществляется при температуре 500...600°C, обжиг – до 1000°C, клинкерование > 1000°C), применяемое для упрочнения просадочных лессовых грунтов путем нагнетания в лессовую породу горячего воздуха (600...900°C) под давлением 1...2 атм. непосредственно в толще);



2) термическое упрочнение грунтов с нарушенным строением, применяемое в дорожном и аэродромном строительстве при отсутствии каменных материалов и наличии большого количества топлива.

3). *Замораживание грунта* – т.е. упрочнение под действием поля отрицательных температур, создающего вокруг котлована прочную монолитную стену (замораживание может быть естественным и искусственным; в скважины устанавливают колонки, по которым циркулирует хладоноситель – раствор хлористого кальция, газообразный аммиак, углекислый газ).

*Физико-химические методы* заключаются в обработке грунтов небольшими дозировками (не более 1...3%) реагентов, изменяющих обменную способность грунта и поверхность минеральных частиц.

Их цель – в изменении структуры грунтов (диспергация, агрегация) или защите их естественной структуры (гидрофобизация). Наиболее эффективны для суглинков и глин.

В основе теории физико-химических методов лежат следующие явления:

*Диспергация* – ослабление связи между грунтовыми частицами при наличии жидкой фазы, образование глинистых суспензий.

*Агрегация* – процесс сжигания, ведущий к образованию агрегатов и основанный на процессе коагуляции.

*Гидрофобизация* – ликвидация возможности взаимодействовать с водой путем нейтрализации зарядов поверхностного притяжения воды.

К физико-химическим методам относятся:

1. *Кольматация и глинизация грунтов:*

1) кольматация – процесс заполнения порового пространства грунта мелкими пылеватыми и глинистыми частицами, находящимися во взвешенном состоянии в фильтрующейся воде;

2) глинизация, или тампонаж – вымыв глинистых суспензий в поры и трещины пород под давлением до 20 атм. и более.

2. *Улучшение грунтов гранулометрическими добавками* – т.е. подбор оптимальных смесей путем глинования и пескования.

3. *Солонцевание грунтов* – искусственная диспергация суглинистых и глинистых пород путем замены в их поглощающем комплексе обменных многовалентных катионов (кальция и магния) на одновалентные (натрия и калия).

*Химические методы* основаны на введении в грунт химических реагентов. Упрочнение грунтов при этом происходит в результате изменения их состава и характера структурных связей. Характер изменения свойств грунтов сводится к значительному увеличению прочности, водо- и морозостойкости, уменьшению водопроницаемости.

Основными процессами, приводящими к образованию новых структурных связей, являются: адсорбция, ионный обмен, коагуляция, диспергация, полимеризация, поликонденсация, кристаллизация, гидратация, гидролиз и ряд других сложных химических реакций. При этом необходимо достигнуть высокой адгезии и когезии между грунтом и вяжущим.

*Полимеризация* – это реакция соединения нескольких молекул (мономеров), протекающая без изменения элементарного состава и не сопровождающаяся выделением побочных продуктов.

*Поликонденсация* – реакция соединения нескольких молекул одинакового или различного строения, сопровождающаяся выделением простейших низкомолекулярных веществ.

*Адгезия* (прилипание) – возникновение связи между поверхностными слоями двух разнородных тел, приведенных в соприкосновение.

*Когезия* (сцепление) – молекулярное взаимодействие частей одного и того же физического тела, приводящее к объединению этих частиц в единое целое.

К химическим методам относятся:

1. *Упрочнение грунтов органическими вяжущими веществами:*

1) битумизация грунтов: холодная битумизация осуществляется на грунтах с  $K_f = 10 \dots 100$  м/сут, горячая – при ширине раскрытия трещин 0,2... 1 мм; при этом применяются материалы: битумы, битумные эмульсии, битумные пасты;

2) упрочнение грунтов синтетическими полимерными смолами: фенолформальдегидными, мочевиноформальдегидными (карбамидными), фенолфурфурольными, фурфуроланилиновыми и др.

2. *Упрочнение грунтов минеральными вяжущими веществами:* портландцементами (цементация); известью (известкование); шлаками и шлаковыми цементами; гипсовыми и ангидритовыми вяжущими.

3. *Силикатизация* – упрочнение грунтов растворами силиката натрия (жидкого стекла). Применяются:

1) однорастворная силикатизация (введение в грунт раствора, состоящего из двух или трех компонентов с замедленным временем гелеобразования);

2) двухрастворная силикатизация (поочередное нагнетание растворов силиката натрия и хлористого кальция);

3) газовая силикатизация (в качестве отвердителя жидкого стекла применяется углекислый газ).

### Вопросы для самопроверки

1. Что означает техническая мелиорация грунтов?
2. Чем отличается укрепление грунтов от их стабилизации?
3. К каким методам относится уплотнение грунтов укаткой?
4. За счет чего происходит сейсмическое уплотнение грунтов?
5. На каких грунтах возможно водонасыщение как способ уплотнения грунта?
6. Что такое обжиг грунта?
7. Сформулируйте понятие диспергации.
8. В чем отличие адгезии от когезии?
9. Какие методы относятся к химическим?
10. Какие минеральные вяжущие применяются для укрепления грунтов?

## 29. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ

### 29.1. Требования к укрепленным грунтам

Укрепленные грунты должны обладать определенными техническими показателями:

1) *механической прочностью*, характеризуемой модулем деформации или модулем упругости, пределом прочности при сжатии, сопротивлением сдвигу;

2) *водоустойчивостью*, характеризуемой сохранением механической прочности при насыщении водой;

3) *морозостойкостью*, характеризуемой показателями прочности и влагоемкости после многократного переменного воздействия отрицательной и положительной температуры на увлажненные образцы.

