

Ю. А. МАСАЕВ

П. М. БУДНИКОВ

В. Ю. МАСАЕВ

**ФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД**  
**(ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**  
**ГОРНЫХ ПОРОД)**

**Учебное пособие**

Кемерово 2025

УДК 622.02(075.8)  
ББК 33.111.2я73  
М31

Рецензенты:

Кочетков В. Н. – директор Федерального исследовательского центра угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, кандидат технических наук;

Вохмин С. А. – заведующий кафедрой шахтного и подземного строительства Института цветных металлов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет», кандидат технических наук, профессор.

**Масаев, Ю. А. Физика горных пород (Геотехнические свойства горных пород) :** учебное пособие / Ю. А. Масаев, П. М. Будников, В. Ю. Масаев ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева. – Кемерово, 2025. – 268 с. – ISBN 978-5-00137-514-2. – Текст : непосредственный.

Даны основные понятия геотехнических свойств горных пород. Рассмотрены свойства и классификации горных пород, физико-технические свойства и процессы в образцах горных пород, параметры состояния породных массивов, закономерности изменения свойств горных пород и породных массивов под воздействием физических полей, горно-технологические параметры горных пород, влияние свойств горных пород и состояния породного массива на технологию и механизацию разработки месторождений полезных ископаемых.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Горное дело» и «Физические процессы горного или нефтегазового производства».

Печатается по решению редакционно-издательского совета Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева.

Ил. 89. Табл. 19. Библиогр.: 37 назв.

УДК 622.02(075.8)  
ББК 33.111.2я73  
М31

© Кузбасский государственный  
технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева, 2025

© Ю. А. Масаев, П. М. Будников,  
В. Ю. Масаев, 2025

ISBN 978-5-00137-514-2

## ВВЕДЕНИЕ

Геотехнические свойства горных пород (физика горных пород) – это учение о физико-технических свойствах и физических процессах в горных породах, закономерностях изменения свойств и принципах их использования при решении задач горного производства.

Физика горных пород, оформившаяся в самостоятельный раздел горной науки в 1960-х годах, положила начало новому подходу к породе как геологическому телу, объекту физических исследований и горных разработок одновременно.

Место физики горных пород и процессов среди других наук определяется объектами, методами и направленностью исследований.

По объектам исследований физика горных пород близка к геологическим наукам, а именно кристаллографии, минералогии, петрографии. Без знания минерального состава и структурно-текстурных особенностей пород и условий их залегания невозможно изучение физических свойств пород, обоснованное объяснение физических явлений, происходящих в них. Поэтому данные о составе, строении, генезисе пород, их залегании физика горных пород заимствует у геологических наук и использует для своих исследований.

По методам исследований физика горных пород близка к физике твердого тела: явления и свойства объясняются и изучаются с позиций современной физики твердого тела, используется ее математический аппарат и экспериментальные методы.

Однако изучаемые физикой горных пород объекты значительно разнообразнее, более сложны и зависят от большего количества случайных факторов, чем в физике твердого тела. Законы возникновения и влияния всех этих факторов учесть одновременно практически невозможно. В связи с этим в физике горных пород широко применяется аппарат теории вероятностей и математической статистики, используются экспериментально установленные закономерности и корреляционные зависимости, а физические явления в породах описываются феноменологически.

Направленность исследований физики горных пород и горной науки одна и та же. Физика горных пород решает вопросы совершенствования горного производства, ищет резервы повышения производительности труда через познание свойств горных пород.

Как известно, горное производство в общем виде представляет собой следующую технологическую цепочку: бурение, взрывание, выемку взорванной массы, транспортирование пород, складирование их, первичную обработку и измельчение полезного ископаемого и, наконец, его обогащение. Стадии процесса добывания полезного ископаемого неразрывно связаны с воздействиями на породу различных машин и механизмов. Наибольшая эффективность горных работ достигается при оптимальном соответствии параметров машин и механизмов физическим характеристикам пород.

Так как свойства пород меняются в широких пределах, эффективность работы механизмов будет высокой только при наличии соответствующих устройств, способных давать информацию о свойствах, составе и состоянии массивов пород. Следовательно, необходима разработка методов контроля состояния пород и физических процессов.

Физические параметры пород не являются константами, ими можно управлять. Например, свойства пород могут меняться при нагреве, охлаждении, насыщении их жидкостями, воздействии на них электрического тока и т. д. Поэтому возникает проблема исследования результатов таких воздействий на породу.

Развитие физики горных пород вызвано потребностями горного производства в изучении физических процессов, происходящих в массивах пород. Успешное удовлетворение этих потребностей возможно лишь при условии усвоения горными инженерами знаний о физических свойствах горных пород, методах прогноза свойств и управления ими, а также овладения принципами физического воздействия на горные породы с целью их эффективной разработки.

# 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ В ФИЗИКЕ ГОРНЫХ ПОРОД

## 1.1 Минералы, горные породы и полезные ископаемые

### 1.1.1 Минералы и горные породы

**Минерал** – однородное по составу и строению химическое соединение или самостоятельно существующий химический элемент в твердом агрегатном состоянии, возникшие в земной коре в результате физико-химических процессов. Многие исследователи под минералом понимают природное тело, приблизительно однородное по химическому составу и физическим свойствам, возникшее в земной коре в результате физико-химических процессов.

Минеральное образование – химическое соединение или смесь химических соединений в любом агрегатном состоянии, возникшие в земной коре в результате физико-химических процессов.

Минеральный агрегат – характерный по составу, форме, размеру и строению сросток минералов, обусловленный их генезисом.

Процессы и условия образования минералов очень сложны и чрезвычайно разнообразны, в результате чего минералы делят на три группы: эндогенные, экзогенные и метаморфические.

**Эндогенные минералы** образуются в недрах земной коры при высоких значениях температуры и давления, обладают в основном сравнительно большими значениями плотности, твердости и стойкости к воде, кислотам, щелочам.

**Экзогенные минералы** образуются в поверхностном слое земной коры, где протекают сложные процессы взаимодействия литосферы с гидросферой, атмосферой и биосферой. При этом минералы образуются на суше, а также путем выпадения их из водных растворов (озер, морей и др.) за счет жизнедеятельности организмов и растений, весьма разнообразны по своим свойствам, большей частью имеют сравнительно низкую плотность и твердость, некоторые активно взаимодействуют с водой.

**Метаморфические минералы** образуются в процессе изменения первоначального состава и перекристаллизации ранее образовавшихся минералов (эндогенных и экзогенных) под воздействием высоких давлений и температур, а также газов и воды.

Природные минеральные образования земной коры неорганического и органического происхождения, которые могут быть эффективно использованы в сфере материального производства либо для извлечения химических элементов и их соединений, называют полезными ископаемыми.

Месторождение полезных ископаемых – скопление минерального вещества на поверхности или в недрах Земли, по количеству, качеству и условиям залегания пригодное для промышленного использования.

По физическому состоянию минералы и, соответственно, полезные ископаемые делят:

- на **твердые** (угли ископаемые, горючие сланцы, торф, рудные и нерудные);
- **жидкие** (нефть, минеральные воды);
- **газообразные** (газы природные горючие и инертные).

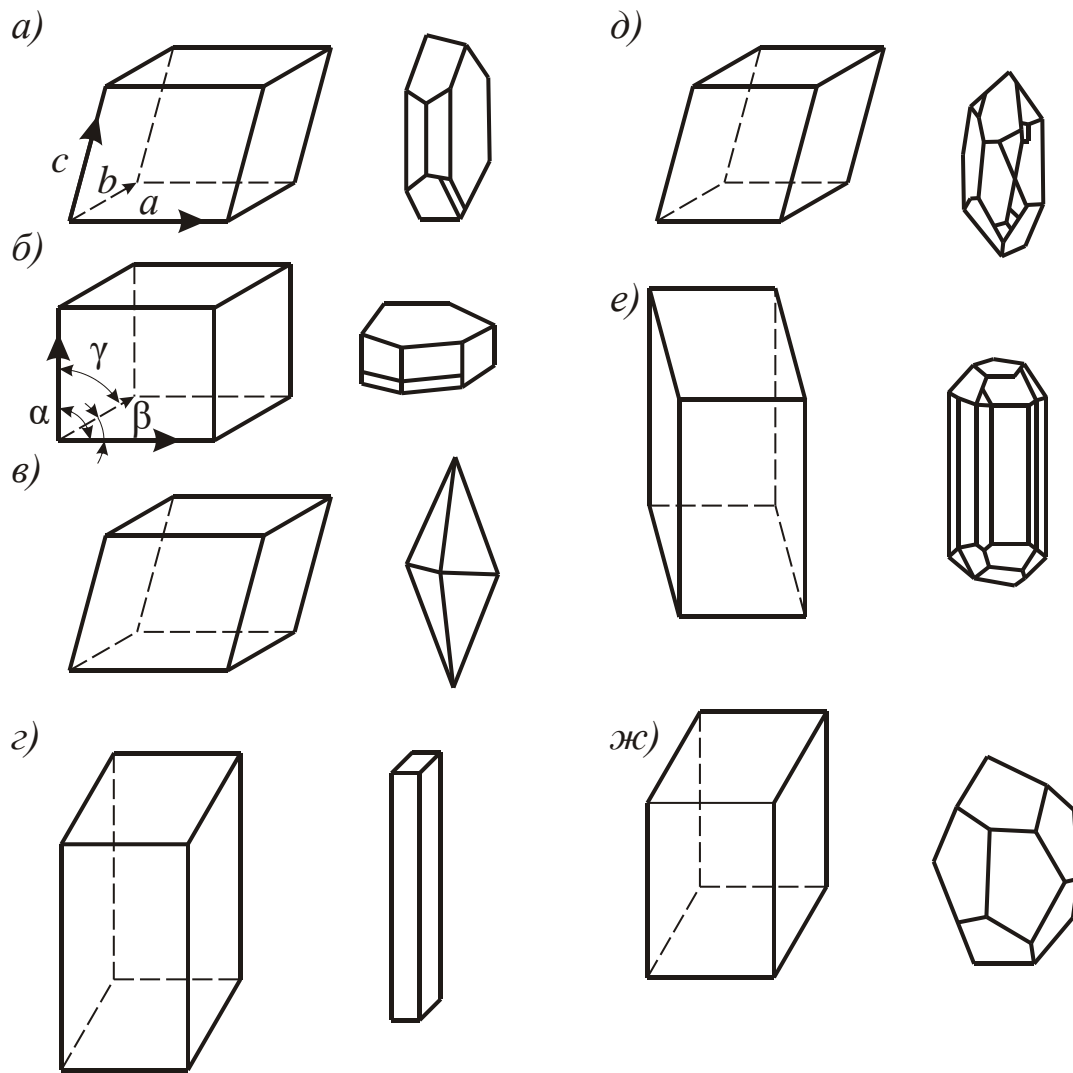
Минералы различают по их химическому составу, внутреннему строению и физическим свойствам.

Основным фактором, определяющим свойства минералов, является их химический состав, в зависимости от которого выделяют шесть основных групп: самородные элементы, сульфиды (соли сероводородной кислоты), оксиды, силикаты, соли кислородных кислот, галоидные соединения. Всего известно около 3 000 различных минералов.

По внутреннему строению твердые минералы бывают кристаллическими и аморфными. Подавляющее большинство минералов имеет кристаллическое строение, которое характеризуют тем, что образующие их частицы (атомы, ионы, радикалы) расположены закономерно, наподобие узлов пространственных решеток.

Известно семь типов (сингоний) кристаллических решеток, характеризующихся отношениями величин кристаллических осей (наименьших расстояний между узлами решетки в трех направлениях) и углов между ними: *триклинная, моноклинная, ромбическая, тетрагональная, тригональная, гексагональная и кубическая* (рис. 1.1).

**Горная порода** – устойчивая по составу и строению природная ассоциация одного или нескольких минералов или минеральных агрегатов.



*а* – триклинная, *б* – моноклинная, *в* – ромбическая,  
*г* – тетрагональная, *д* – тригональная, *е* – гексагональная,  
*ж* – кубическая

Рис. 1.1 – Схемы кристаллических решеток разных сингоний

В образовании горных пород основную роль играют около 30 так называемых породообразующих минералов. Это самые распространенные, наиболее устойчивые минералы из групп силикатов, окислов и алюмосиликатов.

Геологические процессы, приводящие к образованию горных пород, называют процессами породообразования или петрогенеза. По признаку происхождения (генезису) все горные породы подразделяют на магматические (базальт, габбро, гнейсы, диабаз, гранит, диорит, порфир и др.), метаморфические (гнейсы, кристаллические сланцы, мрамор и др.) и осадочные (алевролиты, аргиллиты, глины, известняки, пески, песчаники и др.).

Горные породы бывают мономинеральными и полиминеральными. Большинство из них относят к полиминеральным и характеризуют минеральным составом горной породы – количественным содержанием минералов, входящих в состав данной горной породы.

Тип и название горных пород определяют их минеральный состав и строение: форму, размеры, взаимное пространственное расположение и связь в горной породе минеральных зерен и минеральных агрегатов.

### 1.1.2 Строение, состав и состояние пород и массивов

В строении пород различают *структуру* и *текстуру*.

**Структура горной породы** – характеристика строения, определяющая размеры, форму и взаимную связь составляющих минерального агрегата.

В отечественной петрографической литературе термином «*структура*» обозначают особенности строения горной породы, определяемые степенью кристалличности, размерами, формой и взаимоотношением составных частей.

По *степени кристалличности* выделяют следующие типы структур: *полнокристаллические*, *неполнокристаллические* и *стекловатые*.

**Полнокристаллические** структуры характерны для пород, полностью сложенных кристаллическими зёрнами и не содержащих вулканического стекла.

Среди них различают равномерно- и неравномерно-зернистые.

Если отдельные кристаллы видны только под микроскопом, то в таком случае структуру называют микрокристаллической.

Полнокристаллические структуры являются типичными для интрузивных пород, которые кристаллизовались на различных глубинах в земной коре обычно на протяжении длительного времени.

**Неполнокристаллические** структуры отличаются присутствием в породе как кристаллических зёрен, так и вулканического стекла. Такое сочетание составных компонентов указывает на две фазы кристаллизации. Раннюю фазу представляют зёрна минералов, которые кристаллизовались в условиях медленного охлаждения на разных глубинах в земной коре. Поздняя фаза обычно сложена вулканическим стеклом, образовавшимся в результате быстрого охлаждения расплава, насыщенного кристаллами.



**Стекловатые** структуры также характерны для эффузивных пород, практически полностью сложенных аморфным вулканическим стеклом, не действующим на поляризованный свет. Они возникают в процессе излияния лавовых расплавов, имеющих температуру выше начала кристаллизации минеральных индивидов.

При рассмотрении структур *по размерам составных частей* следует различать структуры, выделяемые по *абсолютным размерам* составных частей, и структуры, выделяемые по *относительным размерам* минеральных зерен, слагающих породу.

По *абсолютным размерам* составных частей Д. С. Штейнберг (1957 г.) выделил следующие типы структур:

- *грубозернистая* – с размером минеральных зерен более 10 мм;
- *крупнозернистая* – с размером зерен от 5 до 10 мм;
- *среднезернистая* – с размером зерен от 2 до 5 мм;
- *мелкозернистая* – с размером зерен 1–2 мм;
- *тонкозернистая* – с размером менее 1 мм;
- *афанитовая* (скрытокристаллическая) – структура, которую выделяют среди тонкозернистых структур, когда в породе невооруженным глазом зернистость не обнаруживают, однако под микроскопом видны мелкие минеральные зерна размером менее 0,1 мм.

Приведенное разделение структур по абсолютным размерам не является общепризнанным. В связи с этим при описании пород кроме названия структуры по величине составных частей следует указывать средний размер зерен в миллиметрах.

По *относительным размерам* составных частей среди метаморфических структур выделяют:

а) *равномерно-зернистые структуры*, характеризующиеся тем, что зерна, слагающие породу, имеют близкие размеры, укладываемые в один класс размерности, например, тонкозернистый;

б) *неравномерно-зернистые структуры*, характеризующиеся присутствием зерен, резко отличающихся друг от друга по размерам и представляющих разные классы размерности.

В качестве примеров здесь могут служить:

➤ *порфировая структура* – в общую кристаллическую или стекловатую массу вкраплены крупные зерна;

➤ *обломочная структура* – порода сцементирована из обломков.

Зерна в породе могут быть соединены между собой либо непосредственно гранями, либо с помощью цементирующего вещества,

то есть тонкообломочного материала. По химическому составу цемент может быть кремнистым, известковым (карбонатным), глинистым, железистым, гипсовым, мергелистым, кальцитовым, фосфатным и др. Наибольшей прочностью обладают породы с кремнистым и железистым цементом, наименьшей – с гипсовым и глинистым.

По соотношению цементирующего материала и обломков выделяют следующие типы цементов:

- *базальный* – обломки заключены в цементирующем материале и не соприкасаются друг с другом;
- *поровый* – зерна соприкасаются друг с другом, а цемент заполняет промежутки между зернами;
- *контактный* – цемент присутствует только на контакте зерен, а промежутки между зернами не заполнены;
- *пленочный* – цемент покрывает тонким слоем все обломки, связывая их между собой, часть пор между зернами остается незаполненной.

Из описанных типов цементов наибольшую прочность связи обеспечивает базальный цемент, наименьшую – контактный.

**Текстура горной породы** – характеристика строения горной породы, определяющая взаимное расположение и ориентировку минеральных агрегатов горной породы.

Характер текстур связан преимущественно с геологическими условиями формирования пород и в меньшей степени с их составом. Выделяют следующие основные типы строения (текстуры):

1) **статистический** тип строения горной породы – строение, характеризующееся отсутствием преимущественной ориентации, равномерным распределением зерен и минеральных агрегатов в горной породе;

2) **матричный** тип строения горной породы – строение, характеризующееся наличием крупных включений минеральных зерен или агрегатов в основной однородной минеральной среде;

3) **прожилковый** тип строения горной породы – строение, характеризующееся наличием в породе минералов, агрегатов или пор в виде пучков, волокон, каналов с преимущественной ориентацией;

4) **слоистый** тип строения горной породы – строение, характеризующееся чередованием прослоек различных минералов, минеральных агрегатов или плоскостей ослабления.

**Слоем** называют геологическое тело, которое имеет более или менее однородный состав и ограничено приблизительно параллельными поверхностями. Чередование слоев называют **слоистостью горных пород**.

В отечественной петрографической литературе **текстурой** называют особенности строения горной породы, определяемые взаиморасположением составных частей породы и способом заполнения ими пространства.

Текстуры подразделяют на две большие группы:

- *по взаиморасположению составных частей;*
- *по способу заполнения пространства.*

А. По **взаиморасположению составных частей** выделяются два типа текстур:

1) **однородные (массивные) текстуры** обусловлены особенностями кристаллизации, их характеризуют равномерным распределением в породе минеральных зерен различного состава, размера, формы и отсутствием их закономерной ориентировки. При этом порода во всем объеме имеет одинаковую структуру, состав. Однородные текстуры наиболее распространены в магматических и значительно реже встречаются в метаморфических породах;

2) **неоднородные текстуры** характеризуются наличием участков или слоев различного минерального состава и структуры либо ориентированным расположением минералов в породе. Неоднородные текстуры типичны для большинства метаморфических пород.

Среди неоднородных текстур выделяют многочисленные разновидности, наиболее распространенными из которых являются:

а) **сланцеватая текстура** – очень широко распространена, ее характеризуют более или менее параллельная ориентировка некоторых минералов и наличие субпараллельных плоскостей сланцеватости, по которым породу легко разбить на отдельные пластинки. В зависимости от формы преобладающих минералов выделяют следующие разновидности сланцеватых текстур:

➤ **плоскопараллельная сланцеватая текстура** – отличается наличием в породе довольно совершенных субпараллельных плоскостей, вдоль которых располагаются пластинчатые и чешуйчатые минералы;

➤ **линейно-сланцеватая текстура** – возникает в породах, сложенных удлинёнными минералами, ориентированными субпа-

раллельно. При таком типе текстуры плоскости сланцеватости выражены менее отчетливо;

➤ **плосковолнистая сланцеватая текстура** – представлена волнистой поверхностью плоскостей сланцеватости, обусловленной наличием в породе субпараллельно ориентированных изгибающихся чешуйчатых минералов;

б) **очковая, или линзовидная, текстура** – отличается наличием в породе отдельных округлых либо линзовидных зерен или их скоплений, ориентированных согласно сланцеватости.

Б. По **способу заполнения пространства** выделяют два типа текстур с несколькими разновидностями:

1) **плотная (компактная) текстура**, характеризуемая тем, что магматическая масса целиком заполняет пространство, ею занятое. При этом горная порода состоит из составных частей, которые тесно соприкасаются между собой и не содержит каких-либо пор или пустот;

2) **пористая текстура** типична для эффузивных пород, отличается присутствием в породе пор и пустот обычно округлой и эллипсоидальной формы, иногда они принимают трубчатый вид. В кислых эффузивных породах поры и пустоты преимущественно обнаруживают неправильную форму вследствие большей вязкости таких лав.

Выделяют различные виды пористых структур.

**Шлаковую текстуру** выделяют при наличии в породе обильного количества пор и пустот, не заполненных вторичными минералами.

**Миндалекаменную текстуру** выделяют в том случае, когда поры и пустоты в эффузивных породах оказываются заполненными более поздними вторичными минералами. Выполнение миндалин может быть представлено весьма разнообразными низкотемпературными минералами (кальцитом, хлоритом, эпидотом, кварцем, халцедоном, цеолитами).

**Миароловую текстуру** встречают в крупно-, грубозернистых интрузивных породах и характеризуют наличием полостей либо неправильных угловатых пустот, ограниченных гранями кристаллических зерен. Миароловые пустоты часто выполнены более поздними минералами, образовавшимися из остаточных расплавов. Однако иногда они остаются ничем не заполненными.

*Шаровую текстуру* наблюдают сравнительно редко в некоторых интрузивных породах (гранитах, диоритах и габбро). Ее характеризует наличие шаровых и эллипсоидальных образований, часто имеющих концентрически-зональное строение и скорлуповатую отдельность, которые отчетливо выделяются на фоне кристаллически зернистой основной массы породы.

*Подушечную текстуру* наблюдают в породах, образовавшихся при подводном излиянии лавовых расплавов. Такие породы сложены сфероидальными, округлыми шаровидными телами размером до 1 м, которые сцементированы осадочным материалом либо вторичными продуктами.

## 1.2 Физико-технические свойства горных пород

Минеральный состав и строение, а также многофазность горных пород определяют различное их поведение при воздействии нагрузок, тепла, электрического поля, т. е. различные их физические свойства.

Под **физическим свойством** породы понимают ее особое поведение (ответную реакцию) при воздействии на нее определенных физических полей или сред.

Численно каждое физическое свойство породы оценивается одним или несколькими параметрами (показателями, характеристиками), являющимися количественной мерой свойства.

Свойства пород и соответствующие им параметры, характеризующие ответную реакцию пород на воздействие определенными инструментами (например, буровыми), механизмами или технологическими процессами (например, взрывами), называют **горно-технологическими**.

Всю совокупность физических и горно-технологических параметров пород, описывающих их поведение в процессах разработки, принято называть **физико-техническими параметрами**.

Факторы, обуславливающие численное значение тех или иных физико-технических параметров горных пород и минералов и их изменчивость, подразделяют на две группы.

Это **внутренние** факторы, своей сущностью связанные с породой (минералом) и определяющие ее название (минеральный состав и строение – для пород, химический состав и кристаллическая решетка – для минералов), и **внешние** (различные физические поля,

внешнее воздействие, окружающие и проникающие в породу среды), обобщенно называемые **внешним полем**.

В физике горных пород под понятием «внешнее поле» подразумевают тот вид энергии или вещества, под воздействием которого в данный момент находится порода.

Физико-технические параметры подразделяют по виду соответствующих внешних полей, вызывающих ответную реакцию породы.

Исходя из этого, выделяют **механическое поле** (давление) и соответствующие ему механические свойства пород, **тепловое поле** (температура, тепловой поток) и тепловые свойства, **электрическое, магнитное и радиационное поля** и такие же свойства пород. Кроме того, существует еще **вещественное поле** (флюиды) и соответствующие ему гидравлические и газодинамические свойства.

Воздействие знакопеременных нагрузок на горные породы описывается акустическими свойствами, воздействие электромагнитных волн – электромагнитными свойствами. Как те, так и другие связаны с волновыми процессами и поэтому могут быть объединены в общую группу волновых свойств.

Как следует из определения, **горно-технологические параметры** соответствуют конкретным условиям и средствам воздействия на породы.

Горно-технологические параметры пород подразделяются на несколько групп по принципу принадлежности к определенным процессам технологического воздействия:

- 1) характеризующие общую разрушаемость пород механическим способом, например, твердость, крепость, вязкость, дробимость;
- 2) характеризующие разрушаемость пород определенными механизмами, например буримость, сопротивляемость резанию, экскавируемость, зарубаемость, взрываемость, удельные усилия внедрения;
- 3) оценивающие воздействие пород на инструмент, например, абразивность;
- 4) оценивающие качество полезных ископаемых, например, коксуемость для углей, морозостойкость и термостойкость для строительного камня;
- 5) устанавливающие производительность или эффективность иных процессов воздействия на горные породы (кроме разрушения), например, обогатимость, флотуруемость, устойчивость в отвалах;

б) определяющие особое поведение пород при разработке месторождений полезных ископаемых, например, выбороопасность, метаноносность, самовозгораемость и др.;

7) оценивающие эффективность воздействия на горные породы различными немеханическими методами с целью их разрушения, упрочнения, плавления и т. д., например, термобуримость, критерий эффективности нагрева токами высокой частоты, электротермомеханическая разрушаемость и др.

Физико-технические параметры, описывающие объемный, накопительный процесс, являются **скалярными** и не зависят от направления действия внешнего поля (например, плотность, теплоемкость).

Остальные параметры зависят от направления поля действия и степени ориентации минеральных частиц и поэтому в общем виде описываются векторами и тензорами. Они называются тензорными.

### **1.3 Классификации горных пород по физическим и физико-техническим свойствам**

#### **1.3.1 Классификация пород по физическим свойствам**

Известны различные классификации пород по одному или двум физико-техническим параметрам. Горные породы в них разделяются на группы по величине параметров. Это так называемые частные классификации, пригодные только при рассмотрении конкретных свойств и конкретных, заранее внесенных в классификацию пород. К ним относятся, например, классификации пород по пористости, плотности, крепости, буримости, взрываемости и т. д. В них не выделены исходные факторы, определяющие свойства пород.

Существующие общие *петрографические* и *генетические* классификации магматических, осадочных и метаморфических пород основаны на разделении породы по минеральному составу и структурно-текстурным особенностям. Такие классификации предназначены для диагностики горных пород, выявления и систематизации их петрографических особенностей. Они позволяют установить по известным признакам (строению и составу) неизвестное – название породы. Хотя по названию породы и можно в какой-то мере судить о ее физических свойствах, однако для систематизации горных пород по физическим свойствам петрографические классификации непригодны из-за неоднозначности оценки свойств по ним.

Обобщенная классификация горных пород по всему комплексу физико-технических параметров должна базироваться на таких классификационных признаках, которые оказывают определяющее влияние на свойства пород.

Если все горные породы объединить в группы по основным внутренним факторам, то этим будут predeterminedены и численные значения физических параметров каждой такой группы пород, т. е. будет достигнута задача классификации горных пород по физическим свойствам.

Для этих целей выделены основные признаки состава и строения, по которым целесообразно группирование горных пород.

Так, по минеральному составу выделены 20 минералов, оказывающих основное влияние на свойства горных пород (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Основные минералы, обуславливающие физические свойства горных пород

<b>Минералы</b>	<b>Код</b>	<b>Минералы</b>	<b>Код</b>
Кварц	01	Гипс	11
Полевые шпаты	02	Галоиды	12
Оливин	03	Глинистые	13
Пироксены	04	Слюда	14
Доломит	05	Сера	15
Роговая обманка	06	Хлорит, тальк	16
Апатит	07	Углеродистые	17
Серпентин	08	Магнетит	18
Кальцит	09	Другие железорудные	19
Нефелин	10	Другие рудные	20

По строению горные породы подразделены на группы в соответствии с таблицей 1.2.

Статистический тип строения пород количественно оценивают по размерам и неоднородности в размерах зерен и пор. Эти породы изотропны. Породы матричного строения, у которых включения или пустоты изометричны, также практически изотропны.

Породы матричного строения, у которых включения, пустоты или зоны ослабления имеют вытянутую (линейную или плоскостную) форму, анизотропны. Строение их оценивается по размерам зерен и неоднородностей в их размерах, а также по размерам прожилков, каналов, слоев и по их числу, приходящемуся на единицу объема породы.



Таблица 1.2 – Группирование пород по признакам строения

Тип пород по связям между частицами	Степень пористости	Степень изотропности	Взаимное расположение частиц (тип строения)	Подгруппа строения	Группа строения
Скальные	Непористые	Изотропные	Статистические	1.1	1
			Матричные	1.2	
		Анизотропные	Слоистые	1.3	
			Прожилковые	1.4	
	Пористые	Изотропные	Статистические	2.1	2
			Матричные	2.2	
		Анизотропные	Слоистые	2.3	
			Прожилковые	2.4	
Связные и рыхлые	Пористые	Изотропные	Статистические	3.1	3
			Матричные	3.2	
		Анизотропные	Слоистые	3.3	
			Прожилковые	3.4	

Если построить классификационное поле, на котором по горизонтали проставить перечисленные типы строения, а по вертикали – возможные сочетания двух основных минералов, то любой участок этого поля станет вполне конкретизированным по минералам и типу строения и, следовательно, по физическим свойствам (табл. 1.3).

Таблица 1.3 – Фрагмент классификации горных пород

Группа состава (коды минералов)		Подгруппа строения				
		1.1	1.3	2.3	3.1	3.2
02	01	Гранит	Гнейс	—	Аркозовый песок	—
13	02	—	—	—	Аргиллит	—
	15	—	—	—	—	Слюдистый, глинистый сланец
	17	—	—	Углистый сланец	—	—

При переходе от одной группы пород по признакам строения к другой происходит резкое изменение их состояния. Так, если

непористые скальные породы однофазные, то пористые по крайней мере двухфазные, пористые связные и рыхлые – двухфазные с сильно ослабленными связями между частицами.

Каждая группа пород в данной классификации имеет свои формулы расчета физических параметров, позволяющие прогнозировать свойства пород.

К тому же каждый участок классификационного поля может быть записан в виде соответствующего набора цифр (кода), если каждому минералу и каждому типу строения присвоить свой номер.

Приняв определенный порядок записи – вначале код основного минерала, далее код дополнительного минерала и код строения породы, – получают численную характеристику породы, определяющую ее свойства. Так, например, участок, занимаемый в классификации гранитом, записывают следующим образом: 02–01–1.1; аркозовым песком, имеющим тот же состав, – 02–01–3.1. В результате такой записи наглядно выявляются общие и отличительные признаки. Приведенные породы, например, отличаются только степенью связи частиц. Наоборот, записи каменного угля (17–13–2.3) и углистого сланца (13–17–2.3) показывают, что они отличаются, в первую очередь, преобладающим минералом.

### **1.3.2 Классификации пород по физико-техническим свойствам**

Классификация наиболее часто применяемых физико-технических свойств и параметров пород приведена в таблице 1.4. Определения параметров даны при рассмотрении соответствующих свойств горных пород в образце.

Известно более ста физико-технических параметров пород, измерить такое их количество для всех видов и разновидностей пород не представляется возможным.

С целью сопоставления разных пород, совместного их рассмотрения, анализа и классификации выделяют ограниченную группу физико-технических параметров, являющуюся минимально необходимой и достаточной для характеристики породы как физического и геологического тела и объекта горной разработки одновременно. Такие параметры горных пород носят название базовых (табл. 1.5).

К базовым отнесено 12 элементарных, исходных и независимых физических параметров, позволяющих вычислять максимальное количество других параметров пород.

Базовые физические параметры служат общим фундаментом для изучения всех пород. Поэтому их определение является обязательным.

Таблица 1.4 – Классификация наиболее часто применяемых физико-технических параметров пород

Группа свойств	Подгруппа свойств	Физические параметры	Обозначение
Плотностные	–	Плотность, объемная масса	$\rho_0, \rho$
		Удельный вес	$\gamma_0$
		Пористость (общая, эффективная)	$P, P_{эф}$
		Коэффициент пористости	$k_p$
Механические	Упругие	Модуль Юнга	$E$
		Коэффициент Пуассона	$\nu$
		Модуль сдвига	$G$
		Модуль всестороннего сжатия	$K$
		Модуль одностороннего сжатия	$M$
		Предел упругости	$\sigma_E$
	Пластические	Коэффициент пластичности	$k_{пл}$
		Модуль деформации	$E_{деф}$
	Прочностные	Предел прочности при сжатии	$\sigma_{сж}$
		Предел прочности при растяжении	$\sigma_r$
		Предел прочности при сдвиге	$\tau_{сдв}$
		Сцепление	$C$
		Угол внутреннего трения	$\varphi$
	Реологические	Параметры ползучести	$\alpha_p, \delta$
		Период релаксации	$t_0$
		Длительная прочность	$\sigma_{дл}$
		Предел длительной прочности	$\sigma_{\infty}$
Тепловые	Проводимость	Коэффициент теплопроводности	$\lambda$
		Температуропроводность	$a$
	Поглощение	Удельная теплоемкость	$c$
	Воздействие	Температура и теплота плавления	$T_{пл}, Q_{пл}$
		Коэффициенты теплового расширения	$\alpha, \gamma_t$
		Температура фазовых превращений	$T_f$
Электрические	Проводимость	Удельное электрическое сопротивление	$\rho_{\varepsilon}$
		Удельная электрическая проводимость	$\sigma_{\varepsilon}$
	Поглощение	Относительная диэлектрическая проницаемость	$\sigma_r$
		Тангенс угла диэлектрических потерь	$tg\delta$
	Воздействие	Пробивная напряженность (электрическая прочность)	$E_{\varepsilon.п}$

Продолжение таблицы 1.4

Группа свойств	Подгруппа свойств	Физические параметры	Обозначение
Магнитные	Поглощение	Остаточная намагниченность	$I_{\text{ост}}$
		Магнитная проницаемость	$\mu$
		Магнитная восприимчивость	$\chi$
	Воздействие	Температура Кюри	$T_c$
		Коэрцитивная сила	$H_c$
Волновые	Акустические	Скорости распространения волн	$v_P, v_S, v_L$
		Коэффициент поглощения	$\theta$
		Удельное волновое сопротивление	$z$
		Коэффициент отражения	$k_{\text{отр}}$
		Коэффициент преломления	$n$
		Критический угол полного внутреннего отражения	$i$
	Электромагнитные	Скорости распространения волн	$v, c$
		Коэффициент поглощения	$\theta_{\text{эм}}$
		Коэффициент отражения	$K_n$
		Коэффициенты преломления	$n_{\Gamma}, n_n$
		Волновое сопротивление	$z_{\text{эм}}$
Радиационные	Естественные	Естественная радиоактивность	$\Gamma_{\text{акт}}$
	Поглощение	Коэффициенты поглощения	$\theta_p, \theta_{\Gamma}$
		Эффективные сечения рассеяния и поглощения	$\Sigma_p, \Sigma_{\text{э}}$
	Проводимость	Длина замедления нейтронов	$L_z$
		Время замедления нейтронов	$t_z$
Гидрогазодинамические	Поглощение	Влагоемкость	$\omega_p, \omega_m, \omega_k$
		Коэффициент водонасыщенности	$k_{\text{вн}}$
		Коэффициент водоотдачи	$\xi$
	Проводимость	Коэффициент проницаемости	$k_{\text{пр}}$
		Коэффициент фильтрации	$k_{\text{ф}}$
	Воздействие	Коэффициент растворимости	$k_{\text{раст}}$
		Коэффициент набухания	$k_n$
		Коэффициент водопрочности	$\eta_p$
Горно-технологические	Общие	Показатель трудности разрушения	$\Pi_{\text{тр}}$
		Коэффициент крепости	$f$
		Твердость	$H, p_k, p_{\text{ш}}$
		Коэффициент абразивности	$k_{\text{аб}}$
		Дробимость	$D$
		Коэффициент трения	$f_{\text{тр}}$
	Частные	Взрываемость	$q, q_{\text{э}}$
		Удельное усилие резания	$K_F$
		Показатель трудности бурения	$\Pi_6$
		Экスカвируемость	$\Pi_3$

Таблица 1.5 – Базовые физико-технические параметры горных пород

Свойства	Основные параметры	Обозначение	Ед. изм.	Определение	Пределы изменения
Плотностные	Объемная масса	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	Масса единицы объема сухой горной породы с естественной ненарушенной структурой (с порами, трещинами и т. д.)	1500–3000
	Пористость	$P$	%	Относительный объем всех пор, заключенных в единице объема породы	1,5–3,0
Механические	Предел прочности при сжатии	$\sigma_{сж}$	Па	Критическое значение одноосного сжимающего напряжения, при котором происходит разрушение породы	$10^7$ – $3 \cdot 10^8$
	Предел прочности при растяжении	$\sigma_{сж}$	Па	Критическое значение одноосного растягивающего напряжения, при котором происходит разрушение породы	$0$ – $2 \cdot 10^7$
	Модуль продольной упругости (модуль Юнга)	$E$	Па	Коэффициент пропорциональности между действующим нормальным напряжением и соответствующей ему продольной упругой деформацией	$10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$
	Коэффициент Пуассона	$\nu$	–	Коэффициент пропорциональности между продольными и поперечными деформациями при одноосной нормальной нагрузке (отношение относительных поперечных деформаций к продольным)	0,1–0,45
Тепловые	Коэффициент теплопроводности	$\lambda$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	Количество тепла, проходящего вследствие теплопроводности через 1 м <sup>2</sup> поверхности в единицу времени при разности температур 1 К, приходящейся на 1 м длины нормали к изотермической поверхности.	0,2–12

Продолжение табл. 1.5

Свойства	Основные параметры	Обозначение	Ед. изм.	Определение	Пределы изменения
	Удельная теплоемкость	$c$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$	Количество тепла, необходимое для повышения температуры 1 кг вещества на 1 K	$(0,5-1,5) \cdot 10^3$
	Коэффициент линейного теплового расширения	$\alpha$	$\text{K}^{-1}$	Относительное удлинение тела при нагреве его на 1 K	$2 \cdot 10^{-6}-10^{-4}$
Электро-магнитные	Удельное электрическое сопротивление	$\rho_{\text{э}}$	Ом·м	Величина, обратная силе тока, проходящего через 1 м <sup>2</sup> площади образца при напряженности электрического поля в образце, равной 1 В/м	$10^{-3}-10^8$
	Относительная диэлектрическая проницаемость	$\varepsilon_r$	—	Коэффициент, показывающий, во сколько раз уменьшается напряженность электрического поля при внесении в него породы	2–30
	Относительная магнитная проницаемость	$\mu$	—	Коэффициент, показывающий, во сколько раз магнитная индукция поля изменяется при помещении в него образца по сравнению с полем в вакууме	

## 1.4 Физические процессы в горных породах

Как видно из раздела 1.3, наряду с минеральным составом и строением физико-технические свойства пород определяются внешними условиями, в которых находится порода, – внешними полями.

Каждое поле оценивается рядом величин: напряженностью, интенсивностью и т. д.

Так, **механическое поле** характеризуется величиной нагрузок и напряжений, создаваемых в породе, длительностью их действия, характером изменения во времени, направлением (растягивающие, сжимающие, сдвигающие нагрузки), распределением в горной породе: сосредоточенным, линейным, плоским, объемным.

Как особый случай механического поля выделяют **акустическое поле** – распространение в породах упругих волн, по существу, тех же механических нагрузок, быстро меняющихся по направлению, во времени и характеризующихся интенсивностью, амплитудой и частотой колебаний.

**Тепловое поле** описывается температурой, градиентом температуры, тепловым потоком, направлением теплового потока, изменением его во времени, распределением температур и теплового потока в объеме породы.

**Электрическое и магнитное поля** оцениваются по напряжению и напряженности, по величине магнитной и электрической индукции и плотности потока.

**Электромагнитное поле:** распространение в породах электромагнитных волн характеризуется теми же параметрами, что и в электрическом и магнитном полях, и дополнительно частотой колебаний.

**Радиационное поле** описывается интенсивностью, типом микрочастиц, обуславливающих поле, частотой колебаний (в случае волновой природы поля), энергией квантов.

**Вещественное поле**, чаще всего представленное водой или природными газами, оценивается по давлению, создаваемому полем (напору – в случае воды), градиенту давления, вязкости, химическому составу.

**Физические поля** в породах могут быть естественными (природными) и искусственными.

**Естественные поля** – это исходное горное давление, тепловое поле, водонасыщенность пород, радиационное поле.

**Искусственные внешние поля** либо возникают при ведении горных работ (блуждающие электрические токи, повышенные температуры в забое скважины при бурении, динамические нагрузки на ближайшие массивы при взрывании и т. д.), либо создаются преднамеренно с целью воздействовать на состояние породы и ее свойства.

Физические процессы в горных породах – это явления взаимодействия физического поля с горной породой, в результате которого в породе возникают и протекают различные изменения ее состава, строения и состояния.

Физические свойства и параметры пород, характеризующие эти процессы, можно подразделить на три большие группы.

В первую группу входят параметры, оценивающие **обратимые изменения количества энергии** или **вещества** внутри породы (ее повышение или понижение под воздействием внешних полей). К ним относятся, например, модуль объемного сжатия  $K$ , характеризующий накопление потенциальной упругой энергии в породе при всестороннем ее сжатии; диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$ , определяющая емкость пород; удельная теплоемкость  $c$ , оценивающая способность породы накапливать тепло; влагоемкость  $\omega$ , характеризующая способность породы накапливать воду, и т. д.

Большинство этих параметров имеют статический, накопительный характер и поэтому являются скалярными.

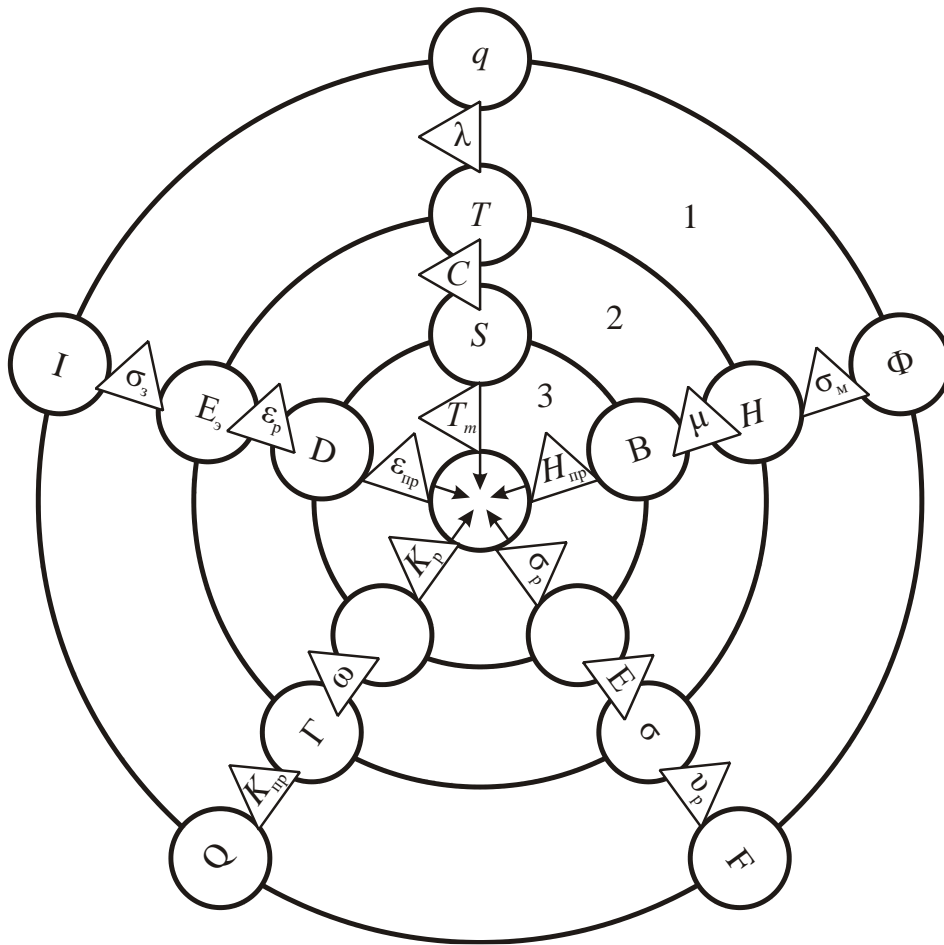
К параметрам второй группы, оценивающим **необратимые превращения** данного вида энергии в породах в другой вид, относятся коэффициент пластичности  $k_{пл}$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\tan \delta$ , удельная теплота плавления  $Q_{пл}$ , коэффициенты поглощения упругих и электромагнитных волн  $\theta$ , пределы прочности  $\sigma_{сж}$ ,  $\sigma_r$ , коэффициенты теплового расширения  $\alpha$ ,  $\gamma_t$ , электрическая  $E_{пр}$  и магнитная  $H_{пр}$  прочность и др.

К параметрам третьей группы, описывающим процессы **передачи энергии**, а также **перемещения жидкости и газов** в породах, относятся коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , удельная электропроводность  $\sigma_z$ , магнитная проводимость  $\sigma_m$ , коэффициенты преломления  $n$  и отражения  $k_{отр}$  волн, коэффициенты проницаемости  $k_{пр}$  и фильтрации  $k_f$  и т. д. Все эти параметры зависят от направления измерения и приложения поля, т. е. являются четко выраженными тензорными величинами.

Взаимосвязь между процессами перемещения, поглощения энергии или вещества, изменения состояния пород и их свойств



вами может быть представлена в виде соответствующей диаграммы (рис. 1.2).



1 – область проницаемости; 2 – область поглощения;  
3 – область необратимых изменений и разрушения

Рис. 1.2 – Обобщенная схема природы и взаимосвязей физических свойств горных пород

Физические процессы в породах могут быть первого рода – когда они вызваны наличием в породе минералов, обладающих соответствующими эффектами, обусловленными их химическим составом и строением кристаллической решетки, и второго рода – возникающие в породе в результате особого состояния и сочетания минералов, которые сами по себе не имеют рассматриваемых эффектов.

К первому роду относится, например, эффект возрастания модуля упругости кварцсодержащей породы при температуре свыше 573 °С (за счет полиморфного перехода кварца), ко второму – внутренние межзеренные термонапряжения при равномерном нагреве породы, обусловленные различными упругими и тепловыми свойствами минералов, слагающих породу.

## 2 ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРОЦЕССЫ В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД

### 2.1 Механические свойства образцов горных пород

#### 2.1.1 Общие положения

Механические свойства, характеризующие поведение пород при воздействии механических нагрузок, подразделяются на упругие, пластические, прочностные и реологические.

**Упругие свойства** определяют поведение пород только в пределах упругой зоны, т. е. при нагрузках, после снятия которых порода возвращается в исходное состояние. Упругие смещения, возникшие в породах под воздействием кратковременных импульсов, способны распространяться по объему пород. Волновой процесс распространения таких смещений (упругих колебаний) описывается *акустическими свойствами* пород.

**Пластические свойства** пород проявляются при нагрузках, превышающих предел упругости породы, после снятия таких нагрузок порода уже не полностью восстанавливает исходную форму и размеры.

**Прочностные свойства** определяют величины разрушающих нагрузок в породах.

**Реологические свойства** оценивают изменения деформаций, напряжений и перечисленных выше механических параметров пород во времени – при длительных воздействиях нагрузок.

#### 2.1.2 Плотностные свойства пород

Масса единицы объема твердой фазы (минерального скелета) минерала или породы называется ее плотностью  $\rho_0$ .

Минералы делятся на тяжелые ( $\rho_0 > 4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ), средние ( $\rho_0 = (4-2,5) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ) и легкие ( $\rho_0 < 2,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ); 13 % всех минералов относятся к легким, 33,8 % – к тяжелым, 53,2 % – к средним.

Плотность горных пород определяется плотностью слагающих породы минералов  $\rho_{0i}$ . Она может быть рассчитана по формуле

$$\rho_0 = \sum_{i=1}^n \rho_{0i} V_i,$$

где  $n$  – число минералов, составляющих породу;  $V_i$  – доля объема, занимаемого каждым минералом.

Масса единицы объема породы в ее естественном состоянии отличается от  $\rho_0$ ; такое отличие обусловлено, в первую очередь, пористостью.

Поэтому наряду с плотностью используют понятие объемной массы  $\rho$ . **Объемной массой** называется масса единицы объема сухой породы при данной пористости в ее естественном состоянии. Плотность пород всегда больше их объемной массы. Связь между объемной массой и плотностью выражается через пористость

$$\rho = \rho_0(1 - P)$$

или

$$\rho_0 = \rho(1 + k_{\Pi}),$$

где  $P$  – общая пористость, доли единицы.

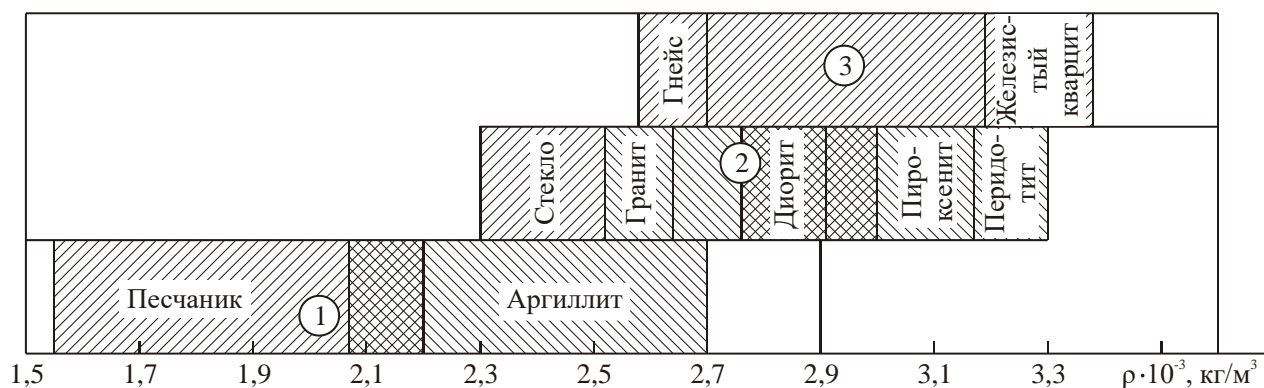
Если порода сложена из минералов примерно одинаковой плотности, ее объемная масса в основном зависит от пористости. Например, объемная масса известняков может меняться от  $1,5 \cdot 10^3$  до  $2,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, в то время как плотность слагающего известняк кальцита равна  $2,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Объемная масса малопористых пород зависит в основном от их минерального состава. Так, у магматических пород наблюдается увеличение объемной массы с уменьшением содержания кварца, поскольку кварц обладает меньшей плотностью ( $2,65 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>), чем железисто-магнезиальные минералы (оливин, пироксены, роговая обманка, биотит и т. д.), слагающие магматические породы.

Объемная масса большинства пород колеблется от  $1,5 \cdot 10^3$  до  $3,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> (рис. 2.1). Большой объемной массой обладают руды, так как в их состав входят тяжелые рудные минералы: гематит, магнетит, сидерит, киноварь. Плотность кристаллических пород на 44 · 10 % больше плотности аналогичных им по составу аморфных пород (стекол).

Низкую объемную массу имеют гидрохимические осадки: гипс ( $2,3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) и каменная соль ( $2,1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>). Весьма низкими значениями объемной массы  $(0,72-2) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> обладают каменные угли и торф. Объемная масса углей определяется их пористостью, содержанием углерода и наличием минеральных примесей. Так как углерод имеет плотность  $2,3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, увеличение степени углефи-

кации приводит к росту объемной массы углей. Этому способствует также то, что при переходе к более метаморфизованным углям (бурые угли – газовые угли – антрацит) наблюдается снижение пористости.



1 – осадочных; 2 – изверженных; 3 – метаморфических

Рис. 2.1 – Пределы изменений объемной массы пород

Вес единицы объема твердой фазы породы называется удельным весом  $\gamma_0$  породы, а вес единицы объема сухой породы в естественном пористом состоянии – объемным весом  $\gamma$ . Удельный вес породы и ее плотность связаны соотношением

$$\gamma_0 = \rho_0 g ,$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

Удельные и объемные веса породы – параметры силовые, поэтому они должны применяться только в тех случаях, когда рассматриваются силы, вызванные действием гравитационного поля, например горное давление. В случаях, когда оценивают количество вещества, используют плотность и объемную массу.

Отношение объемной массы породы к ее плотности, характеризующее степень заполнения объема горной породы минеральным веществом, иногда называют коэффициентом плотности.

### 2.1.3 Напряжения и деформации в породах

Как известно из физики твердого тела, между ионами в кристаллической решетке любого вещества существуют силы взаимного притяжения и силы взаимного отталкивания. Именно благодаря этому при воздействии на породу внешних сил, стремящихся сдвинуть с нейтрального положения ионы в решетке вещества в одну или

другую сторону, в породе возникают внутренние силы, противодействующие внешним.

Поверхностная плотность внутренних сил называется **напряжением**  $\sigma$ ; оно, как и сила, – величина векторная:

$$\sigma = \frac{dF}{dS},$$

где  $dF$  – сила, действующая на элемент площадки  $dS$ .

Напряжение в системе СИ выражается в паскалях, Па:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ кг/(мс}^2\text{)}.$$

Если внешние силы действуют на породу только в направлении одной оси, то они вызывают в ней **одноосное** напряженное состояние, а действующие в направлении двух осей – **плоское** напряженное состояние. Действие сил по трем осям приводит к **объемному** напряженному состоянию породы, которое в случае равенства всех сил называется гидростатическим.

Напряжения, направленные перпендикулярно к рассматриваемой площадке  $S$ , – **нормальные** ( $\sigma$ ); напряжения, возникающие вдоль площадки  $S$ , – **касательные** ( $\tau$ ). Напряженное состояние твердого тела в любой плоскости можно охарактеризовать действующими в ней нормальными и касательными напряжениями. Если из тела, находящегося в напряженном состоянии, выделить элементарный кубик, то в общем случае на каждой его грани можно выявить по три вектора напряжений: два взаимно перпендикулярных касательных и один нормальный (рис. 2.2).

В итоге внутреннее напряженное состояние рассматриваемого объема породы будет описываться девятью компонентами (векторами) напряжений. Все вместе они представляют собой **тензор напряжений**  $S_{ij}$  второго ранга, записываемый в следующем виде:

$$S_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix} = \rho_{ik} n_i,$$

где  $\rho_{ik}$  – совокупность девяти напряжений, нормальных (при  $i = k$ ) и касательных (при  $i \neq k$ ) относительно трех взаимно перпендикулярных площадок в одной точке;  $n_i$  – единичный вектор, нормальный

к соответствующей рассматриваемой площадке;  $i, k$  – индексы обозначения осей координат  $x, y, z$ .

В этом тензоре любые два касательных напряжения  $\tau$ , лежащие в одной плоскости и направленные противоположно, должны быть равны, поскольку тело находится в равновесии и, следовательно, полный момент сил относительно центра элементарного кубика должен быть равен нулю. Поэтому

$$\tau_{yx} = \tau_{xy}; \quad \tau_{xz} = \tau_{zx}; \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}.$$

Такой тензор называется симметричным.

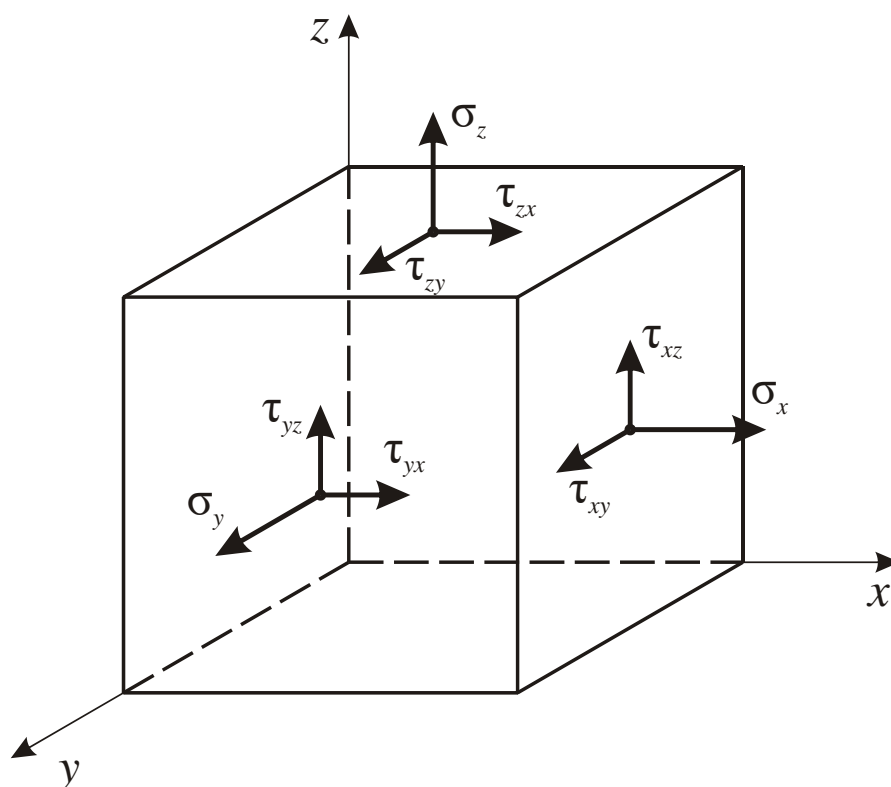


Рис. 2.2 – Компоненты напряжений в элементарном кубике породы, находящихся в сложнапряженном состоянии

Напряжения в породах могут создаваться не только действием внешних нагрузок, но и другими физическими полями. Например, **термические** напряжения вызываются неоднородным нагревом пород. После снятия воздействующего поля в породе могут быть обнаружены **остаточные** напряжения. Последние возникают, например, при неравномерном распределении напряжений из-за местной текучести материала.

Под воздействием внешних сил горная порода подвергается **деформациям** – изменению линейных размеров, объема и формы.

Деформации, соответствующие нормальным напряжениям, выражаются через относительное изменение  $\varepsilon$  линейных размеров образца и называются относительными **линейными** (рис. 2.3).

$$\varepsilon = \frac{l' - l}{l} = \frac{\Delta l}{l},$$

где  $l'$  – длина ребра  $l$  после деформирования;  $\Delta l$  – изменение длины ребра.

Линейные деформации, происходящие по направлению действующей силы, называются продольными, перпендикулярно ей – поперечными.

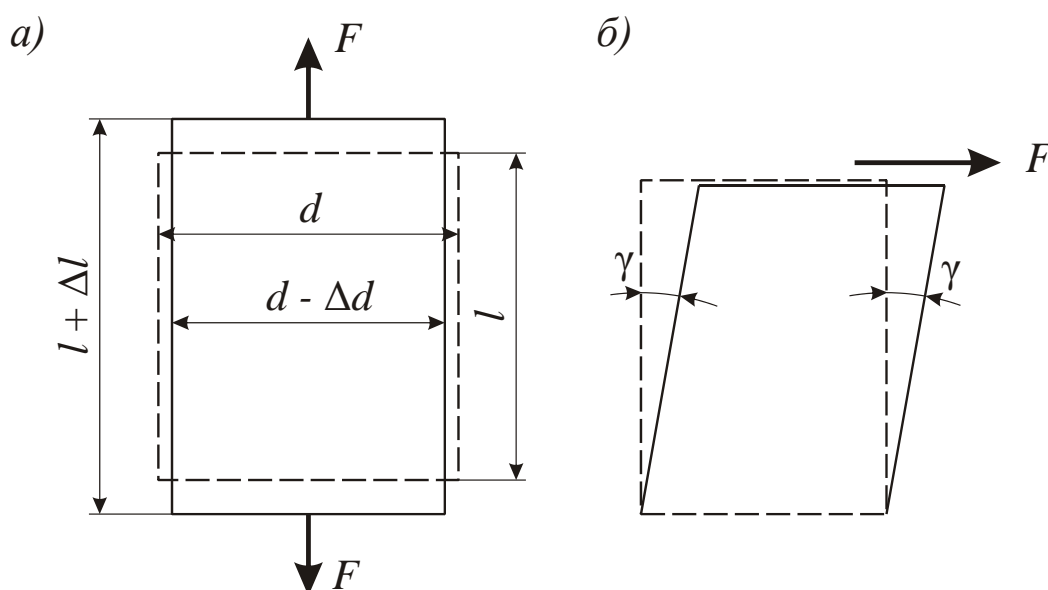


Рис. 2.3 – Деформация образца породы под действием нормальных (а) и касательных (б) сил  $F$ ;  $d$  – исходный поперечный размер образца;  $\Delta d$  – уменьшение поперечного размера образца

Деформации, соответствующие касательным напряжениям, выражаются через угол сдвига  $\gamma$  граней образца (рис. 2.4). Величина **деформации сдвига** определяется по величине  $\operatorname{tg} \gamma$ . Вследствие малости углов  $\operatorname{tg} \gamma \approx \gamma$ .

Линейные и сдвиговые деформации можно разложить на составляющие векторы по осям координат и написать **тензор деформаций**, определяющий характер деформации любой точки тела:

$$e_{kl} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_{yy} & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \left( \frac{du_l}{dx_k} + \frac{du_k}{dx_l} \right),$$

где  $u$  – общее обозначение любой деформации;  $k$  и  $l$  – индексы, обозначающие соответствующие оси координат (они могут принимать значения осей  $x, y, z$ ).

Тензор деформаций симметричный, так как противоположные сдвиговые деформации (например,  $\gamma_{xy}$  и  $\gamma_{yx}$ ) равны между собой.

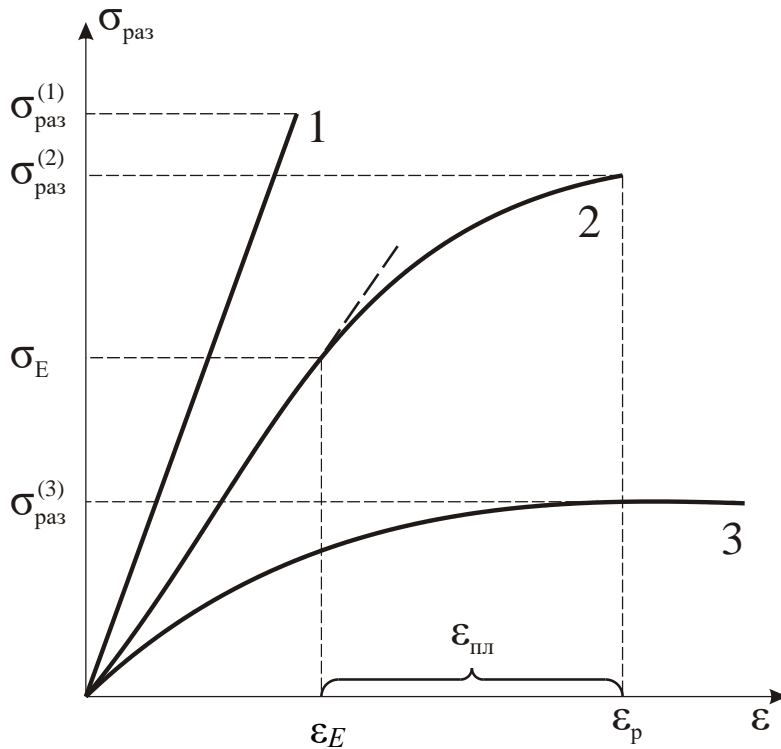
Характер и величина деформации зависят от типа и величины приложенных напряжений. Увеличение нагрузок приводит к возрастанию деформаций, и в пределе возникает **разрушение**: порода теряет свою сплошность, разделяется на части. Деформации, не приводящие к разрушению, бывают **упругие** и **пластические**. В первом случае часто наблюдается прямая пропорциональность между величинами напряжений и соответствующих им упругих деформаций. При этом в породе накапливается потенциальная энергия, которая после прекращения действия внешних сил возвращает деформированное тело в исходное состояние.

Пластические деформации находятся в значительно более сложной зависимости от напряжений. Характерной чертой пластических деформаций является их необратимость после снятия нагрузки: форма и размеры тела полностью не восстанавливаются.

При увеличении напряжений можно постепенно наблюдать все три вида деформаций породы: упругую  $\varepsilon_E$ , пластическую  $\varepsilon_{пл}$  и разрушающую  $\varepsilon_r$  (рис. 2.4).

В зависимости от соотношения величин этих деформаций горные породы могут быть подразделены на **упругохрупкие** (пластическая зона практически не наблюдается вплоть до разрушения), **упругопластичные** (разрушающей деформации предшествует зона пластической деформации) и **пластические** (упругая деформация практически отсутствует).





1 – упрягохрупких (кварциты); 2 – упрягопластичных (роговики);  
 3 – пластичных (мраморы);  $\sigma_{\text{раз}}^{(1)}$ ,  $\sigma_{\text{раз}}^{(2)}$ ,  $\sigma_{\text{раз}}^{(3)}$  – пределы прочности  
 пород соответственно 1, 2 и 3-го типа

Рис. 2.4 – Типичные графики деформации пород

#### 2.1.4 Прочностные свойства пород

Прочность породы определяется величиной критических напряжений, при которых происходит ее разрушение. Эти напряжения различны для разных пород и для разных видов приложенных нагрузок. Они носят названия пределов прочности. Различают пределы прочности пород при сжатии  $\sigma_{\text{сж}}$ , растяжении  $\sigma_{\text{р}}$ , сдвиге  $\tau_{\text{сдв}}$ , изгибе  $\sigma_{\text{изг}}$  и т. д.

**Разрушение** – это разрыв связей между атомами и ионами в кристаллической решетке. Величины сил, необходимых для разрыва, зависят от типа межатомных связей и строения кристаллической решетки вещества.

Расчеты показывают, что разрыв межатомных связей в какой-либо плоскости кристалла произойдет, если значения касательных и нормальных напряжений в этой плоскости будут иметь порядок

соответственно  $\frac{G}{2\pi}$  и  $0,1E$ . Исходя из этого, для пород  $\sigma_p$  должен быть примерно равен  $10^4$  МПа.

Однако реальные значения предела прочности при растяжении в сотни и тысячи раз меньше теоретических (для пород  $\sigma_p$  составляет порядка 10 МПа).

Причина таких расхождений кроется в том, что реальные тела обладают множеством различных дефектов. В кристалле – это точечные (вакансии) и линейные (дислокации) искажения кристаллической решетки. В породе – это границы зерен (плоскостные) и поры (объемные) искажения и нарушения строения породы.

В зависимости от масштаба разрушения породы преобладающее значение имеют те или другие виды дефектов.

Существует несколько масштабов (уровней) разрушения пород. **Мегаскопический уровень разрушения** характерен для взрывания массивов пород, сдвигения и обвалов их. В этом случае наиболее сильно на разрушаемости сказываются крупные трещины.

Более мелкие трещины, поры, контакты между агрегатами зерен определяют **разрушение макроскопическое** – выемочными агрегатами (экскаваторами, комбайнами), буровым инструментом.

**Микроскопический уровень** разрушения характерен для измельчения полезных ископаемых в мельницах и, частично, при бурении скважин. На этой стадии происходит разрыв связей в кристаллах и зернах. При этом существенную роль играют дислокации и вакансии.

Плотность дислокаций в кристаллах высока и может составлять до  $10^{12}$  на  $1\text{ см}^2$ . Как правило, увеличение плотности дислокаций ослабляет минералы, вызывает в них пластические деформации. Вместе с тем перенасыщенность дислокациями может привести и к упрочнению кристаллов (рис. 2.5) за счет запутывания и закрепления концов дислокаций и исчезновения свободных плоскостей скольжения.

Разрушение горных пород имеет либо хрупкий, либо пластичный характер. При хрупком разрушении происходит одновременный отрыв атомов друг от друга по всей плоскости разрыва, на что требуются большие внешние усилия, чем при пластическом.

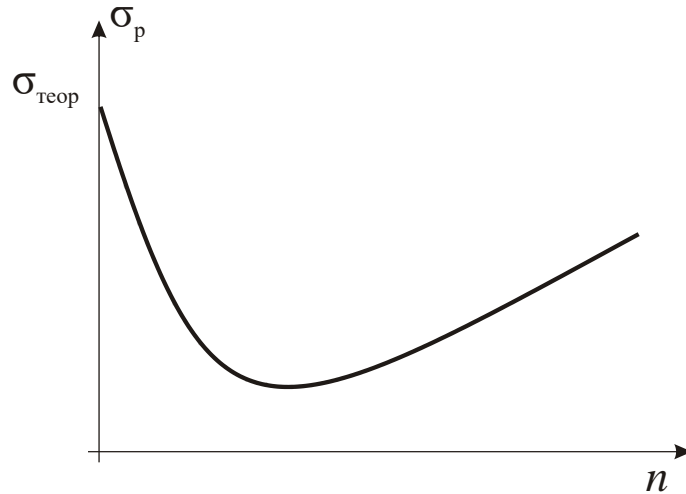


Рис. 2.5 – Зависимость предела прочности кристалла при растяжении  $\sigma_p$  от числа дислокаций  $n$  ( $\sigma_{\text{теор}}$  – теоретическая прочность)

Мелкие трещины, поры, неоднородности, плоскости ослабления определяют преобладающий хрупкий характер разрушения горных пород, поэтому механизм их разрушения может быть описан посредством **теории хрупкого разрушения**, разработанной А. Гриффитсом, согласно которой решающее значение для начала разрушения имеют **критические трещины** в объеме твердого тела.

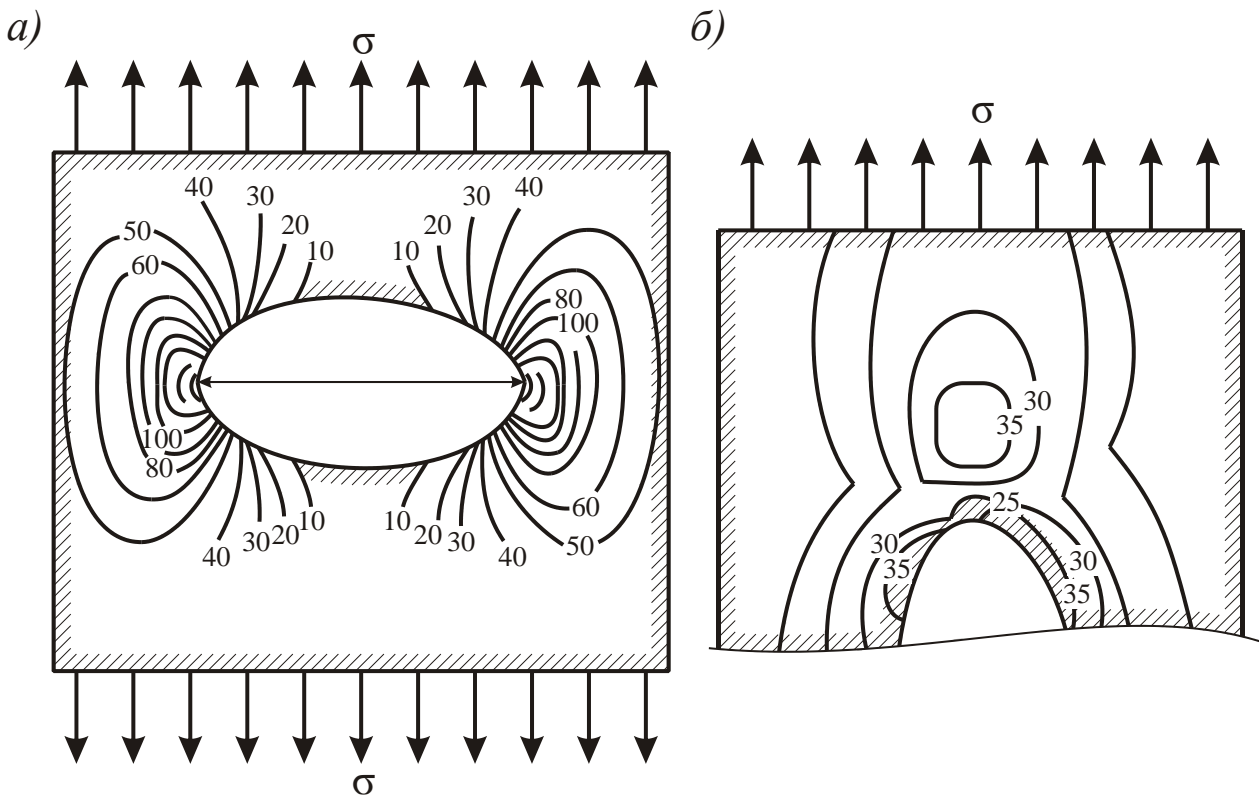
На краях трещины обычно возникает концентрация напряжений, значительно превышающая среднее напряжение  $\sigma$ . Так, при длине трещины  $2l$  и радиусе ее закругления на конце  $r$  (рис. 2.6) напряжения на краю трещины

$$\sigma' = 2\sigma\sqrt{\frac{l}{r}}.$$

Как только  $\sigma'$  станет больше предела прочности породы при растяжении в данной точке, трещина начнет развиваться, преодолевая при этом молекулярные силы сцепления (производя работу  $A_s$ , пропорциональную удельной поверхностной энергии  $\epsilon_s$  данного тела):

$$A_s = 4l\epsilon_s,$$

где  $4l$  – относительная площадь двух поверхностей трещины, приходящаяся на единицу поперечного размера породы.



*a* – при нагружении перпендикулярно трещине;  
*б* – при нагружении параллельно ей

Рис. 2.6 – Концентрация напряжений на краях трещины длиной  $2l$  и с радиусом закругления  $r$  (числа указывают кратность превышения напряжений  $\sigma'$  над  $\sigma$ )

Упругая энергия, запасенная в породе в результате действия внешней нагрузки и необходимая для образования трещины,

$$A_E = \frac{\sigma^2 \pi l^2}{E}.$$

Трещина будет расти, если

$$\frac{dA_E}{dl} \geq \frac{dA_s}{dl}.$$

Отсюда

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{2Ee_s}{\pi l}}.$$

При действии сжимающей нагрузки трещины смыкаются, и на их поверхности появляются силы трения. В результате  $\sigma_{сж} > \sigma_p$ , и их отношение подчиняется уравнению

$$\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} = 4 \left[ \left( 1 + \operatorname{tg}^2 \varphi \right)^{\frac{1}{2}} - \operatorname{tg} \varphi \right]^{-1},$$

где  $\operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент внутреннего трения ( $\operatorname{tg} \varphi = 0,2-2$ ).

Таким образом, на основании теории хрупкого разрушения получаем  $\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} = 5 \div 17$ , что в ряде случаев близко к значениям, определяемым экспериментально (табл. 2.3).

Таблица 2.3 – Соотношение пределов прочности при сжатии и растяжении (по А. М. Викторову)

Порода	$\sigma_{сж}$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа	$s_n^{\sigma_p}$ , МПа	$K_{вар}^{\sigma_p}$ , МПа	$\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p}$
Гранит	141	11,0	1,9	18	13
Гранито-гнейс	192	9,0	2,3	26	21
Порфирит	224	17,5	4,4	26	13
Песчаник кварцевый	164	6,6	2,9	44	26
Известняк брекчиевидный	28	3,0	0,6	18	9

Уравнение Гриффитса можно распространить на тела, разрушающиеся в зоне пластической деформации:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{2E(e_{sy} - e_{sn})}{\pi l}},$$

где  $e_{sy}$  и  $e_{sn}$  – удельная поверхностная энергия соответственно упругого и пластического разрушения.

**Кинетическая (термофлуктуационная) теория** разрушения твердых тел, разработанная акад. С. Н. Журковым, построена на том, что разрушение не является критическим состоянием тела. В соответствии с этой теорией в твердых телах непрерывно идет процесс накопления повреждений (старение), которое приводит к полному разрушению тел. Приложенные извне нагрузки и соответствующие напряжения лишь уменьшают длительность  $t$  существования тела в неразрушенном состоянии согласно экспоненциальному уравнению

$$t = \frac{t_0 \exp(u_0 - \sigma V)}{kT},$$

где  $t_0$  – константа, совпадающая по порядку с периодом колебаний атомов и не зависящая от химического состава структуры тела ( $t_0 \approx 10^{-12}$  с);  $u_0$  – энергия активации процесса разрушения, структурно-нечувствительная величина (для гранитов  $u_0 \approx 2,9 \cdot 10^{-19}$  Дж; для кварцитов  $u_0 \approx 5,8 \cdot 10^{-19}$  Дж);  $V$  – активационный объем, зависящий от структуры тела и составляющий  $10^3$ – $10^4$  атомных объемов (для гранитов  $V = 1,5 \cdot 10^{-27}$  м<sup>3</sup>, для кварцитов  $V = 1,9 \cdot 10^{-27}$  м<sup>3</sup>);  $kT$  – мера энергии тепловых флуктуаций;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура тела. Отсюда

$$\sigma_p = \frac{u_0 - \frac{kT \ln t}{t_0}}{V},$$

т. е. предел прочности зависит от параметров  $u_0$  и  $V$ , температуры тела и длительности действия на него нагрузки.

Эксперименты, проведенные на породах, подтверждают снижение прочности с увеличением длительности действия нагрузки (рис. 2.7).

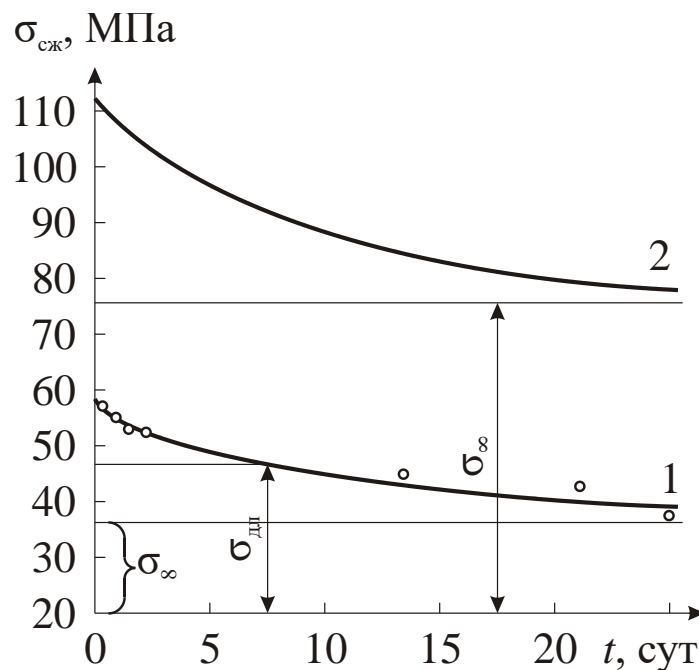


Рис. 2.7 – Кривые длительной прочности песчаного сланца Донбасса (1) и известняка (2)

Прочность пород, соответствующая той или иной длительности воздействия нагрузки, называется их **длительной (текущей) прочностью**  $\sigma_{дл}$ . С увеличением времени действия нагрузки величина  $\sigma_{дл}$

падает по кривой, асимптотически приближаясь к некоторому предельному значению, называемому **пределом длительной прочности**  $\sigma_{\infty}$  (см. рис. 2.7). Для ряда глин и мергелей Курской магнитной аномалии  $\sigma_{\infty} = 0,5\sigma_{сж}$ . Для других пород предел длительной прочности  $\sigma_{\infty} = (0,7-0,8)\sigma_{сж}$  (табл. 2.4).

Между длительной прочностью глин и временем приложения нагрузки  $t$  установлена следующая эмпирическая зависимость:

$$\sigma_{дл} = \frac{\sigma_{сж} \ln B}{t},$$

где  $B$  – константа, характеризующая стойкость породы.

Таблица 2.4 – Значения длительной прочности горных пород

Порода	$\sigma_{\infty}$ , МПа	$\sigma_{сж}$ , МПа	$\frac{\sigma_{\infty}}{\sigma_{сж}}$
Известняк	28	38	0,74
Песчаник	49	76	0,64
Каменная соль	14–22	20–35	0,60–0,75
Глинистый сланец	15–18	30–40	0,5–0,65
Мергель глинистый КМА	2,1	3,1	0,68–0,86
Глины разные	1,0	1,3	0,37–0,81
Мел	–	–	0,62–0,70
Мелоподобные породы КМА	–	–	0,36–0,52

Отношение мгновенного предела прочности при сжатии к некоторому значению длительной прочности называется **коэффициентом расслабления** (табл. 2.5).

Таблица 2.5 – Коэффициенты расслабления некоторых пород

Порода	Мгновенный предел прочности, МПа	Время действия нагрузки	Длительная прочность, МПа	Коэффициент расслабления
Глина	–	1 мес.	–	1,5
Песчаник	15,5	48 ч	8,6	1,8
Бетон	–	48 ч	–	1,67

Так как разрушение пород сопровождается развитием трещин, смещением отдельных частей относительно друг друга, т. е. их

разуплотнением, в процессе нагружения породы наблюдают возрастание объема ее деформируемого образца.

Вызванный деформированием прирост объема породы по отношению к его упругому изменению называется **дилатансией**.

Дилатансия, предшествующая хрупкому разрушению породы, начинается при напряжениях  $\sigma \geq 0,4\sigma_{сж}$  и соизмерима с упругими изменениями объема (с обратным знаком).

Дилатансия при пластическом деформировании начинает проявляться за пределом текучести и достигает значений, существенно превышающих величины упругих деформаций.

Для оценки разрушения пластичных пород можно применить теорию максимальных касательных напряжений (теорию Кулона), в соответствии с которой разрушение наступит при достижении  $\tau$  критического значения  $\tau_0$ .

Применительно к горным породам наибольшее распространение получила теория прочности Мора, основанная на зависимости между касательными и нормальными напряжениями в каждой точке тела, находящегося в сложнапряженном состоянии.

Согласно теории Мора, разрушение наступает в одном из двух случаев: когда касательные напряжения  $\tau$  превысят предельное значение  $\tau_{кр}$ , величина которого тем больше, чем больше нормальные напряжения, действующие на образец, либо когда при  $\tau = 0$  нормальные растягивающие напряжения превысят предел, равный  $\sigma_p$ .

Графически эта зависимость между предельными нормальными и касательными напряжениями изображается в виде параболы. Она может быть построена для каждого типа породы по результатам определения ряда ее прочностных параметров.

Известно, что в любой плоскости тела при нагружении породы возникают касательные и нормальные напряжения, которые взаимосвязаны и могут быть рассчитаны. Так, если образец находится в плоском напряженном состоянии (больше  $\sigma_1$  и меньше  $\sigma_3$  напряжения), то в плоскости под углом  $\alpha$  (рис. 2.8) будут действовать напряжения:

– нормальные

$$\sigma_n = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha ;$$

– касательные

$$\tau = 0,5(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha .$$



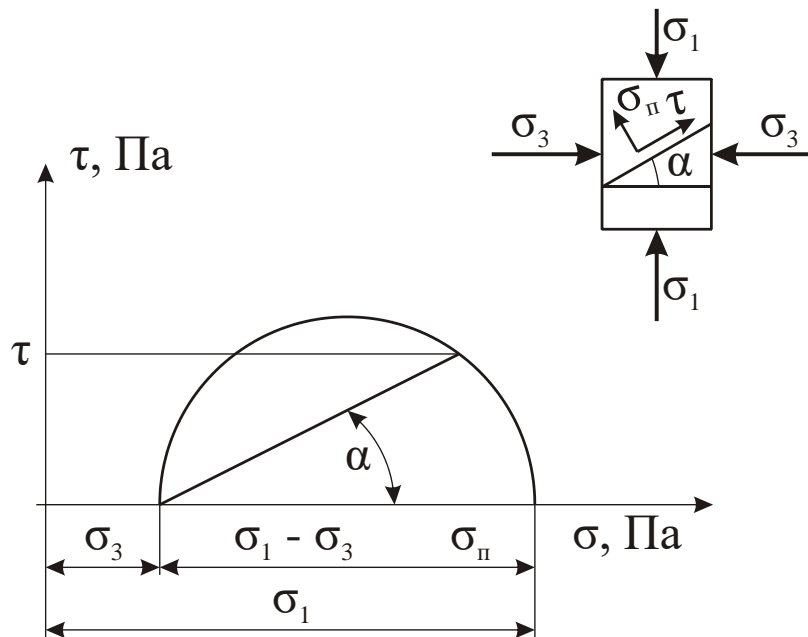


Рис. 2.8 – Взаимосвязь между нормальными и касательными напряжениями в породе

Связь между  $\sigma_n$  и  $\tau$  может быть представлена графически с помощью так называемых **кругов напряжений**, которые строятся следующим образом. По оси абсцисс откладывают максимальное и минимальное значения нормальных напряжений, действующих на образец; на разности отрезков, как на диаметре, строят круг.

Значения касательного и нормального напряжений в любой точке образца могут быть найдены, если задан угол плоскости, в которой определяются напряжения. Под этим углом из точки пересечения окружности с абсциссой проводят прямую до ее пересечения с окружностью. Ордината точки пересечения окружности с прямой численно равна значению отыскиваемых касательных напряжений, абсцисса – значению нормальных напряжений.

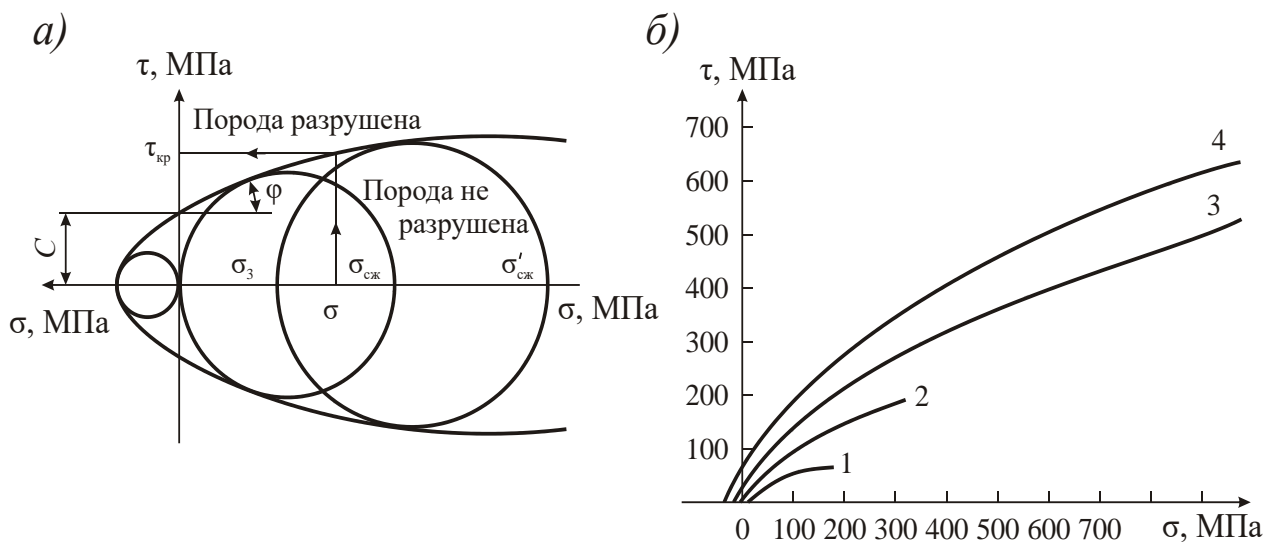
Каждому частному значению напряженного состояния соответствует свой круг напряжений.

Если горная порода подвергается одноосному ( $\sigma_3 = 0$ ) сжатию вплоть до момента разрушения, то для данного случая также можно построить круг напряжений, отложив на оси абсцисс значения  $\sigma_1 = \sigma_{сж}$ .

Поскольку этот круг для данного напряженного состояния является максимальным, его называют предельным. На этом графике можно таким же образом построить предельные круги напряжений для  $\sigma_r$  и  $\tau_{сдв}$ , а также для пределов прочности  $\sigma'_{сж}$  и  $\sigma''_{сж}$ ,

определенных в сложнапряженном состоянии (при  $\sigma_3 > 0$ ). В результате получают семейство кругов напряжений. Очевидно, что любое напряженное состояние породы, характеризуемое точкой на графике, лежащей вне этого семейства, является разрушающим для данной породы, и наоборот. Поэтому, проведя огибающую этих кругов напряжений, получают кривую, характеризующую предельное напряженное состояние тела в момент его разрушения (рис. 2.9).

Огибающую предельных кругов напряжений называют **паспортом прочности** горных пород. Теория Мора наиболее полно согласуется с экспериментальными данными о прочности образцов горных пород.



1 – уголь (Кизеловский бассейн); 2 – алевролит (Донбасс);  
3 – песчаник (Донбасс); 4 – диабаз

Рис. 2.9 – Построение паспорта прочности (а) и примеры паспортов прочности различных пород (б)

Паспорт прочности может быть представлен аналитически в виде параболы

$$\tau = \sqrt{(\sigma_p + \sigma) \left[ 2\sigma_p - 2\sqrt{\sigma_p (\sigma_p + \sigma_{сж})} + \sigma_{сж} \right]}$$

или (на некотором участке вблизи оси ординат) в виде прямой линии

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $C$  – предел прочности породы при срезе в условиях отсутствия нормальных напряжений, называемый **сцеплением породы** (см.

рис. 2.9);  $\varphi$  – угол внутреннего трения;  $\operatorname{tg} \varphi$  – **коэффициент внутреннего трения**, коэффициент пропорциональности между приращениями нормальных и касательных разрушающих напряжений.

Зная пределы прочности пород  $\sigma_{сж}$  и  $\sigma_p$ , можно вычислить  $\varphi$  и  $C$ .

Так, приняв за основу параболическое описание огибающей кругов Мора, для плотных пород можно вывести следующие уравнения:

$$C = B\sigma_p;$$

$$\varphi = 2 \left[ \frac{\operatorname{arctg}(B + 2)}{2} - 45^\circ \right],$$

где

$$B = \sqrt{\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} + 1} - 1.$$

Обычно с увеличением отношения  $\sigma_{сж}/\sigma_p$  возрастают  $C$  и угол  $\varphi$  (рис. 2.10).

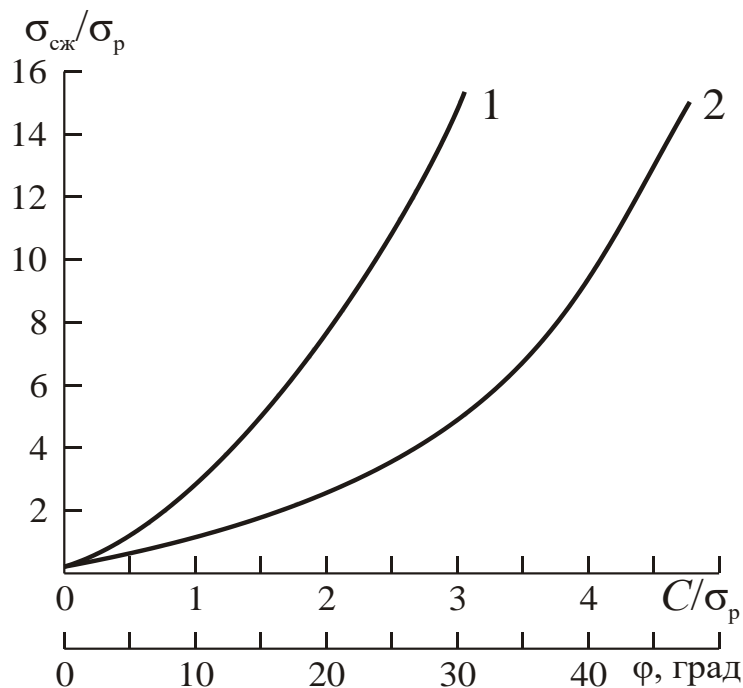


Рис. 2.10 – Взаимная связь между относительным сцеплением  $C/\sigma_p$  (1), углом внутреннего трения  $\varphi$  (2) и отношением  $\sigma_{сж}/\sigma_p$

### 2.1.5 Пластические и реологические свойства пород

Приложение к породам нагрузок, превышающих их пределы упругости, приводит к возникновению необратимых пластических деформаций, в области которых исчезает пропорциональность между величиной деформации породы и нагрузкой. При этом наблюдается увеличение скорости роста деформаций с повышением нагрузки и даже при постоянных или уменьшающихся нагрузках.

**Пластическая деформация** в породах обусловлена внутризеренным и межзеренным скольжением (постепенное соскальзывание атомов в кристаллической решетке с одного на другой, сдвиг зерен по определенным плоскостям и направлениям под действием нагрузок). Значительную роль во внутризеренном скольжении играют **дислокации** – сдвиги одной части кристалла относительно другой или линии искажения, проходящие вдоль края лишней атомной плоскости. Однако дислокация, вышедшая на поверхность или границу зерна, в дальнейшем уже не принимает участия в пластической деформации. Плотность дислокаций внутри зерна уменьшается, и пластическая деформация затухает. Именно поэтому для поддержания деформирования в породе необходимо увеличивать напряжения. Пластическая деформация происходит без нарушения сплошности тела. Однако довольно часто пластичность, рассматриваемая в породах, не совпадает с понятием идеальной пластичности, так как, строго говоря, ряд явлений, вызывающих в породах остаточные деформации (обжатие, смятие, взаимное перемещение блоков), следует отнести к разрушающим (квазипластичность).

Если связь между напряжением  $\sigma$  и относительной деформацией  $\varepsilon$  в области пластической деформации выразить через некоторый коэффициент  $E' = f(\varepsilon) \neq \text{const}$ , то  $E'$ , называемый **секущим модулем деформации**, будет находиться в пределах

$$E > E' > 0.$$

Предельный секущий модуль деформации – отношение прироста напряжений в пластической зоне (до момента разрушения породы) к полной пластической деформации

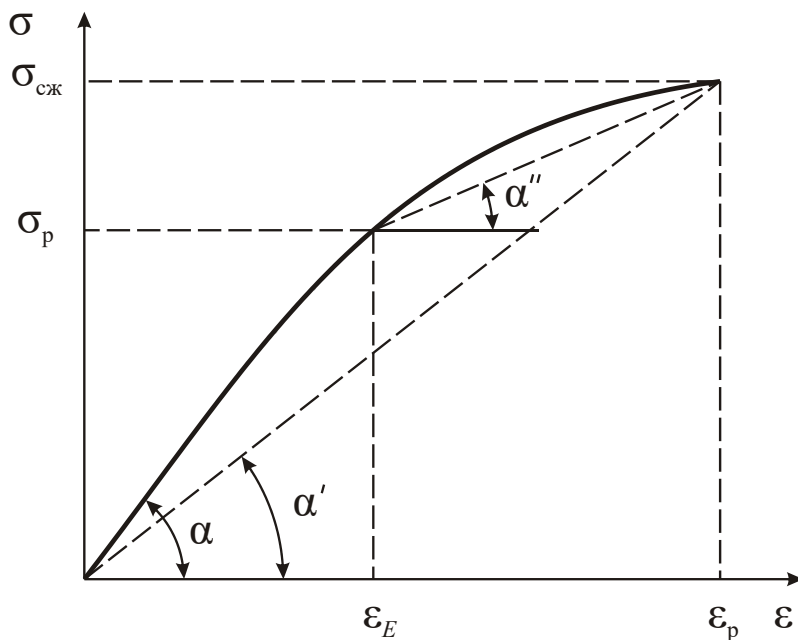
$$E_{\text{пл}} = \frac{\sigma_{\text{сж}} - \sigma_E}{\varepsilon_p - \varepsilon_E} = \text{tg}\alpha''$$

называется **модулем пластичности** (рис. 2.11).

Для идеального пластического тела  $E_{\text{пл}} = 0$ .

Если на рисунке 2.11 соединить прямой линией конечную точку графика (момент разрушения образца) с началом координат, то тангенс образовавшегося угла  $\alpha'$  будет называться **модулем полной деформации**  $E_{\text{деф}}$ . Он равен отношению максимальных (разрушающих) напряжений  $\sigma_{\text{сж}}$  к полной относительной деформации образца  $\varepsilon_{\text{р}}$ :

$$E_{\text{деф}} = \frac{\sigma_{\text{сж}}}{\varepsilon_{\text{р}}}.$$



$\text{tg}\alpha, \text{tg}\alpha', \text{tg}\alpha''$  –  
соответственно модули  
Юнга, полной деформации  
и пластичности

Рис. 2.11 – К расчету  
параметров пластичности  
пород

Пластичность горных пород зависит от их минерального состава.

Наличие жестких кварцевых зерен и полевого шпата в породе уменьшает ее пластичность.

В углях наблюдается зависимость пластичности от содержания в них углерода. При переходе от слабометаморфизованных углей к антрацитам их пластичность уменьшается в 30 раз.

Характерно, что повышение пластичности в породах сопровождается, как правило, снижением их модуля упругости. В то же время коэффициент Пуассона с увеличением пластичности пород растет.

Длительное действие нагрузок на породы приводит к изменению их напряженно-деформированного состояния. Если при этом возможно свободное перемещение частиц породы, наблюдается ее непрерывное деформирование. При ограниченной величине деформации породы в ней происходит снижение напряжения, несмотря

на постоянные внешние нагрузки. Явления изменения деформаций и напряжений в горных породах под действием нагрузки во времени описываются реологическими свойствами.

Постепенный рост деформаций во времени называется ползучестью пород (крипом).

**Явление ползучести** – это такое же пластическое деформирование горной породы, только происходящее во времени. Ползучесть может проявляться даже при напряжениях, не превышающих предела упругости.

Кривая ползучести состоит из трех отрезков, соответствующих трем основным стадиям деформации (рис. 2.12): *I* – неустановившейся ползучести породы; *II* – установившемуся состоянию пластического течения при постоянной нагрузке; *III* – возрастанию скорости деформации и наступлению момента разрушения породы.

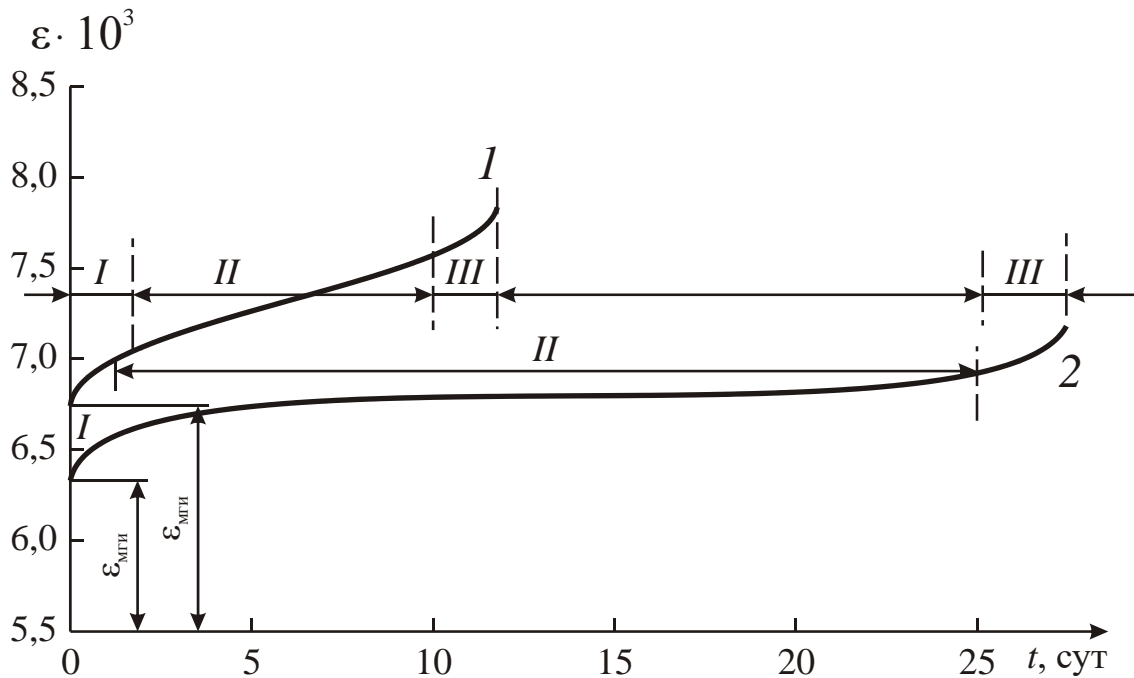


Рис. 2.12 – График ползучести горных пород на примере образцов песчанистого сланца при напряжении, равном  $0,8 \sigma_{сж}$  (1) и  $0,7 \sigma_{сж}$  (2), где  $\sigma_{сж} = 56$  МПа ( $\varepsilon_{мги}$  – мгновенная деформация)

Скорость деформации породы является суммой скоростей упругой  $\varepsilon_E$  и пластической  $\varepsilon_{II}$  деформаций:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_E}{dt} + \frac{d\varepsilon_{II}}{dt}.$$

Так как  $\varepsilon_E = \sigma/E$ , а скорость пластического течения  $d\varepsilon_{\Pi}/dt$  прямо пропорциональна величине приложенных напряжений, то

$$\sigma = \frac{\eta d\varepsilon_{\Pi}}{dt},$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости  $\eta = Et_0$  – постоянная, выраженная в единицах времени,

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\sigma}{Edt} + \frac{\sigma}{\eta}. \quad (2.1)$$

Уравнение (2.1) называется уравнением ползучести. Если  $d\sigma/dt = 0$ , т. е. не происходит изменения напряжений во времени, то

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta}.$$

Следовательно, в этих условиях происходит непрерывное деформирование породы с определенной скоростью, зависящей от  $\sigma$ .

Деформация ползучести горных пород в любой момент времени  $t$  зависит от предыстории нагружения. Это свойство называется **наследственностью**. Согласно теории наследственности, если в момент времени  $\tau$  приложено напряжение  $\sigma(\tau)$ , действующее в течение времени  $d\tau$ , то деформация  $d\varepsilon_{\Pi}$  к моменту времени  $t$  будет зависеть от  $\sigma(\tau)$  и разности  $(t - \tau)$ .

Исходя из этого, второй член в уравнении (2.1) может быть записан следующим образом:

$$\sigma(\tau)L(t - \tau).$$

Функция  $L(t - \tau)$  называется **ядром ползучести**, вид ее зависит от типа породы.

Предложен степенной вид ядра ползучести:

$$L(t - \tau) = \delta(t - \tau)^{-\alpha},$$

где  $\delta > 0$  и  $\alpha > 0$  – параметры ползучести. Для пород  $\alpha \approx 0,7$ ,  $\delta \approx (2-5) \cdot 10^{-3}$ .

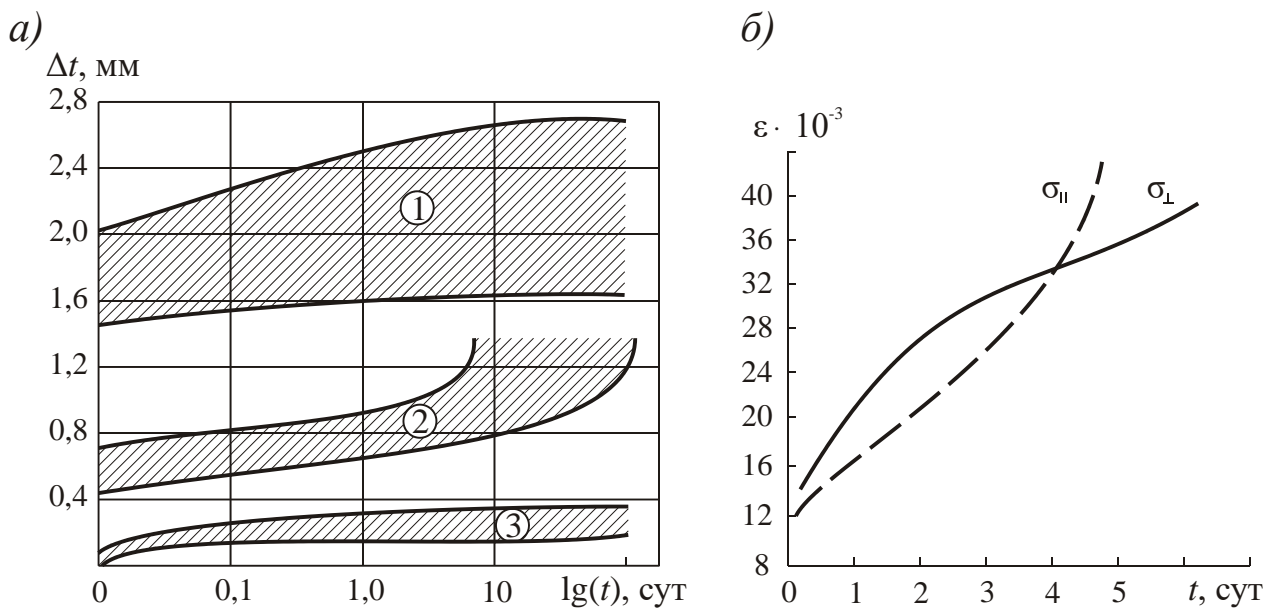
Возможен экспоненциальный вид ядра ползучести:

$$L(t - \tau) = ae^{-b(t-\alpha)},$$

где  $a$  и  $b$  – некоторые параметры ползучести.

Значительная ползучесть присуща глинам, аргиллитам, глинистым сланцам. Криворожские породы (кварцсерицитовый сланец, гидрогематитовый роговик, аркозовый песчаник) обладают ползучестью, составляющей в среднем 20–35 % первоначальной мгновенной упругой деформации, причем наиболее значительные деформации происходят в течение первых 1,5–2 сут нагружения (рис. 2.13).

Ползучесть зависит от направления приложения нагрузки. Так, наибольшие деформации ползучести  $\varepsilon_n$  наблюдаются при нагрузках, приложенных перпендикулярно к слоистости, причем отношение  $\varepsilon_{\perp}/\varepsilon_{\parallel}$  достигает 1,5 (рис. 2.13, б). Как известно, упругие деформации также больше в этом направлении.



а – осадочных горных пород при нагрузках 0,7 и 0,9 от разрушающих:

1 – позднеледниковые глины; 2 – послеледниковые глины;

3 – аркозовые песчаники Кривого Рога;

б – сильвинита перпендикулярно  $\sigma_{\perp}$  и вдоль  $\sigma_{\parallel}$  слоистости

Рис. 2.13 – Характерные области кривых ползучести

Если в уравнении (2.1) принять  $d\varepsilon/dt = 0$ , что означает зафиксированные в образце и не изменяющиеся во времени деформации, то решение уравнения дает выражение

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\frac{\sigma}{t_0},$$

т. е. должно наблюдаться постепенное снижение напряжений во времени.



Такое явление, обратное ползучести, – постепенное снижение напряжений в породе при постоянной ее деформации называется **релаксацией напряжений**. Релаксация представляет собой ползучесть при напряжении, которое уменьшается пропорционально нарастающей пластической деформации.

Таким образом, ползучесть и релаксация – два проявления одного и того же реологического процесса.

При релаксации возникшие в первый момент упругие деформации постепенно переходят в пластические.

В результате после снятия нагрузки образец не восстанавливает своей первоначальной формы даже тогда, когда исходные напряжения не превышают предела упругости породы.

Установлено, что во многих случаях связь между  $\sigma$  и  $t$  носит экспоненциальный характер:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{-t}{\tau_0}},$$

где  $\sigma_0$  – первоначальные напряжения в образце;  $\tau_0$  – **период релаксации**, время, в течение которого напряжения в породе убывают в  $e$  раз. Период релаксации большинства горных пород очень велик. Так, у скальных грунтов он составляет 100–1000 лет, у стекла – 100 лет, в то время как у воды  $\tau_0 \approx 10^{-11}$  с. Поэтому на практике для характеристики реологических свойств пород при меньшей длительности нагружения часто используют **относительный показатель падения напряжений** в породе  $R'$ , %, за определенный период  $t$  (неделю, месяц и т. д.) (рис. 2.14).

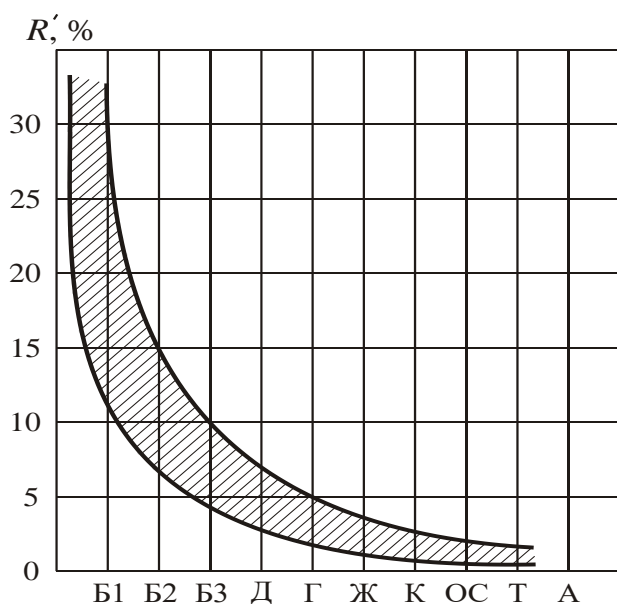


Рис. 2.14 – Значения относительного показателя падения напряжений  $R'$  за 16 ч для углей различных марок

## 2.2 Гидравлические и газодинамические свойства образцов горных пород

Наличие пор и трещин в породах предопределяет возможность их заполнения различными жидкостями и газами.

Наиболее часто горные породы бывают насыщены водой, которая может содержаться в породах в разном виде. Различают химически связанную, физически связанную и свободную воду.

**Химически связанная вода** наряду с другими молекулами и ионами входит в состав кристаллической решетки минералов, например, гипса  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  или каолинита  $\text{Al}_2(\text{OH})_4 \cdot \text{Si}_2\text{O}_5$ . Удаление такой воды приводит к разрушению минерала, превращению его в другое – безводное соединение.

$$R' = \frac{(\sigma_0 - \sigma_t)}{100}.$$

Наличие в породе химически связанной воды проявляется только при ее нагревании. Она обуславливает изменение свойств породы при высоких температурах. Из-за нарушения кристаллической решетки минералов при выделении из них химически связанной воды происходит ослабление и разрушение пород, а в ряде случаев – их упрочнение (например, глины).

**Физически связанная вода** тесно соединена молекулярными силами притяжения с твердыми частицами породы; вода обволакивает их в виде пленки. Ее количество зависит от смачиваемости пород.

**Смачиваемость** – это способность горной породы покрываться пленкой жидкости. Величина смачивания твердой поверхности жидкостью характеризуется краевым углом  $\theta$  между плоскостью твердого тела и касательной к поверхности капли, проведенной из точки касания капли с телом.

Смачиваемость пород обусловлена **адсорбционной способностью**, т. е. способностью концентрировать на своей поверхности молекулы жидкости за счет электростатического притяжения. Большинство пород относится к хорошо смачиваемым водой (гидрофильным). Частично или полностью не смачиваемы (гидрофобные) сера, угли, битуминозные песчаники и некоторые другие породы.

Адсорбционная способность пород возрастает при наличии в них растворимых солей, глинистых минералов (особенно с подвижной кристаллической решеткой – монтмориллонитов), а также

с увеличением удельной поверхности твердой фазы. Поэтому наблюдается увеличение адсорбционной способности с уменьшением размеров частиц рыхлой породы и увеличением их угловатости.

Физически (прочно) связанная вода не перемещается в породах, имеет высокую плотность (до  $1,74 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ), низкую температуру замерзания ( $-78^\circ\text{C}$ ), малые значения теплоемкости, диэлектрической проницаемости, электрической проводимости, не является растворителем. Она удаляется из породы только нагреванием свыше  $105\text{--}110^\circ\text{C}$ .

Максимальное количество связанной воды, которое способны адсорбировать породы, оценивается показателями максимальной гигроскопичности и максимальной молекулярной влагоемкости.

**Максимальная гигроскопичность**  $\omega_r$  – наибольшее количество влаги, которое способна адсорбировать на своей поверхности горная порода из воздуха с относительной влажностью 94 %.

**Молекулярная, или пленочная, влагоемкость**  $\omega_m$  – количество воды, удерживаемой силами молекулярного притяжения на поверхности частиц породы.

$$\omega_m = \frac{(m_m - m_c)}{m_c},$$

где  $m_m$  – масса влажного образца породы;  $m_c$  – масса образца породы, высушенного при температуре  $105\text{--}110^\circ\text{C}$ .

$\omega_m > \omega_r$  за счет наличия в породе слабо связанной пленочной воды, отличием которой от физически (прочно) связанной воды является способность передвигаться под действием молекулярных сил.

Молекулярная влагоемкость зависит от размеров зерен, составляющих породу. Так, для кварцевых частиц размером  $0,1\text{--}0,05 \text{ мм}$   $\omega_m$  составляет 0,02 %, размером менее  $0,001 \text{ мм}$  – 0,86 %. Однако основную роль играет минеральный состав пород. Так, при размере частиц меньше 1 мкм  $\omega_m$  альбита равна 8,1 %, лимонита – 23 %, а биотита – 48 %. В связи с этим кварцевые пески, например, содержат количество связанной воды – 0,24 %, лессы – 5,2 %, глины – 10–30 %.

Влажные породы обладают способностью избирательно адсорбировать наряду с водой ионы из насыщающего породу раствора, т. е. обладают **ионосорбционной способностью**. Это явление важно при изучении электрохимических реакций в породах, электрической проводимости и электрических полей в массиве.

**Свободная вода** в породах может находиться в виде **капиллярной воды**, удерживаемой в мелких порах силами капиллярного поднятия, и в виде **гравитационной воды**, заполняющей крупные поры и передвигающейся в породах под действием сил тяжести или давления.

Количество капиллярной воды оценивается параметром **капиллярной влагоемкости**.

В зависимости от минерального, гранулометрического состава пород и формы частиц соотношение количества различных видов воды в породах может быть разным. Так, пески содержат в основном гравитационную воду, а глины, лесс и суглинки – молекулярную и капиллярную.

Максимальное количество связанной, капиллярной и гравитационной воды, которое способна вместить порода, характеризуется ее **полной влагоемкостью** (массовой и объемной).

Массовая полная влагоемкость

$$\omega_{\Pi} = \frac{(m_{\Pi} - m_c)}{m_c};$$

объемная полная влагоемкость

$$\omega_{\Pi.об} = \frac{V_{ж}}{V} = \frac{\omega_{\Pi} \rho}{\rho_{ж}},$$

где  $m_{\Pi}$  – масса породы, максимально насыщенной водой;  $V_{ж}$  – объем воды, заполняющей породу  $\left[ V_{ж} = \frac{(m_{\Pi} - m_c)}{\rho_{ж}} \right]$ ;  $V$  – объем породы;  $\rho_{ж}$  – плотность воды;  $\rho$  – объемная масса породы.

По величине объемная полная влагоемкость примерно равна открытой пористости породы. Если поры в породах не имеют свободного сообщения друг с другом, в них может остаться некоторое количество заземленных газов или воздуха даже при полном насыщении пород водой. Тогда  $\omega_{\Pi.об} < P$ .

Иногда вода проникает между пакетами кристаллических решеток некоторых минералов (к ним относятся, например, монтмориллонит, вермикулит, галлуазит). Тогда наблюдается  $\omega_{\Pi.об} > P$ .

Для оценки породы в естественном состоянии пользуются параметром естественной влажности  $\omega_e$ , равным относительному количеству воды, содержащейся в породах в природных условиях, и

**коэффициентом водонасыщенности**  $k_{\text{вн}}$ , указывающим на степень насыщения породы водой.

$$k_{\text{вн}} = \frac{\omega_{\text{е}}}{\omega_{\text{п}}} = \frac{V_{\text{в}}}{V_{\text{п}}},$$

где  $V_{\text{в}}$  и  $V_{\text{п}}$  – объемы воды и пор в породе соответственно.

Влагоемкости – это физические параметры породы; естественная влажность  $\omega_{\text{е}}$  и  $k_{\text{вн}}$  – характеристики состояния породы.

Извлечь всю воду из увлажненной породы механическими средствами невозможно. При любом механическом воздействии в породе остается физически связанная вода. Весьма трудно отдать воду лессы, очень мелкие пески (плывуны), так как именно в них имеется большой процент физически связанной воды. Способность породы отдавать воду при механическом воздействии характеризуется **водоотдачей**  $\xi$ :

$$\xi = \omega_{\text{п}} - \omega_{\text{м}}.$$

Величина водоотдачи зависит от размеров частиц, образующих породу, а также величины и взаимного расположения пор. Слабая водоотдача пород обычно снижает производительность механической и гидравлической разработки пород, затрудняет осушение месторождения, транспортирование и дробление полезного ископаемого.

В породах кроме воды встречаются также нефть и газы.

Характер распределения в порах воды, нефти и газа предопределяет многие физические свойства этих пород, в частности сильно сказывается на их электросопротивлении.

В общем случае сумма объемов нефти  $V_{\text{н}}$ , газа  $V_{\text{г}}$  и воды  $V_{\text{в}}$  в нефтегазоводонасыщенных породах равна объему порового пространства пород  $V_{\text{п}}$  и, следовательно,

$$\frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{п}}} + \frac{V_{\text{г}}}{V_{\text{п}}} + \frac{V_{\text{в}}}{V_{\text{п}}} = 1.$$

Отношения  $\frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{п}}}$ ,  $\frac{V_{\text{г}}}{V_{\text{п}}}$ ,  $\frac{V_{\text{в}}}{V_{\text{п}}}$  называются относительными коэффициентами

соответственно нефтенасыщенности  $k_{\text{н}}$ , газонасыщенности  $k_{\text{г}}$  и водонасыщенности  $k_{\text{вн}}$ .

## Перемещение жидкостей и газов в породах

Жидкости и газы способны перемещаться по поровым каналам и трещинам породы. Свойство породы пропускать сквозь себя флюиды называется ее **проницаемостью**.

Проницаемость бывает физическая (абсолютная) и фазовая (эффективная).

**Физическая проницаемость** – это проницаемость в случае фильтрации через породу однородной жидкости или газа. **Фазовая проницаемость** – это способность пород, насыщенных неоднородной жидкостью, пропускать отдельные ее фазы.

Численно величина проницаемости описывается **коэффициентом проницаемости**  $k_{\text{пр}}$ , выводимым из уравнения Дарси, согласно которому количество жидкости  $Q$ , м<sup>3</sup>, прошедшей расстояние  $\Delta l$  в образце породы, выражается следующим образом:

$$Q = \frac{k_{\text{пр}} \Delta P_{\sigma} S t}{\Delta l \eta}, \quad (2.2)$$

где  $\Delta P_{\sigma}$  – перепад давлений на пути фильтрации, Па;  $S$  – площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>;  $t$  – время фильтрации, с;  $\eta$  – вязкость жидкости, Па · с.

Из формулы (2.2) имеем

$$k_{\text{пр}} = \frac{Q \Delta P_{\sigma} S t}{\Delta l \eta}.$$

Коэффициент проницаемости выражается в квадратных метрах.

Практической единицей измерения проницаемости является дарси (Д) – величина проницаемости, присущая образцу породы объемом 1 см<sup>3</sup>, через который при давлении  $9,8 \cdot 10^4$  Па в 1 с проходит 1 см<sup>3</sup> жидкости вязкостью  $10^{-3}$  Па · с. При этом  $1 \text{ Д} = 1,02^{-12} \text{ м}^2$ .

В практике горного производства широкое распространение получил другой параметр – **коэффициент фильтрации**  $k_{\text{ф}}$ . Практически он представляет собой скорость фильтрации газа или жидкости через породы:

$$k_{\text{ф}} = \frac{Q}{tS}.$$

Коэффициент фильтрации  $k_f$  не учитывает влияния напора воды. Сравнение  $k_f$  и  $k_{пр}$  показывает, что между ними в случае фильтрации воды существует следующее примерное соотношение:  $1 \text{ Д} = 1 \text{ см/с} = 864 \text{ м/сут.}$

В зависимости от значения коэффициента фильтрации породы подразделяют на водоупорные ( $k_f < 0,1 \text{ сут}$ ), слабопроницаемые ( $0,1 \text{ м/сут} < k_f < 500 \text{ м/сут}$ ) и легкопроницаемые ( $k_f \gg 1000 \text{ м/сут}$ ).

**Сверхкапиллярные поры** пропускают жидкости под действием силы тяжести или давления по обычным законам гидродинамики.

**В капиллярных порах** движение жидкости происходит вследствие сил капиллярного притяжения. Под действием давления жидкость в капиллярах будет двигаться лишь тогда, когда оно превысит молекулярные силы притяжения.

**Субкапиллярные поры** жидкости практически не пропускают. Именно поэтому глины относятся к водоупорным, несмотря на высокую их пористость (50 % и более). Почти вся вода в них находится в связанном состоянии и препятствует перемещению гравитационной воды. И наоборот, скальные породы могут иметь малую пористость, но обладать большой проницаемостью. У этих пород различают проницаемость **межгранулярную** и **трещинную**, из которых последняя значительно больше. Так, трещинная проницаемость сланцев, известняков, доломитов и т. д. находится в пределах  $(1,5-4,0) \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$  (до 40 мД), межгранулярная достигает  $10^{-16} \text{ м}^2$  (0,1 мД).

Коэффициент трещинной проницаемости  $k_{пр.т}$  может быть рассчитан по формуле

$$k_{пр.т} = 8,45 \cdot 10^{-4} b^2 P_t,$$

где  $b$  – величина раскрытия трещин, м;  $P_t$  – трещинная пористость.

Так как раскрытие трещин обычно составляет  $(14-15) \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ,

$$k_{пр.т} = 1,66 \cdot 10^{-13} P_t.$$

Слоистым породам присуща анизотропия водопроницаемости: проницаемость вдоль напластования больше, чем перпендикулярно к нему.

На водопроницаемость рыхлых пород влияет также их минеральный состав. Минералы с хорошо выраженной спайностью пропускают воду довольно слабо, так как в них при прочих равных

условиях образуются поры меньших размеров, чем в минералах, не обладающих спайностью и хорошо окатанных. Вода лучше проходит через породы, сложенные минералами, обладающими хорошей смачиваемостью.