Чтобы получить высокие прочностные показатели укрепленного грунта, необходимо создать условия для протекания процессов структурообразования, в результате которых обеспечивалась бы необратимая устойчивая связность, высокая прочность и стабильная плотность укрепленного грунта.

При введении в грунт вяжущих материалов (цемента, битума, смолы) возникают сложные физико-химические и химические взаимодействия с вяжущим материалом, в результате чего происходит коренное качественное изменение и улучшение физико-механических свойств грунта. Однако максимального эффекта можно ожидать при условии тщательного и равномерного распределения в нужном количестве вяжущего материала с последующим уплотнением всей массы обработанного грунта при оптимальной влажности.

Высокая прочность укрепленного грунта зависит от:

1) факторов, определяющих свойства материалов, – химического и минералогического состава грунта и активности вяжущего; количества вяжущего; характера взаимодействия грунта с вяжущим веществом;

2) факторов, зависящих от технологии работ, – влажности и температуры смеси; качества разрыхления, точности дозирования, равномерности перемешивания и увлажнения; плотности готовой смеси; условий последующего режима твердения и структурообразования.

Заданная прочность укрепленного грунта должна быть обеспечена с наименьшим расходом вяжущих материалов.

## 29.2. Вяжущие материалы для укрепления грунтов

С момента возникновения структуры и в ходе ее развития и упрочнения различают три типа структур:

- 1) коагуляционные;
- 2) конденсационные;
- 3) кристаллизационные [17].

*Коагуляционные структуры* – простейший вид, в котором частицы дисперсной фазы образуют беспорядочную пространственную сетку в результате столкновений в тепловом (броуновском) движении. Они обладают следующими свойствами: наименьшей прочностью; предельной тиксотропностью (полной обратимостью разрушения); пластичностью; способностью к ползучести; высокой эластичностью.

*Конденсационные структуры* возникают при действии наибольших сил сцепления – химических. Они образуются из коагуляционных структур в случае их дегидратации (отнятия воды от вещества). Обладают: прочностью, хрупкостью, упругостью, отсутствием тиксотропных свойств.

**Кристаллизационные структуры** являются наиболее прочными и водостойчивыми. Образуются в результате сращивания кристалликов новой твердой фазы, возникающей из перенасыщенного раствора.

Вяжущие материалы, вводимые в грунт, разделяются на три группы:

1. Вяжущие, способные к самостоятельному структурообразованию с получением наиболее прочных и стойких структур – конденсационных и кристаллизационных (цемент с добавками и без них, синтетические смолы типа карбамидных).

2. Вяжущие, не способные к самостоятельному образованию прочных водостойких структурных связей (известь и фурфуроланилиновая смола), образующие кристаллизационные и конденсационные структуры.

3. Органические материалы (жидкие битумы и битумные эмульсии), образующие коагуляционные структуры.

Если повышение прочности укрепленного грунта в 1-й группе связано с увеличением содержания в нем вяжущего в широком диапазоне (от 2...3 до нескольких десятков процентов), во 2-й группе – до некоторого предела (несколько процентов в смеси), после которого показатели прочности остаются неизменными или постепенно уменьшаются, то в 3-й группе содержание вяжущего имеет оптимальное значение, выше и ниже которого свойства укрепленного грунта резко ухудшаются.

### **29.3. Классификация грунтов по степени пригодности для укрепления вяжущими материалами**

Все грунты по степени их пригодности для укрепления вяжущими материалами подразделяются на три группы (рис. 29.1):

- 1) пригодные;
- 2) условно непригодные;
- 3) непригодные.

**Пригодные грунты** подразделяются на четыре подгруппы: IA, IB, IB, IG.

**Подгруппа IA** включает крупно- и мелкообломочные грунты в естественном виде, наиболее пригодные для укрепления любыми методами (характеризуются наиболее высокими показателями прочности).

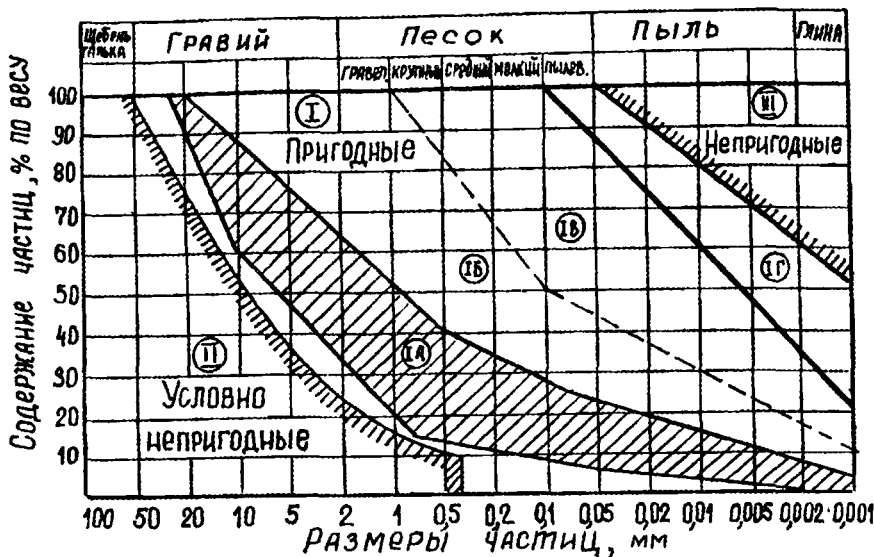


Рис. 29.1. Классификация грунтов по степени пригодности

*Подгруппа IB* включает песчаные, супесчаные и легкосуглинистые грунты, а также песчано-глинистые смеси оптимального гранулометрического состава.