В случае циркуляции газов в породах пользуются понятием газопроницаемости пород: физическая сущность газопроницаемости подобна водопроницаемости.

## 2.3 Тепловые свойства горных пород и массивов

### 2.3.1 Теплоемкость горных пород

Удельная теплоемкость минералов и пород изменяется от 0,4 до 2 кДж/(кг · К). Обычно она выше удельной теплоемкости металлов.

У минералов с уменьшением их плотности наблюдается повышение удельной теплоемкости (рис. 2.15). При этом их объемная теплоемкость  $c_p$  изменяется от 1,5 до 3 МДж/(м<sup>3</sup> · К).

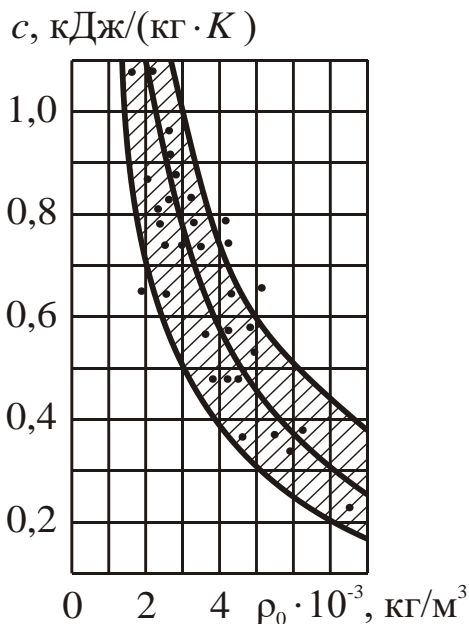


Рис. 2.15 – Корреляционная связь между удельной теплоемкостью  $c$  и плотностью  $\rho_0$  минералов. Заштрихованная область – наиболее вероятные значения  $c$  и  $\rho_0$  минералов

Удельная теплоемкость плотной породы зависит только от ее минерального состава и может быть рассчитана по формуле арифметического средневзвешенного

$$c_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n c_i m_i ,$$

где  $m_i$  – относительное массовое содержание минерала с удельной теплоемкостью  $c_i$ .



Рудные минералы, как правило, имеют низкую теплоемкость, поэтому в рудосодержащих породах теплоемкость ниже, чем в безрудных породах. Теплоемкость не зависит от того, в каком состоянии находится порода – в аморфном или в кристаллическом. Например, теплоемкости кристаллического и плавленого кварца одинаковы и составляют  $0,85 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ . Теплоемкость не зависит также и от всех прочих параметров строения породы: зернистости, слоистости и т. д.

Зависимость теплоемкости от пористости обусловлена значениями величин  $c$  воздуха и минералов.

Объемная теплоемкость пористой породы  $c_p$  определяется так же, как арифметическое средневзвешенное.

Так как объемная теплоемкость воздуха равна только  $1,29 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$ ,

$$c_{\text{ср}} \approx c_0 \rho_0 (1 - P),$$

где  $c_0$  и  $\rho_0$  – соответственно удельные теплоемкость и плотность минеральной фазы породы.

### 2.3.2 Теплопроводность и температуропроводность горных пород

Минералы и горные породы, как правило, являются плохими проводниками тепла, они занимают в ряду твердых тел сравнительно узкую полосу с малыми значениями теплопроводности –  $0,1\text{--}7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ .

Большей теплопроводностью – до  $30\text{--}40 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$  обладают лишь некоторые рудные минералы, например, сфалерит (рис. 2.16).

Исключительно большое значение  $\lambda$  наблюдается у алмаза – до  $200 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$  – вследствие небольшого количества дефектов в кристаллической решетке, высокой энергии решетки и, следовательно, большой длины свободного пробега фононов.

Из породообразующих минералов большим значением теплопроводности [ $\lambda = 7\text{--}12 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ ] обладает кварц, поэтому у плотных малопористых безрудных пород (группа 1*n*) наблюдается повышение  $K$  с увеличением содержания в них кварца.

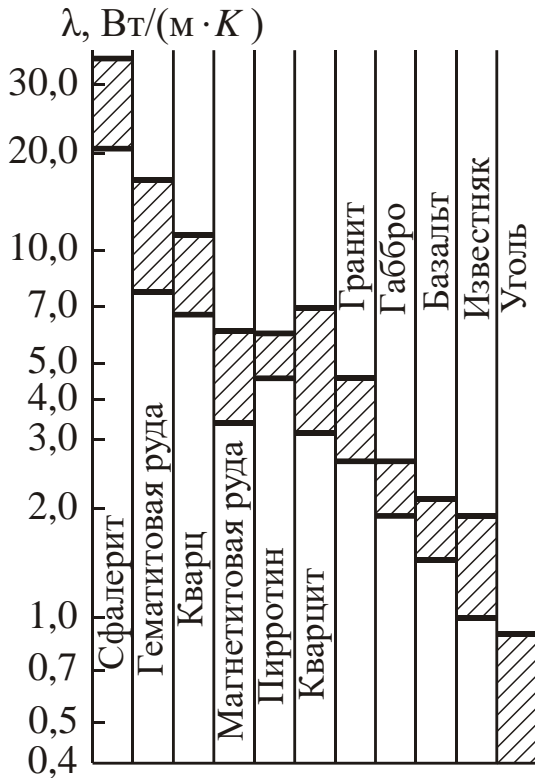


Рис. 2.16 – Сравнение коэффициентов теплопроводности различных пород и минералов

Повышенную по сравнению с другими нерудными минералами теплопроводность имеют также гидрохимические осадки – каменная соль, сильвин, ангидрит, а пониженную – каменный уголь, асбест и другие породы.

Теплопроводность пород определяется способностью минералов, слагающих породу, проводить тепло, и для пород, представляющих собой статистические смеси минералов с хорошими контактными условиями, пригодна для расчета их теплопроводности формула логарифмического средневзвешенного.

В слоистых средах наблюдается большая теплопроводность вдоль слоистости  $\lambda_{\parallel}$ , чем перпендикулярно слоистости  $\lambda_{\perp}$ .

Коэффициент анизотропии теплопроводности слоистых горных пород в среднем составляет 1,1–1,5 (табл. 2.6). Анизотропией теплопроводности обладают не только породы, сложенные различными слоями, но и сланцеватые породы и минералы с хорошей спайностью. Так, у слюды вдоль спайности теплопроводность в 6 раз выше, чем поперек спайности; для графита это отношение составляет 2 и более. Физическая сущность такого явления заключается в том, что частицы, входящие в кристаллическую решетку минерала, вдоль плоскости слоистости взаимодействуют интенсивнее, и наоборот, молекулярное движение перпендикулярно к плоскости спайности

передается значительно хуже. Теплопроводность пористых пород является сложной функцией всех их составляющих фаз: жидкой, газообразной и твердой (табл. 2.7).

Передача тепловой энергии в пористых породах может происходить как путем теплопроводности, так и путем конвекции заполнителя порового пространства (теплоотдачи).

Если размеры пор по сравнению с исследуемым объемом малы, то явление конвекции можно не учитывать. Доля конвективного теплового потока в порах с радиусом 3 мм составляет 0,13 % от общего теплового потока. Можно не учитывать также явление передачи тепла излучением, если температура нагрева породы не превышает 1000 К.

Таблица 2.6 – Анизотропия теплопроводности пород

Порода	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м · К)		Коэффициент анизотропии, $k_{ан}$
	вдоль слоистости	перпендикулярно слоистости	
Кварцевый песчаник	5,7	5,5	1,06
Гнейс	3,1	2,2	1,44
Мрамор	3,1	3,0	1,02
Известняк	3,4	2,6	1,35

Таблица 2.7 – Тепловые свойства фаз, входящих в состав породы

Фаза	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м · К)	Удельная теплоемкость $c$ , кДж/(кг · К)
Лед	2,330	2,09
Вода	0,580	4,18
Воздух	0,023	1,00

Как известно, теплопроводность воздуха  $\lambda_v$  очень низкая [0,023 Вт/(м · К)], поэтому теплопроводность сухих пористых пород всегда ниже теплопроводности непористых пород. Например, теплопроводность песка в 6–7 раз меньше, чем теплопроводность плотного песчаника.

Исключительно большую роль играет форма пор в породе.

Если поры в породе удлиненные (типа трещин), то теплопроводность значительно уменьшается при расположении пор перпендикулярно тепловому потоку.

В этом случае для расчета пригодна формула гармонического средневзвешенного:

$$\lambda_{\text{ср}}^{\perp} = \frac{\lambda_0}{1 - P + 43,5P\lambda_0}, \quad (2.3)$$

где  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности минеральной фазы породы.

Если тепловой поток направлен вдоль трещин, то, поскольку  $\lambda_{\text{в}} \ll \lambda_0$ , будем иметь

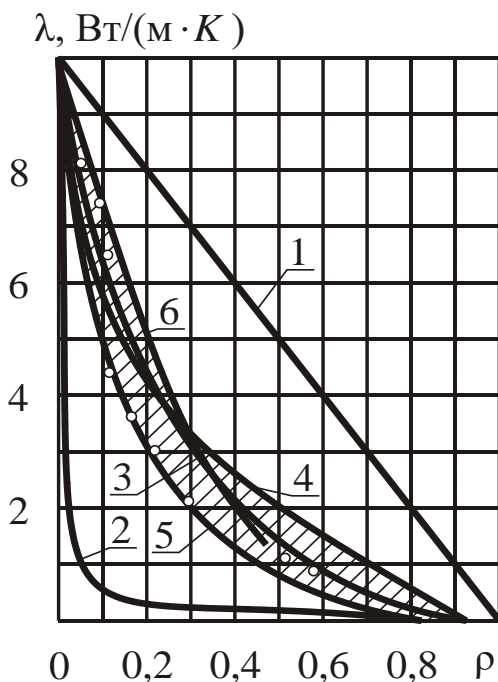
$$\lambda_{\text{ср}}^{\parallel} \approx \lambda_0(1 - P). \quad (2.4)$$

Очень близкие к реальным значениям величины  $\lambda$  дает формула

$$\lambda = \lambda_0(1 - P)^3.$$

По уравнениям (2.3) и (2.4) можно определить предельные значения теплопроводности пород в зависимости от формы пор и трещин. В конкретных случаях могут быть использованы различные обобщенные зависимости (рис. 2.17, кривые 3, 4, 5, 6).

Существен также состав газов, заполняющих поры. Так, водород обладает теплопроводностью в 7 раз большей, чем воздух, поэтому и теплопроводность пород, содержащих водород, больше при той же пористости.



1 – при тепловом потоке, направленном вдоль трещин;  
 2 – то же, перпендикулярно к трещинам; 3 –  $\lambda = \lambda_0(1 - P)^3$ ;  
 4 –  $\lambda = \lambda_0(1 - \sqrt[3]{P})$ ;  
 5 –  $\lambda = \lambda_0(1 + P)^{-7}$ ;  
 6 –  $\lambda = \lambda_0[1 - \sqrt{P(2 - P)}]$ ;  
 заштрихованная область – наибольшее количество экспериментальных данных

Рис. 2.17 – Корреляционные зависимости коэффициента теплопроводности пород от пористости

Как правило, происходит уменьшение теплопроводности пород с уменьшением размеров зерен (рис. 2.18). Однако это влияние наиболее существенно только при небольших их размерах. Это объясняется тем, что длина свободного пробега фононов определяется двумя факторами: рассеиванием фононов на фононах и рассеиванием фононов на границах кристаллов и зерен. Какой фактор будет преобладать, зависит от соотношения длины свободного пробега фононов  $l_{\text{ф}}$  и размеров зерен  $d_{\text{ср}}$ .

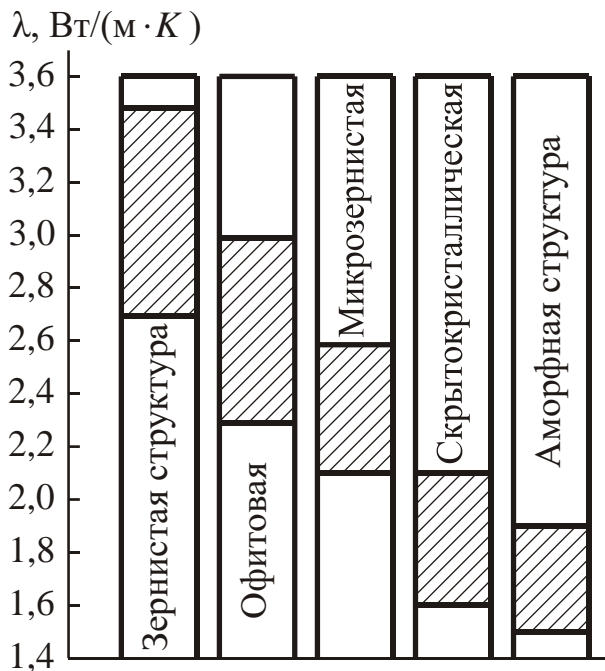


Рис. 2.18 – Зависимость коэффициента теплопроводности пород от степени их зернистости

Если  $l_{\text{ф}} \ll d_{\text{ср}}$ , коэффициент теплопроводности не зависит от размеров зерен, а зависит от температуры. При  $l_{\text{ф}} \approx d_{\text{ср}}$  возрастает влияние размеров зерен на теплопроводность пород. В частности, для мрамора экспериментально установлено

$$\lambda = \frac{\lambda_0 d_{\text{ср}}}{d_{\text{ср}} + B},$$

где  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности монокристалла;  $d_{\text{ср}}$  – размер зерен, см;  $B$  – отношение температурного градиента на одном контакте зерен к среднему температурному градиенту всего образца (для мрамора при температуре 0 °С величина  $B = 0,0027$ ).

Теплопроводности кристаллических  $\lambda_{\text{кр}}$  и аморфных  $\lambda_{\text{ам}}$  минералов значительно различаются. Как правило,  $\lambda_{\text{кр}} > \lambda_{\text{ам}}$ , причем  $\lambda_{\text{ам}} \leq 1,9$  Вт/(м·К), из чего можно заключить, что наличие стекловатой массы в породах понижает их теплопроводность.

Пределы изменения **температуропроводности** пород –  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с.

С увеличением плотности температуропроводность пород незначительно уменьшается.

Температуропроводность пород, как и теплопроводность зависят от их строения: вдоль слоистости  $a_{\parallel}$  всегда больше, чем перпендикулярно ей  $a_{\perp}$ .

Пористость пород приводит к снижению их температуропроводности.

### 2.3.3 Тепловое расширение пород

Коэффициенты линейного и объемного теплового расширения пород являются важнейшими теплофизическими характеристиками, обуславливающими способность пород трансформировать тепловую энергию в механическую, т. е. во внешнюю работу.

**Коэффициент линейного теплового расширения**  $\alpha$  минералов уменьшается с увеличением энергии кристаллической решетки и, соответственно, плотности минералов. Величина  $\alpha$  минералов изменяется в пределах от  $10^{-6}$  до  $10^{-4}$  K<sup>-1</sup>. У пород коэффициент линейного теплового расширения находится в более узком диапазоне:  $10^{-6}$ – $10^{-5}$  K<sup>-1</sup> (рис. 2.19).

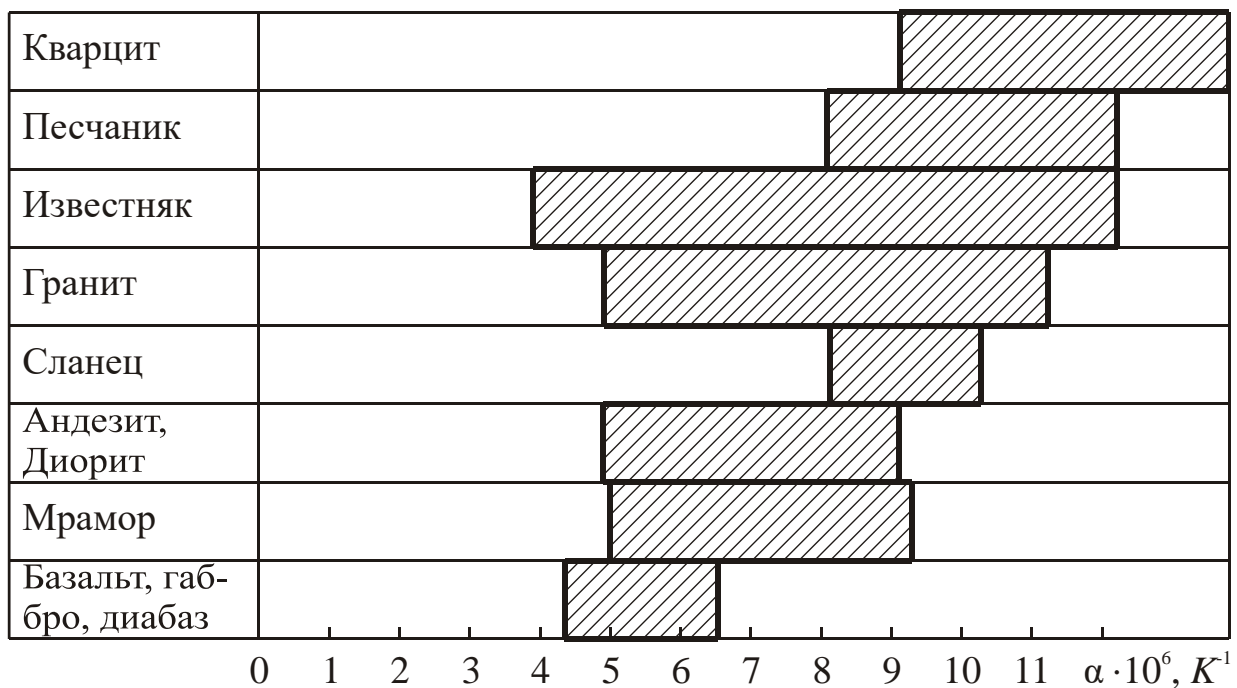


Рис. 2.19 – Сравнение коэффициентов теплового расширения различных пород

Высокими значениями  $\alpha$  обладают сера ( $8 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ ), каменная соль ( $4 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ ), слюда, флюорит, кварц ( $1,3 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ ).

**Коэффициент объемного расширения**  $\gamma_T$  полиминеральной горной породы определяется значениями  $\gamma_{Ti}$ , величинами модулей всестороннего сжатия  $K_i$  слагающих ее минералов и относительным их объемным содержанием  $V_i$ . Если порода при нагревании не разрушается, то

$$\gamma_T = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_{Ti} K_i V_i}{\sum_{i=1}^n K_i V_i}.$$

Обычно  $\gamma_T \approx 3\alpha$ .

Таким образом, связь между коэффициентом теплового расширения пород и минеральным составом осуществляется не непосредственно, а через произведение параметров  $\gamma_T K$  или  $\alpha E$ .

Большие значения параметра  $\alpha E$  присущи, например, кварцу. Вследствие этого высокие значения коэффициента теплового расширения характерны для кварцитов ( $1,1 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ ) и гранитов ( $0,8 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ ).

Кристаллы и слоистые горные породы имеют различное тепловое расширение в разных направлениях. Для них  $\gamma_T \neq 3\alpha$ . Так, у диопсида, например,  $\gamma_T/\alpha = 1,5$ , у роговой обманки  $\gamma_T/\alpha = 2,5$ . Монокристалл кальцита при нагревании расширяется только в одном направлении, а в остальных направлениях он сокращается. Расширение кварца в одном из направлений превышает расширение его в других направлениях в 2 раза.

Установлено влияние химического состава пород на их тепловое линейное расширение.

Коэффициент линейного теплового расширения  $\alpha$  кварцитов увеличивается с увеличением размеров зерен. Это связано с увеличением сил поверхностного натяжения при уменьшении размеров зерен, противодействующих силам теплового расширения.

Коэффициенты линейного теплового расширения минералов в аморфном состоянии ниже, чем в кристаллическом (до  $3,8 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ ).

Пористость, трещиноватость и пустоты в горной породе приводят к снижению ее коэффициента теплового расширения.

Так, установлена следующая зависимость  $\gamma_{т.ср}$  от пористости  $P$ :

$$\gamma_{т.ср} = \gamma_{т.о} \sqrt{1 - P},$$

где  $\gamma_{т.о}$  – коэффициент объемного теплового расширения минеральной фазы породы.

### 2.3.4 Термические напряжения в горных породах

Термические напряжения в горных породах возникают за счет либо неоднородного нагрева породы, либо различия в значениях коэффициентов теплового расширения и упругих свойств слагающих породу минералов и агрегатов.

Так, если представить стержень длиной  $l$ , свободное расширение которого невозможно, то при его нагреве на  $\Delta T$  в нем возникнут термические напряжения  $\sigma_t$ , равные напряжениям, необходимым для сжатия удлинившегося стержня до первоначальных размеров, т. е.

$$\sigma_t = \frac{E \Delta l}{l} = E \alpha \Delta T.$$

Аналогично можно рассчитать термические напряжения в некотором нагреваемом объеме породы, находящемся в массиве, когда возможности расширяться отсутствуют:

$$\sigma'_t = \gamma_t K \Delta T. \quad (2.5)$$

В этом случае нагреваемый объем испытывает напряжения сжатия, в то время как окружающие его объемы в зависимости от их расположения испытывают напряжения сжатия и растяжения.

Если нагреваемый объем породы представить в виде стержня, зажатого с обоих концов другими стержнями той же породы (рис. 2.20), то ненагреваемые стержни породы при отсутствии возможности расширяться будут испытывать напряжения сжатия, которые, очевидно, не будут равны вычисленным по формуле (2.5), поскольку любая порода способна до некоторой степени упруго деформироваться, т. е. (в случае одномерной задачи)

$$\sigma_t = E_n (\alpha \Delta T - \varepsilon), \quad (2.6)$$

где  $E_n$  – модуль упругости нагретого объема;  $\varepsilon$  – относительная деформация нагретого объема, обусловленная упругостью окружа-



ющей породы ( $\varepsilon \approx \sigma_T/E_0$ );  $E_0$  – модуль упругости ненагретого объема (чаще всего  $E_0 > E_H$ ).

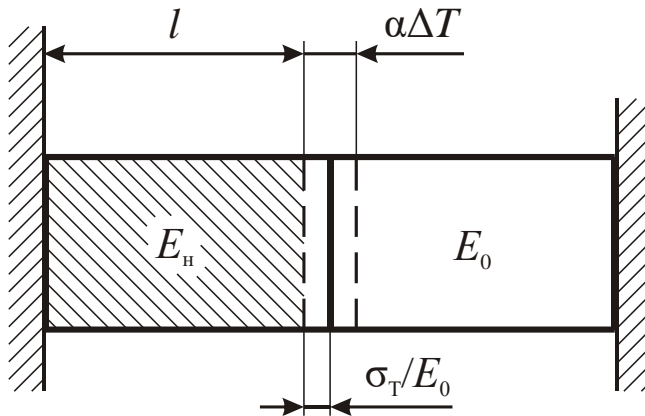


Рис. 2.20 – Схема к расчету термических напряжений при последовательном расположении нагретого  $E_H$  и ненагретого  $E_0$  объемов породы

После преобразований (2.6), приняв равенство нагреваемого и ненагреваемого объемов, получаем

$$\sigma_T = \frac{a\Delta TE_0 E_H}{E_0 + E_H} = a\Delta TE_{\text{пр}}$$

или для случая объемного напряженного состояния

$$\sigma_T = \frac{a\Delta TK_0 K_H}{K_0 + K_H} = \gamma_T \Delta TK_{\text{пр}},$$

где  $K_0$  и  $K_H$  – модули объемного сжатия соответственно ненагретого и нагретого объемов породы;  $E_{\text{пр}}$  и  $K_{\text{пр}}$  – приведенные модули упругости горных пород, учитывающие изменение  $E$  и  $K$  с нагревом, относительное расположение и величины нагретого и ненагретого объемов породы.

В связи с тем, что термические напряжения определяются произведением  $Ea$  или  $K\gamma_T$ , их зависимость от внутренних факторов обусловлена зависимостью модулей упругости и коэффициентов расширения от этих факторов. Например, с увеличением пористости пород термические напряжения уменьшаются.

Если весь образец породы нагреть равномерно, то в нем возможны внутренние, межзеренные термонапряжения, обусловленные различиями в упругих свойствах и коэффициентах теплового расширения отдельных минеральных зерен.

Так, если два соприкасающихся кристалла имеют модули Юнга, равные  $E_1$  и  $E_2$ , а коэффициенты линейного расширения соответ-

ственно  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , то в этих кристаллах возникают термонапряжения  $\sigma_T^{\text{BH}}$ , которые приблизительно можно подсчитать по формуле

$$\sigma_T^{\text{BH}} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T E_1 E_2}{E_1 + E_2}.$$

Так, если железистый кварцит, состоящий из зерен магнетита и кварца, нагреть до температуры 100 °С, то, учитывая, что  $\alpha_{\text{KB}} = 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ ,  $\alpha_{\text{маг}} = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $E_{\text{KB}} = 9,6 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ ,  $E_{\text{маг}} = 10,5 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ , получаем  $\sigma_T^{\text{BH}} = 1,4 \text{ МПа}$ .

Если учесть объемное напряженное состояние и возможную разницу в температурах включения  $T_1$  и матрицы  $T_2$ , то радиальные термические напряжения во включениях можно более точно рассчитать по формуле

$$\sigma_T^{\text{BH}} = \frac{3E_1E_2[\alpha_1(T_1 - T_2) + T_1(\alpha_1 - \alpha_2)]}{3E_2(1 + \nu_1) + 2E_1(1 - 2\nu_2)},$$

где индекс 1 относится к свойствам включения; индекс 2 – к свойствам матрицы.

## 2.4 Электромагнитные свойства образцов горных пород

### 2.4.1 Электрические свойства пород

Несмотря на зависимость удельного электрического сопротивления от множества факторов и широкий диапазон изменения у разных пород, основные закономерности удельного электрического сопротивления установлены достаточно четко.

Изверженные и метаморфические породы характеризуются высокими сопротивлениями (500–10000 Ом · м). Среди осадочных пород высокие сопротивления (100–1000 Ом · м) у каменной соли, гипсов, известняков, песчаников и некоторых других.

Величина диэлектрической проницаемости меняется от нескольких единиц (у сухих осадочных пород) до 80 (у воды) и зависит в основном от процентного содержания воды и от минералогического состава породы. У изверженных пород  $\epsilon$  меняется от 5 до 12 единиц, у осадочных – от 2–3 (у сухих) до 16–40 (у полностью насыщенных водой пород).

Как отмечалось выше, магнитная проницаемость громадного большинства пород равна магнитной проницаемости воздуха. Лишь у ферромагнетиков относительная магнитная проницаемость может возрасти до 10 единиц.

Естественная электрохимическая активность горных пород характеризует возникшие в горных породах электрические поля под действием ряда физико-химических процессов. К числу таких процессов относятся диффузионные, диффузионно-абсорбционные, фильтрация пластовых вод в пористой среде, окислительно-восстановительные реакции, происходящие на контакте ионных и электронных проводников.

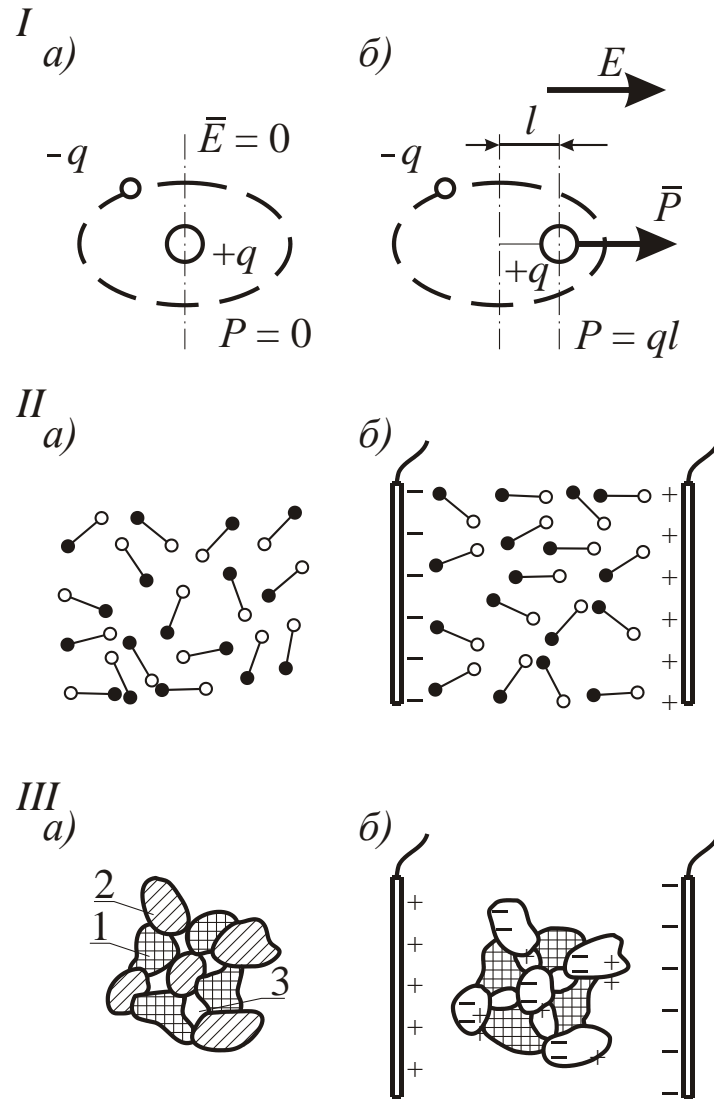
Величина электрохимической активности (коэффициент  $\alpha$ ) меняется от  $-(10-15)$  мВ у чистых песков, близко к нулю у скальных пород, возрастает до  $+(20-40)$  мВ у глин и до сотен милливольт для руд с электропроводящими минералами (сульфиды, графит, антрацит). В целом  $\alpha$  зависит от многих природных факторов (минерального состава, глинистости, пористости, проницаемости, влажности, минерализации подземных вод и др.).

Наибольшей поляризуемостью отличаются руды с электронной проводимостью (сульфиды, сульфосоли, некоторые самородные металлы, отдельные окислы, графит, антрацит). Природа этих потенциалов связана с так называемой концентрационной и электродной поляризацией рудных минералов. Коэффициенты поляризуемости до 2–6 % наблюдаются над обводненными рыхлыми осадочными породами, в которых имеются глинистые частицы. Поляризуемость их обусловлена деформациями внешних обкладок двойных электрических слоев, возникающих на контакте твердой и жидкой фазы. Большинство изверженных, метаморфических и осадочных пород, насыщенных минеральной водой, слабо поляризуется (меньше 2 %).

#### **2.4.2 Электрическая поляризация минералов и пород**

В любой горной породе имеются свободные (электроны) и связанные (например, ионы) заряды.

При наложении на породу электрического поля в ней происходит смещение внутренних связанных зарядов. В результате на ее поверхности появляются неуравновешенные заряды. Это явление носит название **электрической поляризации** (рис. 2.21).



$I$  – электронная поляризация;  $II$  – дипольная поляризация;  
 $III$  – миграционная поляризация;  $a$  – при отсутствии внешнего электрического поля;  $б$  – при наличии внешнего электрического поля;  
 $1$  – диэлектрик;  $2$  – проводник;  $3$  – породы

Рис. 2.21 – Различные виды электрической поляризации горных пород

**Вектор поляризации  $P_3$**  – суммарный электрический момент единицы объема породы. В зависимости от механизма поляризации и типа частиц, участвующих в ней, выделяют четыре основные ее вида: **электронную, ионную, дипольную и миграционную.**

**Электронная** поляризация  $P_{эл}$  возникает в атомах в результате смещения электронных орбит относительно положительно заряженных ядер. Так как с увеличением напряженности поля смещение электронных орбит увеличивается, величина  $P_{эл}$  прямо пропорцио-

нальна напряженности электрического поля  $E_3$  (упругая поляризация):

$$\bar{P}_{эл} = \alpha_э \bar{E}_э n,$$

где  $\alpha_э$  – поляризуемость атома (коэффициент, характеризующий способность электронного облака данного атома деформироваться под воздействием внешнего электрического поля),  $\Phi \cdot \text{м}^2$ ;  $n$  – число поляризующихся в единице объема атомов,  $1/\text{м}^3$ .

Электронная поляризация присуща всем атомам и молекулам и является наиболее быстрым видом поляризации (возникает за  $10^{-13}$  с).

**Ионная** (атомная) поляризация  $P_{и}$  образуется за счет смещения в электрическом поле ионов или частей кристаллических решеток с ковалентной связью. При этом под воздействием электрического поля положительные и отрицательные ионы сдвигаются. Величина ионной поляризации также прямо пропорциональна напряженности внешнего электрического поля  $E_э$ :

$$\bar{P}_{и} = \alpha_{и} E_э n.$$

Время установления ионной поляризации несколько меньше, чем электронной; оно составляет  $10^{-14}$ – $10^{-12}$  с.

**Дипольная** поляризация  $P_{д}$  наблюдается при наличии в породах ионов с полярными связями. В этом случае каждая молекула уже имеет некоторый дипольный момент при отсутствии внешнего электрического поля. Тем не менее, в объеме породы, состоящем из таких молекул, из-за их хаотического расположения суммарный дипольный момент при отсутствии внешнего поля равен нулю.

При его наличии диполи будут ориентироваться согласно внешнему полю, т. е. возникает электрическая поляризация объема породы.

Дипольная поляризация завершается в течение  $10^{-10}$ – $10^{-7}$  с.

**Миграционная** (объемная) поляризация  $P_{м}$  возникает в многофазной породе, состоящей из частиц, обладающих различными электрическими свойствами, а также при наличии пор, заполненных электролитом.

При внесении породы в электрическое поле свободные электроны и ионы, содержащиеся в проводящих и полупроводящих включениях, начинают перемещаться в пределах каждого вклю-

чения. В результате каждое включение приобретает дипольный момент и ведет себя подобно большому диполю.

Время завершения миграционной поляризации составляет  $10^{-6}$ – $10^{-3}$  с.

Время установления дипольной и миграционной поляризации пород сравнимо с частотой применяемых на практике электромагнитных полей, поэтому указанные виды поляризации называются релаксационными или медленными в отличие от «мгновенного» смещения электронов и ионов.

Суммарная поляризация породы, представляющая собой средний дипольный момент единицы ее объема, равна сумме всех видов поляризации.

$$\bar{P}_\Sigma = \alpha_0 E_{\Sigma 0} n,$$

где  $\alpha_0$  – условная средняя поляризуемость.

Поляризации пород сопутствует явление, называемое **электрострикцией**. Оно заключается в деформировании (подобно всестороннему сжатию) диэлектриков под действием электрического поля и присуще всем породам.

Причинами электрострикции являются, с одной стороны, давление на породу заряженных частиц, создающих электрическое поле и притягивающихся друг к другу, с другой – смещение ионов и электронов в породе, вызываемое внешним полем.

### 2.4.3 Магнитные свойства пород

Согласно закону Кулона, **сила взаимодействия между двумя магнитными массами**  $m_{M1}$  и  $m_{M2}$  на расстоянии  $r$  друг от друга

$$F_M = \pm \frac{m_{M1} m_{M2}}{\mu_a r^2},$$

где  $\mu_a$  – некоторая характеристика среды (вещества, породы), называемая **абсолютной магнитной проницаемостью**, Гн/м.

Между магнитной индукцией  $B$  и напряженностью магнитного поля  $H$  (величина векторная, характеризующая интенсивность магнитного поля) в веществе существует прямо пропорциональная зависимость

$$B = \mu_0 \mu H.$$

В вакууме  $\mu_a = \mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  Гн/м. Эту константу называют **магнитной постоянной**.

Отношение  $\mu = \mu_a / \mu_0$  называют **относительной магнитной проницаемостью**.

Основными параметрами (характеристиками) магнитных свойств горных пород (веществ) являются:

- магнитная проницаемость  $\mu$ ;
- магнитная восприимчивость  $H$  пород.

**Относительная магнитная проницаемость**  $\mu$  вещества равна

$$\mu = \frac{B}{B_0},$$

где  $B$  – магнитная индукция поля в веществе;  $B_0$  – магнитная индукция поля в вакууме.

Следовательно, **относительная магнитная проницаемость**  $\mu$  показывает, во сколько раз магнитная индукция  $B$  поля в веществе больше, чем магнитная индукция  $B_0$  этого же поля в вакууме (для вакуума  $\mu = 1$ ).

Все горные породы и минералы обладают в той или иной степени магнитными свойствами, т. е. они являются *магнетиками*. При внесении во внешнее магнитное поле они намагничиваются и приобретают магнитный момент  $M$ , последний, в свою очередь, обусловлен наличием в породе элементарных магнитных моментов  $m_i$ .

Мерой намагничивания породы (вещества) служит **намагниченность**  $J$ , которая представляет собой сумму магнитных моментов  $m_i$  в единице объема  $V$ :

$$J = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\Delta V}.$$

**Намагниченность**  $J$  породы может быть определена, как приращение магнитной индукции поля в веществе по сравнению с вакуумом:

$$\bar{J} = \mu_a \bar{H} - \mu_0 \bar{H} = \mu_0 \bar{H} (\mu - 1).$$

Намагниченность  $\bar{J}$  – векторная величина. Она прямо пропорциональна напряженности  $\bar{H}$  магнитного поля:

$$\bar{J} = \mu_0 \bar{H} (\mu - 1).$$

Коэффициент  $(\mu - 1) = H$  называют **объемной магнитной восприимчивостью**, а отношение магнитной восприимчивости к плотности породы  $H/\rho$  – **удельной магнитной восприимчивостью**  $\chi$ .

Следовательно, магнитная восприимчивость  $H$  и магнитная проницаемость  $\mu$  связаны соотношением

$$\mu = 1 + H.$$

По магнитным свойствам минералы и горные породы делят на **диамагнитные (диамагнетики)**, **парамагнитные (парамагнетики)** и **ферромагнитные (ферромагнетики)**.

**Диамагнитными** называют горные породы, у которых при отсутствии внешнего магнитного поля (магнитная восприимчивость  $H = 0$ ) магнитный момент атомов и молекул равен нулю. Магнитная проницаемость диамагнетиков меньше единицы, т. е.  $\mu < 1$ . Магнитная проницаемость диамагнитных минералов и пород находится в пределах  $\mu = 0,999836-1,0$ .

**Парамагнитными** называют горные породы, атомы которых обладают магнитным моментом при отсутствии внешнего магнитного поля. Магнитная проницаемость парамагнитных горных пород (веществ)  $\mu \geq 1$ ;  $H > 0$ .

Магнитная проницаемость парамагнитных пород  $\mu = 1,0-1,0064$ .

**Ферромагнитными** называют горные породы, у которых целые объемы (домены) обладают магнитным моментом при отсутствии внешнего поля, у них  $\mu \gg 1,0$ ;  $H > 0$ . Магнитная проницаемость ферромагнитных минералов и пород находится в пределах  $\mu = 1,0064-6,5$ .

Магнитные свойства горных пород зависят от их минерального состава (содержания ферромагнитных минералов), формы, размеров и взаимного расположения зерен, температуры, напряженности и частоты магнитного поля и других факторов.

При измерении магнитной восприимчивости ее истинные значения можно получить только на образцах кольцевой формы. Однако изготовление их из горных пород связано с техническими трудностями, поэтому на практике исследуют образцы цилиндрической или призматической формы. У таких образцов проявляется



анизотропия магнитных свойств, определяемая их формой. Анизотропию объясняют действием размагничивающего поля, наведенного в образце.

На магнитные свойства пород оказывают также влияние форма, размеры и взаимное расположение ферромагнитных зерен. Например, магнитная восприимчивость крупнозернистых ферромагнетиков больше, чем мелкозернистых. Это объясняется ростом числа доменов в зернах при увеличении их размеров.

В переменных магнитных полях возникают потери магнитной энергии – переход ее в тепловую. Для их оценки используют коэффициент магнитных потерь. Потери в переменном поле складываются из потерь на гистерезис и вихревые токи.

Некоторые ферромагнетики обладают ярко выраженными магнитострикционными свойствами. При намагничивании таких пород происходит их относительное удлинение (например, магнетита, железа) или укорачивание (например, никеля).

## 2.5 Горно-технологические параметры горных пород

### 2.5.1 Крепость горных пород

Крепость горных пород – характеристика сопротивляемости пород их добычанию – технологическому разрушению. Понятие крепости введено проф. М. М. Протодяконовым (старшим), который для количественной ее оценки предложил коэффициент крепости  $f$ , в первом приближении пропорциональный пределу прочности породы при сжатии. Им была разработана шкала горных пород по крепости, в соответствии с которой все горные породы подразделены на 10 категорий.

К первой категории относятся породы, имеющие наивысшую степень крепости ( $f = 20$ ), к десятой – наиболее слабые плавучие породы ( $f = 0,3$ ). Пределы изменения коэффициента крепости – от 0,3 до 20.

Так как  $f$  связан с прочностью пород, его можно рассчитать по  $\sigma_{сж}$  в простейшем случае по формуле

$$f = \sigma_{сж} \cdot 10^{-7}.$$

Более точно связь между  $\sigma_{сж}$  и  $f$  в области больших значений  $\sigma_{сж}$  может быть выражена эмпирической формулой

$$f = 0,33 \cdot 10^{-7} \sigma_{сж} + 0,58 \cdot 10^{-3} \sqrt{\sigma_{сж}}.$$

Существуют и другие формулы взаимосвязи коэффициента крепости пород с их прочностными параметрами.

Коэффициент крепости можно определить также экспериментально, например, методом толчения по М. М. Протодяконову (младшему).

Сущность метода толчения заключается в следующем. Берут пять кусков породы массой приблизительно по 40–60 г. Каждый кусок дробят в стакане гирей массой 2,4 кг, сбрасываемой с высоты 0,6 м. После 5–15-кратного сбрасывания гири получающуюся мелочь просеивают через сито с отверстиями 0,5 мм. Фракцию размером менее 0,5 мм собирают с пяти образцов и насыпают в стакан объеммера диаметром 23 мм. Определяют высоту столбика пыли  $l$ , мм, в объеммере. Коэффициент крепости, который часто называют динамическим  $f_d$ , вычисляют по формуле

$$f_d = \frac{20n}{l},$$

где  $n$  – число сбрасываний гири при испытании одного образца.

Этот метод основан на предположении, что работа разрушения породы пропорциональна объему получившихся в результате разрушения мельчайших частиц.

Так как коэффициент крепости в наибольшей степени отражает только разрушение породы от сжимающих нагрузок, а в реальных условиях часто используются растягивающие и скалывающие усилия, возникает необходимость введения иных показателей трудности технологического разрушения пород. Такой показатель предложен акад. В. В. Ржевским.

### 2.5.2 Хрупкость и пластичность пород

Так как пластические и обратные им – хрупкие – свойства пород существенно сказываются на процессах их разрушения (в частности, пластичность увеличивает энергоемкость дробления и измельчения пород), в практике горного производства используют различные горно-технологические показатели пластичности и хрупкости.

В качестве технологического показателя пластичности принимают параметр, определяющий, во сколько раз удельная работа

разрушения образца реальной породы  $A_p$  при одноосном сжатии выше удельной работы разрушения идеально упругой породы  $A_y$  с тем же пределом прочности при сжатии.

Удельную работу разрушения рассчитывают по площади диаграммы «напряжение – деформация» (рис. 2.22). Коэффициент пластичности определяют по формуле

$$k_{пл} = \frac{S_{OCD}}{S_{OAB}} = \frac{2E}{E_{деф}} - 1.$$

Для оценки хрупких свойств пород в ИГД им. А. А. Скочинского Л. И. Бароном предложен коэффициент хрупкости  $k_{хр}$ , представляющий собой отношение работы  $A_y$ , затраченной на деформирование образца в чисто упругой области, к полной работе  $A_{п}$ , затраченной на разрушение образца (рис. 2.22).

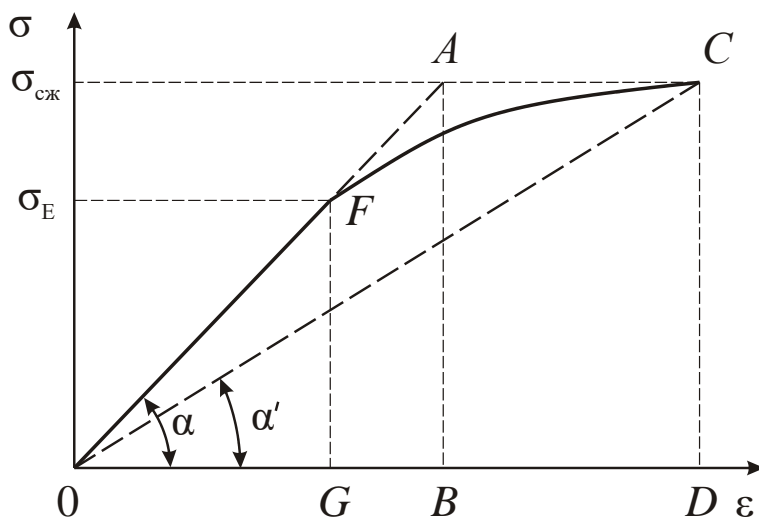


Рис. 2.22 – График к расчету коэффициентов пластичности и хрупкости пород ( $\operatorname{tg} \alpha$ ,  $\operatorname{tg} \alpha'$  – соответственно модули Юнга и полной деформации)

$$k_{пл} = \frac{A_y}{A_{п}} = \frac{S_{OFG}}{S_{OCD}} \leq 1.$$

Определенный по данной методике коэффициент хрупкости мрамора составляет 0,13, известняка – 0,23, железистого кварцита КМА – 0,38, джеспилита – 0,5.

С ростом предела прочности при одноосном сжатии коэффициент хрупкости возрастает.

Предложено множество других показателей, оценивающих пластичность и хрупкость горных пород. Так, коэффициенты хрупкости рассчитывают по отношению пределов прочности породы при сжатии и растяжении

$$k'_{\text{хр}} = \frac{\sigma_{\text{сж}}}{\sigma_{\text{р}}}$$

или по отношению значений предела упругости  $\sigma_E$  и предела прочности при сжатии  $\sigma_{\text{сж}}$

$$k'_{\text{хр}} = \frac{\sigma_E}{\sigma_{\text{сж}}}.$$

### 2.5.3 Твердость пород

Твердость горных пород определяет сопротивляемость пород внедрению в них острого инструмента, т. е. разрушению при точечном (контактном) нагружении. Твердость минералов принято оценивать по известной шкале Мооса. Так как породы состоят из многих минералов и их твердость является агрегатной, для ее определения используют методы, основанные на вдавливании особых штампов в породу.

В зависимости от того, вдавливается ли инструмент в породу при постепенно увеличивающейся нагрузке или ударе, различают статическую  $H_{\text{ст}}$  и динамическую  $H_{\text{д}}$  твердость, причем  $H_{\text{ст}} \neq H_{\text{д}}$ .

Для большинства горных пород применяется метод определения **статической твердости**  $\rho_{\text{ш}}$ , основанный на хрупком выколе лунки в шлифованной поверхности породы под действием приложенной к специальному штампу нагрузки. Метод этот разработан Л. А. Шрейнером.

Если во время опыта фиксируется деформация, то попутно может быть определен модуль упругости породы.

Так называемый метод **контактной прочности**, разработанный Л. И. Бароном и Л. Б. Глатманом в ИГД им. А. А. Скочинского, является более простым вариантом метода Л. А. Шрейнера. По этому методу производится вдавливание цилиндрического штампа с плоским основанием и диаметром 2–3 мм в нешлифованную поверхность образца. Контактная прочность  $\rho_{\text{к}}$  (твердость) образца определяется по величине нагрузки в момент хрупкого разрушения (выкола лунки под штампом), отнесенной к площади штампа.

Связь между  $\rho_{\text{к}}$  и  $\rho_{\text{ш}}$  приблизительно равна следующему соотношению:

$$\rho_{\text{ш}} \approx (2,5 - 3,0) \rho_{\text{к}}.$$

С увеличением пластичности пород твердость их уменьшается (рис. 2.23).

$$\rho_{\text{ш}} = k \sigma_{\text{сж}}. \quad (2.7)$$

Твердость пород всегда выше предела прочности при одноосном сжатии, так как она соответствует прочности породы при сложном всестороннем сжатии, причем характер объемного сжатия в значительной степени зависит от упругих и пластических свойств породы.

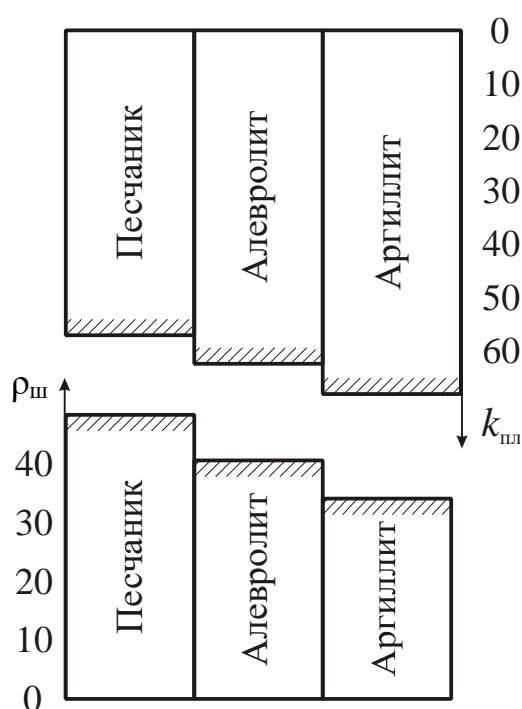


Рис. 2.23 – Сравнение твердости пород  $\rho_{\text{ш}}$  с их коэффициентом пластичности  $k_{\text{пл}}$

Отмечено, что с ростом пластичности породы величина коэффициента  $k$  уменьшается с 20 до 5, т. е. численные значения твердости приближаются к значениям  $\sigma_{\text{сж}}$ . Так, установлено, что для изверженных пород Армении  $k \approx 8,8-10$ , для глин и глинистых сланцев  $k \approx 3-18$ , для песчаников  $k \approx 2-20$ , для карбонатных пород  $k \approx 5-12$ . Поэтому для вывода показателя  $\rho'_{\text{к}}$ , близкого по своей сущности к  $\rho_{\text{к}}$ , в уравнении (2.7) можно принять  $k$  обратно пропорциональным коэффициенту пластичности  $k_{\text{пл}}$ .

Тогда  $\rho'_{\text{к}}$  можно вычислять по формуле

$$\rho'_{\text{к}} = \frac{30E_{\text{деф}}\sigma_{\text{сж}}}{E}.$$

**Динамическая твердость** может быть определена методом Шора. Его сущность заключается в том, что на поверхность испытуемой породы с определенной высоты сбрасывается боек со сферическим алмазным наконечником. За показатель твердости принимается высота отскока бойка.

Твердость пород указывает на их сопротивляемость разрушению при воздействии бурового инструмента и поэтому определяет производительность буровых установок.

#### 2.5.4 Вязкость, дробимость и абразивность пород

Наиболее трудно поддаются разрушению породы, имеющие высокую прочность и большую зону пластической деформации. Такие породы являются вязкими.

Технологический **показатель вязкости горных пород при разрушении** пропорционален сопротивлению породы силам, стремящимся разъединить ее частицы. Он определяется пластическими свойствами породы, отношением пределов прочности при растяжении и сжатии, а также значением предела прочности породы при сдвиге. Общеизвестного метода определения вязкости не существует. Так как вязкость прямо пропорциональна произведению пластичности породы на ее прочность, эту величину можно принять в качестве физического аналога вязкости **В** пород:

$$B = \frac{E\sigma_{сж}}{E_{деф}}.$$

Вязкость горных пород при разрушении не равноценна **вязкости деформирования** – коэффициенту внутреннего трения  $\eta$ , который в соответствии с законом Ньютона является коэффициентом пропорциональности между приложенными касательными напряжениями  $\tau$  и скоростью деформирования  $d\varepsilon/dt$ :

$$\tau = \frac{\eta d\varepsilon}{dt}.$$

Эта величина для горных пород очень велика и составляет  $10^{11}$ – $10^{13}$  Па · с (для сравнения: вязкость глицерина составляет 0,85 Па · с).

В ряде случаев к горным породам применяют понятие ударной вязкости, используемое в металловедении. Ударная вязкость – это работа разрушения надрезанного образца при ударном изгибе на копре. Она выражается в джоулях на метр квадратный.

**Дробимость** выражает энергоемкость процесса дробления породы приложением к ней динамической нагрузки и, как показывают исследования, лучше коррелирует с динамическими методами разрушения пород, чем предел прочности при одноосном нагружении под прессом  $\sigma_{сж}$ .

Современные лабораторные методы определения дробимости пород обычно основываются на оценке удельного расхода энергии на дробление единицы объема породы. Так, по одному из методов, предложенному Л. И. Бароном, дробимость пород определяется одиноким сбрасыванием на образец груза массой 16 кг с высоты 0,5 м. Дробимость устанавливается по объему  $V_{max}$  образованных в результате удара частиц диаметром менее 7 мм. Так, легко дробимая маритовая руда имеет  $V_{max}$ , равный 13,4 см<sup>3</sup>, а трудно дробимый джепилит – всего 2 см<sup>3</sup>.

**Дробимость**  $D$  – параметр, обратный вязкости, поэтому для его оценки по механическим свойствам можно воспользоваться уравнением

$$D = \frac{E_{деф}}{E\sigma_{сж}}.$$

**Абразивность** характеризует способность пород изнашивать при трении инструмент. Абразивность оценивают по износу материала, контактирующего с горной породой. Исследование абразивности по методу Л. А. Шрейнера производится следующим образом. К испытываемому образцу породы прижимают вращающееся кольцо из материала, по отношению к которому определяется абразивность породы. Кольцо взвешивают до начала опыта и после определенного количества оборотов. Вычисляют износ  $\Delta V_c$ , см<sup>3</sup>/м, материала кольца, приходящийся на 1 м пути его движения по породе. Коэффициент абразивности  $k_{аб}$ , см<sup>3</sup>/(Н · м), определяют по формуле

$$k_{аб} = \frac{\Delta V_c}{F},$$

где  $F$  – сила, с которой кольцо прижимается к породе, Н.

В ИГД им. А. А. Скочинского разработана упрощенная методика определения относительной абразивности горных пород. Сущность ее заключается в истирании о поверхность образца горной породы в течение 10 мин торца вращающегося стержня из незакаленной стали и последующих определений износа массы стержня.

За критерий абразивности принимают суммарную потерю массы стержня (в миллиграммах) при истирании поочередно обоих его концов, которое производится при осевой нагрузке 150 Н и частоте вращения 400 мин<sup>-1</sup>.

Наиболее абразивными горными породами являются порфиры, диориты, граниты и корундсодержащие породы. Так,  $k_{аб}$  гранитов, корундов и сиенитов достигает 90 мг, песчаников – 18–30 мг, в то время как у известняка и мрамора  $k_{аб} = 2–5$  мг.

Абразивность по методике Л. А. Шрейнера (относительно стали У8) составляет у известняка и доломита  $(20–22) \cdot 10^{-7}$  см<sup>3</sup>/(Н · м), у полевошпатовых пород –  $(35–40) \cdot 10^{-7}$  см<sup>3</sup>/(Н · м), а у кварцевых пород –  $(50–90) \cdot 10^{-7}$  см<sup>3</sup>/(Н · м).

Как и в предыдущих случаях, коэффициенту абразивности  $k_{аб}$  можно подобрать соответствующий аналог  $k'_{аб}$ , основанный на комплексе механических свойств пород. Действительно, степень истирания инструмента породой зависит от формы минеральных частиц в породе (например, острые или округлые) и твердости этих частиц  $H_m$ . Так как форма частиц – это структурный показатель, физическими параметрами, обуславливающими абразивность пород, становятся пределы прочности при сжатии минеральных частиц  $\sigma_{сж.м}$ , а также их модули деформации  $E_{деф.м}$  и упругости  $E_m$ , т. е.

$$k'_{аб} \approx H_m = \frac{E_{деф.м} \sigma_{сж.м}}{E_m}.$$

Анализ показывает, что между  $k'_{аб}$  и  $k_{аб}$  существует достаточно хорошая связь.

Абразивность пород можно определить также другими способами, в частности, радиоактивным методом, при котором определяется потеря массы радиоактивного эталона при его трении о породу.



### **3 ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД И ПРОЦЕССЫ В МАССИВЕ И РАЗРЫХЛЕННЫХ ПОРОДАХ**

#### **3.1 Строение, состав и состояние массивов горных пород**

##### **3.1.1 Основные особенности строения и состава горных пород в массиве**

Основные факторы, обуславливающие более сложное строение горных пород в массиве по сравнению с образцом, – это развитая трещиноватость пород: геологические нарушения, естественные и искусственные трещины.

**Трещиной** называют плоский разрыв сплошности среды, величина которого на порядок и более превосходит межатомные расстояния в кристаллической решетке (то есть более  $10^{-9}$  м).

Трещины различаются по следующим признакам.

1. По степени раскрытия: открытые, закрытые, скрытые.

Открытые трещины – это трещины с разомкнутыми стенками. Открытые трещины могут быть зияющими или заполненными другой породой или минералами. В закрытых трещинах наблюдается плотное смыкание их стенок. Скрытые трещины вообще неопределимы визуально, однако при нагружении породы разрушение происходит именно по ним.

2. По размерам: внутрикристаллические трещины, вызванные условиями возникновения и развития в породе отдельных кристаллов (размеры около  $10^{-9}$ – $10^{-5}$  м); межкристаллические трещины, ориентированные хаотично (размеры  $10^{-4}$ – $10^{-2}$  м); макроскопические трещины: кливаж, тектонические нарушения, трещины усыхания и остывания, выветривания и т. д. (размеры от  $10^{-1}$  до  $10^{-2}$  м).

3. По форме: прямолинейные и изогнутые (коленчатые, дугообразные и кольцеобразные).

Выделяют также системы трещин: радиальные, концентрические, кулисообразные, ветвящиеся и др.

4. По геометрическому взаимоотношению трещин со слоистостью: трещины продольные, параллельные линии простирания; поперечные, пересекающие породу в направлении линии падения; диагональные, которые пересекают породу под различными вертикаль-

ными углами; согласные трещины, поверхности которых параллельны плоскостям слоистости или сланцеватости.

5. По углам наклона к горизонтали: вертикальные (угол падения  $80\text{--}90^\circ$ ), крутые ( $60\text{--}80^\circ$ ), средней крутизны ( $30\text{--}60^\circ$ ), пологие ( $10\text{--}30^\circ$ ) и горизонтальные ( $0\text{--}10^\circ$ ).

Трещиноватость пород определяется густотой расположения трещин, количеством систем трещин и их взаиморасположением.

Трещины, группируясь в системы, разбивают породу на блоки (отдельности горных пород), форма и величина которых зависят от числа систем трещин, направления и частоты трещин в системе.

Система трещин может оказать влияние на физические параметры пород, если исследуемый объем породы таков, что эти трещины в нем присутствуют.

В лабораторных экспериментах большинство трещин, характеризующих горную породу в массиве, не может быть учтено.

В связи с этим наблюдается отличие свойств образца от горной породы в массиве. Это различие называется **масштабным эффектом**.

По технологическим соображениям при оценке разрабатываемых массивов в известное подразделение пород по силам связей на твердые, связные и рыхлые (см. п. 1.1) вводят дополнительные группы пород в зависимости от их строения. Так, твердые породы подразделяют на скальные и полускальные, связные – на плотные и мягкие, рыхлые – на сыпучие и разрушенные.

К **скальным** относят большую часть изверженных и метаморфических пород и некоторые породы осадочного происхождения.

К **полускальным** относят часть изверженных и метаморфических пород (со сравнительно слабыми силами сцепления между частицами) и породы осадочного происхождения. Характерная технологическая особенность полускальных пород в отличие от связных и рыхлых – необходимость их разрушения перед выемочно-погрузочными работами. К полускальным породам относятся, например, слабые песчаники, мергели, слабые известняки и сланцы, гипс, каменная соль, крепкие каменные угли и др.

**Плотные** породы представлены твердыми глинами, мелями, бурыми и каменными углями и др. Их можно разрабатывать горными машинами без предварительного разрушения при достаточных усилиях резания. В случае динамических нагрузок плотные породы разрушаются хрупко, но при длительном воздействии нагрузок они ведут себя как пластичные тела.

**Мягкие** породы представлены песчаными суглинками, супесями, мягкими углями и др. Такие породы достаточно легко разрабатываются без предварительного рыхления всеми видами выемочных машин. При высыхании они становятся полутвердыми, а под действием воды набухают.

**Сыпучие** породы – это различные пески.

**Разрушенные** породы – это первоначально твердые или связные породы, которые под воздействием природных или искусственных факторов разрушены, превращены в рыхлые.

Скальные и полускальные породы по степени трещиноватости подразделяются на пять технологических категорий:

1. Практически монолитные, у которых размер отдельностей превышает 1,5 м, средний размер – около 1 м, видимые трещины отсутствуют.

2. Малотрещиноватые, у которых среднее расстояние между трещинами и размер отдельностей – до 1,5 м (в среднем 0,7 м). Такие породы имеют блочное строение, видимые трещины в них заполнены мелким материалом.

3. Средней трещиноватости, у которых расстояние между трещинами и средний размер отдельностей составляют около 0,5 м. Они имеют блочное строение, хорошо различимые, иногда заполненные мелким материалом трещины.

4. Сильнотрещиноватые с отдельностями в среднем около 0,3–0,4 м. Часто имеют место напластования и видимые сомкнутые трещины.

5. Чрезвычайно трещиноватые, имеющие средний размер отдельностей в массиве около 0,2 м. Отсутствуют отдельности крупнее 1 м.

Степень трещиноватости пород варьируется в широких пределах даже на одном месторождении. Поэтому одинаковые по наименованию породы одного месторождения на различных участках могут быть отнесены к разным категориям трещиноватости.

Преобладание какой-то определенной ориентированной системы трещин в горной породе в массиве может привести к возникновению анизотропии.

Породный массив, состоящий из нескольких пород, обладает некоторыми усредненными свойствами слагающих массив пород. Однако дополнительное влияние оказывают такие факторы, как

мощность, характер и форма залегания отдельных пород, их чередованность, слоистость, нарушенность.

По строению массивы пород характеризуются мощностью и углом падения слоев, наличием геологических нарушений, зон трещиноватости, секущих жил, интрузий и т. д.

Так, в первую очередь, все массивы горных пород подразделяют (рис. 3.1) на тектонически не нарушенные (*а*) и нарушенные, среди которых выделяют массивы с моноклиналим залеганием пород (*б*), простого складчатого строения без разрывов сплошности (*в*), сложного складчатого строения с вторичной складчатостью пород (*г*), сложного складчатого строения с развитыми разрывами (*д*), сложного складчатого строения с магматическими внедрениями (*е*).

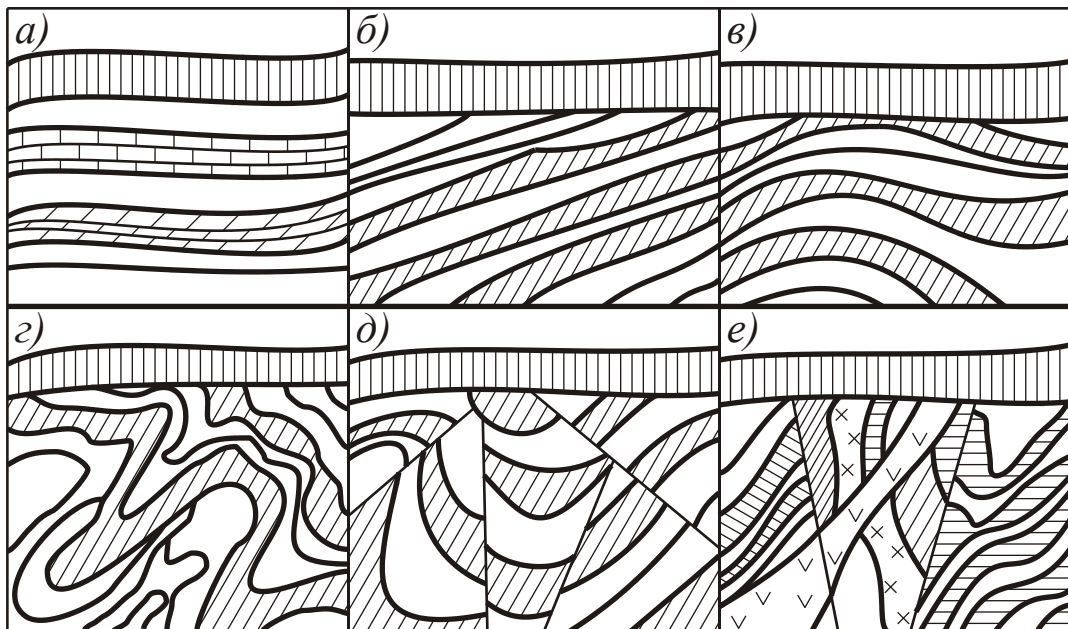


Рис. 3.1 – Схемы различного строения массивов горных пород

При изучении строения и состава пород в толще массива можно наблюдать сильное влияние выветривания на породы верхних слоев и влияние уплотнения, обезвоживания и цементации на свойства тех же пород нижних слоев.

В слоистой толще массива горных пород одни и те же породы могут вести себя либо как жесткие, либо как пластичные в зависимости от того, между какими породами они залегают. Так, угольный пласт может быть жестким элементом в толще глинистых пород и выступать податливым, пластичным пропластком между плотными песчаниками.

Поэтому массив горных пород должен рассматриваться и изучаться как единое целое с учетом его специфического состава, строения и состояния.

### 3.1.2 Физическое состояние горных пород в массиве

В массивах горных пород выделяют начальное состояние, когда массив не нарушен никаким искусственным воздействием, и нарушенное состояние, появляющееся в результате ведения горных работ. Начальное состояние характеризуется естественными физическими полями. В первую очередь, это **жидкости и газы, насыщающие массивы горных пород**.

Вода на земном шаре составляет около 1 % всей массы Земли. При этом на подземные воды приходится более 20 % всех мировых запасов воды – около  $3,6 \cdot 10^8$  км<sup>3</sup>.

В связи с тем, что при температуре 364 °С вода при любом давлении находится в парообразном состоянии, нижняя граница распространения подземных вод располагается на глубине 10–12 км.

До глубины примерно 30 м выделяют так называемую зону аэрации, в которой вода не полностью заполняет поры и пустоты в массивах пород, хорошо насыщена кислородом, поступает из атмосферы (так называемая верховодка).

Ниже зоны аэрации располагаются безнапорные грунтовые воды со свободным зеркалом, и далее между водонепроницаемыми пластами – напорные артезианские.

Все эти воды относятся к зоне насыщения, вода в которой полностью заполняет пустоты и поры в породах и находится под давлением.

По условиям залегания выделяют воды поровые, пластовые, трещинные, карстовые.

Газы, содержащиеся в массивах горных пород, различаются по химическому составу. Наиболее распространенными являются углекислый газ, сероводород, азот, метан, водород, пары воды. Наибольшее количество газов сконцентрировано в породах органического происхождения.

Газы в породах накапливаются, как правило, в результате биохимических процессов. Так, метан и водород – продукты метаморфизма углей. Сероводород появляется при взаимодействии сульфатных вод с метаном. За счет различного давления в разных точках

массива наблюдаются перемещение (дренаж) газов в сторону пониженного давления и выделение в атмосферу, где газовое давление становится равным атмосферному. Эти зоны называются зонами газового выветривания. В Донбассе, например, эта зона достигает глубин 100–300 м, в Кузбассе – 50–150 м.

Горные породы в массивах, кроме того, находятся под воздействием различных естественных нагрузок: давления вышележащих слоев пород, сил тектонического движения земной коры, напора подземных вод, давления газов и др. Вся совокупность этих сил, приводящих к возникновению напряженно-деформированного состояния породы, называется **горным давлением**.

В плотных нетрещиноватых породах максимальные вертикальные напряжения  $\sigma_z$ , вызванные действием **гравитационных сил** на глубине  $H$ , могут быть рассчитаны по известному объемному весу пород  $\gamma$ :

$$\sigma_z = \gamma H .$$

Горизонтальные напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , вызванные горизонтальными составляющими гравитационного поля, рассчитывают, используя уравнения теории упругости:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\nu \gamma H}{1 - \nu} .$$

Величину  $\nu/(1 - \nu)$  называют коэффициентом бокового распора  $k_6$ . Он находится в пределах 0,2–0,9. Так, для глин Подмосковского бассейна  $k_6$  составляет 0,7–0,98; для глинистых сланцев Донбасса – 0,72–0,92; для глинистых песчаников КМА – 0,45. Таким образом, на глубине 500 м напряжения от гравитационных сил в зависимости от плотности пород могут быть в пределах от 7,5 МПа до 18,0 МПа.

Наряду с напряжениями, вызванными действием гравитационных сил, в массивах пород существует поле **тектонических напряжений**, возникающих вследствие тангенциального сжатия земной коры. Тектонические напряжения в первом приближении можно принять горизонтальными. Часто тектонические напряжения превосходят гравитационные в десятки раз.

Различные характер и форма залегания пород в массивах, их слоистость, перемятость, трещиноватость, тектонические нарушения, различное чередование пород с разными свойствами вызывают неравномерность распределения напряжений в массиве, появление

зон повышенного и пониженного давлений, растягивающих и сдвигающих напряжений. Измерения показывают, что реальные напряжения вблизи тектонических разломов всего на глубине нескольких сотен метров могут достигнуть 100 МПа. Наряду с естественными напряжениями породы в массиве могут испытывать и напряжения, которые появляются в результате технологического воздействия на породы (бурение, взрывание, дробление и т. д.).

**Естественные тепловые поля** в массивах горных пород обусловлены, в первую очередь, внутренними источниками тепла, среди которых выделяют распад радиоактивных элементов, приливное трение, гравитационную дифференциацию, химические реакции и др. Приток тепла к земной поверхности происходит с глубин 700 км, плотность теплового потока изменяется примерно от  $2 \cdot 10^{-2}$  до  $13 \cdot 10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup>.

Термические условия массива горных пород характеризуются геотермическим градиентом  $\Gamma$ , показывающим, на сколько градусов возрастает температура в массиве при углублении на 1 м. Так, если в Подмосковье  $\Gamma$  составляет  $1,5 \cdot 10^{-2}$  К/м, то в районе Донбасса он доходит до  $3 \cdot 10^{-2}$  К/м. В зависимости от строения массива горных пород тепловое поле может существенно искажаться. На распределение температур влияют неоднородность, слоистость, складчатость толщи горных пород, движение жидкости и газов в породах. При  $\Gamma = 3,3 \cdot 10^{-2}$  К/м температура на глубине 1 км составляет 48 °С, а на глубине 3 км – 115 °С. На некоторых глубоких рудниках естественная температура горных пород приближается к 80–90 °С. При этом ощутимо меняются некоторые свойства горных пород (реологические, электрические и др.). С возрастанием температуры снижается вязкость растворов, циркулирующих в массиве, усиливается их фильтрация, возрастают скорость диффузии молекул и ионов, растворимость пород.

Верхний слой горных пород подвержен **сезонным колебаниям температур**. В районе Москвы слой постоянной годовой температуры находится на глубине 25–37 м.

При разработке сульфидных руд и каменных углей возможны локальные источники повышенного нагрева горных пород, вызванные их окислением. Так, при окислении 1 кг углерода до углекислого газа выделяется до 33,5 МДж тепла. Это тепло способно нагреть на 50 °С 1 т породы.

Кроме того, возможно повышение температуры пород при выполнении различных технологических операций, не связанных с тепловым воздействием на породы. Например, при механическом бурении забой скважины интенсивно разогревается. В месте контакта с инструментом породы могут нагреться до температуры 800 °С.

**Магнитное поле Земли** характеризуется вектором полной напряженности  $T$ . В естественных условиях вектор  $T$  направлен приблизительно на север и в глубь Земли.

Распределение элементов геомагнитного поля на поверхности Земли показывает, что Земля приближенно может рассматриваться как однородно намагниченный шар с магнитным моментом, равным  $6,77 \cdot 10^{21} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ .

Напряженность магнитного поля Земли колеблется в пределах от 24 до 48 А/м.

Существуют **локальные магнитные** поля, которые могут значительно превосходить магнитное поле Земли. Так, в районе Курской магнитной аномалии, где находятся мощные залежи железистых кварцитов, аномалия вертикальной составляющей магнитного поля достигает 143,24 А/м, а угол склонения отличается от нормального более чем на 120°.

Геомагнитное поле непостоянно во времени.

Изменения геомагнитного поля создают в массивах пород **электрические поля**.

Плотность нормального электрического поля Земли составляет  $1,1 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/м}^2$ , общий потенциал всей поверхности Земли —  $5,4 \cdot 10^8 \text{ В}$ . На фоне нормального электрического поля выделяются поля более высоких напряженностей — теллурические и локальные.

Причиной **теллурических полей** являются изменения электрического состояния ионосферы под воздействием солнечной радиации. Электромагнитные поля в атмосфере индуцируют переменные поля в земной коре. Поэтому теллурические поля переменные, они могут быть одновременно охарактеризованы векторами напряженности как электрического, так и магнитного поля.

В аномальных случаях напряженность теллурических полей достигает  $(5-6) \cdot 10^{-3} \text{ В/м}$ . Эти токи не влияют существенно на физические свойства пород. Однако они служат важным источником информации о составе и строении массивов горных пород.



**Локальные поля**, как правило, постоянны и образуются на контактах различных пород с разным типом электрической проводимости.

Причины их возникновения – окислительно-восстановительные, диффузионно-адсорбционные, фильтрационные, термоэлектрические и биологические явления в породах, а также взаимное трение отдельных массивов в процессе горообразования, сдвигении и т. д. Напряженности этих полей могут быть различны.

Локальные поля, приуроченные к месторождениям полезных ископаемых, имеют небольшую напряженность и могут служить лишь источником информации о массивах пород.

Наибольшей интенсивностью обладают естественные поля электрохимической природы, наблюдаемые в сульфидных, угольных и графитовых месторождениях и возникающие в результате **окислительно-восстановительных реакций** при активном участии подземных вод.

Окислительные реакции сопровождаются высвобождением электронов в атомах окисляющих элементов, в таком случае залежь заряжается положительно. Если же протекают восстановительные реакции, связанные с присоединением электронов, залежь заряжается отрицательно. Наличие в двух частях залежи обоих процессов приводит к тому, что в окружающей среде возникает разность электрических потенциалов.

На контактах разных пород с различной минерализацией подземных вод возникают диффузионно-адсорбционные явления. Из раствора с большей минерализацией в раствор с меньшей минерализацией происходит диффузия ионов. Так, в растворе KCl отрицательный ион  $Cl^-$  перемещается быстрее, чем положительный  $K^+$ . Поэтому в растворе с большой концентрацией  $C_1$  появится избыток положительных зарядов, а в растворе с малой концентрацией  $C_2$  – избыток отрицательных зарядов. Возникает диффузионный потенциал

$$E_d = K_c \lg \left( \frac{C_1}{C_2} \right),$$

где  $K_c$  – коэффициент свободного диффузионного потенциала, например, для KCl  $K_c = 12$  мВ.

Чаще всего диффузионно-адсорбционные потенциалы возникают на контакте глин и песков.

**Фильтрационные потенциалы** появляются в результате фильтрации жидкости по трещинам и порам породы, стенки которых способны адсорбировать ионы одного знака – чаще всего отрицательные. Положительные же заряды выносятся по направлению движения, в результате чего возникает разность потенциалов между началом и концом фильтрационного потока. Напряженность электрического поля, вызванного фильтрацией,  $E_{\phi}$  зависит от минерального состава, пористости пород, гидрогеологических факторов (например, напора) и может быть подсчитана по формуле

$$E_{\phi} = \frac{2\varepsilon_r \rho_{\Sigma} \Delta U v_{\text{ср}}}{\pi r_0^2},$$

где  $\Delta U$  – разность потенциалов между стенкой канала и раствором;  $v_{\text{ср}}$  – средняя скорость движения раствора;  $r_0$  – радиус канала (поры).

Аномалии напряженности электрического поля, возникающие в результате локальных токов, достигают нескольких сотен милливольт.

### 3.1.3 Упругие колебания в массивах горных пород

В массивах горных пород распространение упругих волн в целом подчиняется закономерности распространения в породах знакопеременных упругих деформаций (упругих колебаний). Однако так как в массивах упругие колебания высокой частоты сильно поглощаются, больший интерес представляют низкочастотные колебания. Такие волны возбуждают чаще всего механическими одиночными импульсами.

Волны низкой частоты, распространяющиеся в земной коре, вызванные ударом, взрывом, землетрясением и т. д., быстро затухающие, носят название **сейсмических**.

Выделяют пластовую  $v_{\text{пл}}$ , среднюю  $v_{\text{ср}}$  и граничную  $v_{\text{г}}$  скорости распространения упругих волн.

**Пластовая скорость** – это истинная скорость распространения упругих волн в каждом пласте изучаемого геологического разреза. **Средняя скорость** равна скорости распространения упругих колебаний перпендикулярно ко всем имеющимся пластам в данном массиве. Эта скорость определяется по формуле гармонического средне-

взвешенного. **Граничная скорость** представляет собой скорость распространения упругой волны на границе раздела двух пластов.

На границе раздела различных пластов или геологических тел в массиве горных пород происходят отражение и преломление упругих волн. Количественно этот процесс оценивается соответствующими коэффициентами отражения и преломления.

Коэффициентом отражения  $k_3$  называют отношение энергии отраженной волны  $A_0$  к энергии падающей волны  $A_{\Pi}$ :

$$k_3 = \frac{A_0}{A_{\Pi}}.$$

Коэффициент отражения  $k_3$  в случае нормального падения волны можно выразить также через удельные волновые сопротивления:

$$k_3 = \left[ \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right]^2.$$

Чем больше разница в волновых сопротивлениях сред, тем больше энергии отражается.

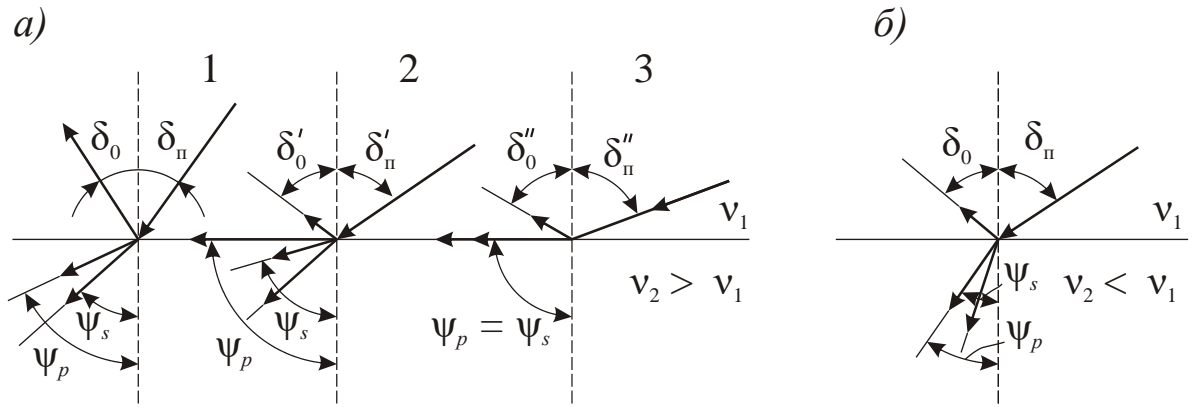
Так, при переходе упругих колебаний из воздуха в воду отражается 99,8 % их энергии, а при переходе из воды в породу – около 85 %.

Углы падения  $\delta_{\Pi}$  и преломления  $\psi$  упругой волны, проникшей в горную породу, подчиняются закону Снеллиуса (рис. 3.2), согласно которому соотношение  $\sin \delta_{\Pi} / \sin \psi$  является величиной постоянной для конкретных веществ. Это соотношение равно отношению скоростей распространения упругих волн в первой  $v_1$  и второй  $v_2$  средах и называется коэффициентом преломления  $n$  упругой волны относительно первой среды:

$$n = \frac{\sin \delta_{\Pi}}{\sin \psi} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Коэффициент преломления  $n$  больше единицы, если  $v_1 > v_2$ , и меньше единицы, если  $v_2 > v_1$ .

В последнем случае ( $v_2 > v_1$ ), постепенно увеличивая угол  $\delta_{\Pi}$ , можно добиться момента полного внутреннего отражения (угол преломления  $\psi = 90^\circ$ ) сначала продольной  $\psi_p = 90^\circ$  (первый критический угол падения  $\delta'_{\Pi}$ ), а затем и поперечной  $\psi_s = 90^\circ$  волны (второй критический угол падения  $\delta''_{\Pi} > \delta'_{\Pi}$ ).



а – при условии  $v_2 > v_1$ ; 1 – общий случай; 2 – момент внутреннего отражения продольной волны; 3 – то же, поперечной волны;  
б – при условии  $v_2 < v_1$

Рис. 3.2 – Преломление и отражение упругой волны на границе раздела двух сред

### 3.1.4 Распространение электромагнитных волн в массивах горных пород

Как известно, электромагнитное поле – это особый вид материи, характеризующийся наличием электрического и магнитного полей, связанных непрерывным взаимным превращением. Взаимная связь электрических и магнитных полей описывается уравнениями Максвелла.

В общем случае все параметры электромагнитного поля, входящие в эти уравнения, связаны с электрическими и магнитными свойствами вещества:

$$\bar{B} = \mu_0 \bar{H}, \quad \bar{D} = \varepsilon_a \bar{E}_a, \quad j = \sigma_a \bar{E}_a,$$

где  $B$  и  $D$  – соответственно магнитная и электрическая индукция;  $j$  – плотность электрического тока.

Электромагнитное поле, возникшее в некотором месте пространства, распространяется во все стороны со скоростью, зависящей от свойств среды.

Так как большинство горных пород является диэлектриками, токи проводимости  $\sigma_a$  у них малы. Поэтому волновые уравнения электрической и магнитной составляющих поля можно записать в следующем виде:

$$\nabla^2 E_a = -\omega^2 \varepsilon_a \mu_a E_a; \quad \nabla^2 H_a = -\omega^2 \varepsilon_a \mu_a H_a. \quad (3.1)$$

Согласно уравнениям (3.1), скорость распространения электромагнитных волн:

– в веществе

$$v = \sqrt{1/\varepsilon_a \mu_a}; \quad (3.2)$$

– в вакууме

$$v = c_3 = \sqrt{1/\varepsilon_0 \mu_0} = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}. \quad (3.3)$$

Из формул (3.2)–(3.3) видно, что скорость электромагнитных волн в веществе меньше, чем в вакууме:

$$v = \frac{c_3}{\varepsilon_r \mu}.$$

Скорость электромагнитных волн в плохо проводящих ток породах практически не зависит от частоты поля (при отсутствии изменения  $\varepsilon_r$  с изменением частоты), а в хорошо проводящих наблюдается возрастание  $v$  прямо пропорционально  $\sqrt{f}$ :

$$v = c_3 = \sqrt{\frac{4\pi f}{\sigma_3 \mu_a}}.$$

В реальных породах имеют место потери электромагнитной энергии. Уменьшение интенсивности электромагнитных волн с увеличением расстояния от точки излучения происходит по экспоненциальному закону

$$I_3 = I_{30} \exp(-\theta x),$$

где  $\theta$  – коэффициент поглощения электромагнитной энергии, зависящий от свойств породы и частоты электромагнитного поля.

В диэлектриках

$$\theta = \sqrt{0,5 \varepsilon_a \mu_a \omega^2 \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\delta_3}{\varepsilon_a \omega} \right)^2} - 1 \right]}. \quad (3.4)$$

Из выражения (3.4) следует, что зависимость коэффициента поглощения от частоты поля можно принять приблизительно прямой.

Однако в горных породах эта зависимость сохраняется далеко не всегда. В ряде случаев возрастание  $\theta$  с частотой наблюдается лишь до определенного значения  $f$ .

Коэффициент поглощения хорошо проводящих пород, определенный по формуле

$$\theta' = \sqrt{0,5\omega\sigma_a\mu_a},$$

значительно больше, чем коэффициент диэлектриков.

С увеличением диэлектрической и магнитной проницаемости и проводимости пород усиливается поглощение электромагнитной волны и уменьшается скорость ее прохождения. Так, в сухом песке, обладающем очень большим сопротивлением, амплитуда электромагнитных волн с частотой 50 кГц на глубине 10 м уменьшается на 4,5 %, на глубине 100 м – на 36,6 %. В хорошо проводящих глинах уменьшение амплитуды волн составляет соответственно 37,3 % и 99,1 %. Еще быстрее волны затухают в рудных телах.

Практическое значение имеет показатель глубины проникновения электромагнитных волн  $h_{эм}$  – расстояние в породе, на котором амплитуда волны уменьшается в  $e$  раз. В случае диэлектрика

$$h_{эм} = \frac{9,55 \cdot 10^7}{f \sqrt{\mu\epsilon_r \operatorname{tg}\delta}}.$$

Влияние внешних полей на распространение электромагнитных волн связано с изменением при этом электрических и магнитных свойств пород. Так как в большинстве случаев породы имеют  $\mu$ , близкое к единице, решающее влияние при этом оказывают параметры  $\rho_z$  и  $\epsilon_r$  пород. Поэтому при увлажнении пород всегда уменьшаются скорость и глубина распространения волн. Повышение температуры вызывает рост удельной электрической проводимости и диэлектрической проницаемости и, следовательно, уменьшение глубины проникновения электромагнитных волн в породу.

На границе двух сред электромагнитная волна частично отражается, а частично проходит в другую среду и испытывает преломление.

Соотношение между интенсивностью падающих, отраженных и преломленных волн определяется волновыми (характеристическими) сопротивлениями сред.

Волновое сопротивление неограниченной среды в простейшем случае

$$z_{\text{э}} = z_{\text{э}0} \sqrt{\varepsilon_r^{-1} \mu},$$

где  $z_{\text{э}0}$  – волновое сопротивление вакуума;  $z_{\text{э}0} = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} = 120\pi$ .

Коэффициенты отражения  $K_{\text{н}}$  и преломления  $n$  волн по величине напряженности поля в случае перпендикулярного падения волны на границу раздела сред 1 и 2 могут быть вычислены по следующим формулам:

$$K_{\text{н}} = \frac{E_{\text{отр}}^{\text{э}}}{E_{\text{пад}}^{\text{э}}} = \frac{z'_{\text{э}2} - z'_{\text{э}1}}{z'_{\text{э}2} + z'_{\text{э}1}};$$

$$n = \frac{E_{\text{пр}}^{\text{э}}}{E_{\text{отр}}^{\text{э}}} = \frac{2z'_{\text{э}2}}{z'_{\text{э}2} + z'_{\text{э}1}} = 1 + K_{\text{н}},$$

где  $E_{\text{отр}}^{\text{э}}$ ,  $E_{\text{пад}}^{\text{э}}$  и  $E_{\text{пр}}^{\text{э}}$  – напряженности электромагнитных соответственно отраженных, падающих и преломленных волн;  $z'_a = \sqrt{\varepsilon_a \mu_a}$  – так называемое волновое число пород.

Согласно законам геометрической оптики, геометрический коэффициент преломления  $n_{\text{г}}$  может быть вычислен как отношение скоростей распространения волн  $v_1$  и  $v_2$  в двух средах, то есть

$$n_{\text{г}} = \frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{r2} \mu_2}{\varepsilon_{r1} \mu_1}}. \quad (3.5)$$

Связь между  $K_{\text{н}}$  и  $n_{\text{г}}$  в случае слабого поглощения электромагнитной волны преломляющей средой описывается формулой

$$K_{\text{н}} = \frac{n_{\text{г}} - 1}{n_{\text{г}} + 1}.$$

Показатели, характеризующие поведение горной породы под воздействием электромагнитных волн оптического диапазона ( $10^{13}$ – $10^{15}$  Гц): инфракрасных, световых и ультрафиолетовых лучей, – относятся к группе оптических. Это коэффициенты отражения, преломления и поглощения света. Все оптические параметры подчиняются закономерностям распространения электромагнитных волн.

Так как для воздуха  $\varepsilon_{\text{в}} \approx 1$ ,  $\mu_{\text{в}} \approx 1$ , используя уравнение (3.5), можно записать, что коэффициент преломления света  $n_{\text{г}}$  относительно воздуха равен

$$n_{\text{г}} = \sqrt{\varepsilon_r \mu}.$$

Для породы, если  $\mu \approx 1$ , существует связь  $n_{\text{г}}^2 = \varepsilon_r$ .

Обычно свет характеризуется интенсивностью – величиной, пропорциональной квадрату амплитуды вектора электрической составляющей волны. Отношение интенсивностей отраженного и падающего света называется коэффициентом отражения  $K_{\text{и}}$  породы по интенсивности.

Коэффициент отражения по напряженности  $K_{\text{н}}$  связан с коэффициентом отражения по интенсивности  $K_{\text{и}}$  соотношением

$$K_{\text{и}} = K_{\text{н}}^2,$$

так как

$$\frac{I_{\text{отр}}}{I_{\text{пад}}} = \frac{E_{\text{отр}}^2}{E_{\text{пад}}^2},$$

где  $I_{\text{пад}}$ ,  $I_{\text{отр}}$  – соответственно интенсивность падающего и отраженного луча света.

Падая на поверхность твердого тела, световые волны воздействуют на электроны и часть ионов. Они возбуждаются и создают вторичные электромагнитные колебания, которые распространяются как в самом веществе, так и вне его. Последние и представляют собой отражение.

Зависимость между основными оптическими параметрами для изотропных рудных минералов (сильное поглощение волны) выражается формулой

$$K_{\text{н}} = \frac{(n_{\text{г}} - 1)^2 + (n_{\text{г}}\theta)^2}{(n_{\text{г}} + 1)^2 + (n_{\text{г}}\theta)^2},$$

где  $\theta$  – коэффициент поглощения.

Световое воздействие выражается в фотоэлектрическом эффекте – выбивании электронов из проводников и полупроводников и повышении их электрической проводимости; в нагреве горных пород и минералов; в возникновении люминесценции.



### 3.1.5 Основные методы определения свойств породных массивов в натуральных условиях

Учитывая большое влияние характеристик состояния, строения и состава породного массива на все процессы ведения горных работ, начиная с проектирования вскрытия и выбора системы разработки, весьма существенным является получение предварительной информации по этим характеристикам массива.

Трещиноватость горных пород может быть оценена различными коэффициентами трещиноватости.

Так, среднее число параллельных трещин, приходящееся на единицу расстояния, называется **линейным модулем трещиноватости**. Он удобен тем, что может характеризовать степень выраженности в массиве каждой системы трещин в отдельности.

Общую трещиноватость удобнее описывать **объемным модулем трещиноватости**, равным отношению  $1 \text{ м}^3$  массива к среднему объему структурного блока, отделенного трещинами.

Измерение параметров систем трещин ведут непосредственно на обнажениях массива. По всем трещинам измеряют элементы залегания, расстояния между ними, величину раскрытия, характер трещин, протяженность, искривленность и т. д.

По результатам измерений строят различные диаграммы, наглядно отображающие пространственную ориентировку трещин, например, розы трещин, на которых отмечают азимут их простирания или азимут падения.

Строят также диаграммы трещиноватости массива пород в изолиниях и карты трещиноватости по всему изучаемому массиву пород.

Кроме визуальных измерений параметров трещиноватости массива, производят также оценку его нарушенности различными физическими методами, в частности по скорости распространения упругих колебаний. Если в монолитном образце породы принять скорость распространения упругих колебаний за эталонную, то появление любых нарушений в виде трещин должно ее уменьшать.

Поэтому, измерив скорость распространения упругих волн в горной породе в массиве  $v_m$  образце  $v_{обр}$ , можно рассчитать акустический показатель трещиноватости:

$$A_i = \frac{v_m}{v_{обр}}.$$

Для практически монолитных пород  $A_i = 1-0,9$ ; для весьма трещиноватых мелкоблочных – около 0,1.

Определение параметров строения и состава массивов горных пород: гидрогеологических условий, элементов залегания, тектонического строения, размеров, формы, чередуемости породных тел – осуществляют в настоящее время геофизическими методами: непосредственно с поверхности (так называемыми методами полевой геофизики) и скважинными методами.

### 3.1.5.1 Методы полевой геофизики

Поверхностные (полевые) методы исследования массивов основаны на различии плотностных, электрических и других свойств горных пород разного минерального состава и строения. В этих методах используют либо аномалии естественных физических полей, вызванные различными свойствами пород, либо закономерности распространения искусственно возбуждаемых в массиве физических полей.

В зависимости от используемых свойств пород и физических полей все эти методы исследования подразделяют на гравитационные, магнитные, радиометрические, сейсмические, электрические, термические и радиоволновые.

**Гравитационные методы.** Как известно, сила взаимного притяжения двух масс  $M$  и  $m$  подчиняется закону Ньютона

$$F = \frac{kMm}{r^2},$$

где  $k$  – гравитационная постоянная,  $k = 66,7 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ ;  $r$  – расстояние между центрами притягивающихся тел.

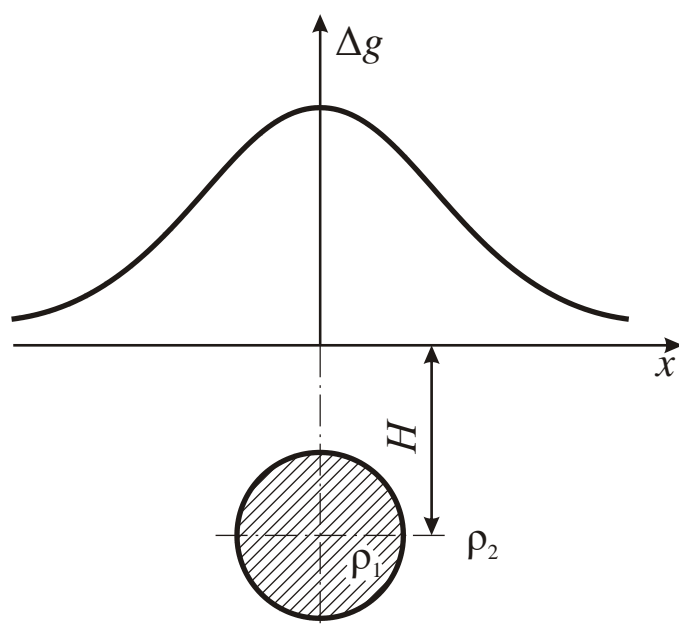
Отсюда ускорение свободного падения

$$g = \frac{kM}{r^2},$$

где  $M$  – масса Земли.

Очевидно, что изменение плотности в какой-то точке земной коры должно приводить к изменению силы тяжести и, соответственно, величины  $g$  в данной точке.

Действительно, над более плотными рудными телами возникают так называемые **гравитационные аномалии**  $\Delta g$  (рис. 3.3).



$h$  – глубина залегания рудного тела;  $\rho_1 \gg \rho_2$  – плотности соответственно рудного тела и вмещающих пород

Рис. 3.3 – Гравитационная аномалия  $\Delta g$  над шарообразным рудным телом повышенной плотности

В результате интерпретации измеренной аномалии находят глубину залегания аномального породного тела, устанавливают его форму и размеры.

Гравитационным методом можно оценить рельеф и состав кристаллического фундамента, наличие тектонических нарушений, зон пониженной плотности, уступов и сдвигов в пластах, геосинклиналей.

В процессе эксплуатации месторождения этим методом можно отыскивать слепые рудные тела, засекать карстовые полости, включения плотных пород, раздробленные и рыхлые зоны и т. д.

**Магнитные методы.** Как и в случае гравитационного поля, напряженность магнитного поля в каждой точке поверхности Земли зависит от намагниченности  $I$  (или магнитного момента  $M$ ) находящихся под этой точкой геологических объектов.

Так, для вертикально намагниченного шара составляющие напряженности магнитного поля  $\Delta H$  и  $\Delta Z$  описываются уравнениями:

– горизонтальная

$$\Delta H = \frac{3Mhx}{(x^2 + h^2)^{\frac{5}{2}}};$$

– вертикальная

$$\Delta Z = \frac{M(2x^2 - h^2)}{(x^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}},$$

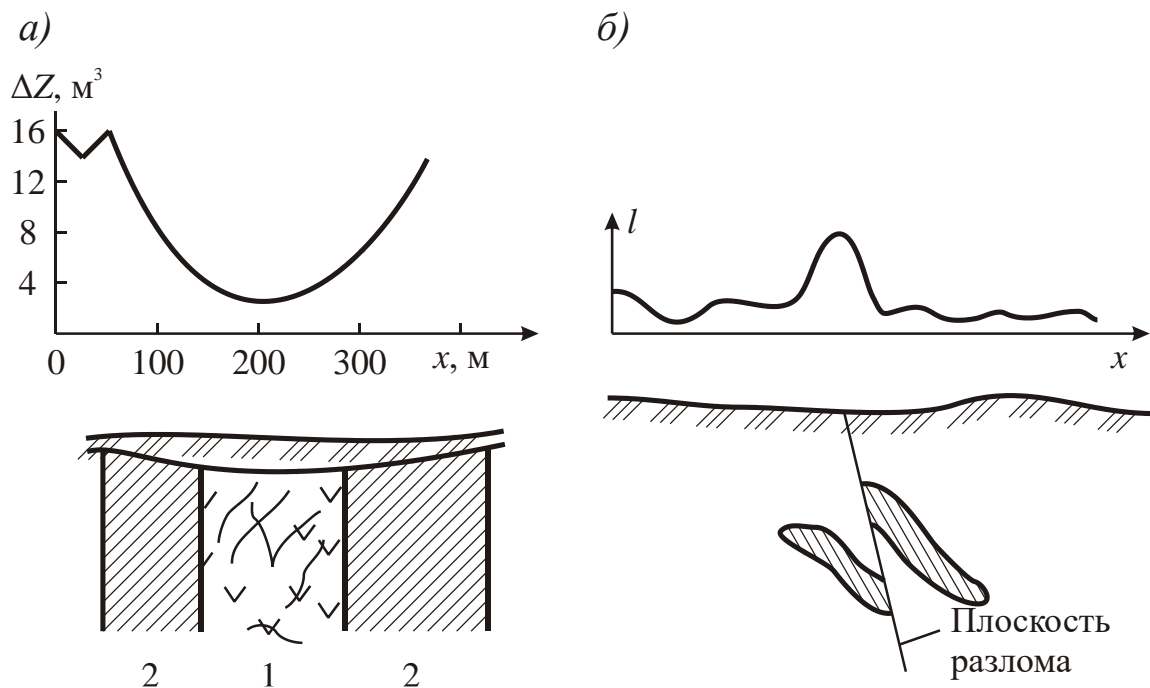
где  $h$  – глубина залегания рудного тела.

Величина магнитной аномалии обусловлена магнитной восприимчивостью пород. Если магниторазведкой установлен вид аномалии, то, зная величину  $X$  пород, можно рассчитать объем рудного тела и глубину его залегания.

Пользуясь магнитными методами, изучают не только месторождения ферромагнитных руд, но и нерудные полезные ископаемые.

По результатам магнитной съемки можно судить о геолого-петрографических особенностях массива, трещиноватости пород, наличии карстовых полостей, контактах различных пород, разломах и т. д. (рис. 3.4).

**Радиометрические методы.** При этом виде исследования массивов используют естественные радиоактивные поля. Метод позволяет изучать и обнаруживать не только радиоактивные руды, но и многие другие геологические тела, гранитные массивы, области нефтегазоносности и т. д. Радиометрической съемкой устанавливают также строение массивов – выявляют плоскости разлома (рис. 3.4) и трещиноватости, интрузии и дайки.

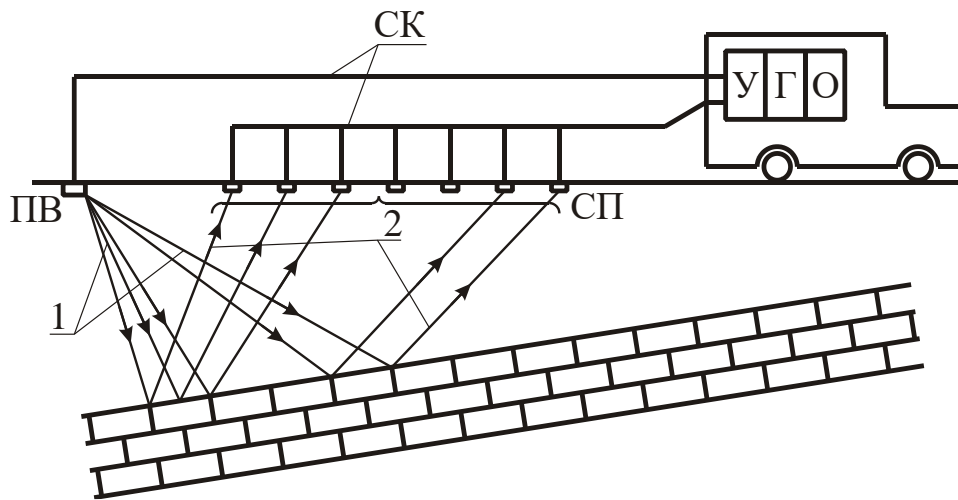


$a$  – аномалия магнитного поля над зоной разрушенных серпентинитов:  
 $I$  – разрушенные серпентиниты; 2 – плотные серпентиниты  
 (по Ф. И. Рябченко);  $b$  – аномалия интенсивности  $I$  естественного  
 гамма-излучения над зоной разлома

Рис. 3.4 – Обнаружение нарушенных зон в массивах

**Сейсмические методы.** Эти методы основаны на использовании закономерностей распространения упругих колебаний в массивах пород (рис. 3.5). На практике применяют два метода сейсморазведки: метод **отраженных волн** (МОВ) и корреляционный метод **преломленных волн** (КМПВ).

Упругие колебания в породах можно возбуждать взрывом, ударом, механическими вибраторами, пьезоэлектрическими или магнитострикционными датчиками. Вдоль изучаемого направления (сейсмопрофиля) располагают серию (до 60) сейсмоприемников, которые регистрируют моменты прихода упругих колебаний к соответствующей точке профиля.



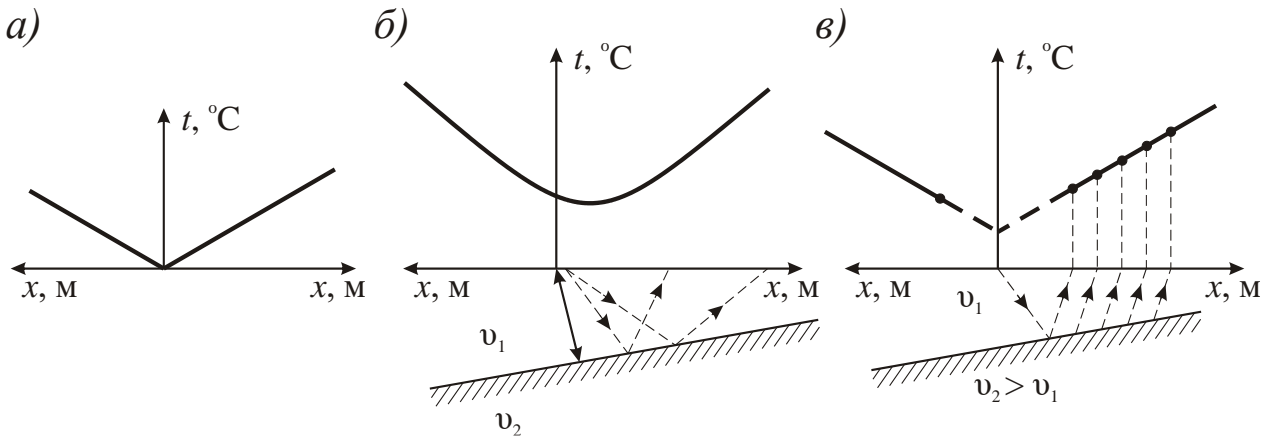
ПВ – пункт возбуждения упругих колебаний;  
 СП – сейсмоприемники; СК – сейсмическая коса; У – усилитель;  
 Г – гальванометр; О – осциллограф; 1 – прямые лучи  
 упругих колебаний; 2 – отраженные лучи

Рис. 3.5 – Принципиальная схема сейсмического метода исследования массива пород

График зависимости времени прихода упругих волн  $t$  к изучаемым пунктам профиля от их расстояния  $x$  до пункта возбуждения колебаний называется **годографом упругих волн**.

Волна, приходящая к изучаемой точке непосредственно от пункта возбуждения, называется прямой. Годограф такой волны – прямая линия, выходящая из начала координат. Скорость распространения упругих волн в массиве по **годографу прямых волн** (рис. 3.6) определяют по формуле

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}.$$



*a* – прямых; *б* – отраженных; *в* – преломленных упругих волн

Рис. 3.6 – Годографы

**Годограф отраженных волн** представляет собой гиперболу, причем при  $x = 0$   $t = t_0 > 0$ , так как упругая волна должна прийти до границы двух сред, отразиться от нее и вернуться к сейсмоприемнику (рис. 3.8).

$$t = \frac{\sqrt{x^2 + 4H^2} \pm 4Hx \sin \varphi}{v_1}, \quad (3.6)$$

где  $t$  – время прихода отраженной упругой волны в точку, находящуюся на расстоянии  $x$  от пункта излучения колебаний;  $v_1$  – скорость распространения упругих волн в массиве пород выше границы отражения;  $H$  – глубина расположения границы отраженных волн;  $\varphi$  – угол наклона границы, отражающей упругие волны.

По уравнению годографа (3.6) и графическому его изображению вычисляют глубину залегания отражающего слоя, угол его падения и скорость упругих колебаний  $v_1$ .

МОВ применим во всех случаях, когда удельные волновые сопротивления двух сред различны ( $z_1 \neq z_2$ ).

На явлении **полного внутреннего отражения** упругой волны основан КМПВ. В этом случае на поверхность массива выходит так называемая **головная преломленная волна**.

Уравнение годографа преломленных волн имеет следующий вид (см. рис. 3.6):

$$t = \frac{x \sin(i \pm \varphi) + 2H \cos i}{v_1},$$

где  $i$  – критический угол полного внутреннего отражения  $\sin i = v_1/v_2$ ;  $v_1$  и  $v_2$  – скорости распространения упругих колебаний соответственно в верхнем и нижнем пластах;  $\varphi$  – угол наклона нижнего пласта, вызвавшего преломление упругой волны.

По годографу преломленных волн вычисляют скорость распространения упругих волн в нижнем пласте  $v_2$ , глубину его залегания  $H$  и угол наклона  $\varphi$ .

КМПВ применим только при условии, если  $v_2 > v_1$ .

Сейсмические методы находят широкое применение при разведке месторождений полезных ископаемых, в инженерно-геологических изысканиях, при оценке состояния массивов горных пород, зон нарушенности, обнаружении разломов, карстовых полостей, зон многолетней мерзлоты и талых зон, при определении мощности зон выветривания пород и уровня грунтовых вод и т. д. Сейсмические наблюдения позволяют оценить физические свойства массивов горных пород – параметры упругости и прочности, а следовательно, прогнозировать возможные технику и технологию разработки месторождения.

**Электрические методы.** Наиболее распространены следующие электрические методы исследования массивов пород.

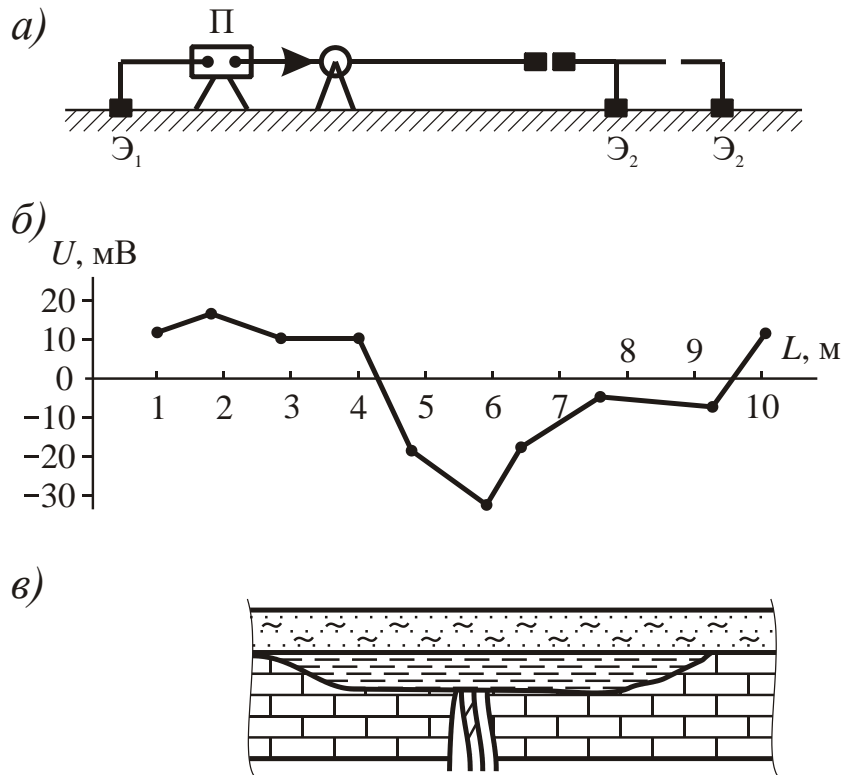
**Метод естественного электрического поля – собственных потенциалов (ПС)** заключается в последовательном замере потенциалов точек, расположенных по профилю относительно одной центральной точки (рис. 3.7).

Выявленные аномалии потенциала обычно указывают на наличие какого-либо источника естественных локальных токов (см. п. 3.1.2).

**Метод вызванной поляризации (ВП)** основан на измерении потенциалов, возникающих при поляризации горных пород после пропускания через них постоянного электрического тока.

По результатам измерений вычисляют поляризуемость пород  $\eta$ , позволяющую судить о характере и состоянии породных массивов.

**Метод кажущихся электрических сопротивлений** основан на определении кажущегося усредненного электрического сопротивления массивов пород.



$a$  – схема установки;  $b$  – график естественного потенциала по профилю;  
 $в$  – место поглощения вод, соответствующее аномалии электрического  
 поля; П – электроразведочный потенциометр;  
 $Э_1$  – неподвижный электрод;  $Э_2$  – подвижный электрод

Рис. 3.7 – К методу собственных потенциалов (ПС)

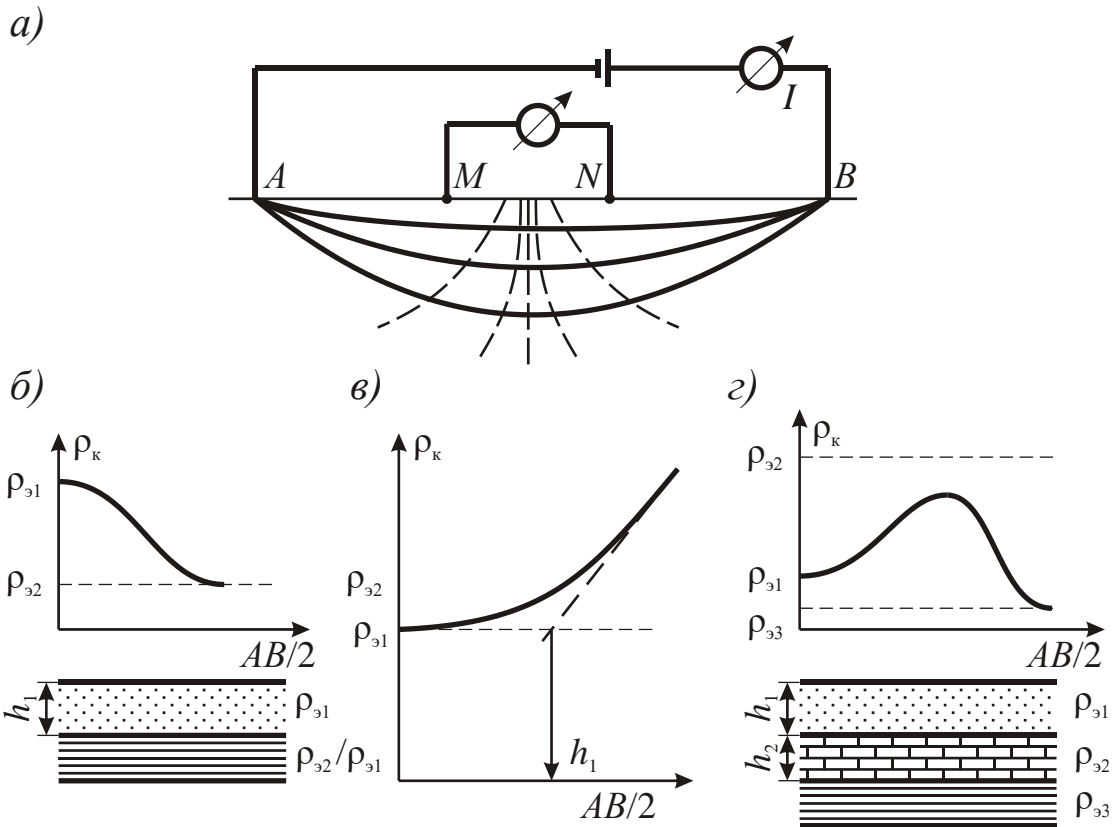
Электрометрия методом электрических сопротивлений чаще всего выполняется с помощью четырехэлектродной установки (рис. 3.8). Зная силу тока в питающей цепи  $I$  и разность потенциалов  $\Delta U$  в измерительной, можно вычислить величину  $\rho_k$  измеряемого участка:

$$\rho_k = \frac{k_y \Delta U}{I},$$

где  $k_y$  – коэффициент установки, зависящий от разноса питающих электродов  $AB$  и измерительных электродов  $MN$ ; для симметричной установки вычисляется по формуле

$$k_y = \frac{\pi AB^2 - MN^2}{4MN}.$$





*a* – четырехэлектродная электроразведочная установка; *б* – кривая ВЭЗ для двухслойного массива при  $\rho_{э1} > \rho_{э2}$ ; *в* – то же, для двухслойного массива при  $\rho_{э2} \rightarrow \infty$ ; *г* – то же, для трехслойного массива при  $\rho_{э1} > \rho_{э2} > \rho_{э3}$

Рис. 3.8 – К методу кажущихся сопротивлений

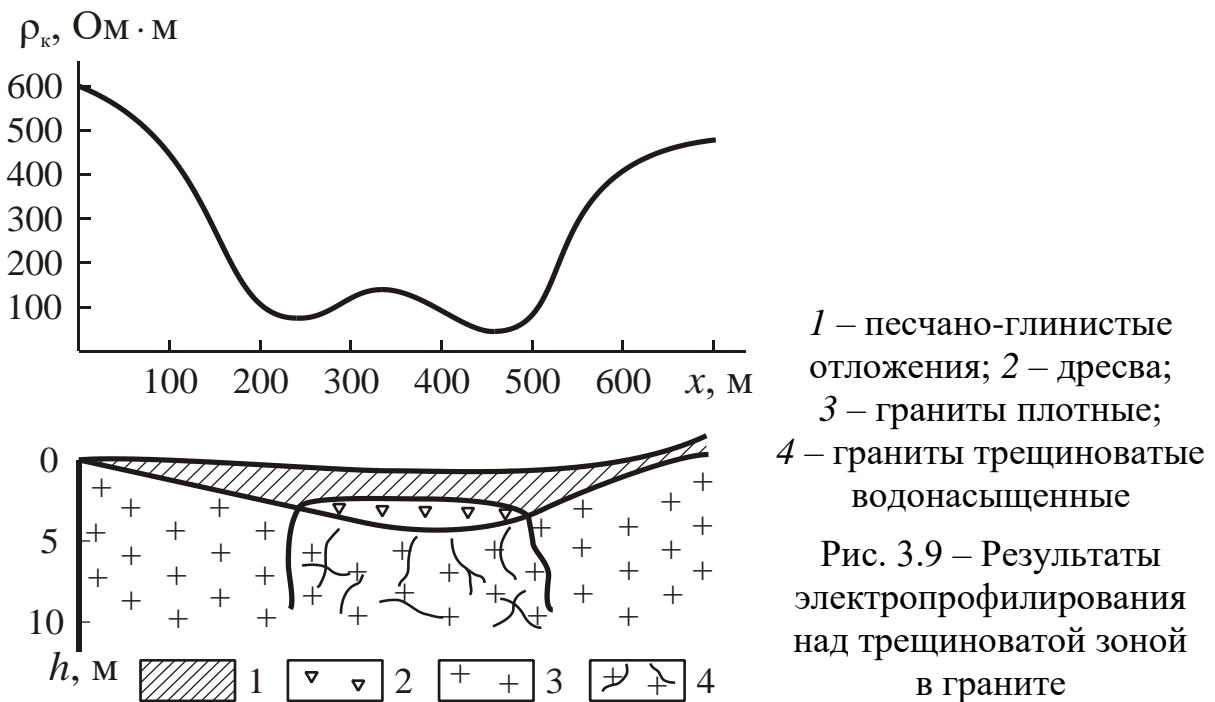
Из теории электрического поля известно, что в однородной среде более 70 % всего тока, подводимого к электродам, проходит на глубине от 1/3 до 1/10 расстояния между питающими электродами *AB*. Поэтому, увеличивая постепенно расстояние между ними, одновременно увеличивают глубину проникновения тока в массив. Такой вариант метода электрических сопротивлений носит название **метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ)**.

Построив в логарифмическом масштабе кривую ВЭЗ – график  $\rho_k = f \frac{AB}{2}$  (см. рис. 3.8), осуществляют его интерпретацию, в результате которой устанавливают истинные удельные электрические сопротивления слоев пород  $\rho_{э1}$ ,  $\rho_{э2}$ ,  $\rho_{э3}$  и их мощности  $h_1$ ,  $h_2$ . Интерпретация производится при помощи специальных палеток. В случае двухслойной кривой ВЭЗ, на которой правая ветвь наклонена к оси абсцисс под углом  $45^\circ$  (см. рис. 3.8), глубина залегания пласта находится как абсцисса точки пересечения асимптот, проведенных к пра-

вой и левой ветвям кривой, а электрическое сопротивление  $\rho_{э1}$  — как ордината этой же точки.

Так как правая ветвь на кривой ВЭЗ в данном случае не выполняется, это значит, что удельное электрическое сопротивление второго слоя  $\rho_{э2}$  близко к бесконечности.

Измеряя  $\rho_k$  пород четырехэлектродной установкой с одним и тем же разномом питающих электродов  $AB$  вдоль какого-либо профиля, получают кривую изменения  $\rho_k$  по профилю примерно на одной и той же глубине, зависящей от расстояния  $AB$ . Такой метод называют **методом электропрофилирования (ЭП)**. Он используется при изучении крутых пластов, штоков и даек. При помощи этого метода исследуют погребенные структуры, выявляют разрывные нарушения (сбросы, сдвиги, разломы, зоны дробления), картируют мерзлые породы, трещиноватые и карстовые зоны (рис. 3.9), осуществляют поиски обводненных зон и т. д.



**Пьезоэлектрический метод** применяют при поисках и исследовании кварцевых жил и пегматитовых рудных тел. Сущность его заключается в том, что упругие волны, возбужденные в массиве взрывом, встретив на своем пути, например, кварцевую жилу, преобразуются последней в электромагнитные. Электрическая составляющая электромагнитной волны принимается заземленными электродами. По электросейсмограммам судят о наличии и глубине залегания кварцевой жилы (или других горных пород – пьезоэлектриков).

**Магнитотеллурические методы** изучения массивов пород используют естественные переменные электромагнитные поля в земной коре. Измерив электрические  $E_{\text{эx}}$  и магнитные  $H_y$  компоненты теллурического поля и определив его период колебаний  $2T$ , можно рассчитать кажущееся электрическое сопротивление пород:

$$\rho_k = \frac{2T\mu_a E_{\text{эx}}^2}{H_y^2}.$$

Среди **радиоволновых методов** исследования массивов выделяют методы индуктивные, радиоволновых просвечиваний, интерференционные и др.

В **индуктивных методах** электромагнитное поле в массиве создается индуктивным способом при помощи незаземленных рамок и петель, по которым пропускают ток разной частоты. Наличие хорошо проводящих тел в массивах приводит к индуцированию в них вторичных полей.

Такими методами кроме хорошо проводящих рудных тел обнаруживают угли, графит, выявляют тектонические нарушения и обводненные зоны.

**Метод радиоволнового просвечивания** заключается в просвечивании радиоволнами массива породы между двумя или несколькими выработками.

Рудные тела, хорошо проводящие ток, являются практически непроницаемыми для электромагнитных волн.

Так, методом просвечивания на многих месторождениях обнаруживают дополнительные рудные тела, а на соляных месторождениях определяют положения полостей, заполненных соляным, хорошо проводящим раствором. Этим методом возможно обнаружение талых областей в зонах многолетней мерзлоты, плавунцов в песках и т. п.

**Интерференционный метод** основан на приеме радиоволн, излученных с земной поверхности и отраженных от границы раздела между двумя горными породами, обладающими разными показателями величин  $\rho_z$  и  $\epsilon_r$ . В приемнике интерферируют два вида волн – отраженные и прямые. Результат интерференции зависит от глубины отражающей поверхности.