*Подгруппа IB* включает суглинистые и тяжелосуглинистые грунты пылеватых и непылеватых разновидностей, характеризующиеся ограниченной пригодностью (для них рекомендуется применение комплексных методов). Для тонкого размельчения этих грунтов необходимо использовать многократные однопроходные грунтосмесительные машины или стационарные установки.

*Подгруппа IG* включает песчанистые и пылеватые глины, которые являются условно пригодными для укрепления. Грунты, включенные в эту подгруппу, допускается подвергать укреплению лишь при использовании добавок активных веществ.

*Условно непригодные грунты.* Эта группа включает крупнообломочные несвязные каменные породы, не пригодные для укрепления лишь по причине малого содержания песчано-глинистых фракций. Крупные обломки могут вызвать поломку рабочих органов грунтосмесительных машин.

*Непригодные грунты* представлены жирными высокопластичными глинами, обладающими большой связностью в сухом состоянии. Такие грунты требуют колоссальных затрат механической энергии на обработку и чрезмерного расхода вяжущего, что экономически невыгодно.

### Вопросы для самопроверки

1. Какие технические показатели характеризуют укрепленные грунты?
2. От чего зависит прочность укрепленного грунта?
3. Как изменяется прочность в зависимости от процентного содержания вяжущего, относящегося к 3-й группе?
4. Дайте характеристику конденсационной структуры.
5. Перечислите факторы, повышающие прочность укрепленного грунта и зависящие от технологии работ.
6. Какие вяжущие относятся к 1-й группе?
7. Как разделяются группы по степени пригодности?
8. Какие грунты объединяет группа ИБ?
9. Какие грунты относятся к условно непригодным?
10. Какова основная причина отнесения жирных глин к непригодным для укрепления?

## 30. УКРЕПЛЕНИЕ ГРУНТОВ МИНЕРАЛЬНЫМИ И ОРГАНИЧЕСКИМИ ВЯЖУЩИМИ

### 30.1. Укрепление грунтов минеральными вяжущими

В качестве минеральных вяжущих для укрепления грунтов используются цемент и известь.

*Портландцемент* представляет собой гидравлическое вяжущее, получаемое путем обжига до спекания сырьевой смеси. Он содержит в себе несколько минералов:

алит  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2(\text{C}_3\text{S})$  – 40...65%;

белит  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2(\text{C}_2\text{S})$  – 15...40%;

трехкальциевый алюминат  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3(\text{C}_3\text{A})$  – 3...15%;

четырекальциевый алюмоферрит  $4\text{Ca}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{C}_4\text{AF})$  – 10...20%.

При цементации грунтов происходят следующие процессы:

- 1) *химические* – гидратация и гидролиз цементных зерен;
- 2) *физико-химические* – обменные поглощения продуктов гидролиза цемента тонкодисперсной частью грунта, необратимая коагуляция, микроагрегирование, цементация;
- 3) *физические и механические* – размельчение грунта и перемешивание с цементом.

*Гидратация* – присоединение молекул воды к молекулам вещества.

*Гидролиз* – химическое взаимодействие вещества с водой, при котором сложное вещество распадается на два или более новых веществ.

В процессе структурообразования (гидратации и гидролиза цемента) происходит переход в раствор гидрата окиси кальция, насыщение им раствора и образование гидроалюминатов, гидросиликатов кальция и других гидратов. Возникшие кристаллы начинают расти, переплетаться между собой и срачиваться, формируя кристаллизационную структуру.

Наибольшее влияние на свойства цементогрунта оказывают следующие факторы:

- 1) гранулометрический, минералогический и химический состав грунта;
- 2) химико-минералогический состав цемента;
- 3) технологические параметры: дозировка цемента и воды, уплотнение и режим твердения.

Для укрепления грунтов цементом необходимо не менее 8% и не более 18...20% минерального вяжущего. Прочность укрепленного грунта в зависимости от класса колеблется от 1,0 до 6,0 МПа, коэффициент морозостойкости – от 0,65 до 0,75.

*Известь* – продукт, получаемый из известковых карбонатных пород обжигом до полного удаления углекислоты и состоящий из оксида кальция.

Различают виды воздушной извести: *негашеная* – *кипелка* и *гашеная (гидратная)* – *пушонка*. Процесс гашения идет с выделением тепла:



При гашении 1 кг извести выделяется 277 кал, объем при этом увеличивается в 2...2,5 раза.

Известь применяется как добавка при комплексном укреплении.



Оптимальное количество гашеной извести (в пересчете на  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) для различных грунтов находится в пределах от 5 до 12%.

Применение негашеной извести дает больший эффект, однако надо строго соблюдать правила безопасности. Гашеная известь дает наибольший эффект при введении ее в гравий с пылевато-глинистым заполнителем, тяжелыми суглинками и глинами. При этом известь вступает в химическое и физико-химическое взаимодействие с тонкодисперсными частицами. Для укрепления глинистых переувлажненных грунтов, имеющих влажность на 4...6% выше оптимальной, эффективно применять молотую негашеную известь.

*Сланцевую золу-унос* сухого отбора в качестве самостоятельного вяжущего надлежит применять при укреплении крупнообломочных грунтов оптимального и неоптимального гранулометрического состава, супесей, песков гравелистых, крупных, средних, мелких. Дозировку золы назначают не менее 15...20% в сочетании с 4...6% цемента или 5...8% извести от массы смеси.

### 30.2. Укрепление грунтов органическими вяжущими

В качестве органических вяжущих для укрепления грунтов используются: битумы (жидкие, эмульсии, пасты) и синтетические высокомолекулярные соединения.