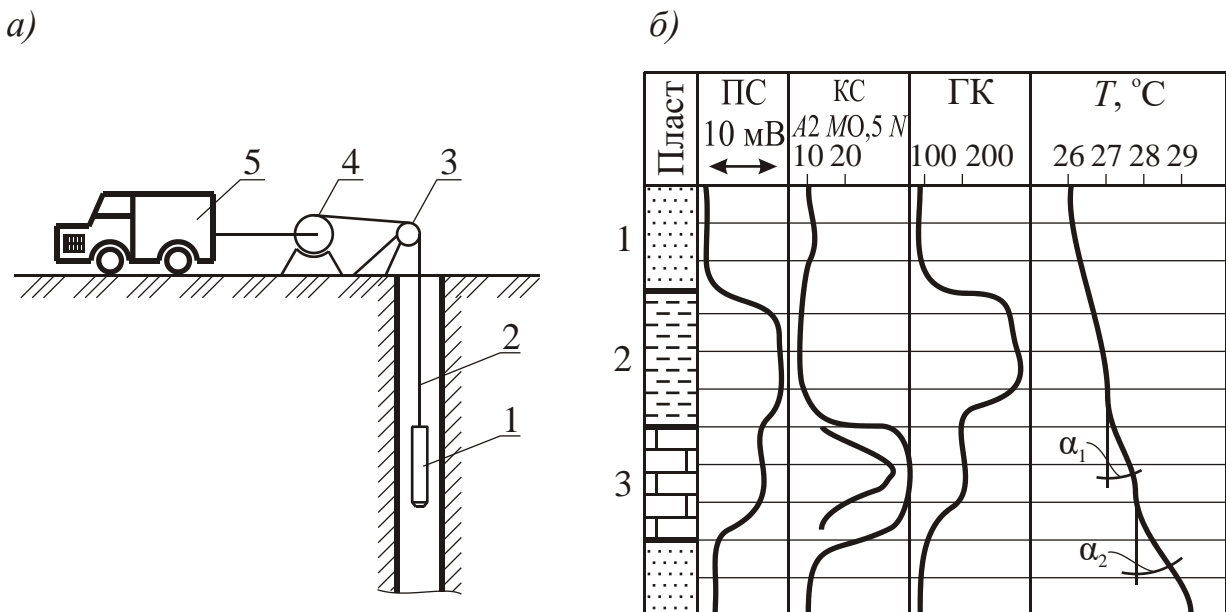
Как известно, с увеличением частоты усиливается поглощение электромагнитных волн. Поэтому волны высокой частоты не могут

применяться при исследовании больших глубин в породах. В то же время применение электромагнитных волн большой длины снижает точность исследований из-за дифракционных явлений, возникающих в случае, когда геометрические размеры изучаемого тела становятся соизмеримыми с длиной волны.

### 3.1.5.2 Скважинные методы исследования

Геофизические методы исследования скважин (каротаж) основаны на изучении пород непосредственно в скважинах, пробуренных без отбора кернов.

В скважину опускают скважинный снаряд (зонд-датчик), включающий в себя источник какого-либо поля (в случае применения метода искусственного поля) и приемные устройства. Снаряд соединен посредством кабеля с каротажной станцией, расположенной на поверхности и фиксирующей измеряемые величины по глубине скважины (рис. 3.10).



а – принципиальная схема каротажа: 1 – скважинный снаряд (датчик); 2 – кабель; 3 – блок-баланс; 4 – лебедка; 5 – регистрирующая аппаратура; б – комплекс каротажных диаграмм по участку скважины; ПС – потенциал собственной поляризации; КС – кажущееся сопротивление; A2 MO,5 N – тип каротажного зонда; ГК – гамма-каротаж;  $I_\gamma$  – интенсивность гамма-излучения; T – термокаротаж; 1 – песок; 2 – глина; 3 – известняк;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы наклона термограммы

Рис. 3.10 – Скважинный метод изучения массивов

По данным скважинных исследований строят геологические разрезы, оценивают структуру месторождений, расчленяют породы по литологическим признакам, выявляют полезные ископаемые, определяют физические свойства пород.

При каротаже применяют те же поля и методы, которые используются в полевой геофизике. Однако техническое воплощение этих методов и приемы выполнения работ из-за специфических условий измерения существенно отличаются от рассмотренных выше.

Наиболее часто применяют методы электрического каротажа собственных потенциалов (ПС) и кажущихся сопротивлений (КС), термокаротажа, радиоактивного каротажа и др. (см. рис. 3.10).

По данным метода ПС выделяют пласты с различной электрохимической активностью (напротив глинистых пластов наблюдаются максимумы ПС, напротив песчанистых – минимумы) и определяют мощности пластов.

В методах КС определяют значения  $\rho_k$  пластов трехэлектродными зондами. Используя зонды разной длины, получают различную глубину проникновения тока в стенки скважины и, соответственно, выявляют изменение  $\rho_k$  с удалением от стенки скважины. Это один из вариантов метода КС – **метод бокового электрического зондирования (БЭЗ)**, позволяющий оценить пористость и проницаемость горных пород. Кривые БЭЗ интерпретируют с помощью специальных палеток.

Широко используют также магнитный и акустический каротаж. Первый метод основан на измерении магнитной восприимчивости по глубине скважины, второй – на измерении скорости распространения упругих колебаний.

В применяемом **термическом методе** исследования скважин (термокаротаже) используют как естественные температурные поля Земли, так и искусственные, создаваемые в пробуренных скважинах нагнетанием в них горячих пульп.

В результате термокаротажа скважины можно, во-первых, установить геотермический градиент и, во-вторых, расчленить массив на породы с различными тепловыми свойствами (см. рис. 3.10).

Термокаротаж используют для определения границы зоны многолетней мерзлоты, мест подтока глубинных вод, местоположения газоносных пластов, а также зон оттаивания, степени промерзания пород и т. д. Движущиеся потоки воды служат переносчиком тепла,

и на термограммах места притоков обнаруживаются по температурным аномалиям: сульфидные руды и каменные угли создают в результате процессов окисления повышенные геотермические аномалии; газоносные пласты создают в результате охлаждающего эффекта пониженные аномалии.

**Радиоактивный каротаж** осуществляют либо измерением естественной радиоактивности горных пород по глубине скважин – гамма-каротаж (ГК), либо посредством искусственного облучения горных пород. В последнем случае в скважину одновременно с регистрирующим прибором опускают источник гамма-лучей или нейтронов.

Существуют различные методы каротажа искусственным облучением: гамма-гамма-каротаж (ГГК), нейтронный гамма-каротаж (НГК) и др.

В методе **гамма-гамма-каротажа** излучаются  $\gamma$ -лучи и принимаются те же прошедшие через горную породу  $\gamma$ -лучи.

В методе **нейтронного гамма-каротажа** породы в скважине облучают потоком быстрых нейтронов. Последние, проходя по породам, сталкиваются с ядрами разных элементов. От тяжелых ядер нейтроны отскакивают, не теряя энергии и скорости; легким ядрам они передают часть своей энергии и замедляются, превращаясь в так называемые тепловые нейтроны, которые затем легко поглощаются ядрами других элементов. При этом возникает вторичное гамма-излучение, величина которого прямо пропорциональна числу тепловых нейтронов.

Больше всего нейтроны замедляются ядрами водорода, так как последние по своей массе близки к массе нейтронов.

Содержание водорода в разных горных породах различно. Например, у пород, содержащих кристаллизационную воду (гипсы), водорода намного больше, чем у других пород. Это обстоятельство позволяет диагностировать породы при обследовании скважин.

Количество водорода в породах связано также с их влажностью. Это означает, что нейтронным способом можно оценивать влажность пород и на основании этого обнаруживать нефтяные или водоносные пласты при обследовании разведочных скважин.

Оптические свойства пород используют в **фотометрических методах** каротажа скважин. Таким методом можно легко выявить

наличие пластов и прослоев горных пород, обладающих различными коэффициентами отражения света.

В частности, по отражающей способности хризотил-асбеста, которая у него в несколько раз больше, чем у вмещающих пород, определяют общее его содержание на месторождении и мощность пластов и прослоев.

### **3.2 Оценка физико-технических параметров горных пород в массиве**

#### **3.2.1 Методы исследования физических свойств горных пород в массиве**

Натурные методы по характеру проведения испытаний бывают имитирующими лабораторный эксперимент (как правило, с изменением масштаба); пенетрационными; геофизическими; расчетными.

Применение методов, *имитирующих лабораторный эксперимент*, требует предварительной подготовки блока пород, частичного его отделения от окружающего массива. Этими методами проводят определение прочностных параметров пород, частично гидравлических и тепловых свойств массива. Методы дают информацию о свойствах горных пород в массиве достаточно больших объемов, однако они трудоемки и не позволяют получить требуемого количества данных.

С помощью *пенетрационных методов*, основанных на внедрении в горные породы различного рода инденторов, можно получить информацию о прочностных, упругих, пластических свойствах и горно-технологических параметрах пород. Основное их достоинство – быстрота и простота определений. Однако исследуемый объем породы при каждом испытании очень мал.

Все пенетрационные методы – косвенные. Для оценки тех или иных физических характеристик пород они должны быть предварительно протестированы в лабораторных условиях (при одновременном определении изучаемого параметра каким-либо лабораторным методом).

К группе *геофизических методов* относятся все имеющиеся модификации этих методов исследования массивов пород (см. п. 3.1.5.1). Однако непосредственное использование геофизических методов разведки для оценки свойств пород невозможно, так как

последние применяются при определении строения и состава массивов горных пород и для интерпретации получаемых данных уже требуется знание физических свойств пород. Таким образом, необходимо решение обратной задачи: по известным характеристикам строения массива и данным геофизики оценить его физические свойства.

Использование в этих методах мобильных физических полей, проникающих достаточно глубоко в массивы пород, позволяет давать действительно интегральную характеристику значительных объемов массива.

*Расчетные методы* включают в себя группу методов расчета физических свойств пород в массиве по свойствам образцов, определенным в лаборатории, а также методы расчета одних физических параметров пород по другим, определенным в натуре. В последнем случае широкое применение находят взаимосвязи свойств пород.

Так определяют прочностные параметры по скорости распространения упругих волн, прочность пород – по поглощению  $\gamma$ -лучей, проницаемость пород – по результатам электрокаротажа скважин.

Расчетными методами при известных закономерностях изменения свойств пород от структурных факторов массива можно произвести корректировку значений, полученных в лабораторных условиях, на массив.

**Объемную массу** горных пород в массиве измеряют либо непосредственно – путем выемки некоторого объема пород из массива, взвешивания его и определения объема получившейся выемки в массиве, либо различными геофизическими методами. Для этих целей можно использовать гравиметрию и плотностной гамма-гамма-каротаж (ГГК-П) (рис. 3.11). Последний основан на эффекте взаимодействия  $\gamma$ -квантов с электронами атома вещества (комpton-эффект). Рассеяние  $\gamma$ -квантов при этом пропорционально количеству электронов  $N_e$ , в свою очередь, зависящему от объемной массы  $\rho$  пород.  $N_e$  можно определить из выражения

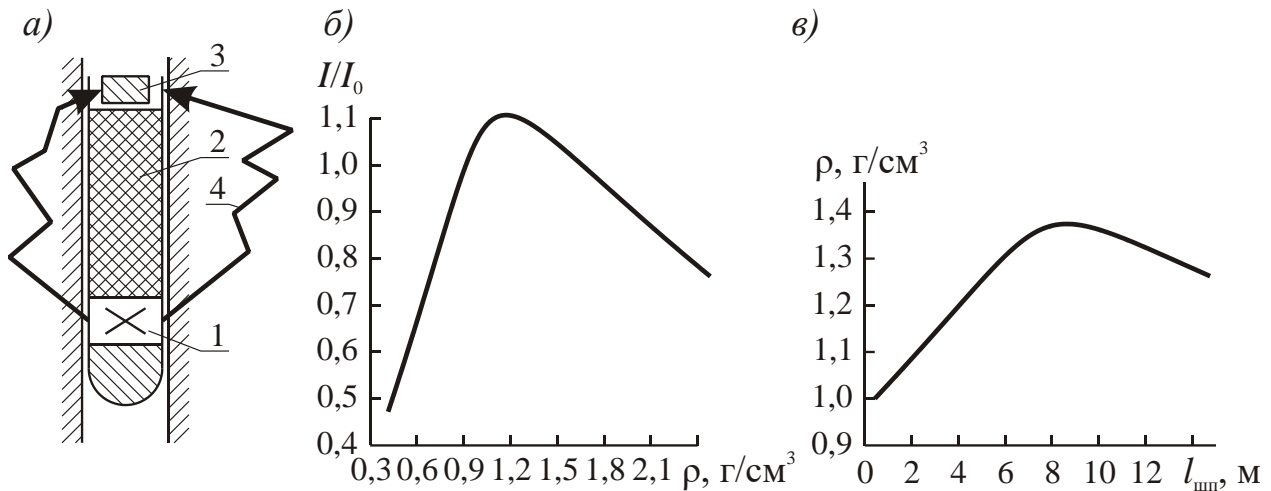
$$N_e = \frac{Z N_A \rho}{A},$$

где  $Z$  – заряд ядра;  $A$  – атомная масса;  $N_A$  – число Авогадро.

В осадочных породах  $Z/A \approx 0,5$ , поэтому  $N_e$  прямо пропорционально  $\rho$ . Для пересчета показаний ГГК-П на плоскость породы используют определенные для данной аппаратуры тарировочные



графики зависимости интенсивности рассеянного  $\gamma$ -излучения от объемной массы породы (рис. 3.11).



*а* – схема ГПК: 1 – источник  $\gamma$ -квантов; 2 – экран; 3 – детектор; 4 – путь  $\gamma$ -квантов по породе; *б* – тарировочный график определения плотности  $\rho$  пород;  $I / I_0$  – относительное изменение интенсивности гамма-излучения; *в* – изменение плотности  $\rho$  углей по длине шпура  $l_{\text{шп}}$

Рис. 3.11 – Измерение плотности горных пород методом ГПК

Упругие свойства пород в массивах определяют, как правило, различными вариантами сейсмических методов.

Значения скоростей распространения упругих волн в верхних частях массива горных пород  $v_1$  определяют в результате интерпретации годографов отраженных волн.

Скорость распространения упругих волн по годографу отраженных волн может быть рассчитана способом постоянной разности (рис. 3.12):

$$v_1 = \sqrt{\frac{2m\Delta x}{\Delta U}}. \quad (3.7)$$

где  $m$  – произвольно взятый отрезок на оси абсцисс годографа, которому соответствует время прихода упругих колебаний  $t_2$  и  $t_1$ ;  $U = t_2^2 - t_1^2$  – некоторая функция.

На годографе берут несколько пар точек  $t_1$  и  $t_2$ ,  $t'_1$  и  $t'_2$  и т. д. (рис. 3.12, *а*), соответствующих началу и концу отрезков  $m$ .

Для каждой пары времен находят функцию  $U$  и строят график  $U = f(x)$  (рис. 3.12, *б*). Далее берут приращение  $\Delta U$  для какого-нибудь  $\Delta x$  и находят  $v$  по формуле (3.7).

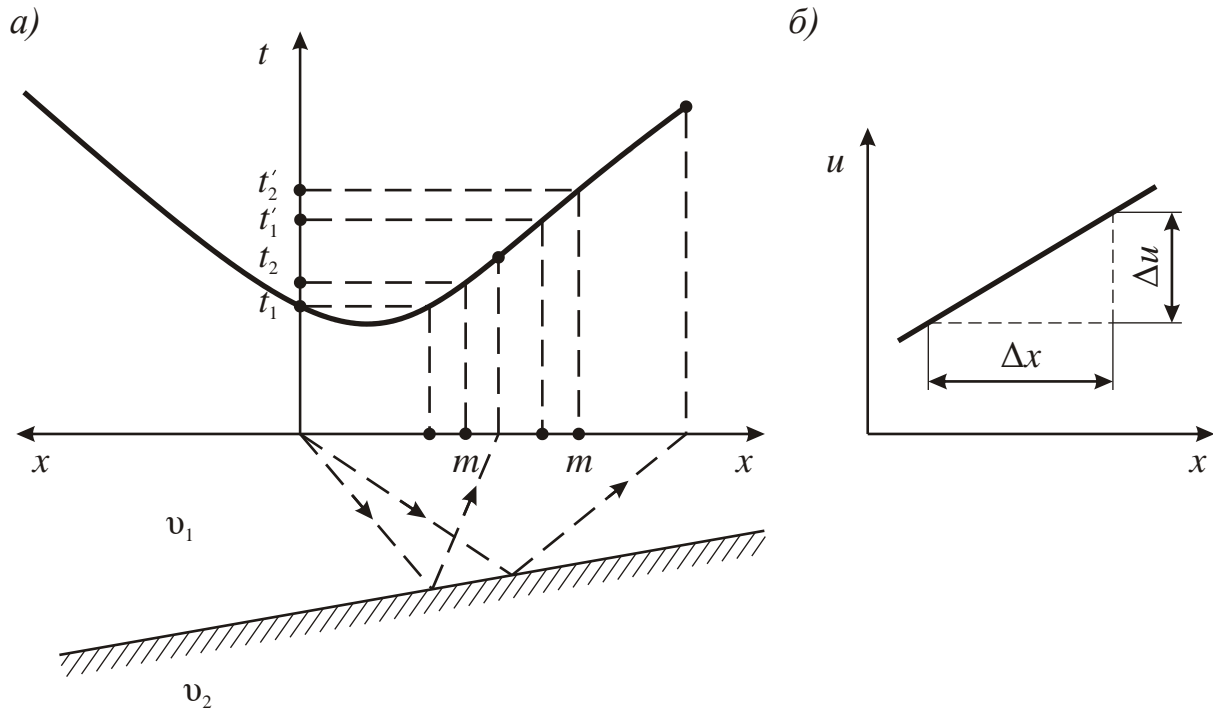
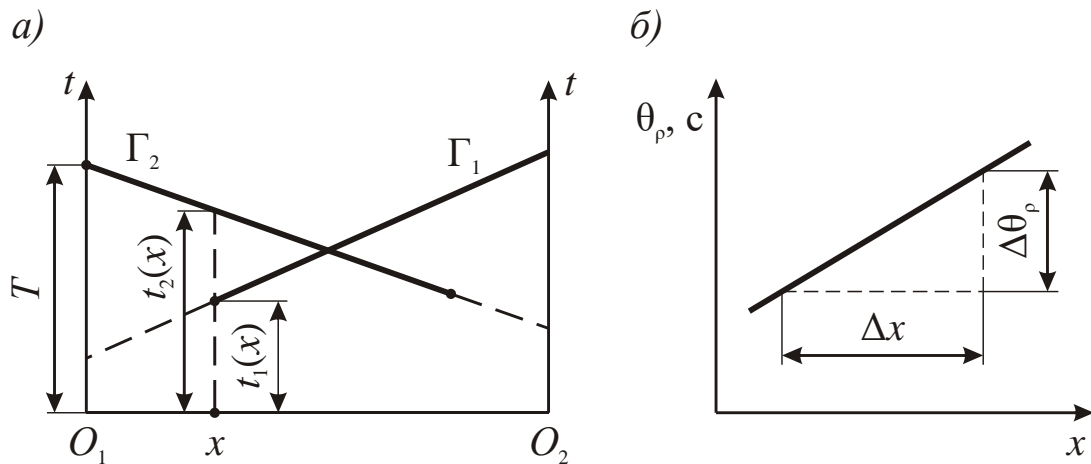


Рис. 3.12 – Определение скорости упругих волн по годографу отраженных волн

Если необходимо исследовать более плотные, залегающие на некоторой глубине слои, используют метод преломленных волн.

По годографу преломленных волн можно определить скорость распространения упругих волн в нижележащей среде  $v_2$ , которая примерно равна граничной скорости  $v_r$ .

Для этого чаще всего используют так называемые встречные годографы, полученные на одном и том же участке профиля с двух противоположных пунктов возбуждения колебаний (рис. 3.13).



$t$  – время прихода упругой волны к сейсмоприемнику

Рис. 3.13 – Определение граничной скорости упругих волн в массиве по встречным годографам  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  преломленных волн

Построив график  $\theta_p = f(x)$  (см. рис. 3.13, б), на нем берут произвольный отрезок  $\Delta x$  и  $\Delta \theta_p$  и находят  $v_2$  по формуле

$$v_2 = v_T = \frac{2\Delta x}{\Delta \theta_p},$$

где  $\theta_p$  – разность годографов [ $\theta_p = t_1(x) - t_2(x) - T$ ];  $t_1(x)$  и  $t_2(x)$  – время прихода головных преломленных волн в точку  $x$  соответственно по первому и второму годографам;  $T$  – время прихода волны из первой точки возбуждения упругих колебаний  $O_1$  во вторую  $O_2$ .

**Коэффициенты проницаемости и фильтрации** в массиве горных пород часто определяют непосредственным экспериментом, например, путем опытной откачки воды из какой-либо центральной скважины, около которой пробурены наблюдательные скважины.

При этом

– для безнапорных вод

$$K_{\phi} = \frac{2A}{2H - S_1 - S_2};$$

– для напорных вод

$$K_{\phi} = \frac{A}{h},$$

где  $A = \frac{0,335Q(\lg x_2 - \lg x_1)}{S_1 - S_2}$ ;  $H$  – высота столба воды по почве

водоносного пласта до уровня ее в скважине до откачивания;  $S_1$  и  $S_2$  – понижение уровня воды соответственно в первой и второй скважинах;  $h$  – мощность водоносного пласта;  $Q$  – расход воды при откачивании из центральной скважины;  $x_1$  и  $x_2$  – расстояние соответственно от первой и второй наблюдательных скважин до оси центральной скважины.

Коэффициент фильтрации и направление движения подземных вод устанавливают также с помощью гидрогеологического варианта метода заряда. В скважину, пересекающую изучаемые водные потоки, засыпают соль, которая растворяется и превращает воду, окружающую скважину, в электролит – своеобразное подвижное низкоомное тело, которое можно зарядить, и с поверхности следят за изменением эквипотенциальных линий во времени, характеризующим перемещение заряженного электролита в пласте.

Скорость и направление фильтрации вод можно определить также методом радиоактивных изотопов.

Проницаемость пород определяют также по данным электрокаротажа скважин методом бокового электрического зондирования. Это позволяет определить изменения  $\rho$  пород с увеличением расстояния от стенки скважины и установить зону проникновения бурового раствора в пласт. Величина последней пропорциональна проницаемости пород в массиве. Влажность в массиве пород можно непосредственно определить методом НГК (рис. 3.14).

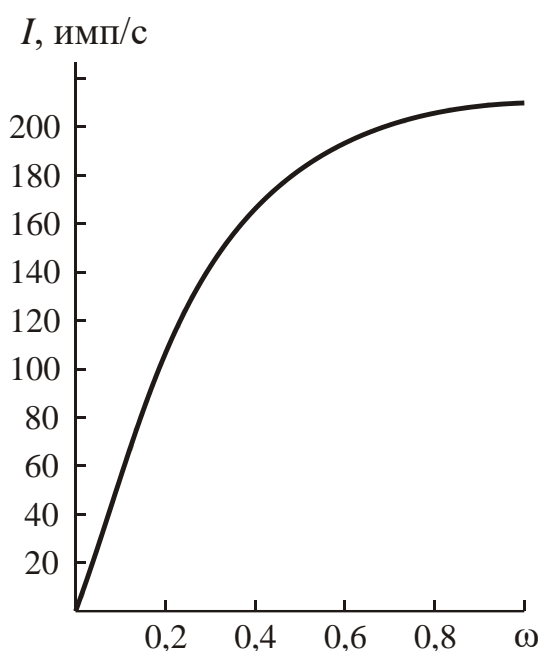


Рис. 3.14 – Зависимость интенсивности вторичного  $\gamma$ -излучения  $I$  в методе НГК от влажности пород, измеренной датчиком на базе 12 см

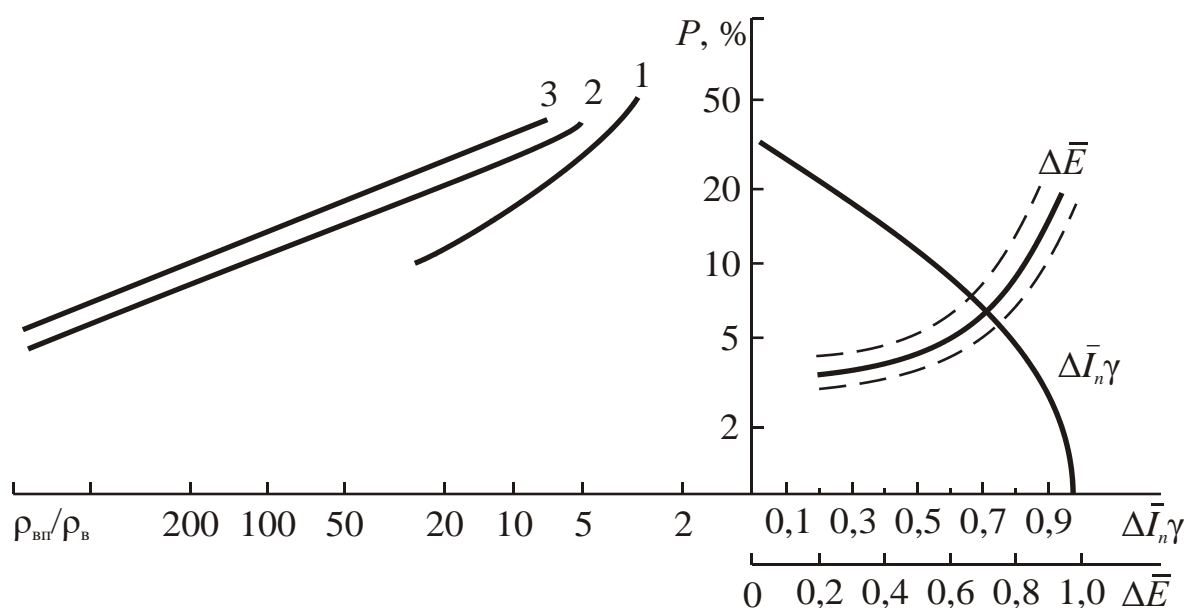
**Пористость** определяют по данным акустического каротажа (используется зависимость между  $P$  и временем распространения упругих волн), по данным нейтронного каротажа (используется связь между содержанием воды в полностью водонасыщенной породе и ее пористостью), по данным измерений потенциалов собственной поляризации с использованием тарифовочных графиков, а также по результатам электрокаротажа с использованием зависимости между  $\rho_{вп} / \rho_{в}$  и  $P$ , где  $\rho_{вп}$  и  $\rho_{в}$  – удельное электрическое сопротивление соответственно насыщенной водой породы и воды, насыщающей породу (рис. 3.15).

**Прочностные свойства пород.** В методах, имитирующих лабораторный эксперимент, замеряют разрушающие напряжения по результатам нагружения (искусственного или за счет проведения горных работ) элементов массива, отделенных щелями или выработками от окружающих пород (рис. 3.16). Этими методами определяют

прочностные характеристики пород в объемах до нескольких десятков кубических метров.

Широко применяют также инденторные методы.

Более предпочтительны геофизические методы определения прочности пород, основанные на зависимости ее от свойств, легко определяемых в массивах, например скорости распространения и коэффициента поглощения упругих колебаний.



$$\text{По данным НКГ для карбонатов } \Delta I_{n\gamma} = \frac{\Delta I_{n\gamma}^* - \Delta I_{n\gamma \min}}{\Delta I_{n\gamma \max} - \Delta I_{n\gamma \min}},$$

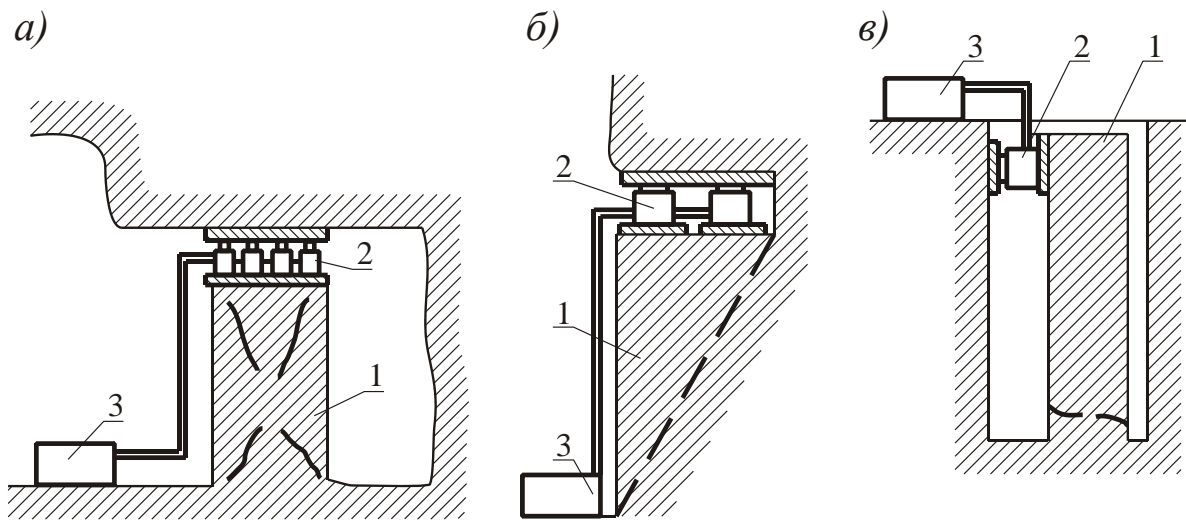
где  $\Delta I_{n\gamma}^*$ ;  $\Delta I_{n\gamma \min}$ ;  $\Delta I_{n\gamma \max}$  – интенсивность вторичного  $\gamma$ -излучения соответственно напротив данного пласта, минимальное и максимальное в карбонатах; по данным ПС  $\Delta E = \Delta E^* / \Delta E_{\max}$  (по Б. Ю. Вендельштейну),

где  $\Delta E^*$ ;  $\Delta E_{\max}$  – потенциалы собственной поляризации напротив изучаемого пласта и максимальный; по электрокаротажу для: 1 – песков; 2 – песчаников; 3 – плотных известняков (по В. П. Дахнову)

Рис. 3.15 – Метод оценки пористости пород

**Тепловые свойства** горных пород в массиве определяют специальными прямыми методами, повторяющими лабораторный эксперимент, а также по термограммам, полученным в результате термического каротажа. Так как тепловой поток  $q$ , идущий из недр Земли, в определенном районе постоянен,

$$\lambda = \frac{q}{\Gamma}.$$



*а* – предел прочности при одноосном сжатии; *б* – предел прочности при сдвиге со сжатием; *в* – предел прочности при изгибе;  
 1 – испытываемый массив; 2 – гидродомкрат; 3 – насос

Рис. 3.16 – Схемы непосредственного определения прочностных свойств в массивах горных пород

Теплопроводность пород можно рассчитать по скорости остывания или нагревания промывочной жидкости, заполняющей скважину:

$$\alpha = f\left(\frac{\Delta t}{\Delta t_0}, \tau, \tau_1, \tau_3, r_c\right),$$

где  $\Delta t$  – изменение температуры жидкости за время простоя скважины в покое  $\tau$ ;  $\Delta t_0$  – разность температур жидкости и породы в начале эксперимента;  $\tau_1$  – время нарушения термического режима;  $\tau_3$  – эффективное время, для непроницаемых пород  $\tau_3 = r_c^2 / 4a_c$ ;  $a_c$  – температуропроводность промывочной жидкости;  $r_c$  – радиус скважины.

**Удельное электрическое сопротивление** массивов горных пород измеряют методом кажущихся сопротивлений.

Если пласт однородный и достаточно мощный, то  $\rho_k = \rho_3$ .

Для больших слоистых массивов пород удельное электрическое сопротивление каждого пласта определяют в результате интерпретации данных ВЭЗ. При наличии скважин  $\rho_3$  пластов пород определяют посредством каротажа методом КС.

**Диэлектрическую проницаемость** массивов пород определяют по распространению электромагнитных волн в породах (скорости,

коэффициентам поглощения и отражения), а также непосредственно методом диэлектрического каротажа скважин или имитацией лабораторного эксперимента с накладными датчиками (развернутый конденсатор).

Естественная радиоактивность горных пород измеряется радиометрами непосредственно с поверхности либо в скважинах (гамма-каротаж).

**Магнитная проницаемость** массивов пород устанавливается либо по данным магниторазведки, либо в результате магнитного каротажа скважин.

Практически все физические свойства пород в массиве с той или иной достоверностью могут быть также рассчитаны по данным лабораторного эксперимента. Расчетные методы требуют знания отличительных структурных особенностей массива и характера зависимости свойств от этих особенностей.

Так, объемную массу массива пород  $\rho_m$  можно рассчитать по известной объемной массе  $\rho_{ли}$  лабораторных образцов:

$$\rho_m = \omega + (1 - K_{скв}) \sum_{i=1}^n \rho_{ли} V_i,$$

где  $\omega$  – объемная влажность массива;  $K_{скв}$  – коэффициент скважности массива, представляющий собой отношение дополнительной трещинной пористости  $P_T$  к истинному объемному содержанию плотной фазы  $[K_{скв} = P_T / (1 - P)]$ ;  $\rho_{ли}$  – объемная масса породы (определяется в лаборатории), относительное объемное содержание которой в массиве  $V_i$ .

Для определения  $P_T$  можно использовать вышеперечисленные методы. Прочность массива  $\sigma_{сж.м}$  можно приближенно рассчитать по прочности  $\sigma_{сж.л}$  образцов пород, определенной в лабораторных условиях.

Так, используя теорию Риттингера, одно из следствий которой состоит в том, что работа разрушения обратно пропорциональна диаметру  $d$  кусков разрушенных твердых тел, для идеально упругой горной породы можно написать (рис. 3.17)

$$\frac{\sigma_{сж.л}^2 E_m}{\sigma_{сж.м}^2 E_l} = \frac{d_m}{d_l}.$$

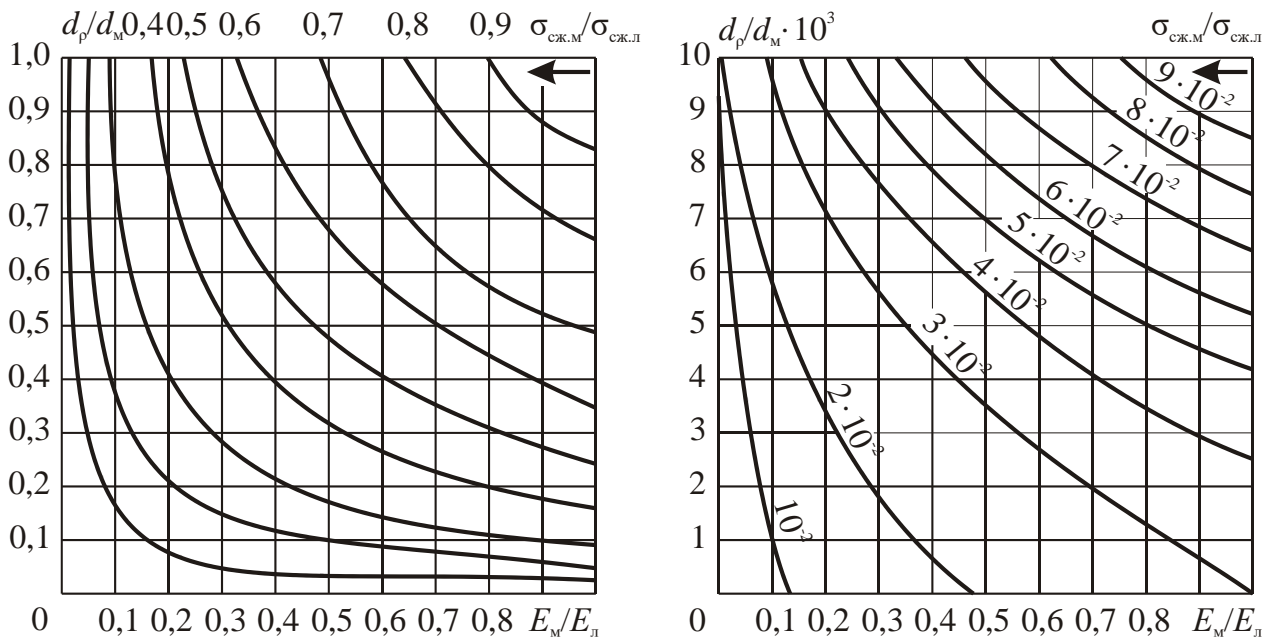


Рис. 3.17 – Номограммы для определения предела прочности при сжатии пород в массиве  $\sigma_{сж.м}$  по известной прочности в куске  $\sigma_{сж.л}$

Отсюда

$$\sigma_{сж.м} = \sigma_{сж.л} \sqrt{\frac{d_{л} E_{м}}{d_{м} E_{л}}}.$$

Как правило, отношение  $d_{л}/d_{м}$  предварительно известно исходя из применяемого способа разрушения пород. Отношение  $E_{м}/E_{л}$  примерно равно отношению квадратов скоростей распространения упругих волн в массиве и в образце.

### 3.2.2 Анализ физико-технических параметров горных пород в массиве

Объемная масса горных пород в массиве независимо от степени ее насыщения водой ниже или, по крайней мере, равна объемной массе образца. Плотность, обусловленная только минеральной составляющей пород, не зависит от места измерений (при условии одинакового минерального состава изучаемых пород).

**Прочность** горных пород в массиве и массива горных пород всегда ниже, чем прочность, определенная на образцах.

Значения  $\sigma_{сж}$ , определенные на образцах пород Кузбасса размерами  $5 \times 5 \times 5$  см, составляли 15–23 МПа, а определенные в массиве – 4,4–9 МПа (табл. 3.1). Прочность каменного угля Кузбасса



в целиках составляет 3–9 МПа, а в образцах размерами  $5 \times 5 \times 5$  см – 15–18 МПа, что в 2–4 раза выше, чем в массиве.

Таблица 3.1 – Сравнение прочности углей в образцах  $\sigma_{сж.л}$  и в массивах  $\sigma_{сж.м}$  (по С. Е. Чиркову)

Бассейн, пласт	$\sigma_{сж.л}$ , МПа	$\sigma_{сж.м}$ , МПа	$\frac{\sigma_{сж.л}}{\sigma_{сж.м}}$
Кузбасс, пласт XXVII	17,0	4,4	3,9
Кузбасс, пласт Полысаевский I	15,0	7,0–9,0	2,1–1,7
Кузбасс, пласт Красногорский	18,5	6,1	3,0
Кузбасс, пласт Наджуринский II	18,0	5,5	3,3
Львовско-Волынский бассейн, пласт Волынский	12,5	8,2	2,1

В технических расчетах снижение прочности массива условно обозначается коэффициентом структурного ослабления  $k_{с.о}$ , равным отношению сцепления отдельного куса породы при отрыве его от массива к сцеплению в куске.

Наиболее существенно на величину  $k_{с.о}$  влияет ориентирование системы трещин относительно плоскостей напластования. Для одних и тех же пород величина  $k_{с.о}$ , измеренная под углом к трещинам, оказывается больше в 2–5 раз, чем измеренная по отдельным трещинам и по их направлению.

Согласно рекомендациям В. Д. Слесарева, для расчета горно-технологических процессов, захватывающих большие пространства, необходимо ввести следующие коэффициенты структурного ослабления к параметрам, определенным в лабораторных условиях на образцах:

$$\sigma_{сж.м} = (0,3 \div 0,35) \sigma_{сж.л};$$

$$\sigma_{р.м} = k_{с.о} \sigma_{р.л},$$

где  $k_{с.о} = 0$  – при густой сети трещин, полностью расчленяющих массив;  $k_{с.о} = 0,01–0,1$  – при закрытых макротрещинах;  $k_{с.о} = 0,05–0,2$  – при макротрещиноватости.

Сцепление горных пород в массиве по плоскостям ослабления также зависит от характера ослабления. При поверхности ослабления, представленной сетью микротрещин,  $C_m \leq (0,6–0,9)C_l$ , по кон-

тактными поверхностям  $C_m \leq (0,05-0,25)C_{\text{л}}$  и, наконец, по плоскостям пластовой и текущей отдельностей  $C_m \leq (0,6-0,9)C_{\text{л}}$ . В массивах горных пород различают сцепление, обусловленное силами связей между частицами породы, и сцепление, обусловленное капиллярным натяжением воды, находящейся в породе. Первый вид сцепления характерен для скальных пород, второй – для влажных рыхлых и связанных пород.

Угол внутреннего трения уменьшается с увеличением содержания в породе мелких фракций, увеличением количества глинистых частиц (особенно монтмориллонита) и влажности, так как это способствует взаимному скольжению одной частицы породы относительно другой.

Считается, что угол внутреннего трения  $\varphi$  в массиве в условиях одноосного сжатия не превышает  $40-50^\circ$ , в условиях объемного напряженного состояния –  $30-40^\circ$ . Для глинистых прослоек  $\varphi$  принимают равным  $18-20^\circ$ .

**Модуль упругости** пород массива  $E_m$  ниже модуля упругости  $E_{\text{л}}$ , определенного в лаборатории, из-за наличия плоскостей ослабления и трещиноватости пород. Влажность горных пород приводит к некоторому росту модуля Юнга, однако степень влияния этого фактора ниже, чем трещиноватости.

Влияние различных горных пород в массиве на интегральную характеристику модуля упругости массива пород может быть оценено по формуле логарифмического средневзвешенного с учетом поправки на трещиноватость и пористость как образца, так и массива:

$$\lg E_m = \sum_{i=1}^n V_i \lg E_{\text{ли}} + \sum_{i=1}^n V_i \lg (1 - a_i P_i),$$

где  $a_i$  – коэффициенты формы порового пространства, соответствующие пористости  $P_i$  пород в образце и массиве.

В целом следует подчеркнуть существенную изменчивость механических свойств массива горных пород как по глубине (рис. 3.18), так и по горизонтали. Чаще всего это связано с различными породами, слагающими массив, и с их состоянием – степенью нарушенности, увлажненностью и т. д.

Теплопроводность сухого массива горных пород меньше теплопроводности образца из-за наличия дополнительных пустот и трещин в массиве. При этом коэффициент теплопроводности уменьшается

за счет удлинения пути распространения тепла из-за наличия трещин и уменьшения площади сечения, через которое передается тепловой поток.

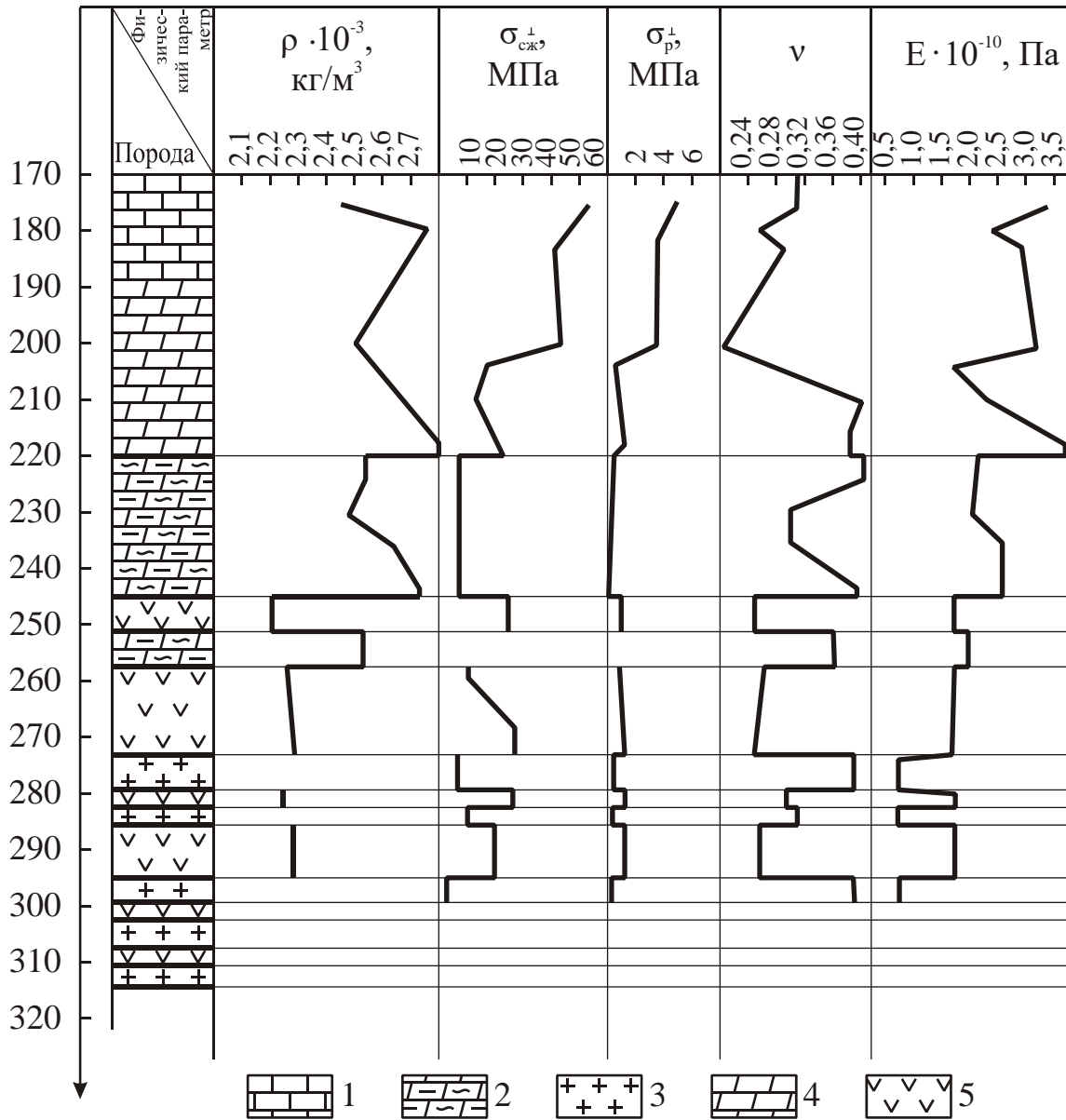


Рис. 3.18 – Изменение механических свойств пород по глубине скважины (по данным В. Г. Зильбершмидта)

Для массива, полностью насыщенного водой, приближенное среднее значение теплопроводности

$$\lambda_{\text{м}} = \sqrt{\frac{\lambda_0^2 \lambda_{\text{в}} (1 - \omega) + \lambda_0 \lambda_{\text{в}}^2 \omega}{\lambda_0 \omega + \lambda_{\text{в}} (1 - \omega)}},$$

где  $\lambda_0$  – теплопроводность минерального скелета массива пород при  $P = 0$ ;  $\lambda_{\text{в}}$  – теплопроводность воды;  $\omega$  – полная объемная влаго-

емкость массива с учетом дополнительной по сравнению с образцом трещиноватости.

Отношение  $\lambda_m$  к теплопроводности сухого образца  $\lambda_{\text{л}}$  после преобразований

$$\frac{\lambda_m}{\lambda_{\text{л}}} = \sqrt{\frac{\lambda_0 \lambda_{\text{в}} (1 - \omega) + \lambda_{\text{в}}^2 \omega}{\lambda_0 [\lambda_0 \omega + \lambda_{\text{в}} (1 - \omega)] [1 - \sqrt{P(2 - P)}]^2}}.$$

Из этого выражения следует, что теплопроводность максимально увлажненного массива может быть как меньше, так и больше теплопроводности сухого образца.

При отсутствии дополнительной трещиноватости величина  $\lambda_m$  всегда больше коэффициента теплопроводности  $\lambda_{\text{л}}$ , определенного в лабораторных условиях увлажнения массива.

Если пористость в образце практически отсутствует, а массив трещиноватый и влажный, то его коэффициент теплопроводности будет меньше коэффициента  $\lambda_{\text{л}}$ .

**Удельная теплоемкость** массива горных пород  $c_m$  отличается от удельной теплоемкости  $c_{\text{л}}$  сухих образцов из-за наличия дополнительной влажности. Поэтому

$$\frac{c_m}{c_{\text{л}}} = \frac{c_{\text{в}} \omega_{\text{е}}}{c_{\text{л}}} + (1 - \omega_{\text{е}}),$$

где  $c_{\text{в}}$  – удельная теплоемкость воды;  $\omega_{\text{е}}$  – естественная влажность пород массива.

Если теплоемкость определяется на сухих образцах породы, то  $c_{\text{в}}/c_{\text{л}} \approx 4 \div 5$  и поэтому

$$c_m/c_{\text{л}} = 1 + (3 \div 4) \omega_{\text{е}}.$$

**Коэффициент теплового расширения** массива горных пород меньше значений, определенных лабораторным путем, так как дополнительная трещиноватость массива увеличивает деформируемость пород.

Основную роль в изменении удельного электрического сопротивления  $\rho_{\text{э}}$  пород в массивах, однотипных по составу, играют трещиноватость и влажность.

Рассмотрение связи между удельными электрическими сопротивлениями массива и лабораторного образца ( $\sigma_{\text{э.мс}}$  и  $\sigma_{\text{э.л}}$ ) показывает, что наиболее вероятные значения  $\sigma_{\text{э.мс}}$  на несколько порядков выше значений, определенных в лабораторных условиях на сухих породах. Сравнение  $\sigma_{\text{э.л}}$  сухих образцов с  $\sigma_{\text{э.мс}}$  влажного массива практически не имеет смысла, поэтому необходимо определение  $\sigma_{\text{э.л}}$  влажных пород.

$$\frac{\sigma_{\text{э.мс}}}{\sigma_{\text{э.л}}} = \frac{K_{\text{и.л.в}}(P + P_2)}{K_{\text{и.м.в}}P},$$

и наоборот, если порода сложена хорошо проводящими ток минералами, то

$$\frac{\sigma_{\text{э.мс}}}{\sigma_{\text{э.л}}} = \frac{K_{\text{и.л.о}}(1 - P_2)}{K_{\text{и.м.о}}},$$

где  $K_{\text{и.м.о}}$ ,  $K_{\text{и.м.в}}$  — коэффициенты извилистости токопроводящих каналов соответственно в минеральном скелете и в насыщенном водой поровом пространстве для породы в массиве;  $K_{\text{и.л.о}}$ ,  $K_{\text{и.л.в}}$  — то же, для породы в образцах;  $P$  и  $P_2$  — соответственно пористость образца и дополнительная пористость (трещиноватость массива).

В массиве пород пластовые воды имеют различные степени минерализации и температуру, что существенно изменяет сопротивление как самих вод, так и минералов.

Отличие **диэлектрической проницаемости** горных пород массива  $\varepsilon_{\text{рмс}}$  от  $\varepsilon_{\text{рлс}}$  лабораторного образца определяется трещиноватостью и влажностью последнего.

Влияние сухих трещин аналогично влиянию пористости, поэтому

$$\frac{\varepsilon_{\text{рмс}}}{\varepsilon_{\text{рл}}} = \varepsilon_{\text{рм}}^{-P_2} < 1.$$

Для влажных горных пород массива

$$\varepsilon_{\text{рмс}} = \varepsilon_{\text{рм}}^{1-\omega_{\text{м}}} \varepsilon_{\text{рв}}^{\omega_{\text{м}}}.$$

Диэлектрическая проницаемость воды  $\varepsilon_{\text{рв}}$  значительно превышает величину  $\varepsilon_{\text{рм}}$  минеральной фазы пород. В связи с этим наблюдается увеличение  $\varepsilon_{\text{рмс}}$  влажных пород в массиве по сравнению с  $\varepsilon_{\text{рл}}$

сухих пород в образце. Степень этого увеличения можно оценить по формуле

$$\frac{\varepsilon_{r\text{MC}}}{\varepsilon_{r\text{Л}}} = \frac{\varepsilon_{r\text{В}}(P_2 + P)}{\varepsilon_{r\text{М}}P_2} \gg 1.$$

Поэтому для расчета диэлектрической проницаемости массива нужно использовать данные лабораторного определения влажных образцов горных пород  $\varepsilon'_{r\text{Л}}$ .

Тогда

$$\frac{\varepsilon_{r\text{MC}}}{\varepsilon'_{r\text{Л}}} = \left( \frac{\varepsilon_{r\text{В}}}{\varepsilon_{r\text{М}}} \right)^{P_2}.$$

Максимальное различие  $\varepsilon_{r\text{MC}}$  и  $\varepsilon_{r\text{Л}}$  при этом полностью определяется величиной дополнительной трещиноватости массива  $P_2$ .

Связь тангенса угла диэлектрических потерь сухих массивов пород  $\text{tg}\delta_{\text{MC}}$  с лабораторными образцами  $\text{tg}\delta_{\text{Л}}$  может быть оценена по формуле

$$\frac{\text{tg}\delta_{\text{MC}}}{\text{tg}\delta_{\text{Л}}} = \text{tg}\delta_{\text{М}}^{2P_2} < 1.$$

**Горно-технологические параметры** массива горных пород также отличаются от измеренных на образцах. Крепость пород в массиве ниже, чем в образцах; твердость, определяемая локальным действием, чаще всего такая же, как и в образцах. Однако коэффициент вариации твердости в массиве значительно больше. То же относится к показателям абразивности, влажности и дробимости пород.

Пластичность и ползучесть массива горных пород, как правило, всегда значительно выше, чем определенные в лаборатории. Это, в первую очередь, обусловлено повышенными давлением, влажностью и температурами в массиве пород.

### 3.2.3 Особые явления в массивах горных пород при их разработке

При изучении угольных пластов в массивах необходимо учитывать их характеристики, оценивающие особое поведение пластов в процессе их выемки. К типовым относятся газоносность пластов,

газообильность, самовозгораемость и выбросоопасность. **Газоносность** горных пород – объемное количество свободных или сорбированных газов, содержащихся в единице массы или объема горных пород в природных условиях.

В угольных пластах главным образом содержится метан, представляющий наибольшую опасность при разработке угольных месторождений. Угольные пласты – это естественные коллекторы метана.

На современных глубинах разработки природная газообильность пластов составляет 12–17 м<sup>3</sup>/т, достигая в отдельных случаях 60–80 м<sup>3</sup>/т; давление метана на глубинах свыше 400–600 м находится в пределах 3–5 МПа, повышаясь в ряде случаев до 13 МПа.

Система «метан – уголь» в природных условиях находится в равновесном состоянии, которое нарушается при ведении горных работ, что обуславливает выделение метана в рудную атмосферу.

Количество выделившегося из углей газа, отнесенное к единице массы добытого угля, называется **газообильностью** углей.

Быстрое и обильное выделение газа происходит при высоком начальном его давлении, небольшой вязкости, высокой газопроницаемости пласта.

По газоносности (метаноносности) угольные пласты в промышленных целях подразделяют на четыре категории: I категория – до 5 м<sup>3</sup> метана на 1 т добытого угля; II – до 10 м<sup>3</sup>/т; III – от 10 до 15 м<sup>3</sup>/т; сверхкатегорные – более 15 м<sup>3</sup>/т (табл. 3.2).

Таблица 3.2 – Распределение шахт по газообильности, %

Бассейн	Негазовые шахты	Категория шахты			Сверхкатегорные шахты
		I	II	III	
Донецкий	18,7	13,1	9,4	7,6	51,2
Кузнецкий	–	13,9	21,5	10,1	54,5
Карагандинский	–	–	8,8	11,8	79,4
Печорский	–	11,6	34,6	3,8	50,0

Количество метана, выделяющегося в угольных пластах, увеличивается с углублением горных работ.

Так, за последние 30 лет метановыделение из угольных пластов в России увеличилось в 25 раз.

**Самовозгораемость** – параметр, характеризующий способность углей к самовозгоранию; определяется скоростью реакции окисления и критической температурой самовозгорания углей.

**Выбросоопасность** – параметр, определяющий склонность угольных пластов к внезапным выбросам угля и газа. Внезапные выбросы проявляются также и в других породах, например, в сильвинитовых и карналлитовых пластах.

**Внезапный выброс** – явление быстрого разрушения призабойного участка массива, сопровождающееся дроблением и измельчением породы и выбрасыванием ее в выработку с одновременным выделением газа.

Склонность угля к внезапным выбросам определяется сочетанием физических свойств угля, особенностей технологии выемки, геологических условий, форм и размеров обнажений, т. е. теми факторами, которые обеспечивают возможность быстрого развития трещин, разрушения и измельчения угля, насыщенного газом.

В. В. Ходот выделяет три основных условия возбуждения и развития внезапных выбросов в породах:

– сумма потенциальной  $W$  и кинетической  $R$  энергий в изучаемом участке массива пород должна превышать величину работы, необходимой для смещения  $A_F$  и разрушения  $A_U$  выбрасываемой массы:

$$W + R > A_F + A_U; \quad (3.8)$$

– скорость разрушения (развития трещин)  $v_{тр}$  пород должна быть больше скорости падения давления  $v_s$  газа в массиве:

$$v_{тр} > v_s; \quad (3.9)$$

– среднее давление газа  $p_{ср}$  в массиве должно быть больше удельных усилий сопротивления породы в массиве разрушению  $\sigma_p$ :

$$p_{ср} > \sigma_p. \quad (3.10)$$

На основе этого разработаны различные показатели выбросоопасности, величина которых зависит, в первую очередь, от давления газов в массивах, газоотдачи и крепости пород.

Внезапные выбросы впервые были зафиксированы в шахтах Франции еще в XVIII веке. В России первые выбросы угля и газов проявились в Донбассе в начале XX века. Сейчас выбросоопасными являются шахты таких крупнейших бассейнов страны, как Донецкий, Кузнецкий, Печерский.

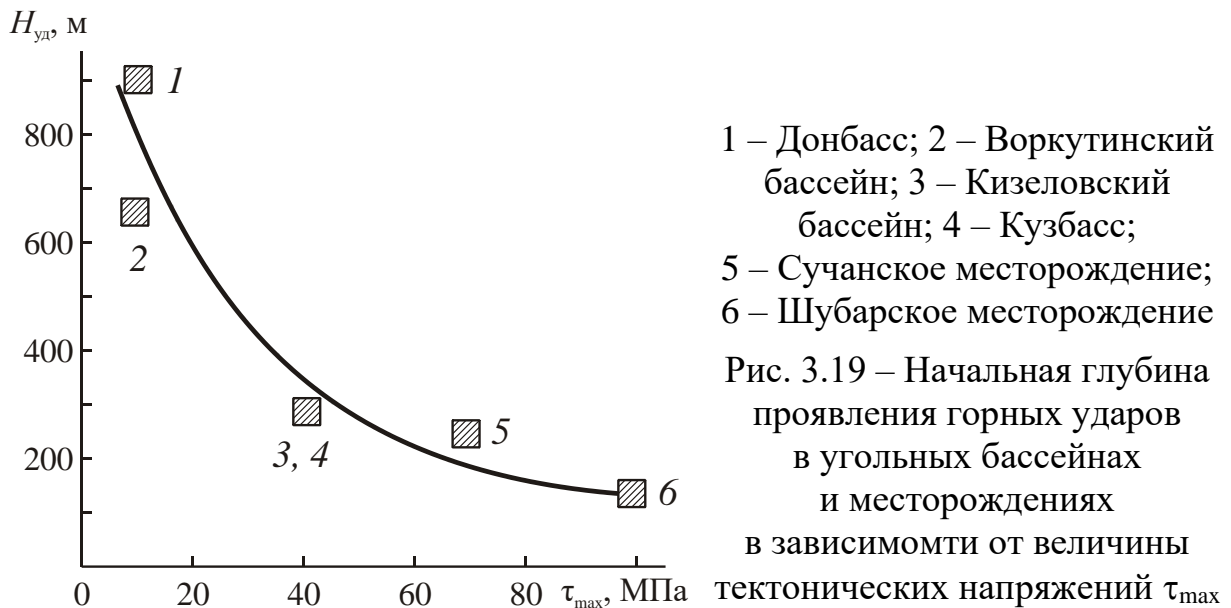


Разработка скальных массивов пород на больших глубинах часто сопровождается горными ударами.

**Горный удар** – это явление хрупкого взрывоподобного разрушения предельно напряженного участка массива, сопровождающееся дроблением и измельчением породы. В отличие от внезапного выброса при горных ударах не происходит выделения газов.

Это явление оценивают показателем удароопасности массивов горных пород.

**Удароопасность** обусловлена напряженным состоянием горных пород, большой запасенной энергией упругого деформирования, хрупкостью пород и целым рядом других факторов. Удароопасность возрастает с увеличением глубины разработки месторождения. Установлено, что минимальная глубина возникновения горных ударов зависит от величины тектонических напряжений в районе месторождения (рис. 3.19).



Запас потенциальной энергии в массиве  $\Pi$ , приводящий к горному удару, может быть рассчитан по формуле

$$\Pi = 0,5\sigma^2 S \left[ \frac{m}{E_{\text{и}}} + \frac{2a}{2E_{\text{п}}} \right], \quad (3.11)$$

где  $\sigma$  – наибольшее нормальное напряжение в очаге удара;  $E_{\text{и}}$ ,  $E_{\text{п}}$  – модули упругости полезного ископаемого и вмещающих пород соответственно;  $S$  – площадь разрушения, захватываемая ударом;

$m$  – мощность рудного тела;  $a$  – ширина зоны разгрузки породы при ударе.

Слабые проявления горного удара наблюдается в виде **стреляния** – динамического хрупкого откола от обнажения чешуек породы массой от 0,1 до 10 кг.

Выбросоопасность и удароопасность горных пород в настоящее время оценивают различными критериями в зависимости от принятой физической модели развития выброса или горного удара. По этим категориям осуществляют прогноз потенциальной выбросо- или удароопасности пород.

### **3.3 Строение, состав и состояние разрыхленных горных пород**

#### **Классификация рыхлых пород**

Рыхлые породы подразделяются на естественно рыхлые и разрыхленные в результате ведения горных работ.