Метод *битумизации* основан на введении битума в вязко-жидком, эмульсионном и пастообразном состояниях. Битумизация пород подразделяется на горячую и холодную.

*Горячая битумизация* применяется для закрепления трещиноватых пород с раскрытием трещин до 0,1...1 мм, *холодная* – для гравелисто-песчаных и песчаных пород с  $K_f$  от 10 до 100 м/сут.

*Эмульсиями* называются дисперсные системы, состоящие из двух взаимно нерастворимых веществ, из которых одно распределено в другом в виде мелких частиц.

Принципиальным отличием технологии укрепления грунтов битумами от технологии укрепления минеральными вяжущими является сохранение в грунте при его измельчении наиболее прочных агрегатов размером 2...4 мм.

Грунты, укрепленные битумом, по природе структурных связей относятся к коагуляционным структурам. Наилучшие результаты достигаются при укреплении супесчаных и легкосуглинистых грун-

тов. Непригодны для укрепления битумами тяжелые суглинки, пылеватые глины и песчаные грунты.

Битумные эмульсии, приготовленные с твердыми порошкообразными эмульгаторами, называют *пастами*.

**Синтетические смолы** (фенолформальдегидные, мочевиноформальдегидные, фенолфурфурольные, анилиноформальдегидные) обладают комплексом положительных качеств:

- 1) высокими адгезионными и когезионными связями;
- 2) регулируемым и быстрым отверждением смолы;
- 3) высокими прочностными свойствами;
- 4) сравнительно небольшим расходом смолы.

Синтетические смолы должны отвечать следующим требованиям:

- 1) растворимость в воде при введении в грунт;
- 2) нерастворимость в воде и несмачиваемость после отверждения;
- 3) хорошая адгезия (прилипаемость);
- 4) высокие механические свойства;
- 5) способность самопроизвольно растекаться по поверхности увлажненного грунта;
- 6) относительная дешевизна.

Для укрепления синтетическими смолами наиболее пригодны грунты оптимального гранулометрического состава с  $\text{pH} < 7,0$ , непригодны карбонатные тяжелые суглинки, легкие и тяжелые суглинки, глины.

### 30.3. Комплексные методы укрепления

Комплексные методы сочетают в себе положительные качества отдельных вяжущих веществ и устраняют их отрицательные особенности.

В задачу комплексных методов входит:

- 1) расширение видов грунтов, пригодных для укрепления;
- 2) обеспечение оптимальных условий для процессов твердения и структурообразования;
- 3) расширение продолжительности сезона строительства;
- 4) применение укрепленных грунтов на дорогах различных технических категорий.

Комплексному укреплению поддаются практически все генетические типы грунтов.

Характерной особенностью комплексных методов укрепления является формирование структурно-механических свойств смешанного типа с преобладанием жестких (кристаллизационных) или пластичных (коагуляционных) типов структур.

В качестве добавок при комплексном укреплении грунтов с использованием цемента как основного вяжущего наиболее часто применяются следующие вещества: известь, хлористый кальций, электролиты, едкий натрий, гипс, а также ряд поверхностно-активных веществ.

*Известь* (гашеную  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  или молотую негашеную  $\text{CaO}$ ) используют при укреплении грунтов, когда обработка одним цементом не дает эффекта (кислых или солонцовых глин и тяжелых суглинков, а также супесей и песков, имеющих рН меньше 6), в целях обеспечения оптимальных условий структурообразования и повышения прочности и долговечности цементогрунта.

*Хлористый кальций* применяют в случае производства работ при отрицательной температуре, при укреплении тяжелых суглинков, кислых или гумусированных песчаных грунтов.

*Силикат натрия* (натриевое жидкое стекло) при введении в качестве добавки химически взаимодействует с гидратом извести, выделяющимся в процессе гидролиза цемента, что повышает прочность цементогрунта, ускоряет его твердение, снижает расход цемента при укреплении супесчаных и суглинистых грунтов, преимущественно – карбонатных разновидностей.

Добавка *кремнийорганических соединений* (метилсиликоната натрия ГКЖ-11, этилсиликоната натрия ГКЖ-10, полиэтилгидросилоксана ГКЖ-94) приводит к возникновению химической адсорбции этих реагентов поверхностью элементарных минеральных частиц и появлению на них мономолекулярных или полимолекулярных водоотталкивающих кремнийорганических полимерных пленок. В процессе взаимодействия происходит сложный обмен между активными группами гидрофобизатора и поглощающим комплексом тонкодисперсной части грунта; при этом протекают реакции полимеризации и поликонденсации.

Добавка кремнийорганических веществ при укреплении грунтов цементом в количестве 0,3...0,7% по весу грунта придает несмачиваемость (гидрофобность) поверхности частиц.

Придание песчаным, супесчаным и легкосуглинистым цементогрунтам гидрофобности, а следовательно, повышенной морозоустойчивости, деформативности, теплоустойчивости может быть обеспечено добавками цемента и битумной эмульсии или битумно-известковой пасты.

Предварительная обработка связных грунтов известью до введения битумного вяжущего приводит к активации поверхности грунтовых частиц, улучшению адгезии битума и резкому снижению водопоглощения и набухания смеси при уменьшении расхода основного вяжущего – битума.

### Вопросы для самопроверки

1. Какие процессы происходят при цементации грунтов?
2. Чем отличается гидролиз от гидратации?
3. Как происходит структурообразование цементогрунта?
4. Какими явлениями сопровождается гашение извести?
5. На каких грунтах применяется горячая и холодная битумизация?
6. Какими положительными свойствами обладают синтетические смолы?
7. Дайте характеристику комплексным методам укрепления грунтов.
8. Что входит в задачу комплексных методов?
9. Какие Вы знаете комплексные методы с использованием в качестве основного вяжущего цемента?
10. Какие Вы знаете комплексные методы с использованием в качестве основного вяжущего битума?

## 31. СЫРЬЕ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОБОЧНЫЕ ПРОДУКТЫ ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ

### 31.1. Сырье для строительных материалов

В качестве сырья для производства строительных материалов используются следующие встречающиеся в природе материалы.

*Песчано-гравийный материал* для бетона, дорожного строительства и силикатных изделий. В республике разведано более 50 месторождений с запасами свыше 242 млн. м<sup>3</sup>. На базе 15 месторождений с общим запасом 70 млн. м<sup>3</sup> работает 7 крупных предприятий.

**Цементное сырье.** Основной вид минерального сырья, используемого для изготовления цемента, – доброкачественные глины и мел или меловой мергель. Разведано 5 месторождений мела с запасами 281 млн. т и 8 месторождений глин с запасам 65 млн. т. На базе этих месторождений работают Кричевский и Волковыский цементные заводы.

**Известковое сырье.** Для производства извести используются мел и доломит. Разведано 36 месторождений мела с общим запасом 152 млн. т и 4 месторождения доломитов с общим запасом 53 млн. т.

**Строительный камень.** На территории республики залегают в виде россыпей, разбросанных ледником (в основном, в северных районах), или в виде коренной залежи, представляющей собой сплошной массив. На базе месторождения «Микашевичи» (запас – 294 млн. т) работает дробильно-сортировочный механизированный карьер по выпуску фракционированного щебня.

**Огнеупорные и тугоплавкие глины.** Служат сырьем для производства шамотного кирпича, канализационных труб, керамики. Разведано 5 месторождений с общим запасом 63 млн. т (в Брестской и Гомельской области).

**Каолины,** или белые глинистые породы, – древние отложения, залегающие на больших глубинах. В районе г. Житковичи выявлено 3 месторождения с общим запасом 9 млн. т. Каолины применяются в бумажной, фарфоро-фаянсовой, огнеупорной и алюминиевой промышленности.

**Кирпичное сырье и сырье для аглопорита и керамзита.** Глинистое сырье идет на изготовление кирпичей, черепицы, облицовочной керамики, посуды, глинистых растворов, паст. Всего разведано 375 месторождений с общим запасом 156 млн. м<sup>3</sup>. На их базе работают свыше 230 кирпичных заводов. Особое промышленное значение имеет месторождение «Гайдуковка» вблизи Минска. Запасы его высокосортных глин составляют 71 млн. м<sup>3</sup>.

**Стекольные и формовочные пески.** В республике имеется около 6 месторождений стекольных песков. Наиболее крупным является месторождение в Тереховском районе Гомельской области с общим запасом 53 млн. т (формовочные пески – 46 млн. т, стекольные – 7 млн. т).

Помимо сырья для строительных материалов Республика Беларусь обладает целым рядом *полезных ископаемых*.

В 1964 г. вблизи г. Речицы Гомельской области с глубины 2000 м был получен первый фонтан *нефти*, расход которого составил 144 м<sup>3</sup> в сутки. Вскрыты и другие нефтеносные горизонты на глубинах 2600 и 2900 м. По своему качеству белорусская нефть относится к типу легких (удельный вес – 0,896) и не уступает украинской, бакинской и другим.

В республике имеются такие месторождения *калийных солей*, как Старобинское, Петриковское, Любанское, прогнозные запасы которых составляют около 40 млрд. т. Содержание хлористого калия в солях колеблется от 13 до 55 %.

В Беларуси известны 3 месторождения *каменной соли*. Самое крупное из них – Мозырское с запасом 480 млн. т.

*Железные руды*. На территории республики выявлено несколько магнитных аномалий, приуроченных к докембрийским породам. Большой интерес представляет Кореличская полоса магнитных аномалий со средней глубиной залегания 155 м. Ее запасы оцениваются в 520 млн. т.

*Медь*. В Брестской области вскрыты породы верхнего протерозоя, представленные, в основном, туфами. Медная минерализация приурочена к трещинам в туфах, по которым наблюдаются скопления халькопирита. Содержание меди колеблется от 0,5 до 3% (минимальное промышленное содержание меди в аналогичных типах руд – 0,8...1%).

*Каменные угли*. Вскрыто 10 пластов рабочей мощностью от 0,5 до 1,3 м. Угли имеют зольность от 16,5 до 42% с теплотворной способностью 4000...6000 кал/кг, что характерно для энергетических углей удовлетворительного качества. Прогнозные запасы оцениваются в 3,5 млрд. т.

*Бурые угли*. У г. Кобрин в более молодых третичных отложениях выявлены бурые угли, запасы которых определены в 20 млн. т на глубинах от 30 до 80 м при мощности пластов до 10 м.

*Горючие сланцы*. В толще девонских и третичных отложений в районе Давид-Городка, Турова, Любани на глубинах 140...350 м залегает несколько пластов горючих сланцев, мощность которых – от 3 м и более. Теплотворная способность сланцев – 1600 кал/кг, зольность – 65%, прогнозные запасы – около 13 млрд. т.

*Фосфориты*. В восточной части Могилевской области выявлены 4 участка, на которых распространены фосфориты, залегающие на

глубине 13...80 м. Запасы фосфоритов составляют 68 млн. т. Содержание фосфорного ангидрита в руде колеблется в пределах от 5 до 8,5%.

### 31.2. Перспективные разработки

По содержанию растворенных солей подземные воды подразделяются на:

- 1) пресные (содержание растворенных солей  $\leq 1$  г/л);
- 2) солоноватые (1... 10 г/л);
- 3) соленые (10... 50 г/л);
- 4) рассолы ( $> 50$  г/л).