Естественно рыхлые (так называемые сыпучие) породы – это, в первую очередь, пески различной крупности.

Разрыхленные (разрушенные) породы в зависимости от степени разрушения делятся на следующие технологические виды.

1. Связновзорванные скальные и полускальные породы. Отдельности массива пород, находящиеся в таком состоянии, не разрываются полностью, лишь увеличивается трещиноватость массива и в значительной мере сохраняются силы сцепления между отдельностями. Линейные размеры отдельностей зависят от естественной блочности и могут превышать 1,5 м; средний размер отдельностей достигает 1 м.

2. Крупновзорванные породы – это породы с большими промежутками между блоками и кусками, которые зажаты во взорванной массе. Силы сцепления существуют по неразрушенным природным трещинам в кусках и зацепление – между кусками. Линейные размеры наиболее крупных кусков составляют 1–1,5 м.

3. Мелковзорванные породы характеризуются наличием большого числа промежутков между кусками. Отдельные куски часто зажаты во взорванной массе. Линейные размеры наиболее крупных кусков составляют 0,6–0,7 м.

4. Раздробленные породы – это все взорванные породы, дополнительно раздробленные другими способами, с кусками крупностью не более 0,2 м. Они обладают сыпучестью. Обычно до такой крупности дробят только полезные ископаемые.

5. Мелкораздробленные (щебеночного типа) породы с частицами размером не более 0,1 м получают в результате дробления и рассева по крупности добытых полезных ископаемых. Породы подчиняются закономерностям сыпучих сред.

6. Разрыхленные мягкие породы, теряющие естественное сцепление, характеризуются непостоянными показателями трения и сцепления.

### Геометрические параметры строения рыхлых пород

Рыхлые и разрушенные породы описываются особыми характеристиками строения. К ним относятся:

- параметры дисперсности: средний диаметр частиц разрыхленной породы; гранулометрический состав; удельная поверхность;
- характеристики формы частиц рыхлого материала: соотношение линейных размеров куска; угловое распределение;
- параметры укладки, среди которых основной – коэффициент разрыхления.

Средний диаметр частиц  $d_{\text{ср}}$  характеризует среднюю крупность горной массы.

Иногда пользуются понятием **дисперсности**  $D$  – мерой раздробленности рыхлых пород, равной величине, обратной среднему размеру частиц грунта.

Значительно полнее горную массу характеризуют сведения о распределении частиц каждого диаметра в горной массе.

Измеренный количественно выход (по массе, объему или числу зерен) отдельных классов крупности, выраженный в процентах к общей массе, объему или числу, называется **гранулометрическим составом** породы.

Гранулометрический состав породы изображают в виде кривой на графике, где по оси абсцисс откладывают диаметры частиц  $d$ , а по оси ординат – суммарное содержание (количество, объем или массу) частиц с диаметром, меньшим или равным данному (рис. 3.20).

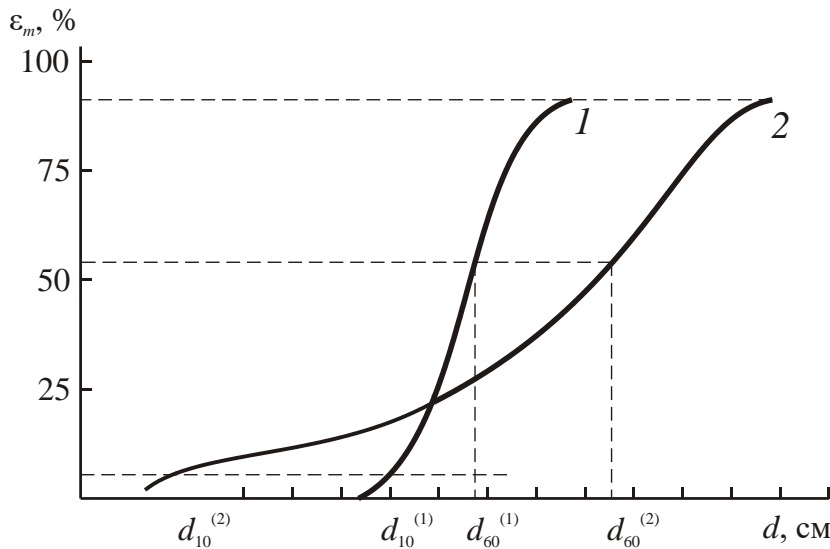


Рис. 3.20 – Кривые гранулометрического состава однородной (1) и неоднородной (2) породы

Для численной оценки неоднородности рыхлых пород по размерам зерен пользуются также отношением, называемым коэффициентом неоднородности,

$$k_{н.р} = \frac{d_{60}}{d_{10}},$$

где  $d_{60}$  и  $d_{10}$  – максимальные диаметры кусков, составляющих соответственно 60 % и 10 % общей массы рыхлой породы.

Гранулометрический состав является важнейшей характеристикой рыхлых пород, в значительной степени обуславливающей свойства рыхлой горной массы.

Гранулометрический состав определяет величину свободной поверхности частиц породы.

Отношение суммарной площади поверхности  $S_{пов}$  всех частиц и кусков рыхлой породы к ее объему  $V_{пор}$  называется **удельной поверхностью**  $s_{уд}$ :

$$s_{уд} = \frac{S_{пов}}{V_{пор}}.$$

Если считать частицы породы по форме шароподобными с объемом  $V_{шар}$ , то  $s_{уд}$  приближенно может быть рассчитана по известному  $d_{ср}$ .

Так как  $S_{пов} = \pi d_{ср}^2 N$ ,

$$N = \frac{V_{\text{пор}}(1-P)}{V_{\text{шар}}} = \frac{6V_{\text{пор}}(1-P)}{\pi d_{\text{ср}}^3};$$

$$s_{\text{уд}} = \frac{6(1-P)}{d_{\text{ср}}}, \quad (3.12)$$

где  $N$  – количество частиц в изучаемом объеме породы  $V_{\text{пор}}$ ;  $P$  – пустотность (внешняя пористость) рыхлой массы пород, доли единицы.

Иногда рассчитывают удельную поверхность на единицу массы породы. Тогда

$$s_{\text{уд}} = \frac{6}{\rho_0 d_{\text{ср}}}. \quad (3.13)$$

Формулы (3.12) и (3.13) справедливы для расчета удельной поверхности горной массы, состоящей как из сферических, так и из кубических (или близких к ним) зерен одного размера.

Фактически же удельная поверхность пород зависит от распределения частиц по размерам, доли мелких частиц в массе и формы частичек. Так,  $s_{\text{уд}}$  особенно возрастает, если куски породы представлены пластинками или столбиками, т. е. образцами удлиненной формы. На  $s_{\text{уд}}$  оказывают влияние величина и количество ребер граней и вершин в куске. Если форма кусков при последующем измельчении сохраняется, то удельная поверхность возрастает меньше, чем при изменении этой формы. Удельная поверхность кварцевого песка составляет около 0,27 м<sup>2</sup>/кг, суглинистой почвы – 26 м<sup>2</sup>/кг, плотных глин – 100 м<sup>2</sup>/кг.

Объем любой разрыхленной горной породы обусловлен гранулометрическим составом, а также формой и характером укладки кусков и частиц в массе. Так как наряду с общей пористостью внутри кусков горной породы возникает дополнительная пустотность, обусловленная неплотным прилеганием кусков и частиц друг к другу, как правило, объем разрыхленной породы  $V_p$  всегда больше ее объема в плотном неразрушенном состоянии  $V_{\text{ц}}$ .

Отношение  $k_p = \frac{V_p}{V_{\text{ц}}}$  называется **коэффициентом разрыхления**

пород.

Коэффициент разрыхления, в первую очередь, обусловлен характером и качеством дробления породы и значительно меньше – типом породы.

Наибольшее влияние на величину  $k_p$  оказывает наличие свободных поверхностей, позволяющих кускам породы перемещаться и свободно укладываться. Для смеси шаров одного и того же размера в бесконечно большой емкости минимальное значение  $k_p$  равно 1,35, а максимальное, при котором смесь остается все еще устойчивой, – 1,9. В связи с этим коэффициенты разрыхления зависят от размеров и формы частиц породы, вместимости и формы емкости, в которую порода погружается (рис. 3.21).

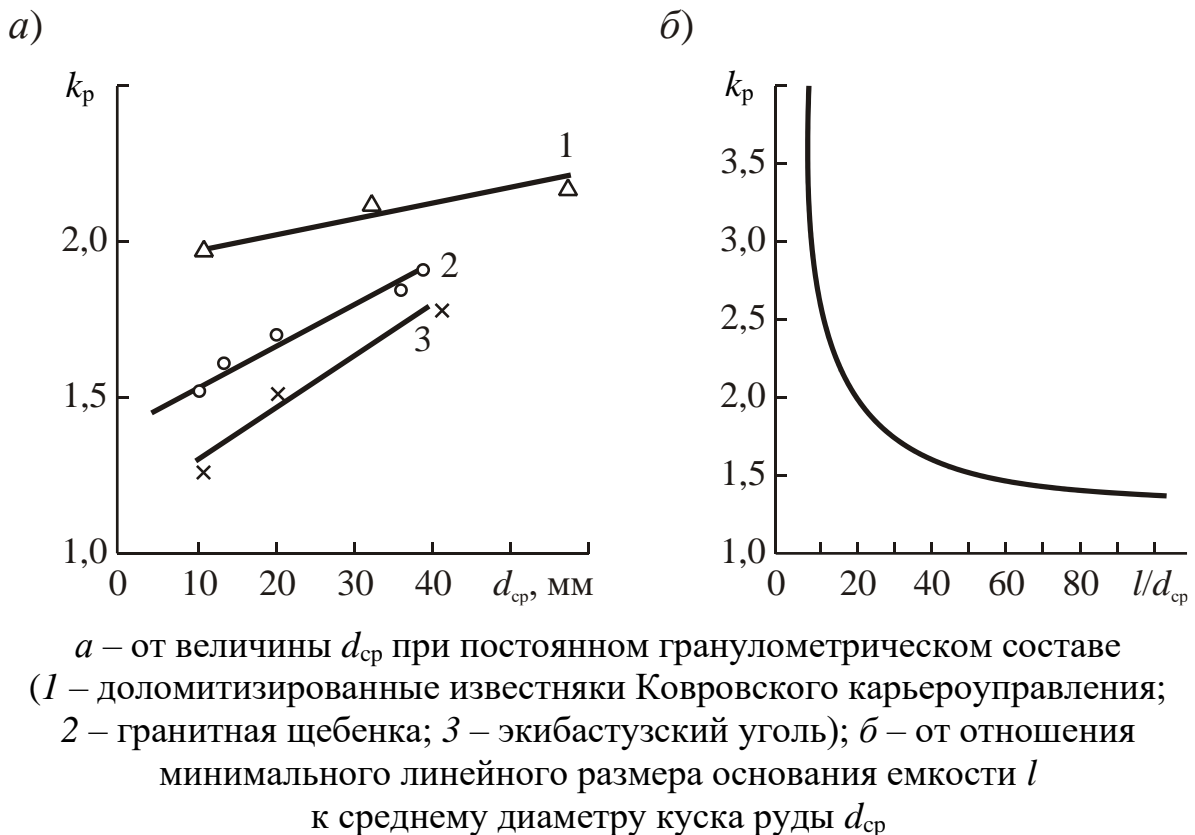


Рис. 3.21 – Изменение коэффициента разрыхления  $k_p$

$k_p$  существенно зависит от параметров и условий взрывания, а именно от удельного расхода взрывчатого вещества (ВВ) (рис. 3.22), ширины буровзрывной заходки, схемы короткозамедленного взрывания и т. д. При этом в основном на  $k_p$  сказывается характер укладки различных по классу фракций и почти не сказывается гранулометрический состав.

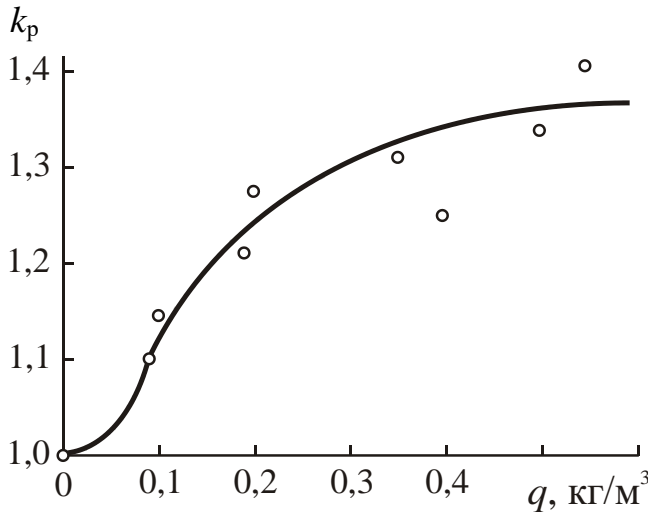


Рис. 3.22 – Влияние удельного расхода  $q$  взрывчатого вещества на коэффициент разрыхления горной массы  $k_p$

При наличии одной свободной поверхности коэффициент разрыхления в результате взрыва имеет значение 1,05–1,2, при шести – может достигнуть 2 и более.

Коэффициент разрыхления возрастает при увеличении удельного расхода ВВ – от сотрясательного взрыва до уровня оптимального расхода ВВ. При дальнейшем увеличении расхода ВВ величина  $k_p$  не растет, поскольку энергия ВВ в дальнейшем тратится только на разброс, а не на дробление кусков породы. Природная трещиноватость сказывается прежде всего на оптимальном удельном расходе ВВ, но непосредственного влияния на величину  $k_p$  практически не имеет.

Анализ соответствующих технологических видов разрыхленных горных пород показывает, что связновзорванные породы имеют небольшой  $k_p$  – 1,03–1,10, крупновзорванные – 1,2–1,3, мелкозорванные – 1,4–1,65, мелкораздробленные – 1,6–1,85. Разрыхленные мягкие породы имеют коэффициент разрыхления порядка 1,15–1,30.

При укладке рыхлой породы в емкости решающее значение имеет величина соотношения между длиной  $l$  наименьшего ребра сосуда и средней крупностью кусков  $d_{ср}$  (см. рис. 3.21).

При уменьшении  $\frac{l}{d_{ср}}$   $k_p$  резко падает, особенно при превышении некоторых критических значений  $\frac{l}{d_{ср}}$ , величина которых находится в интервале 5–10.

Исследованиями выявлено, что существует четкая зависимость между коэффициентом разрыхления и таким показателем, как внутренняя удельная поверхность емкости  $s_{уд.е}$ , куда загружается порода.

Если средний размер кусков породы  $d_{\text{ср}}$  определяется непосредственными измерениями, то, по данным С. В. Ржевской,

$$k_p = 1,71 + 0,27 \arctg(2s_{\text{уд.е}} d_{\text{ср}} - 4).$$

Это выражение может служить основой для определения  $k_p$  в любых типах промышленных емкостей, используемых в горном деле, при любых крупностях и гранулометрическом составе разрыхленной горной массы.

Высота емкости  $H_e$  практически не влияет на величину  $k_p$  при соотношении  $\frac{H_e}{d_{\text{ср}}} = 5$  и более. При меньших, соотношениях  $\frac{H_e}{d_{\text{ср}}}$  коэффициент разрыхления увеличивается на 10–15 %.

Все это обуславливает непостоянство  $k_p$  при перемещении горной массы из одной емкости в другую. Если одно и то же количество разрыхленной породы, занимавшее в относительно большой емкости объем  $V_0$ , разместить в емкостях меньших размеров, то новый суммарный объем  $V_1$  всех этих емкостей может быть в 1,1–1,4 раза больше исходного.

Увеличение шероховатости и липкости частиц ведет к увеличению  $k_p$ .

При размещении рыхлой горной массы в емкостях на величине коэффициента разрыхления существенно сказывается гранулометрический состав пород (в отличие от коэффициента разрыхления пород при взрыве в свободном пространстве).

Если известна близкая к истинному значению для данного процесса дробления функция распределения гранулометрического состава, то можно отыскать степень измельчения пород, соответствующую минимальному коэффициенту разрыхления.

Гранулометрический состав горной массы, обеспечивающий минимальную величину  $k_p$ , приведен ниже.

Относительный класс крупности по отношению $d_{\text{ср}} / d_{\text{max}}$	0–0,2	0,2–0,4	0,4–0,6	0,6–0,8	0,8–1,0
Объемное содержание класса крупности, %	40	60	75	90	100

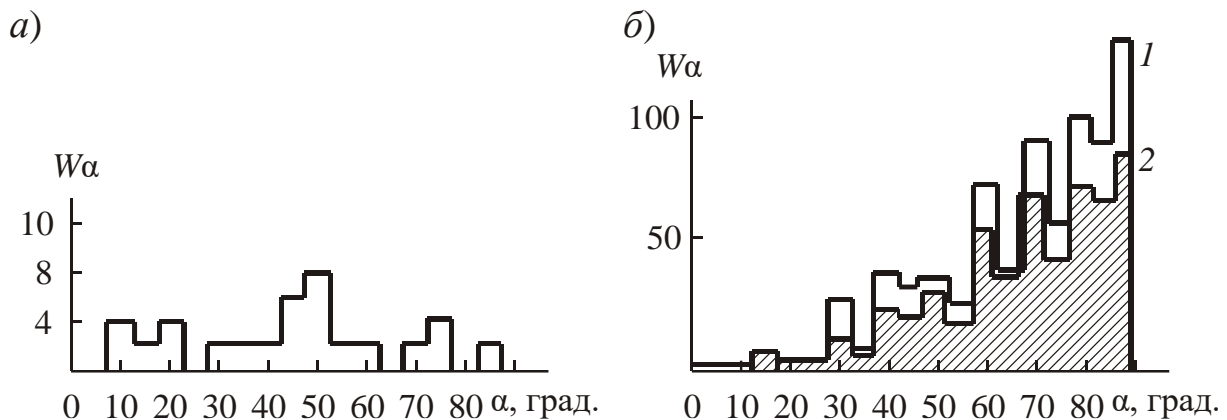
Как уже отмечалось, на рассмотренные характеристики строения, а также физические и технологические параметры пород оказы-



вает существенное влияние форма кусков породы. В связи с этим при анализе строения рыхлой массы С. В. Ржевской предложено вводить еще два параметра: соотношение линейных размеров куска и угловое распределение.

Соотношение линейных размеров куска – это отношение трех взаимно перпендикулярных размеров куска  $a$ ,  $b$  и  $c$ , взятое как среднее по всей рыхлой массе:  $\frac{a}{b} : 1 : \frac{c}{b}$ .

Угловое распределение  $W\alpha$  – это количественное выражение частоты появления величины конкретного двугранного угла для всех ребер куска разрыхленной горной породы, взятое по всей смеси (рис. 3.23). Угловое распределение зависит от формы частиц рыхлой породы. С увеличением числа граней в частицах средний двугранный угол  $\alpha_{\text{ср}}$  возрастает с  $70^\circ$  до  $140^\circ$ ; например, у тетраэдра  $\alpha_{\text{ср}} = 70,48^\circ$ ; у октаэдра  $\alpha_{\text{ср}} = 109,4^\circ$ .



$a$  – для наиболее распространенных систем геологической трещиноватости пород МГОКа;  $б$  – для фракций железистого кварцита крупностью 35–50 мм (1) и 25–30 мм (2) (по С. В. Ржевской)

Рис. 3.23 – Угловые распределения  $W\alpha$

### Факторы, обуславливающие характер разрыхления пород

Степень разрыхления и, следовательно, все параметры рыхлых пород зависят от первичного состояния породы, вида разрыхляющих нагрузок и внешних условий.

По первичному состоянию разрыхляемые объемы пород подразделяют на разрушаемые массивы и разрушаемые отдельности. Разрушаемые массивы, в свою очередь, подразделяют на не оконтуренные и оконтуренные различными горными выработками (этажи,

рудные блоки, лавы, уступы на карьерах и т. д.). Неоконтуренные массивы, в свою очередь, разделяют на однородные и разнородные по слагающим их породам.

Разрушаемые отдельности подразделяют на разбитые по плоскостям естественной трещиноватости и разрушенные по новым поверхностям.

Разрушение неоконтуренных однородных массивов дает горную массу с достаточно устойчивым гранулометрическим составом и малым переизмельчением.

Разрушение оконтуренных массивов приводит к разрыхлению с различным фракционным составом в различных зонах и переизмельчением в ряде зон.

При разрыхлении естественных отдельностей сохраняется их форма, а при разрыхлении кусков породы природная форма и отдельности отсутствуют.

Разрыхляющие нагрузки по виду бывают равномерно рассредоточенные (например, горное давление), сосредоточенные в точке с передачей усилий разрушения на весь массив, сосредоточенные в малом объеме породы без передачи усилий разрушения на весь массив (бурение), рассредоточенные внутренние (термические, остаточные напряжения).

В результате длительного действия внешних рассредоточенных сил продукты разрыхления сохраняют форму природных блоков и отдельностей, фракционный состав относительно однородный, количество переизмельченного материала – минимальное,  $k_p$  имеет минимальное значение.

Воздействие внешних сил, сосредоточенных в точке, ведет, как правило, к большому диапазону фракционного состава. Вблизи действующих сил находится зона переизмельчения, далее расположены зоны мелкого, среднего и крупного дробления. В зонах переизмельчения, мелкого и частично среднего дробления форма частиц и кусков значительно отличается от первичных природных форм отдельностей и блоков.

Важное значение имеет скорость приложения сил. Чем интенсивнее и быстрее прикладывается усилие, тем больше неоднородность гранулометрического состава, неравномерность дробления, выше  $k_p$ .

Воздействие сосредоточенных в объеме породы сил приводит к переизмельчению продуктов малого объема, где действуют силы. Первичные характеристики разрыхляемой породы не сохраняются, коэффициент разрыхления большой.

Воздействие внутренних сил, как правило, приводит к разрушению пород по системам природной трещиноватости, при этом гранулометрический состав продуктов разрыхления сравнительно однороден, продуктов переизмельчения мало. Коэффициент разрыхления меньше, чем при воздействии сосредоточенных внешних сил.

Если разрушаемый объем имеет свободные поверхности, то эффективность разрушения растет практически пропорционально росту числа свободных поверхностей. Количество переизмельченных пород уменьшается с ростом числа свободных поверхностей. Коэффициент разрыхления возрастает примерно на 0,08–0,2 на каждую поверхность, по гранулометрическому составу разрушенная порода становится более однородной. Если разрыхляемый объем предварительно обработан с ослаблением связей между частицами в трещинах, гранулометрический состав еще более однороден.

Процесс разрыхления породы в большой степени зависит от соотношения направления воздействующих сил и направления ослабленных поверхностей в породе. От этого же во многом зависят формы и размеры продуктов разрыхления.

При действии разрушающих усилий, направленных по плоскостям ослабления или параллельно им, разрыхление наиболее эффективно.

Если разрушающие силы действуют перпендикулярно главным плоскостям ослабления в породе, эффект разрыхления будет наименьшим.

### **3.4 Физико-технические параметры разрыхленных горных пород**

#### **Механические и горно-технологические параметры**

В связи с тем, что разрыхленные горные породы имеют особое строение, почти все их физические параметры отличаются от параметров твердых кусков пород, из которых состоит горная масса.

Однако кроме количественных изменений параметров наблюдается также изменение сущности некоторых известных характе-

ристик пород. В ряде случаев используют новые, присущие только рыхлым породам, физико-технические параметры.

Так, из-за разрыхления пород показатель объемной массы для рыхлой породы оказывается неприменимым. Вместо него пользуются показателем насыпной плотности  $\rho_n$ .

Насыпная плотность  $\rho_n$  – это масса единицы объема рыхлой горной породы в ее насыпном состоянии:

$$\rho_n = \frac{M}{V_p}.$$

Насыпная плотность сухой породы всегда меньше (за редким исключением уплотнения в результате разрушения первоначально рыхлых или высокопористых –  $\rho > 60\%$  – пород) объемной массы  $\rho$  и может быть рассчитана по формуле

$$\rho_n = \frac{\rho}{k_p}.$$

Так как  $k_p$  зависит от целого ряда ранее перечисленных факторов, насыпная плотность – величина непостоянная даже для породы одного гранулометрического состава.

Насыпная плотность разрыхленных пород для размеров частиц 5–50 мм находится в пределах 1200–1600 кг/м<sup>3</sup> (табл. 3.3).

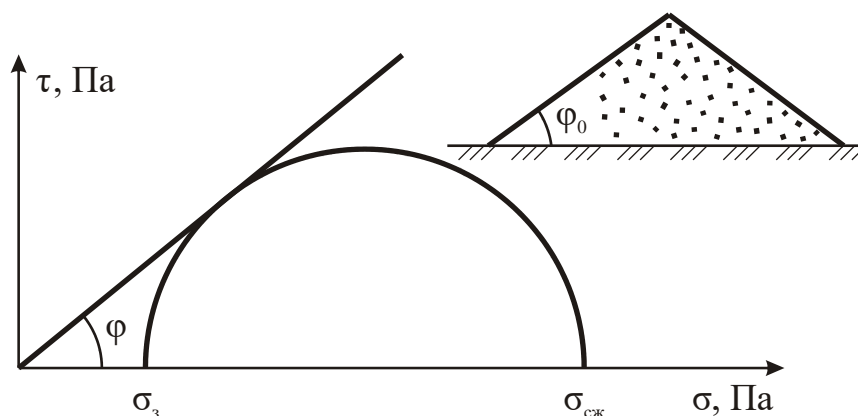
Угол естественного откоса  $\varphi_0$  – параметр, присущий только рыхлым породам. Это угол, образованный свободной поверхностью рыхлой горной массы с горизонтальной плоскостью,  $\varphi_p$  – это как бы предельное значение угла внутреннего трения  $\varphi$ . Действительно, если для рыхлой породы построить паспорт прочности – огибающую предельных кругов напряжений Мора, то окажется, что она имеет вид прямой линии (рис. 3.24), исходящей из начала координат (так как для рыхлой породы  $\sigma_p = 0$  и  $\sigma_{сж} = 0$  при  $\sigma_z = 0$ ):

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi.$$

При этом угол внутреннего трения  $\varphi$  равен углу естественного откоса  $\varphi_0$  рыхлых массивов, а сцепление  $C = 0$ .

Угол естественного откоса связан с коэффициентом трения и зависит от шероховатости и формы частиц породы, степени их увлажнения, гранулометрического состава, а также от плотности кусков породы, слагающих горную массу.

Углы естественного откоса песков составляют 19–37°. Пылеватые увлажненные мелкодисперсные породы (пывуны, болотистый грунт, обводненный лесс) имеют угол естественного откоса, не превышающий 3–5°.



$\varphi$  – угол внутреннего трения, равный углу естественного откоса  $\varphi_0$

Рис. 3.24 – Паспорт прочности рыхлых пород

Таблица 3.3. Значения насыпной плотности щебня при размерах частиц 5–50 мм (по А. М. Викторову)

Порода	Объемная масса $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Насыпная плотность $\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент разрыхления $k_p$
Песчаник Донбасса	2,54–2,59	1,28–1,51	1,98–1,7
Известняк доломитизированный	2,22–2,56	1,18–1,36	1,9
Гранит среднезернистый	2,58–2,71	1,37–1,48	1,9–1,8
Гранит мелкозернистый	2,60–2,79	1,36–1,62	1,9–1,7
Щебеночная смесь (ЩПС)	2,64	1,26	2,1
Порфирит диабазовый	2,64	1,51	1,7
Песок	—	1,40–1,66	—

С увеличением влажности горной породы до некоторого предела (для угля, например, до 14 %) угол естественного откоса возрастает (увеличивается сцепление между частицами при незначительном увлажнении), а затем уменьшается.

Для разрыхленных пород средний угол естественного откоса в сухом состоянии составляет 32–45°, влажных – 25–40°, а водонасыщенных – 10–25°.

Угол  $\varphi_0$  увеличивается также с увеличением крупности и угловатости частиц породы. В результате этого  $\varphi_0$  даже для одного и того же сыпучего материала может колебаться в широких пределах.

В определенных условиях рыхлые породы обладают некоторым сцеплением между частицами и соответственно их  $\sigma_{сж}$  и  $\sigma_p$  отличны от нуля. Так, разнозернистые плотные пески имеют сцепление  $C = 0,03\text{--}0,05$  МПа.

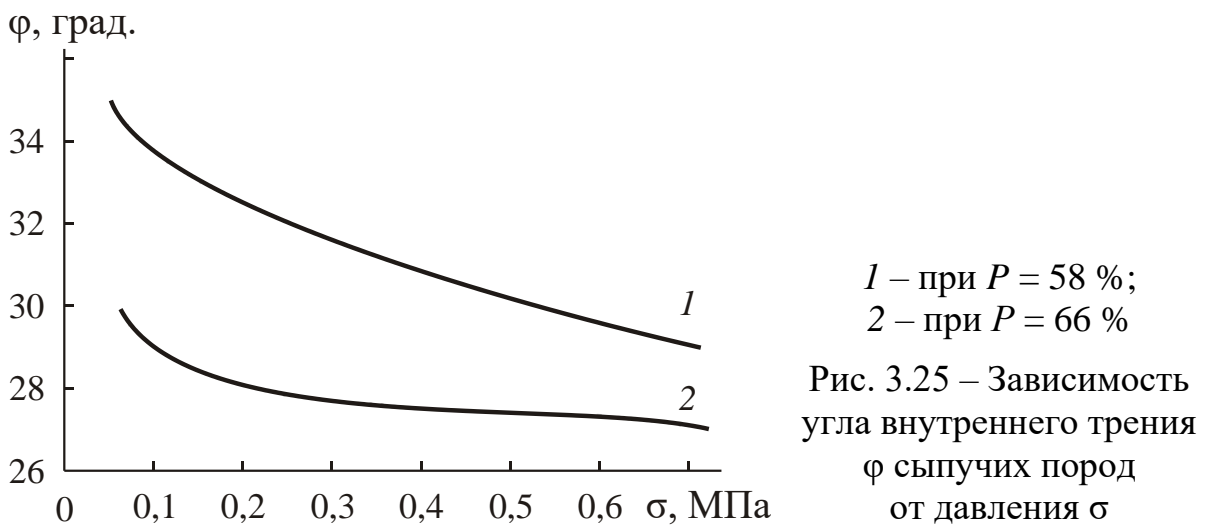
Некоторые виды жирных тонкодисперсных глин, пылеватые пески, заторфованные осадки, обводненный лесс, почвы имеют предел прочности при сжатии  $\sigma_{сж}$  около 0,05 МПа.

В этом случае угол естественного откоса  $\varphi_0$  несколько отличается от угла внутреннего трения породы  $\varphi$ .

Для влажных рыхлых пород  $\varphi$  составляет от  $15^\circ$  до  $40^\circ$ , для сухих сыпучих –  $35\text{--}60^\circ$ . С увеличением размеров частиц  $\varphi$  увеличивается, однако незначительно.

Так, при увеличении размеров частиц кварцевого песка от 0,1 мм до 6 мм (в 60 раз)  $\text{tg}\varphi$  увеличивается от 0,6 до 1,1 (т. е. в 1,8 раза), а увеличение во фракции 5–2,5 мм мелкой фракции кварцевого песка (менее 0,5 мм) приводит к уменьшению  $\text{tg}\varphi$  от 1 до 0,8.

Угол внутреннего трения сыпучих пород с увеличением давления уменьшается (рис. 3.25).



При рассмотрении упругих свойств рыхлых пород обращает на себя внимание практическая невозможность оценить их модуль упругости на одноосное сжатие и коэффициент Пуассона. В связи с этим для рыхлых пород используют понятие модуля одностороннего сжатия  $M$  – коэффициента пропорциональности между нормальным напряжением и соответствующей ему деформацией при расположении рыхлой пробы в цилиндре с жесткими стенками. Зная  $M$  и  $K$  рыхлой породы, по формулам взаимосвязи параметров

упругости можно рассчитать ее модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$ :

$$E = \frac{9K(M - K)}{M + 3K};$$

$$\nu = \frac{3K - M}{3K + M}.$$

Рыхлые породы имеют незначительное сопротивление сдвиговым усилиям, величина которых определяется внутренним трением, поэтому в них, подобно жидкостям, часто распространяются только продольные волны.

Скорости распространения продольных волн в рыхлых породах также очень малы и приближаются к скоростям распространения упругих волн в воздухе (330 м/с).

В рыхлых породах, особенно мелкодисперсных, сильно выражены пластические (точнее квазипластические) и реологические свойства.

Уплотнение рыхлых пород под действием нагрузки может достигать нескольких десятков процентов от исходного объема и характеризуется так называемыми **компрессионными кривыми**.

Среди горно-технологических параметров рыхлых и связных пород, имеющих особое значение, следует отметить коэффициент набухания, характеризующий способность породы увеличивать свой объем  $V$  при насыщении водой  $V_n$  и коэффициент усадки, оценивающий способность породы уменьшать объем при высыхании,  $V_c$ .

Они определяются по формулам

$$k_n = \frac{V_n}{V}; \quad k_y = \frac{V_c}{V}.$$

При этом  $k_n > 1$ ,  $k_y > 1$ .

Набухание происходит в результате проникновения воды между пакетами кристаллических решеток ряда минералов. Коэффициент набухания глин колеблется от 2 до 1,5, супесей – от 1,5–1,05, у песков он равен 1.

Набухание горных пород отрицательно влияет на горные выработки: в сочетании с горным давлением оно вызывает явление пучения и приводит к деформации выработок, разрушению крепи, сдвигу железнодорожных путей и т. д.

Изменение свойств при увлажнении грунтов оценивают также липкостью.

**Липкость** – способность грунтов и разрыхленных пород при определенном содержании влаги прилипать к поверхности инструмента и оборудования. Сущность прилипания заключается в том, что при определенной влажности толщина пленок воды, обволакивающих частицы грунта, становится такой, что они с одинаковой силой взаимодействуют как с минеральными частицами, так и с поверхностью соприкасающихся с ними предметов. Наибольшая липкость соответствует влажности грунта вблизи молекулярной влагоемкости. Увеличение толщины пленки при дальнейшем насыщении породы водой приводит к резкому уменьшению липкости (рис. 3.26).

Липкость оценивается напряжениями, требуемыми для отрыва прилипшего тела от грунта. Липкость грунтов изменяется в пределах  $(0,2-5) \cdot 10^4$  Па. Она зависит не только от свойств грунта, но и от материала и характера поверхности контактирующего тела.

В некоторых породах, содержащих в основном физически связанную воду, при сотрясении происходит преобразование последней в свободную. Это явление носит название **тиксотропии**. По окончании механического воздействия появившаяся свободная вода трансформируется в физически связанную и восстанавливает структуру грунта.

Тиксотропии подвержены влажные глинистые грунты (особенно монтмориллонитовые), содержащие более 2 % частиц размером менее 2 мкм с довольно высоким пределом текучести. Явление тиксотропии может быть вызвано механическим встряхиванием, вибрацией, ультразвуком, электрическим током.

Целый ряд физико-технических параметров рыхлых пород обусловлен особым состоянием дисперсных частиц.

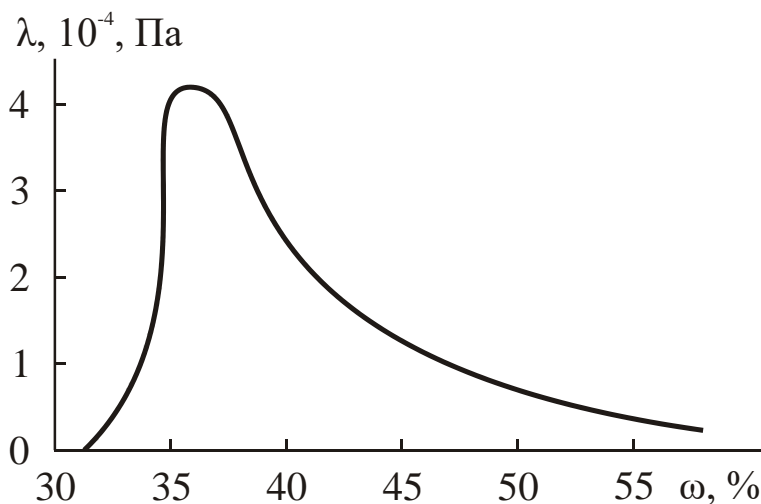


Рис. 3.26 – Зависимость липкости  $L$  грунта от влажности  $\omega$  (по В. Я. Калачеву)



Как известно, поверхностные слои твердых частиц характеризуются значениями свободной и полной энергии, химическим потенциалом и энтропией.

Реальная свободная поверхностная энергия твердых тел отличается от рассчитанной теоретически в связи с искажением кристаллической структуры, особенно значительным в поверхностных слоях.

При высоких значениях дисперсности и большой удельной поверхности роль этих искажений, а также всех поверхностных эффектов значительно возрастает. Так, в высокодисперсных породах наблюдается явление **агрегации** (окомкования, слипания). Существенное влияние агрегации на свойства порошковых тел наблюдается при размерах частиц менее 0,15 мкм.

Учет этих эффектов в ряде горно-технологических процессов (например, при измельчении и обогащении) обязателен.

### **Тепловые и электромагнитные свойства рыхлых пород**

Тепловые свойства рыхлых и разрушенных пород обусловлены как минеральным составом твердых компонент, так и структурой рыхлой системы.

Выделяют две основные разновидности рыхлых пород: ячеистые и зернистые.

Ячеистые породы – это чаще всего связные горные породы, зернистые породы – сыпучие несвязные. При ячеистом строении рыхлых пород теплопроводность осуществляется в основном через стенки ячеек, при зернистом – через контакты между частицами. Так как рыхлые породы имеют большую пористость, а контакты между зернами слабые, влияние минерального состава породы на теплопроводность такой системы незначительно. Преобладает влияние формы и размеров зерен и пор, плотности их укладки, характера и степени насыщения породы жидкостями. Кроме того, в рыхлых породах доля радиационного теплообмена выше, чем в ненарушенных.

Коэффициент радиационной теплопроводности  $\lambda_p$  пор рассчитывают по формуле

$$\lambda_p = 2\zeta^2 \xi T^3 d, \quad (3.14)$$

где  $\zeta$  – степень черноты поверхности пор;  $\xi$  – коэффициент лучеиспускания;  $d$  – средний размер пор.

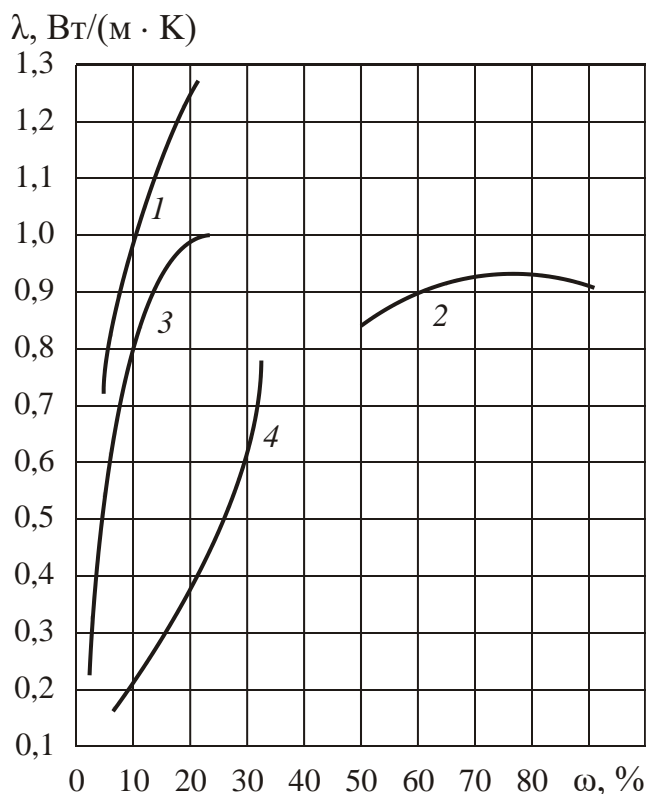
Как видно из формулы (3.14), с увеличением размеров пор увеличивается коэффициент радиационной теплопроводности и, следовательно, коэффициент теплопроводности всей дисперсной системы. Так, при температуре  $T = 0^\circ\text{C}$  для пор размером около 0,1 мм  $\lambda_p = 0,024 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$ , а для пор размером около 2 мм – в 12 раз больше [ $\lambda_p = 0,31 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$ ].

С уменьшением размеров частиц  $d_{\text{ч}}$ , составляющих скелет разрушенной породы, теплопроводность ее также уменьшается, если все остальные факторы остаются неизменными. Так, если при  $d_{\text{ч}} = 5 \text{ мм}$   $\lambda = 1,02 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$ , то при  $d_{\text{ч}} = 2 \text{ мм}$  коэффициент теплопроводности уменьшается до  $0,14 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$  при постоянной плотности породы  $960 \text{ кг/м}^3$ .

Это объясняется уменьшением размеров пор и увеличением числа обладающих пониженной теплопроводностью контактов между зернами.

Уплотнение рыхлых пород приводит к увеличению их коэффициента теплопроводности.

На  $\lambda$  рыхлых пород особенно сильно сказывается их увлажнение (рис. 3.27), так как при этом дополнительно передается тепло за счет конвекции и переноса влаги.



1 – супеси; 2 – суглинки;  
3 – крупнозернистый песок;  
4 – мелкозернистый песок

Рис. 3.27 – Зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda$  рыхлых пород от влажности  $\omega$

В многофазной пористой и рыхлой среде коэффициент конвективной теплопроводности  $\lambda_{\text{кв}}$  равен сумме внутрипоровой свободной  $\lambda_{\text{св}}$  и вынужденной  $\lambda_{\text{в}}$  конвекции:

$$\lambda_{\text{кв}} = \lambda_{\text{св}} + \lambda_{\text{в}}.$$

При этом

$$\lambda_{\text{св}} = \frac{\gamma_{\text{т}} \Delta T g \rho^2 P^2 c h}{9 s_{\text{уд}}^2 \eta},$$

где  $\gamma_{\text{т}}$ ,  $\eta$ ,  $\rho$  – соответственно коэффициент объемного теплового расширения, динамическая вязкость и плотность жидкости, заполняющей поры;  $\Delta T$  – разность температур в слое толщиной  $h$ ;  $g$  – ускорение свободного падения;  $P$  – пористость;  $c$  – удельная теплоемкость породы;  $s_{\text{уд}}$  – удельная поверхность пор (на единицу объема).

$$\lambda_{\text{в}} = \lambda_{\text{л}} + \frac{4 B v_{\text{м}} c}{s_{\text{уд}}},$$

где  $\lambda_{\text{л}}$  – коэффициент конвективной теплопроводности при ламинарном движении жидкости, который определяется по формуле

$$\lambda_{\text{л}} \approx 10,5 \lambda_{\text{ж}};$$

$B$  – эмпирический коэффициент;  $v_{\text{м}}$  – массовая скорость движения потока жидкости,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

Количество теплоты, переносимое паром при температурах  $50^\circ\text{C}$  и выше, превышает 10 % общего количества переносимой теплоты и не может не учитываться при расчетах.

Процессы совместного распространения тепла и вещества рассматриваются теорией тепло- и массопереноса. При этом дифференциальное уравнение диффузии массы аналогично дифференциальному уравнению теплопроводности.

Закономерностям тепло- и массопереноса подчиняются оттаивание и замораживание пород при ведении горных работ.

**Электрическая проводимость** рыхлых и несвязных пород в сухом состоянии определяется в основном проводимостью контактов между зернами и зависит от крупности зерен, но почти не зависит от формы порового пространства.

Если сравнивать  $\rho_{\Sigma}^c$  сухих рыхлых пород с  $\rho_{\Sigma}^n$  той же плотной породы, то всегда наблюдается значительно большее значение  $\rho_{\Sigma}^c$ . Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta$  существенно меньше в рыхлых породах.

Все эти характеристики могут изменяться в другую сторону ( $\rho_{\Sigma}$  может понизиться,  $\epsilon_r$ ,  $\operatorname{tg}\delta$  – значительно возрасти), если рыхлую породу насытить водой.

Воздействие электрического поля на слоистые рыхлые породы приводит еще к одному практически важному явлению – **электроосмосу**. Электроосмос связан с избирательной адсорбцией частицами породы из растворов ионов одного знака (обычно анионов). В результате водные растворы, находящиеся в поровом пространстве, приобретают противоположный знак и под воздействием внешнего электрического поля перемещаются к электроду (чаще всего отрицательному).

### Свойства рыхлых пород в массивах

Рыхлые породы в массивах часто встречаются попеременно со скальными породами в самых различных сочетаниях.

Такие породные массивы называются **разнородными**. Физические свойства и состояние разнородного массива пород являются сложными функциями свойств и состояния рыхлых и твердых пород.

Разнородные породы могут быть представлены уплотненными мягкими и сыпучими породами со скальными включениями в виде гравия, валунов, конгломератов, кремнистых или известняковых прожилков и линз, хаотически расположенных в массиве основной породы. К такому типу относится большинство массивов песчано-гравийных месторождений.

В этом случае определяющую роль играют свойства рыхлой части массива.

Возможен и обратный случай, когда в целом в твердом скальном массиве встречаются включения рыхлых пород, зоны дробленых и измельченных пород и т. д. В этом случае свойства массива в основном определяются свойствами скальной матрицы, однако при конкретном рассмотрении вопросов проходки выработок, отработки отдельных участков месторождения надо ориентироваться на состояние конкретно тех частей массива, которые подвержены действию горных работ.

## О характеристиках запредельного деформирования и нагружения разрушенных пород

Довольно часто рыхлые и разрушенные породы используются в качестве элементов, несущих различные нагрузки. Так, при отвалообразовании отвалы, сложенные рыхлыми породами, должны выдерживать нагрузки от вышележащих слоев, а также от находящихся на их поверхности экскаваторов, транспортных средств, бульдозеров.

В то же время в классическом понимании нагружения и разрушения скальной породы предполагается, что после наступления напряжений, равных пределу прочности данной породы, она теряет способность сопротивляться внешним нагрузкам. Опыт показывает, что это не так.

Поэтому в настоящее время проводят исследования пород с целью определения их деформационных характеристик за областью уже наступившего их разрушения.

Оказывается, что при этом можно дополнить известный график «напряжение – деформация» нисходящей ветвью за пределами  $\sigma_{сж}$  (рис. 3.28). На основе этого графика выделяют три типа запредельного деформирования пород: плавное снижение несущей способности (прочности) разрушенной породы с увеличением ее деформации, резкое снижение, практически мгновенный спад  $\sigma$ .

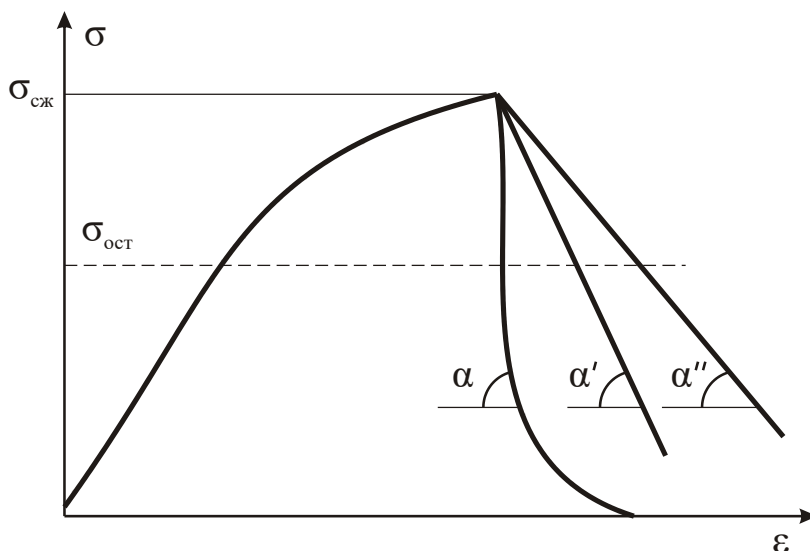


Рис. 3.28 – График запредельного деформирования пород:  $\operatorname{tg}\alpha$ ,  $\operatorname{tg}\alpha'$ ,  $\operatorname{tg}\alpha''$  – модули спада  $M_0$

Соответственно, выделяют определенные параметры пород, характеризующие их состояние запредельного деформирования. К ним относится уровень сохранившейся несущей способности разрушенной породы, равный соответствующим минимальным напряжениям

при данной величине деформации, которые порода выдерживает без дальнейшего деформирования и разрушения, – так называемая **остаточная прочность**  $\sigma_{\text{ост}}$ .

Отношение

$$\sigma^* = \frac{\sigma_{\text{ост}}}{\sigma_{\text{сж}}},$$

где  $\sigma_{\text{сж}}$  – предел прочности породы при сжатии, характеризует уровень потери несущей способности.

Ниспадающая ветвь на графике  $\sigma$ – $\epsilon$  характеризуется также модулем запредельной упругости  $E_3$  и модулем деформации  $M_0$  при заданном уровне потери несущей способности. Модуль деформации  $M_0$  часто называют модулем спада. Можно также определить другие характеристики упругости пород за пределом прочности, например коэффициент поперечной деформации  $\nu_3$ . Так, алевролит из шахты ПАО «Распадская» имеет модуль спада  $M_0$ , равный  $3,4 \cdot 10^4$  МПа, остаточную прочность  $\sigma_{\text{ост}}$  порядка 5 МПа.

Г. Т. Кирничанским установлены следующие связи между параметрами запредельного деформирования:

$$E^* = \frac{\sigma^*}{0,35\sigma^* + 0,72};$$

$$M_0^* = 0,83\sigma^* + 0,1,$$

где  $E^* = \frac{E_3}{E_0}; M_0^* = \frac{E_{\text{деф}}}{M_0}.$

Параметры запредельного деформирования характеризуют остаточную несущую способность уже разрушенной породы и поэтому имеют весьма важное значение при решении вопросов устойчивости целиков, откосов, уступов, отвалов и т. д.

### **Мерзлые горные породы**

Понижение температуры ниже 0 °С приводит к смерзанию рыхлых влажных пород. Это, в свою очередь, сказывается на всех физических свойствах породы. По существу, рыхлая порода при этом перестает существовать – возникает особая скальная порода, имеющая в качестве цементирующего вещества лед со своеобразной ледовой (криогенной) текстурой.

Формирование мерзлых пород происходит в результате длительного действия отрицательных температур воздуха на поверхность массива.

Мерзлые горные породы по времени существования разделяют на сезонно-мерзлые и многолетнемерзлые. Многолетнемерзлые, в свою очередь, подразделяются на сингенетические (возникшие в одно геологическое время с образованием самой породы) и эпигенетические (промерзавшие после накопления и формирования толщи пород).

При замерзании влажной дисперсной породы не вся ее влага переходит в лед сразу после  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Значительная часть ее остается в незамерзшем состоянии. Так, в глинах и суглинках даже при минус  $10\text{--}16\text{ }^{\circ}\text{C}$  около  $38\text{--}40\%$  влаги не замерзает. В общем случае количество незамерзшей воды прямо пропорционально содержанию  $S$  глинистой компоненты в породе, %. Полное замерзание воды наблюдается в мерзлом песке при  $T$  от минус  $20$  до минус  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в мерзлом каолине даже при  $T = -80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Поэтому мерзлые породы наряду с показателем общей влажности (независимо от ее агрегатного состояния) характеризуются еще количеством незамерзшей влаги  $\omega_n$  и льдистостью  $\omega_l$  (т. е. количеством льда в породе).

В зависимости от характера распределения льда в мерзлой породе выделяют три основных типа криогенных текстур: массивную, слоистую и ячеистую.

При этом наименьшей прочностью и наибольшими деформациями обладают глинистые породы, имеющие слоистую криогенную текстуру, а наибольшей прочностью – крупнозернистые песчаные породы со сложной текстурой.

По мере увеличения влажности пород (до полного водонасыщения) и понижения температуры их предел прочности при сжатии существенно возрастает. Прочность мерзлых сыпучих пород становится близкой к прочности плотных и полускальных пород (рис. 3.29).

Если прочность мерзлых песков, супесей и суглинков при влажности  $20\text{--}25\%$  и температуре  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  составляет  $0,5\text{--}0,6\text{ МПа}$ , то при температуре  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  она возрастает до  $5\text{--}6\text{ МПа}$ , у мерзлых глин величина  $\sigma_{сж}$  достигает  $4\text{ МПа}$ .

Дальнейшее постепенное понижение температуры приводит к увеличению прочности мерзлых пород. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, оставшаяся в породах незамерзшая влага

постепенно переходит в мерзлое состояние, во-вторых, наблюдается повышение прочности самого льда с понижением температуры, сопровождающееся снижением его пластичности и, соответственно, возрастанием хрупкости мерзлой породы.

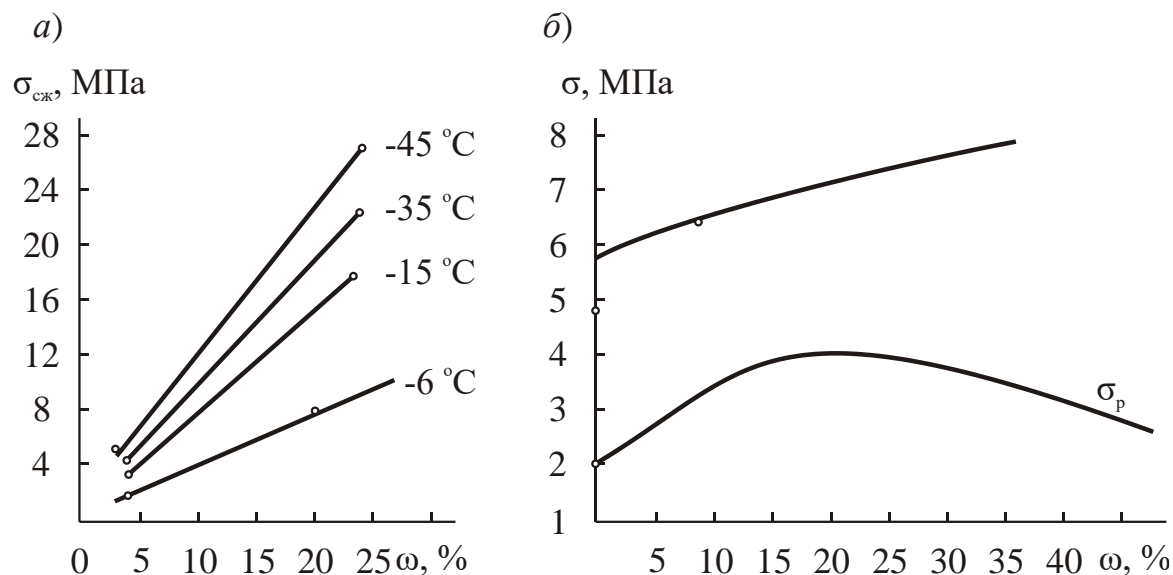


Рис. 3.29 – Зависимости  $\sigma_{сж}$  мерзлого песка от влажности  $\omega$  и температуры (а) и  $\sigma_{сж}$  и  $\sigma_p$  мерзлой глины от влажности  $\omega$  при  $t = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б)

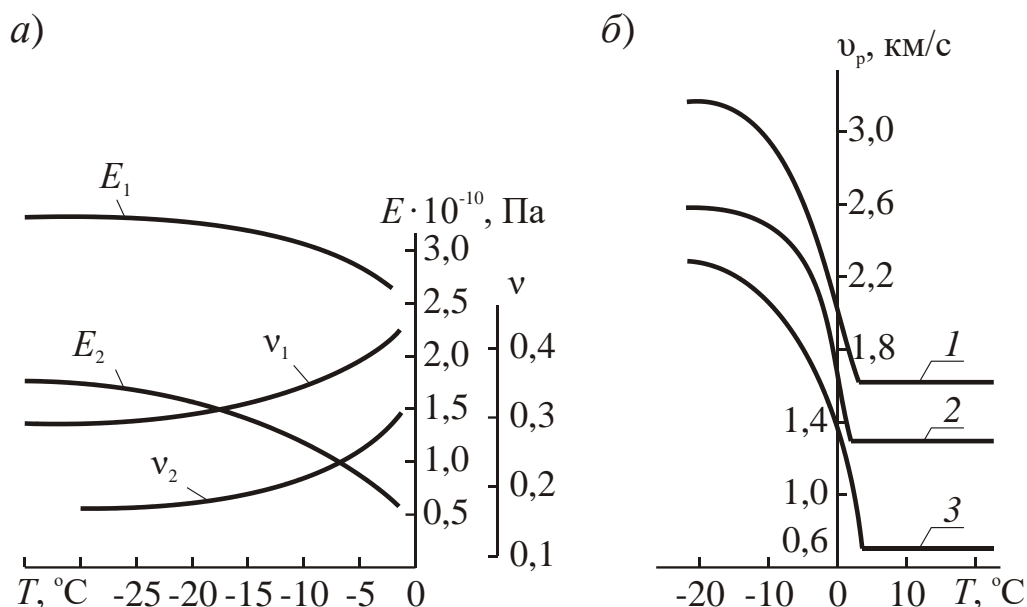
Все упругие свойства рыхлых и связных влажных пород с замерзанием также изменяются. Наблюдается скачок модуля Юнга пород и скоростей распространения в них упругих волн при переходе в область отрицательных температур (рис. 3.30). Коэффициент Пуассона, в свою очередь, при переходе в область низких температур уменьшается. Увеличение размеров зерен, из которых сложена порода, приводит к возрастанию модуля упругости влажной мерзлой породы (рис. 3.31).

$$E = k \lg d + E',$$

где  $k = (7,5-10) \cdot 10^9$  Па;  $E'$  – модуль Юнга тяжелой глины.

Дальнейшее понижение температур приводит к увеличению  $E$  пород. Существенное влияние на рост упругих и прочностных параметров пород оказывает степень их водонасыщения.





$E_1$  и  $\nu_1$  — для влажного песка;  $E_2$  и  $\nu_2$  — для каолина;  
 1, 2 и 3 — соответственно для песчаника, песка и глины

Рис. 3.30 — Изменение модуля Юнга  $E$ , коэффициента Пуассона  $\nu$  (а) и скорости распространения упругих волн  $v_p$  (б) в рыхлых и связных породах при переходе в область отрицательных температур  $T$

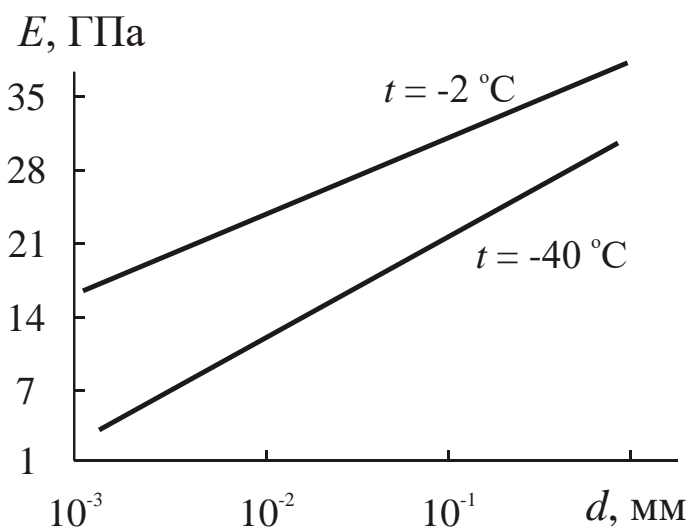


Рис. 3.31 — Зависимость модуля Юнга влагонасыщенных мерзлых пород от степени их дисперсности

### Морозостойкость горных пород

Неоднократные замораживание и оттаивание приводят в конце концов к остаточным нарушениям в объеме даже скальных пород. Это так называемое морозное выветривание горных пород обусловлено напряженным состоянием пород из-за замерзания воды в порах и трещинах. При этом одновременно на скелет породы давит как лед, так и оставшаяся незамерзшая вода, сдавливаемая льдом. Устано-

влено, что влияние последнего фактора преобладающее. Давление воды, замерзающей при  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$  в замкнутом пространстве, составляет около 220 МПа.

**Морозостойкость пород** – это характеристика сопротивляемости пород разупрочению под воздействием циклического оттаивания и замерзания.

Морозостойкость оценивается **коэффициентом морозостойкости**  $k_{\text{мст}}$ , равным отношению предела прочности пород после 25 циклов замораживания и оттаивания к пределу прочности полностью водонасыщенной исходной породы в условиях положительных температур:

$$k_{\text{мст}} = \frac{\sigma_{\text{сж}}^{(25)}}{\sigma_{\text{сж}}}.$$

Если  $k_{\text{мст}} > 0,75$ , образец считается морозостойким. Так, например, гранодиориты имеют  $k_{\text{мст}} = \frac{144}{178} = 0,86$ , известняки – от 0,82 до 0,47.

Довольно часто морозостойкость оценивают количеством циклов замораживания и оттаивания, приводящих к разрушению образца породы. Так, карбонатные породы выдерживают 100–200 циклов, песчаники и порфириты – до 400, гравий – от 15 до 300 циклов.

Морозостойкость определяет устойчивость откосов бортов и уступов на карьерах при длительном их стоянии (например, нерабочий борт карьера).

Морозостойкость является важным показателем качества строительных каменных материалов.