Морская вода содержит около 37% растворимых солей, питьевая – не более 1 г/л.

*Подземные рассолы.* На территории Припятского Полесья найдены вместе с нефтью подземные рассолы.

Объем рассолов в недрах республики оценивается в 2 тыс. кубокилометров. По подсчетам специалистов в них содержится: магния – 17 млрд. т.; брома – 6,5 млрд. т.; стронция – 3,5 млрд. т.; иода – 40 млн. т.

*Редкоземельные элементы.* В угольных отложениях найдены промышленные концентрации молибдена, рения, селена, скандия.

*Алмазы.* Месторождения алмазов связаны со специфическими глубинными магматическими породами – кимберлитами, которые залегают в виде конусообразных тел, называемых трубками взрыва. В них находятся алмазы в виде единичных редких кристаллов различных размеров и качества. Известны трубки взрыва на Жлобинской и Полесской седловинах.

### 31.3. Отходы и побочные продукты для укрепления грунтов

*Отходы производства* – это неликвидные остатки сырья и материалов, не использованные для производства товарной продукции.

В качестве самостоятельных вяжущих веществ могут применяться следующие материалы, являющиеся отходами и побочными продуктами промышленных предприятий республики:

- 1) фосфогипс – отход при производстве фосфорных удобрений;
- 2) сланцевая зола-унос сухого отбора, полученная после сжигания горючих сланцев;

3) остаточный продукт испарительной камеры при производстве диметилтерефталата (ДМТ-ик).

**Фосфогипс** образуется при переработке природных апатитовых и фосфоритовых пород в удобрение при производстве борной кислоты и фтористых соединений. Он состоит, в основном, из двухводного и полуводного гипса или ангидрита, содержание которых – 80...98% по массе.

В качестве вредных примесей в фосфогипсе присутствуют кислоты и фториды, обуславливающие  $\text{pH} = 2...5$  и вызывающие повышенную сорбцию паров воды в изделиях, пониженную морозостойкость и прочность.

На Гомельском химическом заводе производилось до 480 тыс. тонн в год. Сырой фосфогипс не оказывает положительного эффекта при укреплении грунтов, однако после термической обработки при  $t = 170^\circ\text{C}$  он приобретает свойства вяжущего материала. Для укрепления грунтов установлена оптимальная дозировка фосфогипса, соответствующая 20...30% от веса грунта.

**Сланцевая зола** представляет собой тонкодисперсный материал, образующийся на тепловых электростанциях в результате сжигания горючих сланцев в топках котлоагрегатов, осаждаемый золоулавливающими устройствами из дымовых газов. На Эстонской и Прибалтийской ГРЭС ежегодно образуется до 10 млн. т сланцевой золы. Особенностью сланцевых зол по сравнению с золами, образуемыми от сжигания каменных или бурых углей, является содержание в них большого количества сульфатов и оксида кальция.

**ДМТ-ик** является отходом Могилевского комбината синтетического волокна. Выпуск этого продукта на начало 90-х годов достигал 3500 т/год. На основе ДМТ-ик получали термопластичные бетоны, напоминающие по своим свойствам асфальтобетоны.

В качестве поверхностно-активных добавок могут использоваться:

- 1) жировой гудрон – отход Гомельского жиркомбината;
- 2) кубовый остаток регенерации этиленгликоля (КО РЭГ) – отход Могилевского комбината синтетического волокна;
- 3) тяжелое жидкое топливо и сине-зеленое масло – отходы Полоцкого химкомбината;
- 4) амбарная нефть Речицкого нефтепромысла;
- 5) пыль-унос цементных заводов;
- 6) отходы асбесто-шиферного производства (асбестит);



- 7) фильтрпресная пыль – побочный продукт сахарных заводов;
- 8) отходы производства калийных солей (ОПКС) Солигорского калийного комбината;
- 9) сульфитно-спиртовая барда – отход целлюлозно-бумажного производства.

### Вопросы для самопроверки

1. Назовите сырье и его запасы, применяемые в дорожном строительстве.
2. Что является сырьем для производства цемента и каково его наличие в республике?
3. Назовите самое крупное месторождение строительного камня.
4. Какие Вы знаете полезные ископаемые, залегающие в недрах Беларуси?
5. Дайте характеристику белорусской нефти.
6. Какие полезные ископаемые являются перспективными в республике?
7. Что такое рассолы?
8. С какими геологическими породами связано залегание алмазов в земной коре?
9. Какие отходы могут быть использованы в качестве самостоятельных вяжущих для укрепления грунтов?
10. Какие отходы могут служить в качестве поверхностно-активных добавок?

### Литература

1. Земля: Энциклопедия. – М.: Педагогика, 1971. – 447 с.
2. В ы р к о Н. П., Л е о н о в и ч И. И. Дорожное грунтование с основами механики грунтов. – Мн.: Выш. школа, 1977. – 223 с.
3. М а с л о в Н. Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. – Мн.: Выш. школа, 1982. – 511 с.
4. С е р г е е в Е. М. Инженерная геология. – М.: Изд-во Московского университета, 1982. – 248 с.
5. Н е ч и п о р е н к о Л. А. Условия залегания и тектоническая предопределенность антропогенного покрова Белоруссии. – Мн.: Наука и техника, 1989. – 113 с.