## 4 ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ОСВОЕНИИ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

### 4.1 Подготовка подземного массива к разработке

#### Осушение массивов

Обводненность массивов горных пород вызывает снижение их несущей способности, сползание бортов карьеров и отвалов, прилипание и примерзание породы к механизмам, пучение и другие отрицательные явления. Осушением достигается упрочнение горных пород, повышение их устойчивости и т. д.

Так как процесс осушения связан с распространением воды в породах, ее накоплением и удалением из пород, в расчетах систем осушения непосредственно используются гидравлические характеристики пород: коэффициенты фильтрации и водопроницаемости, а также естественная влажность и водоотдача горных пород.

**Расчет процессов осушения.** Предполагаемый водоприток  $Q$  в вертикальную горную выработку рассчитывают, используя коэффициент фильтрации  $k_\phi$  горных пород данного месторождения (рис. 4.1):

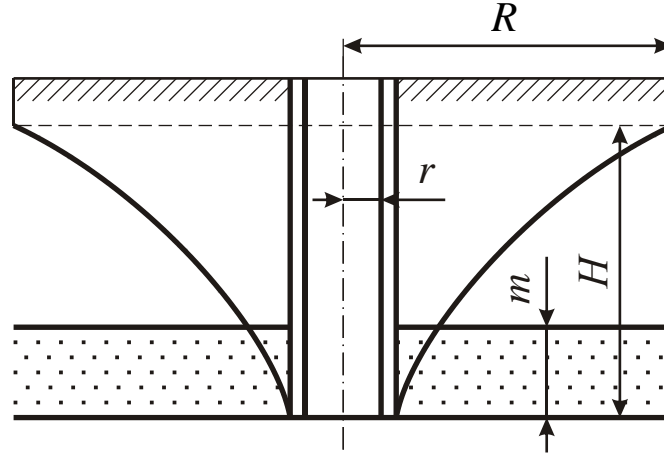
$$Q = \frac{1,36k_\phi(2H - m)m}{\lg \frac{R}{r}},$$

где  $R$  и  $r$  – радиусы соответственно депрессионной воронки и ствола;  $m$  – мощность напорного водоносного пласта;  $H$  – напор подземных вод.

Водоприток в горизонтальную горную выработку, пройденную в пласте большой мощности, приближенно определяется с учетом коэффициента водоотдачи  $\xi$  по формуле

$$Q = \frac{2\pi k_\phi m l h_y}{l \lg \frac{l + \upsilon t}{\sqrt{l^2 + 4h^2}} + 2 \left( \upsilon t \arctg \frac{l}{\upsilon t} - h \arctg \frac{l}{2h} \right)},$$

где  $l$  – половина длины выработки;  $h_y$  – понижение уровня воды;  $\nu = \frac{k_\phi}{\xi}$ ;  $t$  – время откачки;  $h$  – глубина заложения выработки от статического уровня воды;  $m$  – мощность водоносного горизонта.



$R$  – радиус влияния;  $H$  – напор подземных вод;  
 $r$  – радиус выработки;  $m$  – мощность водоносного пласта

Рис. 4.1 – Схема притока воды в вертикальную выработку, пересекающую напорный горизонт

Водоприток в карьер приближенно (в случае безнапорных вод) рассчитывается по формуле

$$Q = \frac{3,14 k_\phi (m^2 - 2H_0^2) m}{\frac{l_\Pi R}{r_k}},$$

где  $H_0$  – давление воды на бортах карьера;  $r_k$  – приведенный радиус карьера.

Фильтрационные характеристики пород применяются также для расчета площади осушения пород. Так, установившийся радиус депрессионной воронки  $R$  вокруг колодца может быть рассчитан по эмпирической формуле

$$R = 2h_y \sqrt{mk_\phi}.$$

Неустановившийся радиус депрессионной воронки

$$R = r_d + 1,5 \sqrt{\nu h_{cp} t},$$

где  $r_d$  – приведенный радиус реального контура дренажа;  $h_{\text{ср}}$  – средняя глубина потока воды при осушении;  $t$  – время осушения.

**Управление фильтрационными характеристиками массивов при водоосушении.** В процессе фильтрации может произойти постепенное заиливание водопроводящих трещин и каналов к скважине и уменьшение водопритоков.

Для восстановления водопритока применяют методы, увеличивающие проницаемость массива пород: торпедирование, простреливание, гидравлический разрыв пласта, соляно-кислотную обработку скважин и т. д.

Торпедирование заключается во взрывании специальных зарядов взрывчатых веществ (торпед), в результате чего вокруг скважины образуется зона с повышенным коэффициентом фильтрации.

Соляно-кислотная обработка скважин производится в карбонатных породах. Кислота, залитая в скважину, вступает в реакцию с породами, что способствует разглинизации стенок, расширению трещин, образованию каналов выщелачивания. Для обеспечения более глубокого проникновения кислоты в пласт добавляют вещества, замедляющие реакцию нейтрализации (уксусную кислоту, нитробензол). Действие соляно-кислотной обработки распространяется на глубину 3–4 м и повышает дебит скважины в некоторых случаях до 20–30 раз.

Гидравлический разрыв пласта осуществляют закачиванием в скважину вязкой жидкости (водного раствора сульфита спиртовой барды, соляной кислоты и др.), содержащей значительное количество зернистого песка. При достижении определенного давления в забое скважины жидкость разрывает пласт и увеличивает его водопроницаемость. Зерна песка препятствуют смыканию трещин после прекращения нагнетания жидкости в пласт. Необходимый объем закачиваемой жидкости определяют с учетом коэффициента проницаемости пород.

**Совершенствование физических процессов водоосушения.** Повысить водоприток в породах, обладающих слабой водоотдачей, только путем разрыхления массива невозможно. В этом случае следует использовать физические методы воздействия с целью интенсификации притока воды без изменения коэффициента фильтрации пород, например, воздействие постоянного электрического поля, приводящего к явлению электроосмоса.

Электроосмос целесообразно использовать в глинистых, илистых породах и плывунах, так как они обладают очень малой водоотдачей и фильтрацией ( $k_f < 0,1$  м/сут). Например, в Подмосковном бассейне использование электроосмоса в сочетании с иглофильтрами привело к росту дебита последних в 4 раза.

### **Разупрочнение пород**

Разупрочнение (ослабление) пород – технологический процесс, применяемый с целью либо исключения буровзрывных работ, либо повышения их эффективности. Ослаблению чаще всего подвергают мерзлые горные породы. Как известно, из-за смерзаемости рыхлых и связных пород вскрышные работы, открытая добыча мягких и влажных руд, глин, песка, гравия в зимнее время затруднены.

Многочерпаковые и роторные экскаваторы, а также бульдозеры и скреперы вообще не способны разрабатывать мерзлую горную породу без предварительной ее подготовки к выемке.

Подготовка горных пород к выемке в зимний период включает три группы мероприятий: предотвращение смерзания пород; оттаивание пород; рыхление смерзшихся пород.

Применение того или иного мероприятия зависит от свойств пород, производительности карьера и применяемых механизмов, характера добываемого полезного ископаемого и климатических условий.

**Расчеты физических процессов ослабления мерзлых пород.** Глубина промерзания породы  $h_m$  зависит от коэффициента теплопроводности массива  $\lambda_m$  и длительности  $t$  действия низких температур:

$$h_m = \sqrt{\frac{2\lambda_m(T_0 - T_{\Pi})t}{Q}},$$

где  $T_0$  и  $T_{\Pi}$  – соответственно исходная температура массива и температура поверхности Земли;  $Q$  – количество теплоты, выделяемой единицей объема породы при промерзании,

$$Q = 0,334\rho_0(\omega - \omega_n);$$

0,334 – размерный коэффициент, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;  $\rho_0$  – плотность породы;  $\omega$  и  $\omega_n$  – исходная (до замораживания) и конечная (после замораживания) влажность пород.

При температуре воздуха минус 25 °С примерно через месяц грунт промерзает до глубины 1,5 м. В то же время механические

лопаты с ковшом емкостью 0,5–1 м<sup>3</sup> могут разрабатывать без предварительного рыхления лишь слой мерзлого грунта мощностью не более 0,15–0,25 м, а емкостью 3–4 м<sup>3</sup> – мощностью до 0,5–0,6 м.

Ослабление мерзлых пород осуществляют механическими и немеханическими методами.

Наиболее часто механическое рыхление осуществляют буровзрывными работами, рыхлителями, дизель-молотами и т. д. При этом в расчетах производительности и параметров рыхления используют соответствующие горно-технологические показатели пород. Так, глубину рыхления определяют с учетом удельного сопротивления породы рыхлению  $K_F$  ( $K_F = 2 \cdot 10^4$ – $4 \cdot 10^4$  Н/м<sup>2</sup>).

**Совершенствование процессов ослабления мерзлых пород.** При ослаблении мерзлых пород немеханическими методами используют явления поглощения электрической энергии породой, электрической проводимости породы, теплопередачи и соответствующие тепловые и электрические свойства пород.

Разогрев пород с поверхности при большой глубине нагрева длителен, малопроизводителен и дорог. Так, для оттаивания почвы до глубины 25 см требуется непрерывно поддерживать температуру 800 °С на поверхности породы в течение примерно 10 ч.

Оттаивание пород осуществляют также непосредственным пропусканием электрического тока по разогреваемому участку. На площади карьера, подлежащей оттаиванию, бурят шпуры, в которые помещают электроды так, чтобы их концы находились в талой породе. При подключении напряжения образуется замкнутая электрическая сеть в талой породе, так как электрическая проводимость талой породы во много раз выше, чем мерзлой (рис. 4.2).

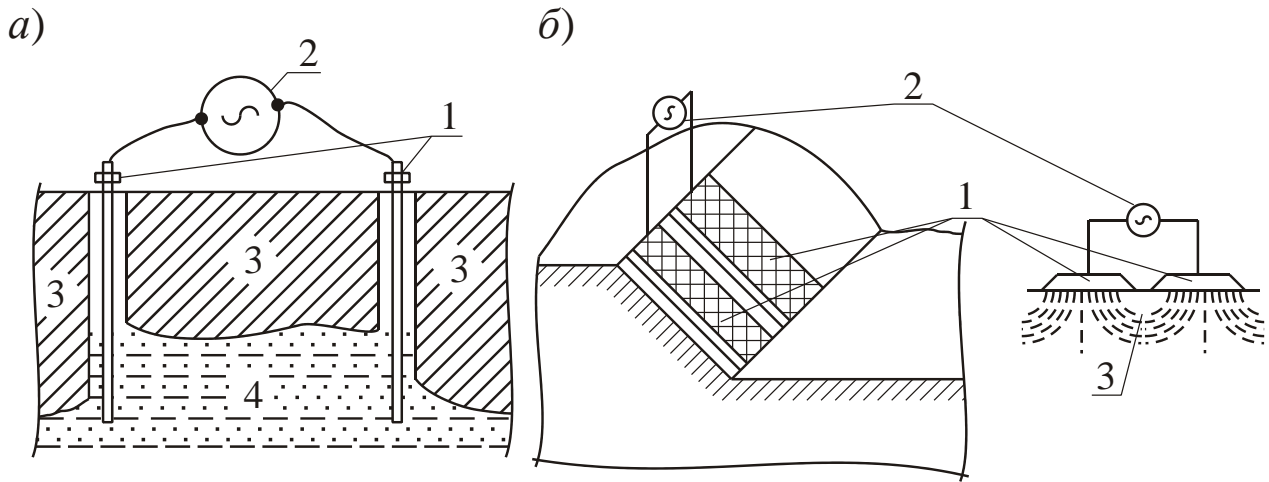
Слой, по которому протекает ток, нагревается и передает тепло вышележащему слою, который после оттаивания сам начинает проводить ток. Постепенно процесс оттаивания достигает поверхности.

Перспективны методы оттаивания током высокой частоты, не требующие как бурения шпуров, так и большого числа электродов (рис. 4.2). При этом ток высокой частоты в основном поглощается льдом. Действительно, при температуре  $T_0 = -15$  °С фактор потерь  $\epsilon_r \operatorname{tg} \delta$  льда составляет 2,4, а кварцевого песка – около 0,05.

Общее количество теплоты  $Q_1$  необходимое для таяния льда, объем которого в породе  $V_{\text{л}}$ , составляет

$$Q_1 = [(T_{\text{пл}} - T_0)c_{V\text{л}} + q_{\text{пл}}]V_{\text{л}},$$

где  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления льда,  $K$ ;  $c_{V\text{л}} = 2,05 \text{ МДж}/(\text{м}^3 \cdot K)$  – объемная теплоемкость льда;  $q_{\text{пл}} = 330 \text{ МДж}/\text{м}^3$  – теплота плавления льда.



$a$  – токами низкой частоты;  $b$  – токами высокой частоты;  
 $1$  – электроды;  $2$  – генератор тока;  $3$  – оттаиваемый слой;  
 $4$  – талая порода

Рис. 4.2 – Схемы электрических способов оттаивания грунта

Так как  $(T_{\text{пл}} - T_0)c_{V\text{л}}$  на порядок меньше  $q_{\text{пл}}$ , приравняв  $Q_1 = Q_2$ , где  $Q_2$  – количество теплоты, выделившейся во льду за счет поглощения тока высокой частоты, можно рассчитать время плавления льда:

$$t_{\text{пл}} \approx \frac{q_{\text{пл}}}{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{л}} \text{tg} \delta_{\text{л}} f E_{\text{э}}^2} \approx \frac{2,5 \cdot 10^{18}}{f E_{\text{э}}^2}.$$

Комплексный параметр, учитывающий свойства породы и ее компонент, – **критерий эффективности нагрева пород  $B$**  – в случаях, подобных описанному, с учетом дополнительного нагрева минеральной фазы с объемной теплоемкостью  $c_{V\text{п}}$  и объемом  $V_{\text{п}}$  может быть представлен следующим образом:

$$B = 55,6 t_{\text{пл}} E_{\text{э}}^2 = \frac{(T_{\text{пл}} - T_0)(c_{V\text{п}} V_{\text{п}} + c_{V\text{л}} V_{\text{л}}) + q_{\text{пл}} V_{\text{л}}}{\varepsilon_{\text{л}} \text{tg} \delta_{\text{л}} V_{\text{л}}}.$$

Если же порода сложена из минералов, при которых происходит высокочастотный нагрев как льда, так и вмещающей породы ( $\varepsilon \text{tg} \delta = \varepsilon_1 \text{tg} \delta_1 \approx \varepsilon_2 \text{tg} \delta_2$ ), то после расчетов и преобразований получаем



$$B = \frac{(T_{\text{пл}} - T_0)(c_{V\Pi} V_{\Pi} + c_{V\text{Л}} V_{\text{Л}}) + q_{\text{пл}} V_{\text{Л}}}{\varepsilon_{\text{Л}} \operatorname{tg} \delta_{\text{Л}} (V_{\Pi} + V_{\text{Л}})} \cdot 10^{12}.$$

Ослаблению подвергают не только мерзлые грунты, но и скальные и полускальные горные породы. При этом часто используют увлажнение пород, которое, как известно, снижает их прочность. На этом явлении основаны методы ослабления угля нагнетанием в пласт воды под давлением через шпуров или скважины. Вода, распространяясь по плоскостям напластования и трещинам, раздвигает их, создает дополнительную трещиноватость и снижает прочность угля на 30–40 %. Это, в свою очередь, позволяет увеличить производительность очистных комбайнов, выход крупных фракций угля и на 60–85 % снизить запыленность шахтной атмосферы.

Влияние разупрочняющего породу действия воды увеличивается при добавлении к ней поверхностно-активных веществ (понижителей твердости), увеличивающих подвижность воды.

Так как этот метод основан на распространении флюидов в породах, расчет его производят с учетом коэффициента фильтрации и влажности горных пород.

Скальные породы можно предварительно ослаблять воздействием постоянного и высокочастотного электрического поля, инфракрасными излучателями и т. д.

Эффективность ослабления пород этими методами существенно зависит от состояния породного массива, крупности зерен (чем меньше зерна минералов, тем большая требуется скорость нагрева) и комплекса электрических, тепловых, упругих и прочностных свойств пород.

### **Упрочнение пород**

При упрочнении используют физические явления уплотнения пород в результате тампонажа, искусственного замораживания, химических и электрохимических реакций, плавления, а также воздействия ударных волн.

Тампонаж пород состоит в нагнетании через скважины в закрепляемый массив под давлением тампонажного раствора, способного вытеснить из трещин и пустот воду, заполнить их и затвердеть; по типу используемых растворов тампонаж подразделяют на цементацию, глинизацию и битуминизацию.

В расчетах тампонажа используют плотностные свойства пород и характеристики проницаемости массива. Так, давление нагнетаемого раствора зависит от глубины  $H$  залегания тампонируемого пласта; оно должно быть выше давления  $\gamma H$  на данной глубине и выше давления пластовых вод.

**Искусственное замораживание** широко используется при проходке шахтных стволов и подземных выработок в обводненных и рыхлых породах. Его осуществляют через специальные замораживающие колонки и скважины, пробуренные по контуру замораживаемой выработки.

По колонкам циркулирует хладагент (аммиак, углекислота, фреоны), в результате чего вокруг них происходит замерзание породы.

Размеры ледопородного цилиндра (ограждения) обусловлены требуемой прочностью.

Для ограждения большой (бесконечной) высоты при проходке вертикальных выработок его требуемый внешний  $b$  и внутренний  $a$  радиусы рассчитывают по формуле

$$\frac{b}{a} = \left[ 1 + \frac{(\beta - 1)\sigma_{рд}}{2C\sqrt{\beta}} \right]^{\frac{1}{\beta - 1}},$$

где  $\beta$  – параметр, зависящий от угла внутреннего трения  $\beta = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)$ ;  $\sigma_{рд}$  – внешнее радиальное равномерно распределенное горное давление;  $C$  и  $\varphi$  – соответственно сцепление и угол внутреннего трения замороженной породы.

Учет длительности действия нагрузки в расчетах на прочность мерзлых пород особенно важен, так как они обладают ярко выраженными реологическими свойствами. Так, при температуре  $-20^\circ\text{C}$  предел прочности глины при сжатии в первые 10 мин составляет 7 МПа, а после действия нагрузки в течение 24 ч – 4,5 МПа, предел прочности мерзлого песка – соответственно 1,3 и 7 МПа.

Для получения ледопородной стенки требуемой толщины необходимо рассчитать время циркуляции хладагента, которое зависит от тепловых свойств пород – коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости.

Закрепление пород **химическим воздействием** (силикатизация) заключается в том, что в породу нагнетают два химических раствора (коллоидный раствор силиката натрия – жидкое стекло – и раствор хлористого кальция). Растворы вступают в реакцию между собой, в результате которой выделяется гидрогель кремниевой кислоты, закрепляющий породу. Получившаяся прочная масса не растворяется в воде.

Силикатизация успешно применяется в среднезернистых плотных породах при  $k_{\text{ф}} = 5\text{--}80$  м/сут. Силикатизации не поддаются глины, плавунуны и илы с  $k_{\text{ф}} = 10^{-2}\text{--}10^{-3}$  м/сут. В лессовые породы достаточно нагнетать только жидкое стекло, так как лесс содержит сернокислые соли, которые заменяют раствор хлористого кальция.

Для химического закрепления применяют также другие растворы (карбамидную смолу, менозоль и др.).

**Электрохимическое закрепление** осуществляют путем пропускания постоянного электрического тока через влажные породы. В результате реакции калий и натрий, имеющиеся в насыщающих породу водах, замещаются водородом и алюминием или железом, и в породе образуются гидраты окиси металлов (например, боксит).

При электрохимическом закреплении глина теряет 30–40 % влаги, существенно возрастает ее предел прочности при сжатии. Грунт приобретает способность не размокать в воде и не теряет прочности после прекращения электрозакрепления.

При электроплавлении водоносные пески нагревают пропусканием электрического тока до температуры 1700–1800 °С, в результате чего песок расплавляется. Остывшая масса образует стекловидное вещество высокой прочности, водонепроницаемое и не разрушаемое агрессивными растворами. Электроплавлением плавунунов в Подмосковном угольном бассейне была получена толщина сплавленной корки 60–70 см. Расход электроэнергии составил  $3 \cdot 10^4$  МДж на 1 м<sup>3</sup> расплава.

**Уплотнение пород взрывом** применяется для создания и одновременно укрепления различных полостей в массивах связных пород: лессах, глинах и суглинках. Специальные заряды ВВ располагают в скважине на всю длину. Взрыв происходит без выброса породы. При взрыве образуется выемка, диаметр которой в 20 раз больше диаметра скважины. Стенки выемки уплотняются настолько, что она может оставаться без крепления длительное время.

## 4.2 Механическое разрушение, дробление и транспортирование пород

### Работа разрушения горных пород

**Разрушение горных пород** – основной процесс горного производства. Разрушение происходит при отделении пород от массива механическими и любыми другими способами: при бурении горных пород, их взрывании, дроблении и измельчении на последующих стадиях переработки.

Разрушаемость пород может быть оценена соответствующей работой разрушения; ее величина обусловлена пределами прочности, упругими и пластическими свойствами горных пород.

Расчет работы разрушения породы можно приблизительно подсчитать по графику «напряжение – деформация».

Так, при нагрузках на породу, не превышающих предела упругости, количество накопленной в единице объема породы потенциальной энергии  $e_E$  равно площади, ограниченной кривой и осью деформации. При одноосном сжатии

$$e_E = \frac{\sigma \Delta l}{2t} = \frac{\sigma^2}{2E}. \quad (4.1)$$

При двухосном сжатии

$$e'_E = \frac{\sigma_2(\sigma_2 - 2\nu\sigma_1) + \sigma_1^2}{2E}. \quad (4.2)$$

Если  $\sigma_1 = \sigma_2$ , то

$$e'_E = \frac{\sigma^2(1-\nu)}{E}. \quad (4.3)$$

При трехосном сжатии

$$e''_E = \frac{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - \nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)}{2E}. \quad (4.4)$$

Если  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ , то

$$e''_E = \frac{3\sigma^2(1-2\nu)}{2E} = \frac{\sigma^2}{2K}. \quad (4.5)$$

Из формул (4.1)–(4.5) видно, что при  $\nu = 0,25$  и  $\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{\sigma_3 e'_E}{e_E} = \frac{e''_E}{e_E} = 1,5$ .

Уравнения (4.1)–(4.5) выведены при наличии в породе только нормальных напряжений. Если же имеются касательные напряжения, то в этом случае общее выражение энергии упругодеформированного тела будет иметь вид

$$e'''_E = \frac{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2\nu(\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x)}{2E} + \frac{\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2}{2G}. \quad (4.6)$$

Если порода хрупкая, т. е. предел упругости  $\sigma_E$  равен  $\sigma_{сж}$ , то приведенные уравнения пригодны для оценки удельной работы разрушения пород. При этом вместо  $\sigma$  в уравнения (4.1)–(4.6) подставляют соответствующие пределы прочности горной породы.

Если порода к тому же обладает пластической деформацией, то в этом случае к энергии упругой деформации  $e_E$  добавляются затраты энергии на пластическое деформирование  $e_{пл}$ :

$$e = e_E + e_{пл}. \quad (4.7)$$

Соответственно, работа разрушения при одноосном сжатии

$$e = \frac{\sigma_{сж}^2}{E_{деф}} - \frac{\sigma_{сж}^2}{2E}. \quad (4.8)$$

Так как  $E_{деф} < E$ , то  $e > e_E$ . Так, если  $E_{деф} = 0,5E$ , то  $e = \frac{3\sigma_{сж}^2}{2E}$ , т. е. удельная работа разрушения пластичной породы превысит работу разрушения хрупкой в три раза (при постоянной прочности и постоянных упругих свойствах породы).

Таким образом, повышение предела прочности пород не всегда затрудняет их разрушение. Высокопрочные, но хрупкие породы значительно легче поддаются динамическому разрушению (например, взрыванию), чем более слабые, но высокопластичные.

Уравнения (4.1)–(4.8) применяют для оценки энергоемкости разрушения при взрывах, бурении, дроблении пород как механическими, так и электрическими и термическими способами.

Однако в данном случае под разрушением понимается простой раскол породы, разделение ее на неопределенное количество частей

неопределенного размера. Для расчета работы разрушения в зависимости от степени измельчения пород существуют другие уравнения (см. ниже «Процессы дробления и измельчения полезного ископаемого в дробилках и мельницах»).

При разрушении породы в массиве существенно знать строение массива, в частности, его слоистость. Работа разрушения породы вдоль слоистости  $A_{\parallel}$  будет всегда меньше таковой поперек слоистости  $A_{\perp}$ ; возможно увеличение работы разрушения  $A_{\perp}$  в 1,8–2 раза по сравнению с  $\sigma_{сж\parallel}$  из-за различия  $\sigma_{сж\perp}$ .

Полная работа разрушения породы  $A_{\Pi}$  состоит из следующих слагаемых: работы  $A_0$ , идущей на непосредственное создание разрушающих напряжений, и работы, идущей на непроизводительные затраты, связанные с конструктивными особенностями рабочего механизма  $A_k$  и особенностями свойств пород  $A_{\phi}$ :

$$A_{\Pi} = A_0 + A_k + A_{\phi}. \quad (4.9)$$

Независимо от метода разрушения при одной и той же степени дробления пород первое слагаемое  $A_0$  в уравнении (4.9) будет постоянно для конкретной горной породы. Оно может быть подсчитано по формулам (4.1)–(4.6).

Пластические деформации приводят к дополнительным затратам работы [см. формулу (4.8)].

Отношение уравнений (4.1) и (4.8) характеризует потери энергии, связанные со свойствами породы при механическом разрушении.

### **Показатель трудности разрушения горных пород**

Как известно, для относительной оценки добываемости горных пород механическими способами на практике широко пользуются коэффициентом крепости по шкале проф. М. М. Протодяконова. Однако этот показатель во многих случаях недостаточен, так как он учитывает только прочность пород при сжатии.

В случае сложного воздействия нагрузок на породы может быть выведен некоторый средний показатель предела прочности при разрушении  $\sigma_{раз}$ , представляющий собой частное от деления величины суммарных действующих на породу сил  $F_i$  на поверхности разрушения  $\Delta S$ :

$$\sigma_{\text{раз}} = \sum \frac{F_i}{\Delta S} = \frac{F_{\text{сж}} + F_{\text{р}} + F_{\text{сдв}}}{\Delta S} \approx k_1 \sigma_{\text{сж}} + k_2 \sigma_{\text{р}} + k_3 \tau_{\text{сдв}},$$

где  $k_1, k_2, k_3$  – доля участия соответственно сжимающих, растягивающих и скалывающих усилий в данном процессе разрушения.

Для общей относительной оценки трудности разрушения пород можно принять условие одинакового участия в разрушении усилий сжатия, сдвига и растяжения.

Тогда

$$\sigma_{\text{раз}} = \frac{\sigma_{\text{сж}} + \sigma_{\text{р}} + \tau_{\text{сдв}}}{3}.$$

В реальных условиях разрушение пород (бурение, взрывание, дробление) всегда сопровождается их перемещением, на что также затрачивается работа. В связи с этим при оценке трудности разрушения пород в технологических процессах необходим учет их объемного веса. В итоге **показатель относительной трудности разрушения** пород  $\Pi_{\text{тр}}$  может быть выражен следующим образом:

$$\Pi_{\text{тр}} = k_{\text{с.о}} A (\sigma_{\text{сж}} + \sigma_{\text{р}} + \tau_{\text{сдв}}) + B \gamma,$$

где  $k_{\text{с.о}}$  – коэффициент структурного ослабления массива;  $A$  и  $B$  – некоторые коэффициенты.

С целью удобства пользования показателем  $\Pi_{\text{тр}}$  коэффициент  $A$  принят равным  $5 \cdot 10^{-8}$ , а коэффициент  $B = 5 \cdot 10^{-5}$  м.

Все породы по относительной трудности разрушения разделены на пять классов (табл. 4.1) и 25 категорий.

Таблица 4.1 – Показатель относительной трудности разрушения

Класс	Наименование класса	Показатель разрушения $\Pi_{\text{тр}}$
I	Мягкие, плотные и полускальные	1–5
II	Легкоразрушаемые скальные	5,1–10
III	Скальные, средней трудности разрушения	10,1–15
IV	Трудноразрушаемые скальные	15,1–20
V	Весьма трудноразрушаемые скальные	20,1–25

Примечание: редко встречающиеся породы с  $\Pi_{\text{тр}} > 25$  относятся к внекатегорным.

По величине  $P_{тр}$  можно определить и правильно выбрать способ механизации горных работ, а также виды оборудования для каждого производственного процесса. Однако показатель  $P_{тр}$  непригоден для расчетов производительности отдельных механизмов и машин. Для этого используются показатели трудности бурения, взрывания, экскавации и транспортирования пород, имеющие единую с показателем  $P_{тр}$  методологическую основу.

### **Механическое бурение пород и их буримость**

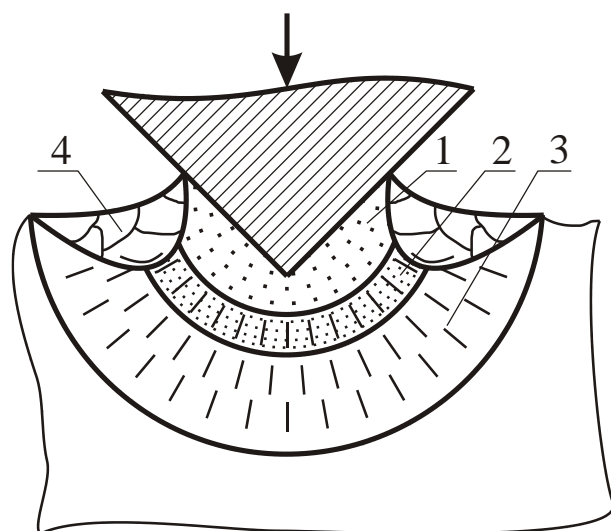
Бурение горных пород в процессе разработки месторождений полезных ископаемых осуществляют, в первую очередь, для создания сети взрывных скважин или шпуров. Кроме того, производят еще технологическое и разведочное бурение с целью оценки состояния, состава массивов пород или осуществления определенного воздействия на массив (например, нагнетания жидкостей или, наоборот, осушения месторождения).

В зависимости от характера приложенных в процессе бурения усилий к горной породе и движения рабочего органа (долота) бурового станка различают ударный, вращательный, ударно-вращательный и шарошечный способы бурения. При ударном способе порода разрушается за счет хрупкого откола в результате действия динамических сжимающих нагрузок, направленных перпендикулярно к плоскости забоя. При вращательном способе разрушение породы наступает под воздействием статического усилия резания и скола, направленного под острым углом к поверхности забоя скважины. При шарошечном бурении по забою под давлением перекатываются специальные шарошки, которые осуществляют хрупкое разрушение и скол частиц породы.

Внедрение бурового инструмента в породу сопровождается образованием четырех характерных зон (рис. 4.3). Величина и соотношение этих зон определяют эффективность бурения.

Эффективность бурения взрывных скважин зависит от свойств пород, определяющих их способность разрушаться под действием бурового инструмента; вида и формы бурового инструмента и способа бурения; усилий и скорости воздействия бурового инструмента на забой скважины; диаметра и глубины скважины; способа, скорости и тщательности удаления из забоя скважины буровой мелочи, препятствующей разрушению породы (рис. 4.4).





1 – зона дробления; 2 – зона разрушения; 3 – зона трещинообразования;  
4 – зона скола

Рис. 4.3 – Схема внедрения бурового инструмента в породу

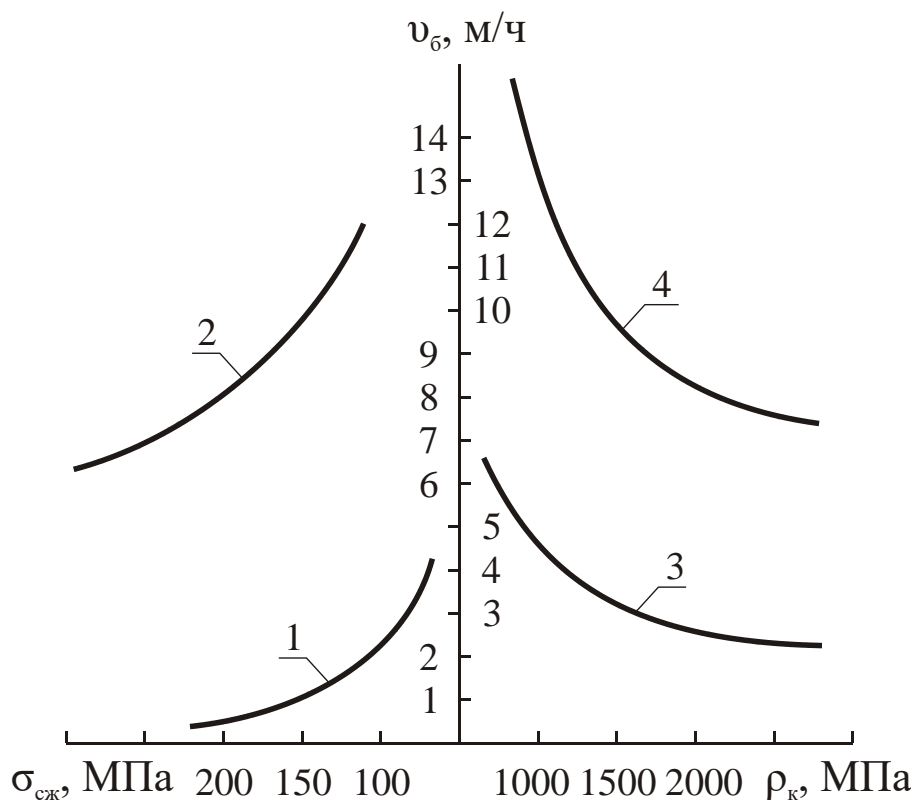


Рис. 4.4 – Зависимость скорости бурения  $v_b$  при вращательном (1) и ударно-поворотном (2) бурении от предела прочности пород при сжатии  $\sigma_{сж}$  и при бурении двухшарошечным долотом от контактной прочности пород  $\rho_k$  при постоянной скорости вращения и усилия подачи  $6 \cdot 10^4$  Н (3) и  $12,5 \cdot 10^4$  Н (4)

**Расчеты процесса бурения горных пород.** Глубина внедрения долота  $h$  с лезвием в виде двустороннего клина, согласно

Н. С. Успенскому, обратно пропорциональна пределу прочности породы при сжатии  $\sigma_{сж}$ :

$$h = \frac{P_{oc} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos f_{тр}}{2d\sigma_{сж} \sin\left(\frac{\alpha}{2} + f_{тр}\right)},$$

где  $P_{oc}$  – усилие подачи;  $\alpha$  – угол приострения лезвия;  $d$  – длина лезвия долота;  $f_{тр}$  – угол трения долота о породу.

Это уравнение положено в основу расчетов скорости бурения горных пород различными способами.

Так как в процессе бурения разрушение породы происходит с высокой степенью измельчения, а толщина единичного скалываемого слоя сравнима с размером зерен и прослоек в породе, в расчетах бурения перпендикулярно к слоям используют пределы прочности минералов, слагающих горную породу. Учитывая, что процесс бурения должен происходить даже при встрече бурового инструмента с наиболее неблагоприятными по свойствам прослойками, конструктивные расчеты производят по прочности данной прослойки (или минерала, слагающего прослойку).

При расчетах процесса бурения слоистого массива вдоль слоев используют характеристики  $\sigma_{сж}$  и  $E$ , определенные для породы в целом вдоль слоистости, так как в этом случае одиночное воздействие всегда распространяется на несколько слоев, расположенных перпендикулярно к плоскости забоя скважины.

КПД передачи энергии от инструмента к породе ударом зависит от удельных волновых сопротивлений инструмента  $z_1$  и породы  $z_2$ :

$$\eta = \frac{4z_1z_2}{(z_1 + z_2)^2}.$$

Скорость ударного, вращательного и шарошечного бурения скважин рассчитывают по формулам, куда входят как конструктивные параметры станков, так и свойства пород.

Если в формулах все параметры, относящиеся к конструкции инструмента, объединить под одним коэффициентом  $k$ , то можно выделить комплексы физических параметров породы, которым пропорциональны скорости бурения:

– для ударного способа бурения

$$v_y = \frac{k_1}{\sigma_{сж} \tau_{сдв} \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha}{2} + f_{тр} \right)}, \quad (4.10)$$

где  $f_{тр}$  – коэффициент трения;

– для вращательного способа бурения

$$v_v = \frac{k_2 \cos^2 \varphi}{\sigma_{сж} \sin(\alpha + 2\varphi)}; \quad (4.11)$$

– для шарошечного способа бурения

$$v_{ш} = k_3 \sqrt[3]{\frac{E}{\sigma_{сж}^4}}; \quad (4.12)$$

– для перфораторного способа бурения

$$v_{п} \frac{k_4}{\sigma_{сж}^{0,59}}. \quad (4.13)$$

На основании этих формул можно выявить наиболее благоприятные по физическим свойствам пород области применения каждого способа бурения.

На практике широко используют упрощенные корреляционные зависимости.

Так, установлены различные зависимости скорости бурения от крепости пород.

Например, по П. М. Кошулько, в случае постоянных параметров перфораторов скорость бурения, мм/мин, рассчитывается по формуле

$$v_{п} = 415 - 32f + 0,65f^2.$$

Скорость бурения бурильным молотком

$$v_{м} = \frac{2,9 \cdot 10^2 N}{d^2 (f_d + 2,6)},$$

где  $N$  – мощность привода бурильного молотка, кВт;  $d$  – диаметр буровой коронки, мм;  $f_d$  – динамический коэффициент крепости.

Скорость бурения, м/мин, пород в зависимости от коэффициента крепости выражается формулой:

– станками БСШ-1м

$$v_{\text{ш}} = \frac{0,64}{f} - 7,8 \cdot 10^{-3};$$

– станками СБШ-250

$$v_{\text{ш}} = \frac{0,68}{f} - 0,03.$$

В расчетах используют корреляционные зависимости скорости бурения не только от крепости, но и от других горно-технологических параметров.

Например, выявлено, что скорость бурения перфоратором (см/мин) с однодолотчатой коронкой пропорциональна показателю дробимости пород  $V_{\text{max}}$  (по Л. И. Барону):

$$v_{\text{п}} = \frac{AnV_{\text{max}}^{0,85}}{d_{\text{ш}}},$$

где  $A$  – энергия единичного удара, Дж;  $n$  – частота ударов в минуту;  $d_{\text{ш}}$  – диаметр шпура, мм.

Скорость бурения шпуров перфоратором, по В. Г. Паносяну, зависит от контактной прочности  $\rho_k$  следующим образом (при  $600 < \rho_k < 1900$  МПа):

$$v_{\text{п}} = \left( 7,2 \cdot 10^{-9} \rho_k - 2,75 \right)^{-1}.$$

Скорость бурения горных пород положена в основу различных классификаций пород по буримости.

Буримость принято оценивать по длине шпура или скважины, пробуренной в исследуемой породе за 1 мин чистого времени бурения в стандартных условиях, или, наоборот, по количеству чистого времени бурения 1 м шпура или скважины при тех же условиях. Кроме свойств пород буримость зависит также от конструктивных особенностей бурового оборудования и режима его работы [см. уравнения (4.10)–(4.13)]. Поэтому при определении буримости требуется строгое соблюдение стандартных условий: применения определенного инструмента, армированного стандартными сплавами; сохра-

нения определенного диаметра шпура и режима работы инструмента (например, давления в воздушной магистрали при бурении перфораторами).

Значительно более широко применим параметр трудности бурения  $\Pi_6$  (табл. 4.2), рассчитанный аналогично показателю трудности разрушения  $\Pi_{тр}$ .

При относительной оценке пород по трудности бурения учитывается, что в разрушении принимают основное участие сжимающие и скалывающие усилия.

Так как разрушение возможно только при постоянном удалении буровой мелочи забоя скважины, при оценке буримости учитывают удельный вес породы  $\gamma$ .

В итоге

$$\Pi_6 = A(\sigma_{сж} + \tau_{сдв} + B\gamma),$$

где коэффициент  $A = 7 \cdot 10^{-8}$ , а  $B = 10^3$  м.

Влияние трещиноватости массива на процесс механического бурения сказывается относительно слабо.

Таблица 4.2 – Параметр трудности бурения

Класс	Наименование класса	Параметр бурения $\Pi_6$
I	Легкобуримые	1–5
II	Средней трудности	6–10
III	Труднобуримые	11–15
IV	Весьма труднобуримые	16–20
V	Исключительно труднобуримые	21–25

**Расчет оптимальных конструктивных параметров бурового инструмента.** Скорость бурения зависит от правильного выбора различных конструктивных параметров бурового инструмента, которые, в свою очередь, определяются свойствами пород.

**Усилие подачи**, по Л. А. Шрейнеру, на шарошечное долото  $P_{ос}$  зависит от твердости горных пород:

$$P_{ос} = k_{фк} \rho_{ш} \sum S_k \left( 1 + \frac{a}{k_{пл}} \right),$$

где  $k_{фк}$  – коэффициент, учитывающий влияние факторов, действующих в реальных условиях бурения;  $\rho_{ш}$  – твердость пород по Шрей-

неру;  $\Sigma S_k$  – суммарная площадь опорных площадок зубьев применяемого долота, одновременно контактирующих с породой;  $k_{пл}$  – коэффициент пластичности;  $a$  – коэффициент, равный 1,5–6.

**Шаг в шарошечных долотах  $l$** , обеспечивающий наиболее эффективное разрушение породы, по В. В. Царицину, обратно пропорционален пределу прочности породы при сжатии  $\sigma_{сж}$ :

$$l = \frac{4,54m_0P_{oc}\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d\sigma_{сж}} \left[ \frac{0,69}{\operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} + \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) + f_{тр}}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right],$$

где  $m_0$  – число шарошек;  $d$  – диаметр долота;  $\alpha$  – угол разрушения горной породы;  $f_{тр}$  – коэффициент трения.

**Оптимальная частота вращения  $n_{опт}$** ,  $\text{мин}^{-1}$ , по О. Д. Алимову, при бурении шпуров вращательным способом обратно пропорциональна крепости пород:

$$n_{опт} = \frac{2200}{f}.$$

**Оптимальная длина лезвия  $B_{опт}$** , мм, при ударном способе бурения зависит от контактной прочности пород  $\rho_k$ :

$$B_{опт} = \frac{3629A^{0,5}}{\rho_k^{0,4}},$$

где  $A$  – энергия удара, Дж.

Б. А. Симкиным предложена номограмма выбора оптимальных осевых давлений и частота вращения долота при шарошечном бурении (рис. 4.5) в зависимости от крепости пород.

**Оптимальный угол поворота  $\beta_{опт}$**  при ударно-вращательном бурении по Э. О. Миндели зависит от предела прочности породы при сжатии  $\sigma_{сж}$ :

$$\beta_{опт} = \alpha \left( 6 \cdot 10^{-2} A - 6 \cdot 10^{-3} A^2 + 2,4 \cdot 10^{-4} A^3 \right),$$

где  $\alpha$  – угол приострения инструмента ( $\alpha = 80$ – $110^\circ$ );

$$A = \frac{10^7 \omega}{\sigma_{сж} d^3};$$

$\omega$  – энергия единичного удара, Дж;  $d$  – диаметр лезвия долота, см.

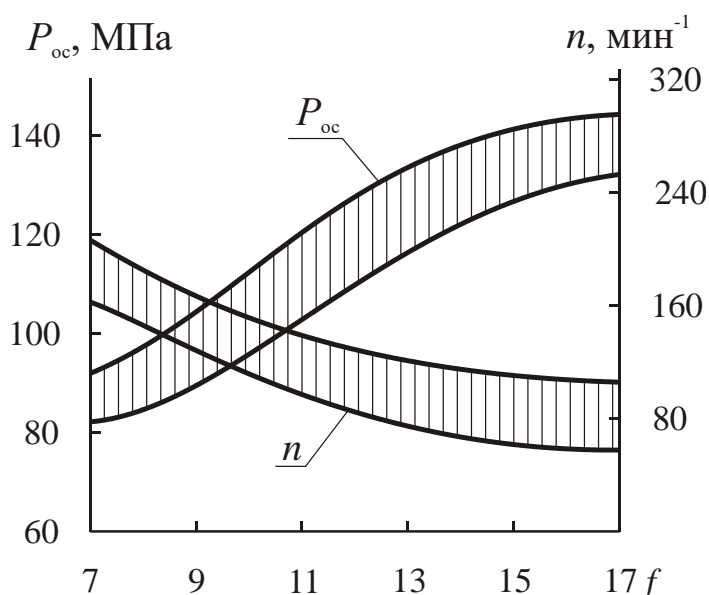


Рис. 4.5 – Рекомендуемые осевые давления  $P_{ос}$  и частоты вращения  $n$  при шарошечном бурении в зависимости от крепости пород  $f$  (по Б. А. Симкину)

**Совершенствование способов механического бурения** связано с применением дополнительного воздействия на породы жидкостями, упругими колебаниями, динамическими нагрузками и т. д.

**Гидравлическое воздействие.** Используются явления размокания, адсорбции, частичного растворения пород. С этой целью в скважину добавляют различные смачивающие растворы – поверхностно-активные вещества (ПАВ), обладающие большой адсорбционной способностью. Скорость разрушения пород под действием таких растворов увеличивается на 15–50 % по сравнению со скоростью бурения в обычных условиях.

В песчаниках, сланцах и известняках в качестве ПАВ можно использовать слабые растворы  $\text{NaCl}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{MgCl}$ ,  $\text{NaCO}_3$ , в кварцитах и кварцевых песчаниках – нафтоловое масло.

Иногда целесообразно использовать динамическое воздействие воды. На основе импульсных гидромониторов, создающих компактные водные струи с давлением у сопла, превышающим 100–200 МПа, сконструированы различные гидравлические и механогидравлические буровые установки.

**Упругие колебания.** Наложение ультразвуковых полей на резец приводит к появлению кавитации в буровой жидкости. На кавитации основана работа ряда экспериментальных ультразвуковых буровых установок.

При наложении упругих колебаний на резец скорость резания пород увеличивается не только в результате кавитации, но и за счет дополнительных динамических усилий и снижения сил сопротивле-

ния движению резца. В итоге происходит виброинтенсификация процесса и скорость бурения увеличивается в 2–6 раз.

**Ударные волны.** Динамическое воздействие позволяет сосредоточить в единичном ударе большие мощности. На этой основе созданы установки **взрывного бурения**.

Процесс бурения такими установками происходит следующим образом. В специальной камере вблизи забоя скважины формируются микрозаряды из жидких или твердых взрывчатых смесей и затем эти микрозаряды направляются в забой скважины, при соударении с которым они взрываются. Такие микровзрывы дробят крепчайшие породы и способны весьма быстро образовывать скважину требуемого диаметра и глубины.

### **Взрывание горных пород, взрываемость**

Взрывание – наиболее распространенный в настоящее время способ разрыхления скального массива пород.

Взрыв осуществляют разнообразными ВВ. Разрушение пород при взрыве происходит в результате совокупного воздействия расширяющихся продуктов взрыва (газов), детонации, ударных волн и волн разгрузки. Влияние того или иного фактора на разрушение пород взрывом определяется величиной их удельного волнового сопротивления – акустической жесткости (табл. 4.3).

Таблица 4.3 – Механизм разрушения пород взрывом

<b>Акустическая жесткость</b> $z \cdot 10^{-6} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	<b>Порода</b>	<b>Основной фактор, вызывающий разрушение</b>
0,2–5	Рыхлая и связная	Расширяющиеся газы
5–15	Полускальная	Ударные и упругие волны и газы
15–25	Скальная	Ударные и упругие волны (прямые и отраженные)

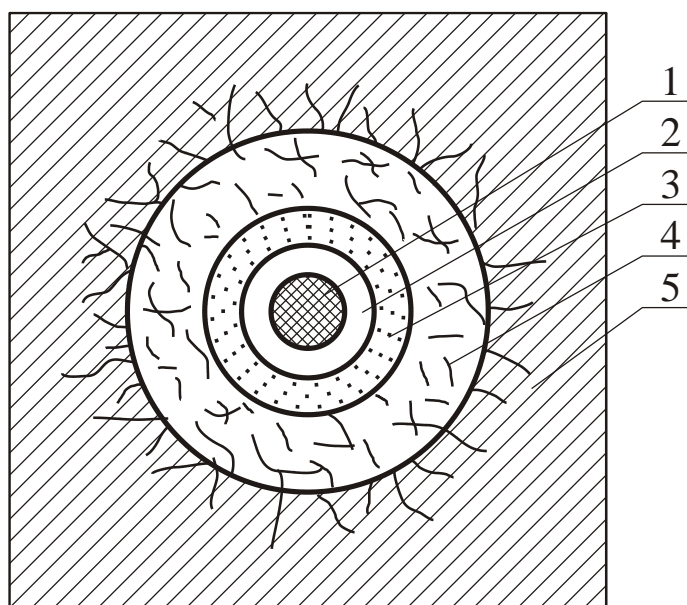
Расширяющиеся газы разрушают породу непосредственно в месте закладки ВВ. Одновременно они передают энергию взрыва в массив. Коэффициент передачи энергии взрыва в массив составляет 0,4–0,6. Энергия в массиве вблизи заряда распространяется в виде ударной волны.



Ударные волны отличаются от упругих тем, что деформации и напряжения, вызванные ими, превосходят предел упругости и достигают пределов прочности пород. Скорость распространения ударной волны выше скорости распространения продольной упругой волны и составляет  $(1,1-1,3) v_p$ .

С удалением от заряда ударная волна переходит в упругую волну, распространяющуюся со звуковой скоростью.

При взрыве в радиусе действия ударной волны образуется зона сжатия, в которой порода либо переизмельчается (скальные и полускальные породы), либо уплотняется (часть плотных и мягкие глинистые породы, рис. 4.6). При этом преодолевается сопротивление породы силам сжатия и сдвига. При взрывном дроблении массива скважинными зарядами радиус зоны сжатия составляет  $(1-7,5)$  диаметра заряда  $d_z$ .



1 – заряд ВВ; 2 – газовая полость; 3 – зона сжатия;  
4 – зона трещинообразования;  
5 – зона сотрясения

Рис. 4.6 – Зоны взрыва

За зоной сжатия расположена зона трещинообразования; радиус ее при скважинных зарядах составляет  $(20-50) d_z$ .

Здесь энергия взрыва расходуется на преодоление сопротивления породы сдвигу, растяжению и частично сжатию. За зоной трещинообразования расположена зона сотрясения, которая с удалением от заряда переходит в зону упругих деформаций. Зоны сжатия и трещинообразования образуют вместе зону регулируемого дробления. В зоне сотрясения также частично происходит разрушение пород по естественным трещинам (без дробления отдельностей массива) – это зона нерегулируемого дробления. При взрывных работах стре-

маться максимально увеличить зону регулируемого дробления путем управления действием взрыва.

Так как взрыв воздействует практически одновременно на большой массив породы, в расчетах процесса взрывания используют физические параметры массива. При этом совершенно обязателен учет анизотропии массива.

Если взрыв производят, например, в скважинах, пробуренных перпендикулярно к слоистости, то сдвиг происходит вдоль слоев, а отрыв – перпендикулярно к слоям. Поэтому в расчетах применяют  $\tau_{сдв}$  и  $\sigma_{p\perp}$ .

Кроме того, так как процесс взрывания динамический, то и физические параметры должны быть динамическими (например,  $E_d$ ,  $\sigma_{сж}^{мгн}$  и т. д.).

В простейшем случае удельную работу разрушения пород взрывом можно представить в следующем виде:

$$e = \frac{k_{пл}\sigma_p^2}{2E} + \frac{k_{пл}\tau_{сдв}^2}{2G} = \frac{k_{пл}\sigma_p^2 + 2(1-\nu)\tau_{сдв}^2}{2E},$$

где  $k_{пл}$  – коэффициент пластичности породы;  $k_{пл} = \frac{2E - E_{деф}}{E_{деф}}$ .

Так как  $\tau_{сдв} > \sigma_p$ , эффективность разрушения взрывом в основном определяется пределом прочности породы при сдвиге. Минимальная энергоемкость разрушения при взрыве наблюдается тогда, когда сдвиг происходит вдоль слоистости, ибо  $\tau_{сдв\parallel} < \tau_{сдв\perp}$ .

Сопротивление пород действию взрыва принято оценивать удельным расходом взрывчатого вещества  $q$ , кг/м<sup>3</sup>, – количеством ВВ, необходимым для разрушения 1 м<sup>3</sup> породы.

В практике производства горных работ выделяют заряды, образующие воронку нормального выброса (в результате взрыва из воронки удаляется вся порода), и заряды, приводящие к нормальному дроблению (порода дробится в объеме воронки, но не выбрасывается).

Удельный расход ВВ в последнем случае составляет 1/3 удельного расхода ВВ при зарядах нормального выброса.

Для определения удельного расхода ВВ применительно к конкретным породам используют различные шкалы и классификации пород по взрываемости, например, шкалу Союзвзрывпрома, в кото-

рой породы разделены на 16 категорий по удельному расходу аммонита № 9, создающему воронку нормального выброса.

Широко известна также Единая классификация пород по буримости и взрываемости проф. А. Ф. Суханова.

Аналогично показателю трудности разрушения (см. выше «Показатель трудности разрушения горных пород») можно рассчитать некоторый **эталонный удельный расход ВВ** по известным значениям прочности и объемного веса пород. При этом принято, что доля участия сжимающих, сдвигающих и растягивающих напряжений в дроблении одинакова, а расход энергии на перемещение взорванной массы пропорционален объемному весу пород.

Эталонный удельный расход ВВ  $q$ , для большинства взрываемых горных пород изменяется от 50 до 500 г/м<sup>3</sup>, достигая для внекатегорных пород 700–1000 г/м<sup>3</sup>.

**Расчет процессов взрывания.** В расчетах взрывания удельный расход ВВ является основной используемой физико-технической характеристикой горных пород. Поэтому большое значение имеет правильный расчет  $q$  пород с учетом всего комплекса физических параметров, определяющих его величину.

**Общую массу требуемого заряда ВВ  $m$**  определяют в зависимости от типа заряда по различным формулам.

Так, при сосредоточенных зарядах расчеты ведут исходя из предположения, что при взрыве образуется воронка нормального выброса. Если радиус воронки  $r$  равен ее глубине, то ее объем примерно равен  $r^3$ . В данном случае  $r$  – это кратчайшее расстояние от центра заряда до ближайшей обнаженной поверхности, называемое линией наименьшего сопротивления  $W$ . Поэтому общая масса заряда

$$m = f(n)qW,$$

где  $f(n) \leq 1$  – функция показателя действия взрыва  $\left(n = \frac{r}{W}\right)$ . Для заряда выброса  $f(n) = 1$ , для заряда дробления  $f(n) \approx 0,33$ .

При расчете удлинённых зарядов, расположенных параллельно обнаженной поверхности, используют формулу Г. П. Демидюка и П. П. Назарова

$$m = f(n)q(W^2l + W^3),$$

где  $l$  – длина заряда.

При взрывании серии удлиненных зарядов массу заряда рассчитывают по объему породы, разрушаемой одним зарядом:

$$m = qWaH,$$

где  $a$  – расстояние между смежными удлиненными зарядами, м;  
 $H$  – высота уступа, м.

Далее, по удельному расходу ВВ  $q$  определяют:

– **мощность взрываемого слоя**

$$K_{\text{ВВ}} = \sqrt{\frac{2G}{q(3-q)}},$$

где  $G$  – масса ВВ, размещаемого в 1 м скважины, кг;

– **расстояние между зарядами в ряду**

$$a = (0,7 \div 0,9) \sqrt{\frac{G}{q}};$$

– **длину перебура**

$$l_{\text{пер}} = 0,5qa;$$

– **ширину развала взорванной массы**

$$B = 5q\sqrt{Wl_3},$$

где  $l_3$  – длина заряда.

Подобным образом определяют линию наименьшего сопротивления (л. н. с), длину заряда, глубину скважины и т. д.

В настоящее время в расчетах взрывных работ все шире используют непосредственно свойства пород.

Так, установлено, что величина л. н. с.  $W$  для одиночной скважины должна быть обратно пропорциональна  $\sqrt{\sigma_p}$  породы

$$\omega = 0,8r_0D_{\text{ВВ}}\sqrt{\frac{\rho_{\text{ВВ}}}{\sigma_p}},$$

где  $r_0$  – радиус скважины;  $D_{\text{ВВ}}$  и  $\rho_{\text{ВВ}}$  – соответственно скорость детонации и плотность ВВ.

Радиус зоны трещинообразования  $R_{\text{тр}}$  при взрыве скважины рассчитывают по формуле, куда входят  $E$ ,  $\sigma_{\text{сж}}$ ,  $v$ ,  $\rho$  пород:

$$R_{\text{тр}} = R_0 \left( \frac{\rho_0 D^2}{8P_{\sigma}} \right)^{\frac{1}{6}} \left[ \frac{E}{8\sigma_{\text{сж}}(1-\nu)} \right]^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\nu\sigma_{\text{сж}}}{(1-\nu)\sigma_p} \right)^{\frac{1}{2}},$$

где  $R_0$  – начальный радиус зарядной полости;  $D$  – скорость детонации;  $P_{\sigma}$  – максимальное давление в полости взрыва.

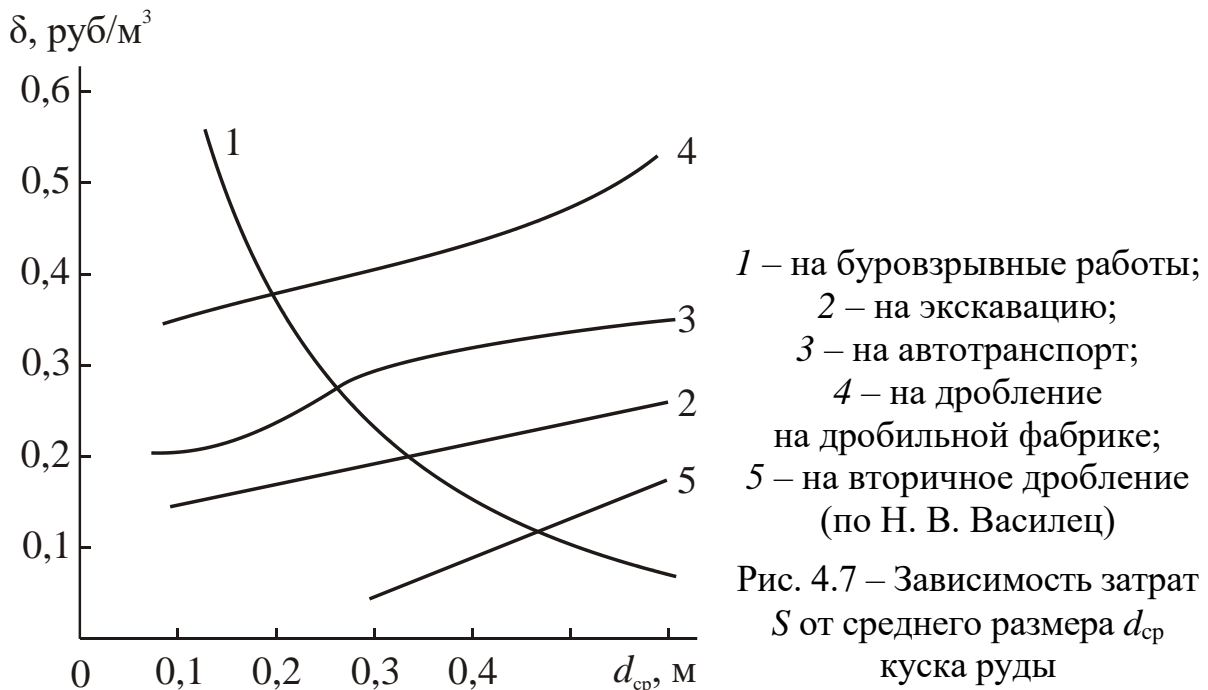
При короткозамедленном взрывании (взрывании серии или отдельных зарядов с интервалами в тысячные доли секунды) производят расчет интервала замедления, обеспечивающего максимальное дробление породы.

Экспериментально установлена следующая эмпирическая зависимость интервала замедления  $t$  от акустической жесткости  $z$  пород:

$$t = \frac{31,5W}{\sqrt[4]{z}} - 6\sqrt[4]{z} + 9,6.$$

Величина  $z$  выражается в  $\text{т}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

Одна из основных задач буровзрывных работ – это обеспечение оптимального куска разрушенной взрывом породы. Несмотря на то, что в результате более мелкого дробления пород в массиве повышается стоимость буровзрывных работ, стоимость всех остальных технологических процессов (рис. 4.7) существенно снижается.



Применяют различные методы расчета оптимального размера куска проектируемого взрыва.