6. Б а б а с к и н Ю. Г. Дорожное грунтоведение и механика земляного полотна дорог. – Мн.: БГПА, 2001. – 223 с.
7. Л е о н о в и ч И. И., В ы р к о Н. П. Механика земляного полотна. – Мн.: Наука и техника, 1975. – 232 с.
8. Я р о м к о В. Н. Дорожные насыпи на болотных грунтах. – Мн.: Изд-во НПО «Белавтодорпрогресс», 1998. – 400 с.
9. К о с т ю к е в и ч Н. И. Охрана природы. Природные ресурсы Белоруссии и их рациональное использование. – Мн.: Выш. школа, 1969. – 392 с.
10. Д у б а х Г. В., Т а б е р Р. В. Тысяча один вопрос об океане и тысяча один ответ. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 188 с.
11. Ч а п о в с к и й Е. Г. Инженерная геология. Основы инженерно-геологического изучения горных пород. – М., 1975. – 210 с.
12. Г о р е л ы ш е в Н. В. Материалы и изделия для строительства дорог: Справочник. – М.: Транспорт, 1986. – 288 с.
13. Л е о н о в и ч И. И. Автомобильные лесовозные дороги. – Мн.: Выш. школа, 1965. – 395 с.
14. К о т о в М. Ф. Механика грунтов в примерах. – Мн.: Выш. школа, 1968 – 246 с.
15. Б а б к о в В. Ф., Б е з р у к В. М. Основы грунтоведения и механики грунтов. – М.: Высш. школа, 1986. – 239 с.
16. Ф о р с с б л а д Л. Вибрационное уплотнение грунтов и оснований. – М.: Транспорт, 1991. – 156 с.
17. Б е з р у к В. М., Е л е н о в и ч А. С. Дорожные одежды из укрепленных грунтов. – М.: Высш. школа, 1969. – 330 с.
18. Инструкция по укреплению грунтов сланцевыми золами в условиях БССР. ВСН 32-82. Миндорстрой БССР. – Мн., 1983. – 43 с.
19. Г о д о в и к о в А. А. Минералогия. – М.: Недра, 1975.

## Содержание

Введение.....	3
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ. . . . .	6
1.1. Краткая историческая справка. . . . .	6
1.2. Современные сведения о строении земного шара. . . . .	7
1.3. Геологическая хронология. . . . .	8
2. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ. . . . .	11
2.1. Инженерно-геологическое районирование территорий. . . . .	11
2.2. Щиты и плиты древних и молодых платформ. . . . .	12
2.3. Кристаллический фундамент Республики Беларусь. . . . .	15
2.4. Основные особенности рельефа кровли антропогенного покрова. . . . .	17
3. ПОРОДООБРАЗУЮЩИЕ МИНЕРАЛЫ. . . . .	19
3.1. Характеристика силикатов и алюмосиликатов. . . . .	19
3.2. Первичные и вторичные минералы. . . . .	22
4. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД. . . . .	25
4.1. Основные подразделения пород по генетическим признакам. . . . .	25
4.2. Минералы, определяющие химический состав магматических пород. . . . .	25
4.3. Классификация магматических пород. . . . .	26
4.4. Характеристика важнейших представителей класса. . . . .	28
5. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД. . . . .	30
5.1. Метаморфизм и его природа. . . . .	30
5.2. Характеристика основных представителей метаморфических пород. . . . .	33
5.3. Трещиноватость горных пород. . . . .	33
6. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД. . . . .	35
6.1. Происхождение осадочных пород. . . . .	35
6.2. Петрографический состав осадочных пород. . . . .	36
6.3. Грунты и их классификация. . . . .	37
7. ЭНДОГЕННЫЕ И ГРАВИТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ВЫЗВАННЫЕ ИМИ ЯВЛЕНИЯ. . . . .	43
7.1. Тектонические движения земной коры. . . . .	44

7.2.	Явления, вызванные гравитационными процессами. . . . .	46
8.	<b>ЭКЗОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ КЛИМАТИЧЕСКОГО И ВОДНОГО ХАРАКТЕРА И ВЫЗВАННЫЕ ИМИ ЯВЛЕНИЯ.</b> . . . . .	51
8.1.	Явления, вызванные экзогенными процессами климатического характера. . . . .	51
8.2.	Явления, вызванные экзогенными процессами водного характера. . . . .	54
9.	<b>ГРУНТ КАК МНОГОКОМПОНЕНТНАЯ СИСТЕМА.</b> . . . .	57
9.1.	Структура грунтов. . . . .	58
9.2.	Значение пористости грунтов. . . . .	59
10.	<b>ДИСПЕРСНЫЕ ГРУНТЫ.</b> . . . . .	61
10.1.	Гомогенные и гетерогенные системы. . . . .	61
10.2.	Коллоиды и коллоидные системы (мицеллы). . . . .	62
10.3.	Поглотительная способность грунтов. . . . .	63
11.	<b>ВОДА В ГРУНТАХ.</b> . . . . .	66
11.1.	Происхождение подземных вод. . . . .	66
11.2.	Положение уровня стояния грунтовых вод. . . . .	68
12.	<b>ФОРМЫ СВЯЗЕЙ ВОДЫ В ГРУНТАХ.</b> . . . . .	70
12.1.	Влагоемкость и водопроницаемость. . . . .	71
12.2.	Водопоглощение и водонасыщение. . . . .	73
13.	<b>ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТОВ.</b> . . . . .	74
13.1.	Физические свойства грунтов. . . . .	74
13.2.	Понятие о зерновом и микроагрегатном составе грунтов. . . . .	75
14.	<b>ПОКАЗАТЕЛИ ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВ ГРУНТОВ.</b> . . . . .	78
14.1.	Плотность грунтов. . . . .	78
14.2.	Пористость грунтов. . . . .	79
14.3.	Влажность грунтов. . . . .	82
14.4.	Методы определения. . . . .	84
15.	<b>КОНСИСТЕНЦИЯ ГРУНТОВ.</b> . . . . .	85
15.1.	Характерная влажность и пластичность грунтов. . . . .	85
15.2.	Связанность, липкость и усадка грунтов. . . . .	86
15.3.	Набухание грунтов и вызванные им явления. . . . .	87
16.	<b>ТИПЫ ГРУНТОВ, РАСПРОСТРАНЕННЫХ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ.</b> . . . . .	90
16.1.	Подразделение грунтов по происхождению. . . . .	90

16.2.	Грунты Беларуси. . . . .	92
16.3.	Дорожно-климатическое районирование Беларуси. . . . .	95
17.	<b>ПОЧВЫ БЕЛАРУСИ.</b> . . . . .	97
17.1.	Почвообразовательный процесс. . . . .	97
17.2.	Почвенные зоны и их характеристика. . . . .	98
17.3.	Типы почв Беларуси. . . . .	99
18.	<b>ВОДНО-ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ГРУНТОВ.</b> . . . . .	101
18.1.	Влияние температуры на тепловой режим грунтов. . . . .	101
18.2.	Водный режим грунтов. . . . .	104
19.	<b>ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕХАНИКИ ГРУНТОВ.</b> . . . . .	106
19.1.	Закономерности сжимаемости грунтов. . . . .	107
19.2.	Методы определения сжимаемости грунтов. . . . .	112
20.	<b>ПРИНЦИП ЛИНЕЙНОЙ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ.</b> . . . . .	112
20.1.	Деформационные свойства грунтов. . . . .	112
20.2.	Показатели деформационных свойств грунта. . . . .	114
21.	<b>УСЛОВИЯ ПРОЧНОСТИ ГРУНТОВ.</b> . . . . .	117
21.1.	Теория прочности Мора. . . . .	120
21.2.	Условия прочности для сыпучих и связных грунтов. . . . .	124
21.3.	Сопrotивляемость связных грунтов сдвигу. . . . .	126
22.	<b>ЗАКОН ЛАМИНАРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ.</b> . . . . .	131
23.	<b>НАПРЯЖЕНИЯ В ГРУНТАХ.</b> . . . . .	135
23.1.	Понятие о величине напряжения. . . . .	135
23.2.	Определение напряжений в однородных грунтах. . . . .	137
23.3.	Расчет напряжений для плоской и пространственной задачи. . . . .	141
23.4.	Кривые распределения напряжений. . . . .	146
23.5.	Распределение напряжений в неоднородных грунтах. . . . .	146
24.	<b>ТЕОРИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ ГРУНТА.</b> . . . . .	148
24.1.	Деформация грунта при возрастании нагрузки. . . . .	148
24.2.	Понятие о безопасной нагрузке. . . . .	150
24.3.	Повышение степени прочности грунта. . . . .	152
25.	<b>УПЛОТНЕНИЕ ГРУНТОВ.</b> . . . . .	155
25.1.	Теоретические предпосылки. . . . .	155
25.2.	Уплотнение однородного грунта. . . . .	156
25.3.	Уплотнение массива, включающего несколько пластов. . . . .	159
25.4.	Уплотнение грунтов при воздействии вибрационных и ударных нагрузок. . . . .	160

25.5.	Стандартное уплотнение грунта. . . . .	161
26.	<b>РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ.</b> . . . . .	163
26.1.	Понятие о реологии. . . . .	163
26.2.	Деформация ползучести глинистых грунтов. . . . .	165
27.	<b>ДЕФОРМАЦИЯ ГРУНТА ПОД КОЛЕСОМ АВТОМОБИЛЯ И ОТВАЛОМ БУЛЬДОЗЕРА.</b> . . . . .	167
27.1.	Сопrotивление грунта деформированию под катящимся колесом. . . . .	168
27.2.	Сопrotивление грунтов резанию. . . . .	170
28.	<b>МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ МЕЛИОРАЦИИ.</b> . . . . .	173
28.1.	Понятие о методах технической мелиорации. . . . .	173
28.2.	Классификация методов технической мелиорации. . . . .	174
29.	<b>ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ.</b> . . . . .	178
29.1.	Требования к укрепленным грунтам. . . . .	178
29.2.	Вяжущие материалы для укрепления грунтов. . . . .	179
29.3.	Классификация грунтов по степени пригодности для укрепления вяжущими материалами. . . . .	180
30.	<b>УКРЕПЛЕНИЕ ГРУНТОВ МИНЕРАЛЬНЫМИ И ОРГАНИЧЕСКИМИ ВЯЖУЩИМИ.</b> . . . . .	182
30.1.	Укрепление грунтов минеральными вяжущими. . . . .	182
30.2.	Укрепление грунтов органическими вяжущими. . . . .	184
30.3.	Комплексные методы укрепления. . . . .	185
31.	<b>СЫРЬЕ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОБОЧНЫЕ ПРОДУКТЫ ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ.</b> . . . . .	187
31.1.	Сырье для строительных материалов. . . . .	187
31.2.	Перспективные разработки. . . . .	190
31.3.	Отходы и побочные продукты для укрепления грунтов. . . . .	190
	<b>Л и т е р а т у р а.</b> . . . . .	192

Учебное издание

БАБАСКИН Юрий Георгиевич

**ДОРОЖНОЕ ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА  
ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ДОРОГ**

Курс лекций

Редактор Л.А.Палилова. Корректор М.П.Антонова  
Компьютерная верстка Н.А.Школьниковой

---

Подписано в печать 13.06.2002.

Формат 60x84 1/16. Бумага типографская № 2.

Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 9,0. Тираж 300. Заказ 62.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

Лицензия ЛВ №155 от 30.01.98. 220027, Минск, проспект Ф.Скорины, 65.