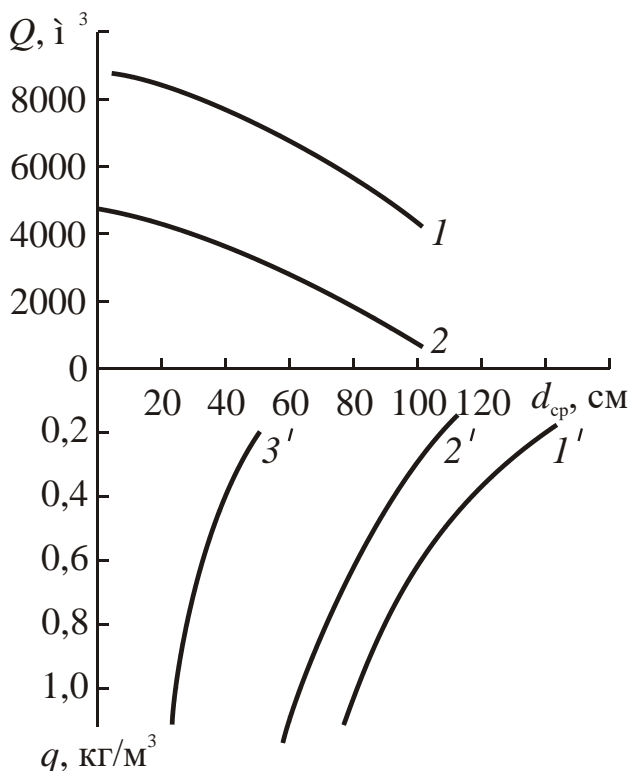
**Совершенствование способов взрывания горных пород** идет, в первую очередь, по направлению улучшения качества дробления горной породы. При этом применяют различные предварительные воздействия на массивы пород перед взрыванием. Установлено, что на качество взрывной отбойки пород влияет их увлажнение поверхностно-активными веществами. Увлажнение массива  $\omega$  пород от 6 до 20 % приводит к уменьшению выхода негабарита размером +300 мм до 5–12 % (вместо 8–16 %), а куски размером свыше 1000 мм вообще не встречаются.

### **Выемка, механическое отделение пород от массива, экскавируемость**

Скальные породы после их разрушения в результате выше рассмотренного буровзрывного процесса подвергаются выемке из забоя различными выемочными машинами и агрегатами.

Рабочий орган выемочной машины внедряется в разрыхленную массу пород, преодолевая остаточные силы сцепления, трения и силы зацепления между кусками породы.

При этом основное значение имеют размеры кусков  $d$  взорванной массы пород (рис. 4.8) и ее объемный вес  $\gamma$ .



1 – трудновзрываемые породы;  
2 – средневзрываемые;  
3 – легковзрываемые  
(по Н. Я. Репину)

Рис. 4.8 – Зависимость сменной производительности  $Q$  экскаваторов ЭКГ-20 (1) и ЭКГ-8 (2) от размера кусков горной массы и зависимость  $d_{cp}$  от удельного расхода ВВ  $q$

Связность взорванной породы обратно пропорциональна ее коэффициенту разрыхления  $k_p$ , поэтому  $k_p$  входит в формулу расчета параметра трудности экскавации разрушенных скальных горных пород  $\Pi'_3$ :

$$\Pi'_3 = 2,2A(1 + 10k_p^{-9}),$$

где  $A$  – коэффициент;  $A = 10^{-4}(\gamma d_{cp} + 10^{-4}\tau_{сдв})$ ;  $\tau_{сдв}$  – предел прочности разрыхленной породы при сдвиге, обусловленный сцеплением, трением и зацеплением кусков породы.

$\Pi'_3$  пород меняется от 3 до 30.

Связные рыхлые, некоторые полускальные и ряд мерзлых пород отделяют от забоя непосредственно выемочными агрегатами без их предварительного рыхления. Например, подавляющее большинство угля на шахтах добывается очистными комбайнами или стругами без проведения взрывных работ.

При этом режущая кромка или зуб агрегата (скрепера, бульдозера, экскаватора, врубовой машины, очистных и проходческих комбайнов и струговых установок) под действием статических или динамических усилий внедряется в массив и скалывает (или срезает) относительно небольшие куски (стружки) от массива. Основные разрушающие усилия в этом процессе – сжимающие и сдвигающие.

Режущие органы скрепера, бульдозера, экскаватора, имеющие заполняющуюся породой емкость, затрачивают работу на преодоление:

- сопротивления породы резанию

$$A_1 = alm;$$

- силы тяжести породы

$$A_2 = al\gamma H ;$$

- силы трения породы о режущую кромку и стенки ковша и между собой

$$A_3 = f_{тр}A_2,$$

где  $l$  и  $m$  – соответственно ширина и толщина срезаемой стружки, м;  $H$  – высота заполнения ковша, м;  $a$  – удельные усилия резания, Н/м;  $k$  – коэффициент, учитывающий высоту подъема породы, м;  $f_{тр}$  – коэффициент трения породы.

**Удельные усилия резания  $a$**  – это параметр, определяющий величину усилий, требуемых для резания пород в массиве и приходящихся на единицу длины лезвия, Н/м.

Удельные усилия резания для мягких углей составляют в среднем  $1,5 \cdot 10^5$  Н/м, для крепких углей –  $4,5 \cdot 10^5$  Н/м.

Форма поперечного сечения стружек (тел выкола) и их фактические размеры зависят от схемы выемки, типа и структуры пород.

Сопrotивляемость пород при их выемке экскаваторами принято характеризовать величиной удельного сопротивления копанию  $K_F$ :

$$K_F = \frac{F_k}{S},$$

где  $F_k$  – касательная сила сопротивления породы копанию, Н;  $S$  – площадь поверхности отрыва, м<sup>2</sup> ( $S = B_k h$ );  $B_k$  – ширина ковша;  $h$  – глубина внедрения ковша в породу при копании, м.

Удельные сопротивления копанию зависят, в первую очередь, от прочностных параметров и плотности породы. При выемке механической лопатой рыхлых сухих песков  $K_F = (0,16–0,25) \cdot 10^5$  Па, у тяжелых влажных глин  $K_F = (2–3) \cdot 10^5$  Па, у полускальных пород в пределах одного структурного блока  $K_F$  достигает 1 МПа. При  $K_F < 1,2 \cdot 10^5$  условия копания легкие, при  $K_F > 2,8 \cdot 10^5$  – тяжелые.

По Ю. И. Беякову,  $K_F$  зависит от сцепления пород  $C$ :

$$K_F = (1,54C + 1,7 \cdot 10^5) \mu_3,$$

где  $\mu_3$  – коэффициент, учитывающий тип экскаватора ( $\mu_3 < 1$ ). Удельное сопротивление копанию мерзлых мягких и плотных, а также промерзших полускальных пород значительной влажности ( $\mu_3 > 12\%$ ) в несколько раз выше, чем этих же пород в талом состоянии, и зависит от глубины промерзания  $h_{пр}$  массива.

Величина  $K_F$  определяет относительную продолжительность рабочего цикла экскаваторов.

На величину  $K_F$  влияют тип применяемой выемочной машины, геометрия и емкость исполнительного органа. Например, при выемке суглинков и легких глин мехлопатой величина  $K_F$  находится в пределах  $(0,6–1,3) \cdot 10^5$  Па, скрепером –  $(0,95–1,8) \cdot 10^5$  Па, роторным экскаватором –  $(1,5–2,9) \cdot 10^5$  Па.

Для сопоставления невзорванных пород по экскавируемости на основе их физических свойств вместо  $K_F$  используют относи-



тельный показатель трудности экскавации породы  $\Pi_3$ , определяемый по формуле

$$\Pi_3 = \left[ 0,3k_{с.о} (0,2\sigma_{сж} + \tau_{сдв} + \sigma_p) + 300\gamma \right] \cdot 10^{-6},$$

где  $k_{с.о}$  – коэффициент структурного ослабления пород массива в направлении экскавации.

Для агрегатов, режущими органами которых являются зубья и резцы (врубковые машины, комбайны и т. д.), суммарное сопротивление резанию  $F_p$ , действующее на зуб, определяют с учетом удельных усилий резания  $a$  и коэффициента трения  $f_{тр}$  породы:

$$F_p = Hk_{фр}a(1 + k_3f_{тр}),$$

где  $H$  – глубина резания, м;  $k_{фр}$  – коэффициент формы поверхности угольного забоя, м;  $k_3$  – коэффициент зацепления зуба.

Параметры  $H$ ,  $k_{фр}$  и  $k_3$  характеризуют конструктивные и технологические особенности машины, параметры  $a$  и  $f_{тр}$  – свойства горной породы.

**Совершенствование методов отделения пород от массива.** Поскольку прочность пород при растяжении значительно меньше, чем при сжатии, целесообразно создавать механизмы, разрушающие породы за счет растягивающих напряжений. Разрабатываются, например, методы отрыва угля и пород от массива специальным рабочим органом – отрывником, введенным в заранее прорезанную в забое щель. Оптимальная толщина отрываемого слоя составляет 13–18 см. При таком способе разрушения углей достигаются большая кусковатость и малое пылеобразование при весьма низких энергозатратах.

Методы выемки пород совершенствуют наложением на исполнительные органы динамических усилий, упругих колебаний и т. д.

Разработаны **угольные комбайны динамического действия**, способные осуществлять откол от массива крепких каменных углей и антрацитов.

**Упругие колебания** инфразвуковой и звуковой частот используют в конструкциях породопогрузочных машин, имеющих вибрирующие лезвия. В результате рабочие усилия внедрения ковшей в рыхлую массу снижаются в 3–4 раза, а производительность машин увеличивается на 20 % и более. Применение вибрации в гребковом рабочем механизме увеличивает его производительность до 60 %.

## **Процессы вторичного механического дробления пород в забое**

Использование разнотипного оборудования для выемки, перемещения и дробления разрушенных пород накладывает определенные ограничения на максимальные линейные размеры кусков. Принято руководствоваться определенными зависимостями между характерными параметрами горного оборудования и максимально допустимыми линейными размерами кондиционных кусков.

Куски породы, имеющие размеры больше допустимых, называются **негабаритами** и подлежат измельчению (вторичному дроблению). Негабарит – понятие относительное, определяемое емкостью погрузочно-транспортного оборудования.

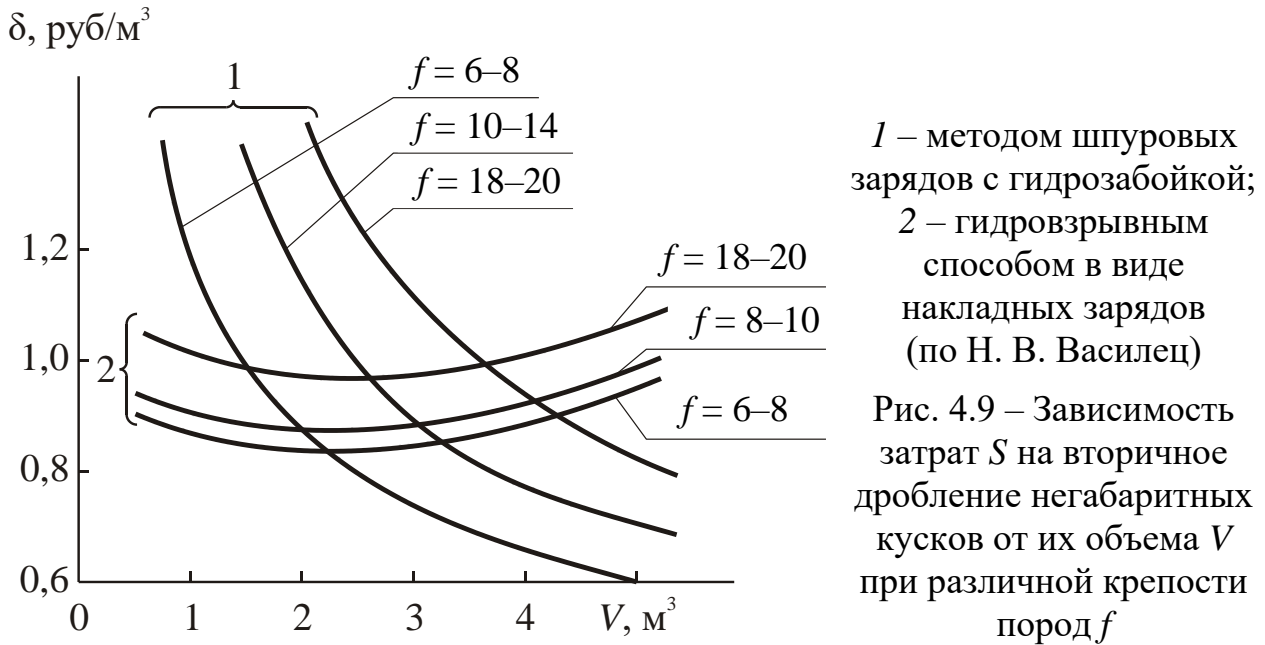
Вторичное дробление обычно осуществляют взрывным способом. В разрушаемом куске породы пробуривают шпур, закладывают заряд и производят взрывание. В таких случаях процесс разрушения по своей физической сущности мало чем отличается от ранее рассмотренного применительно к взрыванию массива.

С целью повышения производительности и снижения затрат на вторичное дробление иногда разбуривание не применяют, а используют накладные заряды. В этом случае требуется больший расход ВВ.

Для того чтобы повысить эффективность дробления накладными зарядами, используют гидравлический экран (пластиковую емкость, заполненную водой и покрывающую заряд), а также специальные кумулятивные патроны, позволяющие направить энергию в определенную точку породы и концентрировать ее в ней.

При применении шпурового метода дробления негабарита возможно существенно повысить эффективность взрыва, используя гидрозабойку – заполнение шпура водой, так как в этом случае на породу дополнительно динамически воздействует вода.

Затраты на вторичное дробление зависят от крепости пород, величины разрушаемого объема и метода разрушения (рис. 4.9).



### Процессы дробления и измельчения полезного ископаемого в дробилках и мельницах

Полезные ископаемые после извлечения из недр в большинстве случаев подвергаются дальнейшему дроблению и измельчению. Эта дополнительная обработка вызвана необходимостью либо получения конечного продукта определенного гранулометрического состава (например, строительных материалов), либо раскрытия и разделения минеральных сростков для последующего обогащения измельченной руды.

В зависимости от физико-технических характеристик пород применяют четыре основных способа дробления и измельчения: раздавливание, раскалывание, удар и истирание.

Для твердых и хрупких горных пород обычно используют раздавливание, пород средней крепости – раскалывание, слабых пород и углей – удар. Для твердых и вязких пород применяют раздавливание и истирание. В соответствии с этим созданы дробилки раздавливающего действия – щековые и конусные, раскалывающего действия – зубчатые, валковые и ударного действия – молотковые.

Энергоемкость процесса дробления зависит от степени измельчения пород.

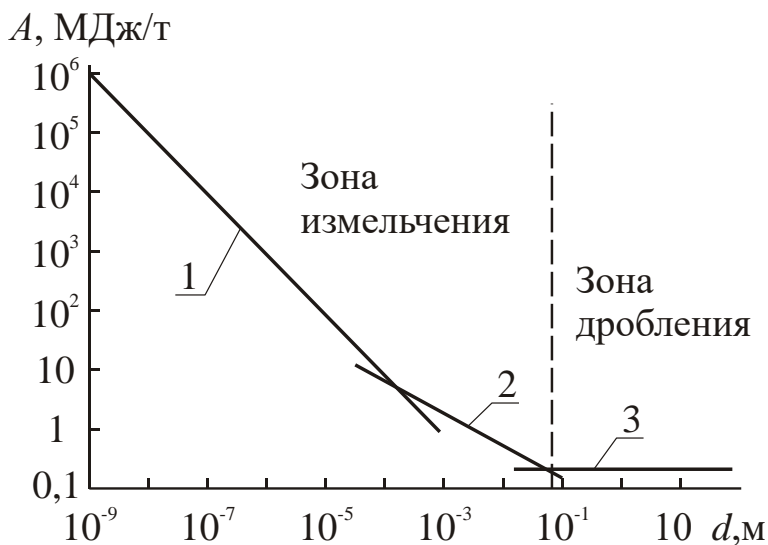
Кирпичевым (1874 г.) и Киком (1885 г.) предложена теория дробления, согласно которой энергоемкость дробления пропорцио-

нальна логарифму отношения диаметров исходных кусков  $D$  к диаметрам кусков конечного продукта  $d$ :

$$A_K = e_K V \lg \frac{D}{d},$$

где  $e_K$  – удельная работа дробления, равная работе, затраченной на единичный раскол единицы объема породы  $\left[ e_K = \frac{\sigma_p^2}{2E} \right]$ ;  $V$  – полный объем дробимой породы.

В соответствии с этой формулой влияние степени дробления на энергоемкость процесса незначительно (рис. 4.10). Это соответствует действительности только при крупном дроблении.



1 – по Риттингеру;  
2 – по Бонду;  
3 – по Кирпичеву – Кику

Рис. 4.10 – Области применения различных формул расчета энергоемкости процесса дробления и измельчения

Поэтому при мелком дроблении и измельчении используют теорию Риттингера (1867 г.), согласно которой работа дробления  $A_R$  прямо пропорциональна величине площади вновь образованной поверхности:

$$A_R = e_S \Delta s_{уд} V,$$

где  $e_S$  – удельная поверхностная энергия, работа, затрачиваемая на образование единицы площади новой поверхности, Дж/м<sup>2</sup>;  $\Delta s_{уд}$  – удельная площадь вновь образованной поверхности, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

Если принять, что исходные куски, как и конечные, имеют примерно форму шаров диаметрами  $D$  и  $d$ , то число шаров после измель-

чения каждого исходного шара  $n = \frac{D^3}{d^3}$ .

Отсюда

$$\Delta s_{\text{уд}} = 6(d^{-1} - D^{-1}).$$

Удельную поверхностную энергию можно рассчитать по формуле

$$e_S = \frac{A_0 V_0}{\Delta S_0},$$

где  $A_0$  – удельная работа единичного разрушения  $\left[ A_0 = \frac{\sigma_p^2}{2E} \right]$ ;  $V_0$  – объем разрушаемого куска (шара)  $\left( V_0 = \frac{\pi D^3}{6} \right)$ ;  $\Delta S_0$  – площадь вновь образованной поверхности после раскола шара. Отсюда

$$e_S = \frac{\sigma_p^2 D}{6E}.$$

Следовательно, по Риттингеру

$$A_R = \frac{\sigma_p^2 D k_{\text{пл}} (d^{-1} - D^{-1})}{E},$$

где  $k_{\text{пл}}$  – коэффициент пластичности породы;  $k_{\text{пл}} = \frac{2E}{E_{\text{деф}}} - 1$ .

По этой теории работа разрушения  $A_{R1}$  и  $A_{R2}$  возрастает примерно обратно пропорционально диаметрам зерен  $d_1$  и  $d_2$  конечного дробленого продукта:

$$\frac{A_{R1}}{A_{R2}} = \frac{d_2}{d_1}.$$

**Измельчение горных пород** осуществляется ударом и истиранием в барабанных мельницах. В зависимости от вида дробящей среды различают мельницы шаровые, стержневые, галечные и самоизмельчения.

Барабаны, в которых загружены дробящие элементы и измельчаемая порода, вращаются с определенной скоростью. Измельчение

происходит в результате перемешивания и соударения дробящих элементов и кусков породы.

Так как полезная мощность мельницы  $N = \frac{A_R}{t}$ , производительность мельницы

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{NEd}{\sigma_p^2 (D-d) k_{пл}},$$

где  $V$  – объем измельчаемой породы в течение времени  $t$ .

Примерные удельные расходы энергии на дробление медных и магнетитовых руд составляют около 180 МДж/м<sup>3</sup>, гематитовых и пиритовых руд – около 120–150 МДж/м<sup>3</sup>, угля – около 50–75 МДж/м<sup>3</sup>, кварца – 130 МДж/м<sup>3</sup>.

Удельная поверхностная энергия мрамора составляет 90–125 Дж/м<sup>2</sup>, диабаза – 250 Дж/м<sup>2</sup>.

**Совершенствование методов дробления и измельчения** ведется в направлении максимального использования особенностей пород, в частности изменения их прочностных характеристик от скорости воздействия нагрузки. Как известно, быстрое нагружение породы определяет более хрупкий характер ее разрушения, снижает величину пластических деформаций и энергоемкость разрушения. Поэтому в настоящее время ведутся исследования по применению ударных нагрузок для разрушения скальных горных пород. Так, расширяется область применения дезинтеграторов – машин для дробления хрупких материалов. Дезинтегратор состоит из двух вращающихся в противоположные стороны роторов, на диске которых расположены цилиндрические пальцы (бины), дробящие горную породу.

По принципу **самоизмельчения** работают **струйные мельницы**, в которых энергия частицам для соударения сообщается струей сжатого воздуха, перегретого пара или газа. Струйные мельницы используются для тонкого и сверхтонкого измельчения.

Измельчение магнетитового кварцита в воздушно- и пароструйных мельницах обеспечивает более полное раскрытие (выделение из вмещающей породы) рудных минералов по сравнению с шаровым помолотом. Воздействие высокотемпературной струи также способствует более полному раскрытию минералов и при этом, кроме того, может осуществляться одновременный обжиг руды (для дальнейшей магнитной сепарации).

Исследования показали, что у ряда руд (например, серных) способность раскрываться по контактам минеральных зерен увеличивается не с повышением, а с понижением температуры. Это явление может быть использовано в струйных мельницах, где в качестве струи служит сверхзвуковой поток охлажденного азота.

### **Процессы перемещения горных пород**

Эффективность транспортирования и производительность средств транспорта зависят не только от конструктивных параметров, но и от соответствия их свойствам перевозимых пород.

В большинстве случаев выбор способа перемещения пород осуществляется только сравнительными методами с учетом степени дробления, влажности, абразивности и плотности пород.

Средствами транспорта перемещают только измененные в процессах выемки и погрузки горные породы – разрушенные и разрыхленные. Эти породы характеризуются широким диапазоном свойств, по-разному влияющих на трудность их транспортирования. Целесообразно выделить и сопоставить характеристики пород, оказывающие основное влияние на трудность их перемещения.

В качестве основы сопоставления пород по сопротивляемости их перемещению применяется относительный **показатель трудности транспортирования породы**  $\Pi_T$ .

На выбор транспортных средств по степени использования их емкости и износостойкости основное влияние оказывают плотность, прочность и гранулометрический состав перемещаемой породы.

На трудность разгрузки породы, связанную с налипанием и примерзанием ее к рабочим поверхностям транспортных средств, решающее влияние оказывают содержание глинистых частиц и влажность породы.

Степень налипания и примерзания, а следовательно, выбор способов предотвращения этих явлений и очистки транспортных средств зависят от времени транспортирования породы и температуры воздуха.

При указанных предпосылках величина  $\Pi_T$  для условий открытых горных работ может быть определена из эмпирического выражения

$$\Pi_T = 6 \cdot 10^{-5} \gamma + 5d_{cp}A + 20\omega nBC,$$

где  $\gamma$  – удельный вес породы в образце, Н/м<sup>3</sup>;  $d_{\text{ср}}$  – средний размер куска породы в транспортном сосуде, м;  $A$ ,  $B$  и  $C$  – коэффициенты ( $A = 1 + \tau_{\text{сдв}} \cdot 10^7$ ;  $B = 1 + \lg(t - 1)$ ;  $C = 1 - 0,025T$ );  $\omega$  – влажность породы, доли единицы;  $n$  – содержание в породе глинистых частиц, доли единицы;  $t$  – продолжительность транспортирования породы, ч;  $T$  – температура воздуха, °С (учитывается только  $T < 0$  °С).

Все транспортируемые горные породы по величине  $\Pi_{\text{т}}$  подразделяются на пять классов, представленных в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Параметр транспортируемости горных пород

Класс	Наименование класса	Параметр транспортируемости $\Pi_{\text{т}}$
I	Весьма легкотранспортируемые	До 2
II	Легкотранспортируемые	2–4
III	Средней трудности транспортирования	4–6
IV	Труднотранспортируемые	6–8
V	Весьма труднотранспортируемые	8–10

Породы с  $\Pi_{\text{т}} > 10$  относятся к внекатегорным. Введение показателя  $\Pi_{\text{т}}$  позволяет упорядочить выбор вида транспорта и производить его технологические расчеты.

Производительность транспорта, как правило, рассчитывают с использованием следующих характеристик пород: объемной массы  $\rho$ , насыпной плотности  $\rho_{\text{н}}$ , угла естественного откоса  $\varphi_0$  и коэффициента трения породы  $f_{\text{тр}}$ .

Например, производительность транспортирования породы конвейером с плоской лентой рассчитывают по формуле

$$\Xi = 576B^2v\rho_{\text{н}}\text{tg}\frac{\varphi}{2},$$

где  $B^2$  и  $v$  – соответственно ширина и скорость движения конвейерной ленты.

Срок службы конвейерных лент зависит от гранулометрического состава транспортируемого материала. Для карбонатных пород установлена следующая зависимость между сроком службы  $t$ , тыс. ч, и средним размером кусков  $d$ , мм:

$$t = 8700d^{-1,33}.$$



При транспортировании пород существенную роль играет коэффициент разрыхления (рис. 4.11). Желательно иметь минимальное его значение. Уменьшения  $k_p$  можно добиться соответствующим подбором гранулометрического состава пород, сотрясением и т. д.

Более компактно частицы породы можно расположить, добавляя в нее углеводородные жидкости (керосин, изоамиловый спирт), обладающие смазочными свойствами и уменьшающие силы сцепления между частицами. Насыпная плотность угля в последнем случае увеличивается на 20 % (рис. 4.12).

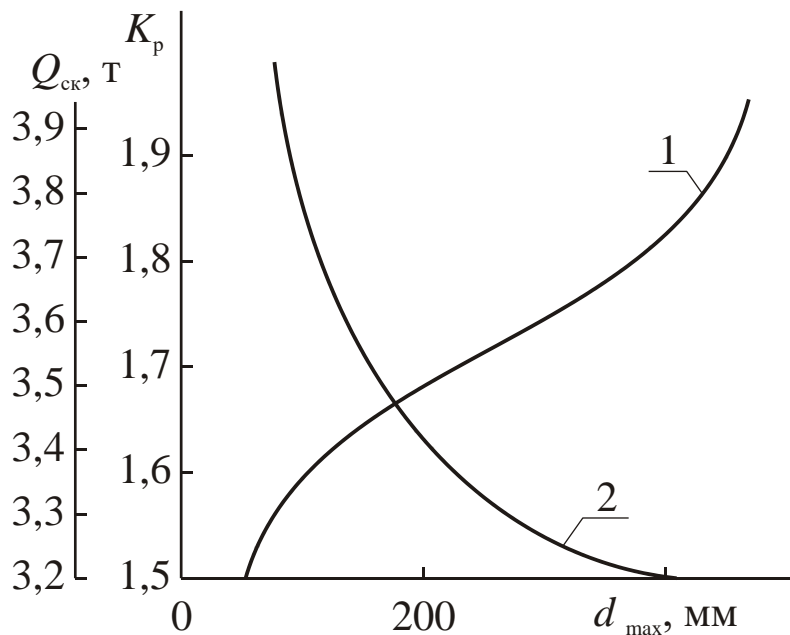


Рис. 4.11 – Зависимость коэффициента разрыхления  $k_p$  (1) и вместимости скипа  $Q_{\text{ск}}$  (2) емкостью 2 м<sup>3</sup> от крупности  $d_{\max}$  загруженной в скип железной руды

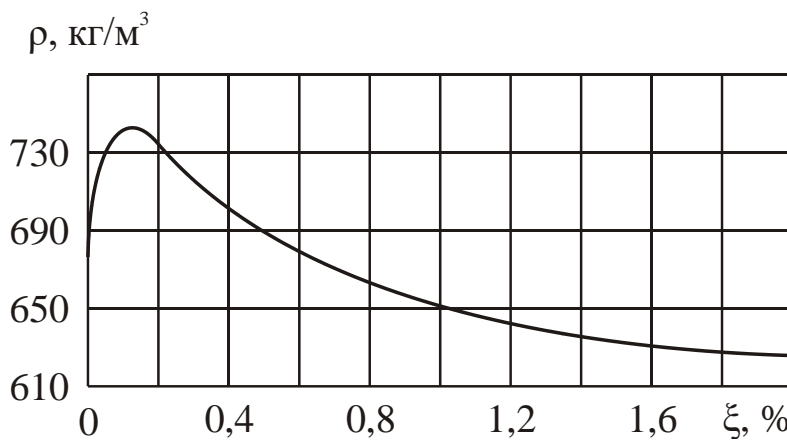


Рис. 4.12 – Влияние добавок керосина  $\xi$  на насыпную плотность  $\rho_n$  угля

Одним из факторов, значительно влияющих на величину насыпной плотности горных пород, является влажность. Так, насыпная плотность угля имеет минимальное значение при содержании влаги 6–7 %. При увеличении влаги в породе появляются силы, препятствующие более плотной укладке раздробленной смеси угля. Они возникают при полном насыщении всех точек контакта капиллярной водой. Вода в контактах стремится занять объем с минимальной свободной поверхностью, препятствуя более плотной укладке частиц.

Для снижения влажности уголь сушат или добавляют в него гигроскопические вещества, например, известь.

При гидротранспортировании особое внимание должно уделяться гранулометрическому составу, плотности и абразивности транспортируемых пород. От этих характеристик зависят диаметр трубопроводов, оптимальные скорости транспортирования, напоры и т. д. Так, при гидротранспортировании крупного гравия плотностью  $2,62 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  скорость потока должна быть в 2 раза больше, чем при гидротранспортировании угля ( $\rho = 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ), т. е. соответственно 3,05 и 1,53 м/с. Плотность пульпы  $\rho_{\Pi}$  определяют по формуле

$$\rho_{\Pi} = \frac{\rho_{\text{от}} (\rho_{\text{т}} + q_{\text{в}} \rho_{\text{в}})}{q_{\text{в}} \rho_{\text{от}} + \rho_{\text{т}}},$$

где  $\rho_{\text{от}}$ ,  $\rho_{\text{в}}$  – плотность соответственно породы и воды;  $\rho_{\text{т}}$  – объемная масса сухой породы в целике;  $q_{\text{в}}$  – удельный расход воды.

Способы доставки пород могут быть совершенствованы на основе более полного использования физических свойств транспортируемого материала.

Так, гидротранспорт можно совершенствовать путем использования жидкостей, имеющих большую плотность и низкую температуру замерзания. Транспортирование пород может осуществляться под действием электростатического или магнитного поля.

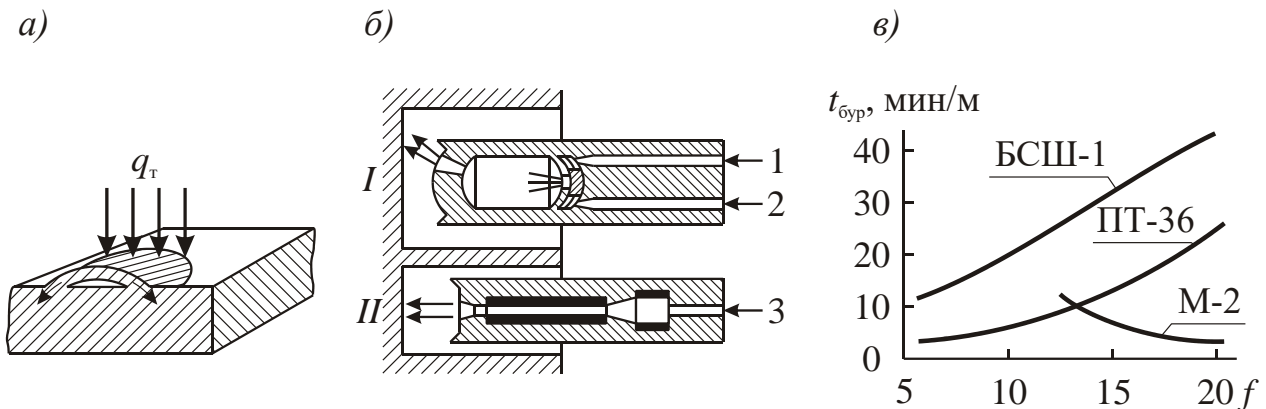
Развивается метод взрывной доставки руды в условиях подземной разработки месторождений. Установлено, что дальность падения кусков руды в данном методе зависит от ее плотности и прочности.

### 4.3 Немеханические и комбинированные способы разрушения пород

#### Термические способы бурения горных пород

В настоящее время из немеханических способов наиболее широко в практике используют термическое бурение. Оно осуществляется воздействием на породу высокотемпературной сверхзвуковой газовой струи, интенсивно разогревающей тонкий поверхностный слой породы, в котором возникают термические напряжения, приводящие к хрупкому отколу от поверхности мелких чешуек и частиц (рис. 4.13).

Так как эффективность термобурения в первую очередь определяется величиной возникающих в породе термонапряжений, которые тем больше, чем больше жесткость породы, т. е. модуль Юнга  $E$  (см. п. 2.3.4), при термобурении в отличие от механических способов бурения наблюдается увеличение скорости бурения с ростом крепости пород (рис. 4.13, в).



$a$  – схема отделения шелушки от породы под воздействием теплового потока  $q_t$ ;  $б$  – принципиальные схемы термических инструментов;  $I$  – бензовоздушная горелка;  $II$  – плазменная горелка;  $1$  и  $3$  – подача сжатого воздуха;  $2$  – подача бензина;  $в$  – зависимость времени бурения 1 м скважины от крепости  $f$  пород для станков механического бурения (БСШ-1 и ПТ-36) и термического бура (М-2)

Рис. 4.13 – К термическому бурению пород

Условием разрушения породы является равенство термических напряжений  $\sigma_t$  разрушающим  $\sigma_{pз}$ . Отсюда можно вычислить температуру разрушения  $T_p$ :

$$T_p = \frac{\sigma_{pz}(1 - 2\nu)}{\alpha E}. \quad (4.14)$$

Как видно из формулы (4.14), напряжения в породе достигают значения разрушающих при относительно невысоких температурах: 300–600 °С. Например, у кварца, микрокварцита, железистых кварцитов  $T_p = 400\text{--}450$  °С, у гранитогнейса  $T_p = 500\text{--}600$  °С. Но, чтобы процесс бурения шел быстро, необходимы высокие градиенты температур. Последние зависят не только от свойств породы, но и от интенсивности теплопередачи и, следовательно, от скорости истечения газовой струи и величины теплового потока. Чем больше градиент температур, тем больше термические напряжения, но меньше толщина откалываемых чешуек.

Интенсивные тепловые потоки создаются специальными газовыми горелками, в рабочей камере которых происходит перемешивание горючего и окислителя и бурное их сгорание (см. рис. 4.13, б).

В зависимости от типа окислителя в качестве горючего применяют либо керосин (окислитель – кислород), либо бензин (окислитель – воздух).

Горячие газы через сопло выбрасываются наружу и, ударяясь о породу, передают последней тепловую энергию.

Удельный тепловой поток  $q_T$  вычисляют по формуле

$$q_T = k_T (T_G - T_{\Pi}), \quad (4.15)$$

где  $k_T$  – коэффициент теплопередачи;  $T_G$ ,  $T_{\Pi}$  – температуры соответственно газов и поверхности пород.

В отечественных станках огневого бурения скорость газовой струи достигает 1600–2000 м/с, а удельные тепловые потоки  $q_T = (2 \cdot 10)$  МВт/м<sup>2</sup>, температура теплоносителя в среднем составляет 1600–2800 °С, при плазменном бурении – 5000 °С.

Отделение частиц породы от массива происходит в результате действия напряжений растяжения и сдвига.

Наиболее эффективно разрушаются породы, сложенные минералами с различными коэффициентами теплового расширения, имеющие жесткий, противодействующий расширению зерен цемент, небольшие коэффициенты теплопроводности и большие значения модуля упругости  $E$ .

Высокая теплопроводность пород и низкие градиенты температур отрицательно сказываются на эффективности термобурения.

Производительность бурения резко снижается в случае увеличения пластичности породы при нагреве ее и плавлении. На плавление затрачивается большое количество тепла, а шлак, получающийся в результате плавления, плохо удаляется из забоя и затрудняет бурение.

В мягких и рыхлых породах (группа строения 3) возникающие термические напряжения невелики. Железистые породы склонны к плавлению, легко прогреваются газовой струей на большие глубины, что приводит к снижению градиента температур и термических напряжений. Поэтому перечисленные породы трудно поддаются термическому разрушению.

В трещиноватых породах скорость бурения уменьшается до двух раз.

С целью выявления влияния комплекса физических свойств горных пород на скорость термического бурения  $v_b$  произведем следующий расчет.

Количество теплоты, поступающей в объем  $V$  породы,

$$Q = cm\Delta T = c\rho V\Delta T, \quad (4.16)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость;  $m$  – масса породы;  $\Delta T$  – температура нагрева породы; удельный тепловой поток

$$q_T = \frac{Q}{St}, \quad (4.17)$$

где  $S$  – нагреваемая площадь породы;  $t$  – время нагрева до создания разрушающих термических напряжений.

Используя уравнения (4.14)–(4.17) и приравняв  $\Delta T = T_p$ , можно написать

$$v_b = \frac{v}{St} = \frac{q\alpha E}{c\rho\sigma_p(1-2\nu)} = \Pi_{Tb} q_T, \quad (4.18)$$

где  $\Pi_{Tb}$  – комплексный параметр, показывающий влияние свойств пород на их термобурируемость (критерий термобурируемости):

$$\Pi_{Tb} = \frac{\alpha E}{c\rho\sigma_p(1-2\nu)}. \quad (4.19)$$

Величина  $\Pi_{Tb}$  соответствует объему идеально упругой породы, разрушаемой при воздействии на нее 1 Дж теплоты. Чем меньше значение  $\Pi_{Tb}$ , тем труднее порода поддается термическому разрушению.

Для пород критерий  $\Pi_{тб}$  может иметь значения от  $10^{-8}$  до  $10^{-7}$  м<sup>3</sup>/Дж. Так, хорошо термобуриемые микрокварциты и железистые кварциты имеют  $\Pi_{тб}$  в пределах  $10^{-7}$ – $3 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/Дж. Плохо термобуриемые породы (габбро, перидотиты, пироксениты) имеют  $\Pi_{тб} < 2 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/Дж.

Уравнение (4.18) не может быть непосредственно использовано для конкретных расчетов скорости термобурения, так как в нем не учитываются конструктивные особенности горелки, градиенты температур в слоях породы, изменения упругих и прочностных свойств при нагреве и т. д.

Для практических расчетов используют эмпирические связи между комплексным показателем  $\Pi_{тб}$  и скоростью термобурения пород  $v_б$ . Например, по А. П. Дмитриеву,

$$v_б = A\Pi_{тб} - B.$$

При бурении скважин малогабаритным воздушно-огнеструйным термобуром коэффициенты  $A$  и  $B$  равны соответственно  $5 \cdot 10^8$  и 3,2 (если  $v_б$  выражается в сантиметрах в минуту).

Как показывает опыт, термическому бурению хорошо поддаются породы, в состав которых входит кварц, обладающий высоким параметром  $\Pi_{тб}$ , высокой температурой плавления и не теряющий своей хрупкости с повышением температуры.

Производительность станков термического бурения значительно более высокая, чем механического, в том числе шарошечного. Так, среднесменная производительность станка огневого бурения по бакальским кварцитам составляет 90 м, по железистым кварцитам ЮГОКа – 16–18 м, по железистым кварцитам Оленегорска – 9–10 м.

На карьерах работают бензовоздушные станки СБТМ-20, СБО-5, кислородно-керосиновые СБО-1Б, СБО-160/20. Стоимость проходки 1 м скважины составляет от 4,5 до 8,7 руб. или на 1 м<sup>3</sup> горной массы – от 0,1 до 0,18 руб. (рис. 4.14).

Термобуры используют не только для бурения взрывных скважин, но и для обработки поверхности пород, резания их, дробления негабарита и т. д.

Станки огневого бурения хорошо зарекомендовали себя при разработке мерзлых грунтов на горных предприятиях Воркуты, Казахстана, Донецкой области. Скорость бурения буровым станком ТБА-1 по мерзлым глинам составляет 19 м/ч, мерзлым пескам – 70 м/ч, суглинкам – 4–12 м/ч.

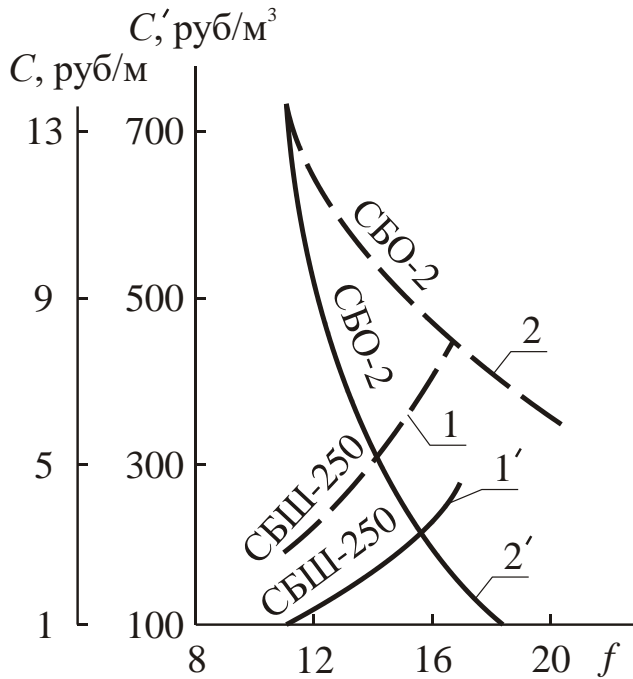


Рис. 4.14 – Сравнительная оценка затрат  $C$  (1 и 2) на бурение 1 м скважины и приведенных затрат  $C$  (1' и 2') на 1 м³ выбуренного объема станком шарошечного бурения (СБО-2) и огневого бурения (СБО-2)

Дальнейшее совершенствование термического бурения ведется в направлениях:

- совершенствования **конструкции газовой горелки**;
- использования **электродуговых** или **плазменных горелок** (см. рис. 4.13, б).

Высокотемпературная струя ионизированных газов в плазменных бурах образуется при пропускании сжатого воздуха через мощный электродуговой разряд.

Плазменные буры не требуют горючего или окислителя, позволяют плавно регулировать температуру газовой струи в пределах 500–8000 °С. Последнее особенно существенно, так как исследованиями установлено, что многие горные породы наиболее эффективно разрушаются лишь в определенном температурном интервале;

- использования **знакопеременных температурных полей**. Сущность этого метода заключается в том, что забой скважины поочередно обрабатывают потоками горячего и охлажденного газа или жидкого азота. Породы при охлаждении становятся более хрупкими. Это позволяет разрушать породы, не буримые обычными газовыми горелками;

- использования при бурении **явления детонации**. Для возникновения эффекта детонационного горения необходимо, чтобы сверхзвуковая струя имела избыток одной из химических компонент. При детонационном горении возникают мощные детонационные и ударные волны, которые дополнительно разрушают породу;

➤ совместного применения термического и механического воздействия (**комбинированных методов**).

### **Термические способы разрушения негабарита**

Наиболее известный термический способ разрушения негабарита – это раскалывание кусков пород нагревом любым источником тепла (например, термитом), располагаемым на поверхности или в углублении (в шпуре).

Хорошие результаты получены при разрушении роговиков, джеспилитов, кварцитов.

Метод создания разрушающих напряжений в куске горной породы нагреванием его электрической дугой опробован на песчанике, мраморе и гранит-порфирах как в лабораторных условиях, так и в карьерах. Под действием тепла электрической дуги порода раскалывается через несколько минут. Расход энергии при этом сравнительно небольшой.

Если источник тепла расположен на поверхности куска породы, то расчет энергоемкости такого процесса разрушения сводится к задаче нагрева некоторого полубесконечного твердого тела источником тепла постоянной мощности.

Решение дифференциального уравнения теплопроводности для таких условий дает следующую формулу для определения температуры породы в любой точке:

$$\frac{T_d - T_s}{T_0 - T_s} = \Phi\left(\frac{d}{2\sqrt{at}}\right),$$

где  $T_d$  – температура в точке, удаленной на расстояние  $d$  от поверхности нагрева;  $T_s$  – температура поверхности породы в процессе нагрева;  $T_0$  – первоначальная температура породы;  $\Phi$  – функция интеграла вероятностей;  $a$  – температуропроводность породы;  $t$  – время нагрева породы.

Если в двух точках, удаленных от поверхности на различных расстояниях  $d_1$  и  $d_2$ , порода нагревается до одной и той же температуры, то

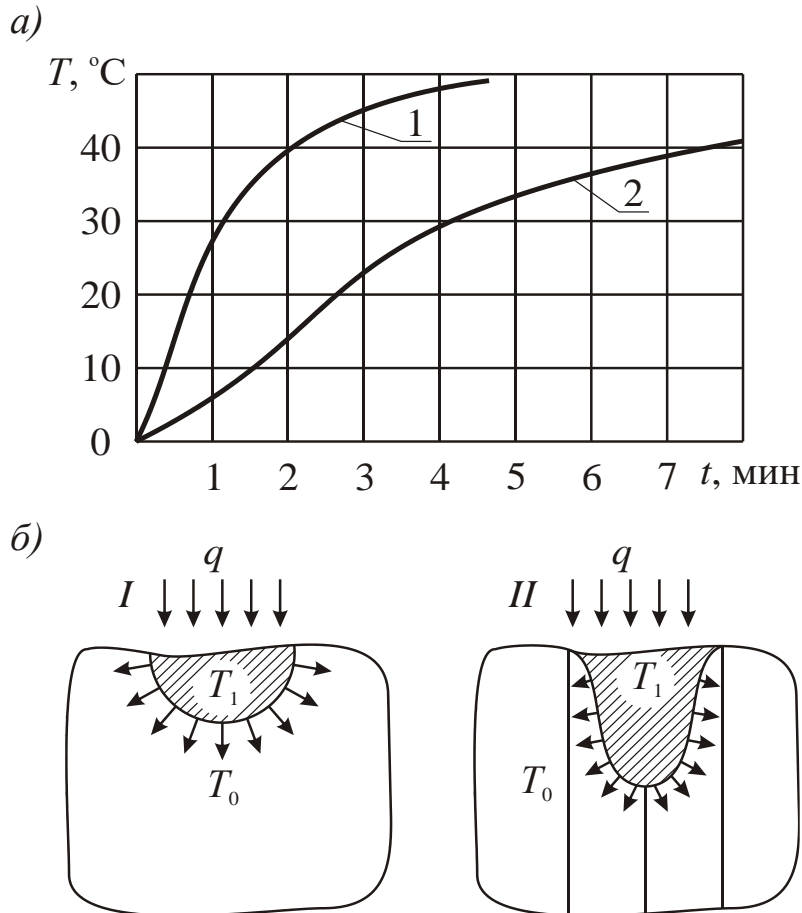
$$\frac{d_1}{2\sqrt{at_1}} = \frac{d_2}{2\sqrt{at_2}}.$$



Отсюда отношение времени нагрева этих точек

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}. \quad (4.20)$$

Таким образом, время, необходимое для нагрева какой-то точки до определенной температуры, прямо пропорционально квадрату ее расстояния от нагреваемой поверхности (рис. 4.15).



а – типичные кривые изменения температуры в зависимости от времени нагрева на глубине 1 см (I) и 2 см (2); б – форма рабочего тела при нагреве массивной (I) и слоистой (II) пород;  $q$  – тепловой поток;  $T_0$  и  $T_1$  – исходная и конечная температура нагрева породы

Рис. 4.15 – К процессу нагрева пород с поверхности

Из уравнения (4.20) следует также, что время нагрева породы обратно пропорционально ее температуропроводности, а поскольку с глубиной резко возрастает время нагрева породы, тепло, поглощаемое породой, скапливается в основном в некотором ее объеме (рабочем теле), размеры которого определяются временем нагрева и температуропроводностью породы.

Если представить, что тепловые свойства породы во всех направлениях одинаковы, то форма рабочего тела будет близка к полусфере (см. рис. 4.15, б). Расширение этого тела приводит к расколу породы. Очевидно, чем больше относительные размеры этого тела и чем оно ближе к клиновидному, тем легче произойдет разрушение породы. Поэтому при разрушении негабарита высокая температуропроводность и слоистость породы, направленная вдоль требуемой плоскости раскола, играют положительную роль.

### Комбинированное термомеханическое бурение пород

Как известно, удельная работа термического разрушения пород  $A_T$  складывается из работы  $A_0$ , потраченной на собственно механическое разрушение, и работы  $T_{ф.т}$ , потерянной за счет термических преобразований в породе:

$$A_T = A_0 + T_{ф.т} = \frac{\sigma_{сж} c_p (1 - 2\nu) \left[ \frac{2E}{E_{деф}} - 1 \right]}{\alpha E}. \quad (4.21)$$

Из уравнения (4.21) видно, что при термическом разрушении существуют дополнительные по сравнению с механическим разрушением потери энергии, обусловленные коэффициентом преобразования тепла в механические напряжения

$$\eta_T = \frac{A_{п}}{A_T} = \frac{\sigma_{сж} \alpha}{2 c_p (1 - 2\nu)} \approx 0,2 \div 0,01,$$

где  $A_{п}$  – удельная работа механического разрушения породы. Чем больше параметры  $\sigma_{сж}$ ,  $E$  и  $\alpha$  пород, тем больше коэффициент преобразования энергии в механическую.

Следовательно, формальное сравнение работ разрушения пород указывает на меньшую энергоемкость механического способа. Фактически же часто выгоднее производить разрушение пород немеханическими (термическими, электротермическими и др.) способами. Это обусловлено следующими факторами:

- разрушение пород механическими способами возможно только весьма прочными износостойкими внедряющимися в породу рабочими органами при приложении к ним больших усилий;
- механическое разрушение связано с преобладанием сил сжатия в отличие от немеханических способов, при которых в процессе

разрушения, как правило, основную роль играют растягивающие напряжения;

➤ энергоемкость разрушения пород механическими способами прямо пропорциональна квадрату их прочности, в то время как при немеханических методах прочность может вообще не влиять на величину работы разрушения.

Практика и эксперименты показывают, что механическое разрушение эффективно только при удельной работе разрушения не более  $10 \text{ МДж/м}^3$ , термическое – до  $500 \text{ МДж/м}^3$ .

Таким образом, для достижения минимальной энергоемкости процесса разрушения пород наиболее перспективно использование комбинированных методов, при которых физическим воздействием не разрушают породу, а снижают ее прочность до величины, позволяющей осуществить эффективное механическое разрушение.

**Термомеханическое бурение** осуществляют либо совмещением обычного механического бурения с нагревом, либо воздействием на породу потоком твердых частиц наряду с тепловым потоком.

При этом на термические напряжения накладываются механические, способствующие более быстрому разрушению породы.

В первом случае тепловой поток создается, как обычно, с помощью газовой или плазменной горелки. Механическое воздействие осуществляют шарошками.

На подобном принципе работают станки СБШО-250, СБШ-250К. Прирост скорости бурения по сравнению с обычным термическим в породах крепостью  $f = 15\text{--}16$  составляет 30 %. Скорость бурения достигает 32 м/ч.

МГИ совместно с институтом Гипромашобогатение разработаны термогидробуры (ТГБ-2), где в качестве теплоносителя используется воздушно-водяная смесь, нагревающая породу в забое скважины до  $300^\circ\text{C}$ . Одновременно с этим осуществляется механическое бурение шарошками.

Применение потока твердых частиц, образующих с горячими газами двухфазную среду, также повышает производительность бурения. В качестве твердых частиц используют либо мелкие частицы самой разрушенной породы, либо стальную дробь, засыпанную в скважину. Твердые частицы, ударяясь о нагретую породу, производят окончательное ее разрушение. Производительность бурения возрастает на 40 %. На таком принципе работает термобур ТВР-46, созданный в МГИ.

## Электромагнитные способы разрушения горных пород

Электромагнитные способы разрушения горных пород подразделяются на электродинамические и электромагнитотермические.

**Электродинамические (ЭД)** способы основаны на осуществлении электрического пробоя. Электромагнитотермические (ЭМ), в свою очередь, подразделяются на электротермические (ЭТ) способы, основанные на электротепловом пробое (ЭТП) и на разогреве пород электромагнитными полями без осуществления пробоя (ЭТН), магнитные, инфракрасные и оптические.

При ЭД способах разрушения пробой производят либо **непосредственно по горной породе**, либо по **жидкости над поверхностью** разрушаемой породы.

В первом случае разрушение происходит непосредственно за счет динамического действия электрического разряда в породе, приводящего к ее растрескиванию и разрыву по линии канала пробоя.

Электрический пробой по породе используют для раскалывания негабарита, отбойки от массива, бурения скважин. Однако для его осуществления требуются высокие напряжения импульсного электрического поля.

Уменьшение электрической прочности  $E_n$  наблюдается с увеличением влажности, пористости пород, с возрастанием давления на них. Эти закономерности позволяют управлять процессом ЭД разрушения.

Положительным качеством электрического разрушения является его быстроедействие – практически мгновенный пробой и разрушение при достижении пробивного напряжения. Время осуществления пробоя от  $10^{-5}$  до  $10^{-6}$  с. Разрушение наиболее эффективно в хрупких горных породах. ЭД способ разрушения горных пород был использован Московским горным институтом (Ю. И. Протасов, Н. И. Андриенко) при строительстве Рогунской ГЭС. Выходное напряжение при этом было около 120 кВ, энергоемкость разрушения пород составила  $1,5 \text{ МДж/м}^3$ , производительность отбойки пород от массива – около  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Коэффициент полезного действия ЭД способа разрушения равен 60–70 %.

Разрушение пород пробоем по жидкости связано с так называемым **электрогидравлическим эффектом (ЭГЭ)**. В данном случае величина пробивного напряжения зависит от  $E_n$  жидкости, в которой проходит разряд.

За счет разряда в жидкости возникает мощная ударная волна, воздействующая на расположенную вблизи горную породу и разрушающая ее. Кроме того, в канале разряда образуется кавитационная полость, которая, захлопываясь, значительно усиливает разрушающее действие разряда.

Электрогидравлическое разрушение пород может быть использовано для бурения горных пород, разрушения негабарита, дробления и измельчения полезных ископаемых. Однако достигнутые в настоящее время КПД разрушения данным способом все еще весьма низки (несколько процентов).

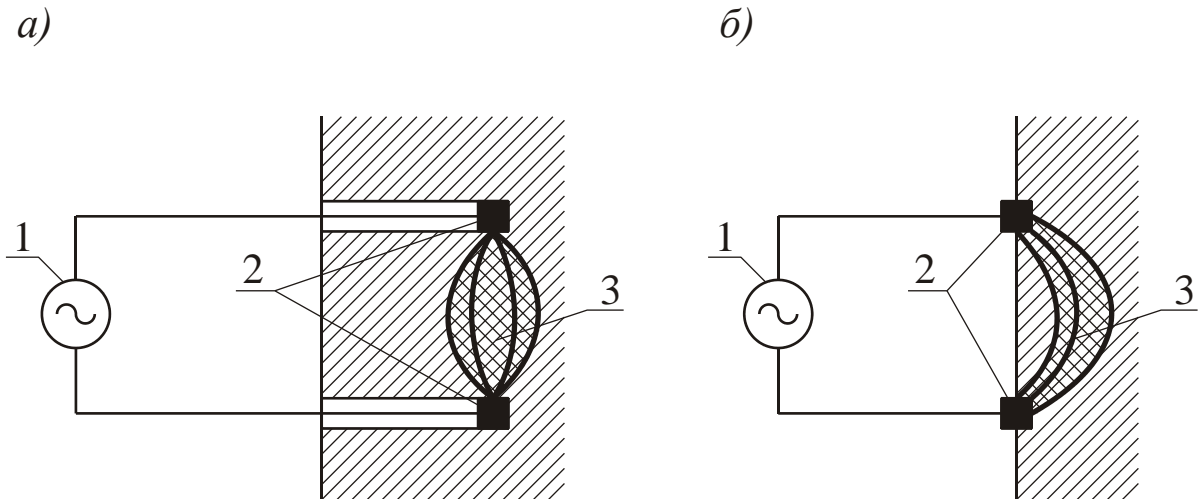
**Электротермические методы** разрушения пород пробоем (ЭТП) подразделяются по частоте применяемого электромагнитного поля на низкочастотные (частота поля до 1 МГц) и высокочастотные (частота поля от 1 до 300 МГц).

Основной предпосылкой применения **низкочастотных методов** (НЧ) является относительно высокая первоначальная проводимость тока пород. Горная порода разогревается под действием электрического поля, в ней образуется канал пробоя. Разрушение наступает либо непосредственно сразу после теплового пробоя, либо после дополнительного прогрева породы за счет усиленного выделения тепла в канале пробоя и возникновения разрушающих термических напряжений.

Повышение частоты электромагнитного поля, как правило, приводит к повышению электрической проводимости породы и более быстрому ее разогреву. Поэтому для разрушения пород, имеющих высокие значения электрического сопротивления, применяют **высокочастотные методы** (ВЧ). Как НЧ, так и ВЧ методы осуществляют приложением к породе электродов, по которым к ней подводится электромагнитная энергия, поэтому они называются **контактными способами**.

В зависимости от формы электродов и их взаимного расположения в породе возникает электрическое поле определенной конфигурации. Таким образом, можно создать направленное электрическое поле или концентрировать его на определенных участках породы.

Если доступ к разрушаемой породе возможен только с одной стороны, электроды располагают на одной поверхности породы. При этом разрушение менее эффективно, чем при расположении электродов с противоположных сторон (рис. 4.16).



1 – генератор электрического тока различной частоты; 2 – электроды;  
3 – нагретый током объем породы, вызывающий разрушающие напряжения (рабочее тело)

Рис. 4.16 – Разрушение горных пород электротермическим высокочастотным контактным методом при расположении электродов с противоположных сторон разрушаемой породы (а) и с одной стороны ее (б)

Методы ЭТН подразделяются на **методы постоянного тока** (или промышленной частоты) и **сверхвысокочастотные (СВЧ) методы**.

В методах постоянного тока осуществляют контактный подвод электрического тока (постоянного или частотой 50 Гц) к породам, обладающим значительной проводимостью. За счет выделения в породе тепла происходит постепенный разогрев определенного ее участка, возникают и нарастают термические напряжения, которые при достижении критических значений разрушают породу.

В СВЧ методах для разогрева породы используется электромагнитная энергия частотой свыше 300 МГц, направляемая на породу посредством специальных излучателей.

Радиоволна проникает в горную породу на глубину  $h_{эм}$  (см. п. 3.1.4) и поглощается в ее объеме. За счет этого порода разогревается, в ней появляются термические напряжения, приводящие к разрушению. Изменяя частоту радиоволн, можно менять глубину проникновения и, следовательно, концентрацию электромагнитной энергии.

ЭТ разрушение, несмотря на эффект разрушения горной породы тепловым полем, отличается от термического. Как известно, при термическом разрушении тепловой поток воздействует непо-

средственно на поверхность горной породы, и поэтому происходит ее поверхностное шелушение.

В результате же воздействия электромагнитного поля порода прогревается на значительную глубину, которая зависит от частоты поля и электрических свойств породы. Эффективность процесса разрушения увеличивается, а энергоемкость снижается, поскольку разрушение породы происходит в большей мере от растягивающих напряжений.

Основным условием разрушения пород является их способность нагреваться в электрическом поле, которая может быть оценена некоторым параметром  $b$ , равным энергии электрического поля, необходимой для нагрева  $1 \text{ м}^3$  данной породы на  $1^\circ\text{C}$ :

$$b = \frac{c\rho}{\varepsilon_r \text{tg}\delta}.$$

Параметр  $b$  называется **показателем сопротивляемости пород высокочастотному нагреву**. Чем меньше  $b$ , тем эффективнее нагрев породы.

Другим условием, как и при термическом разрушении, является способность пород превращать накопленную тепловую энергию в механическую. Эта способность, как указывалось ранее, оценивается параметром  $\alpha E$ .

В случае нагрева породы по сквозному каналу растягивающие напряжения в ненагретой части породы

$$\sigma_p = \frac{\alpha \Delta T E_{\text{пр}}}{1 - 2\nu}, \quad (4.22)$$

где  $E_{\text{пр}} = \frac{E_n E_0 S}{(1 - S)E_0 + E_n S}$  – приведенный модуль Юнга с учетом модулей Юнга нагретого  $E_n$  и ненагретого  $E_0$  объема породы;  $S$  – относительная площадь сечения канала нагрева. Так как требуемая мощность  $W$  для нагрева единичного объема породы на температуру  $\Delta T$

$$W = \frac{\Delta T c \rho}{t},$$

учитывая формулу (4.21),

$$W = \frac{\eta \sigma_p c \rho (1 - 2\nu)}{\alpha E_{\text{пр}} t},$$

где  $\eta$  – коэффициент, учитывающий потери мощности;  $t$  – время нагрева породы, с.

Так как при прохождении высокочастотного тока количество выделяющейся в единице объема породы теплоты прямо пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока, можно составить уравнение энергетического баланса:

$$55,5 \varepsilon_r f E_3^2 \text{tg} \delta \cdot 10^{-12} = \frac{\eta \sigma_p c \rho (1 - 2\nu)}{\alpha E_{\text{пр}} t}. \quad (4.23)$$

Уравнение (4.23) представляет собой условие электротермического разрушения пород токами высокой и сверхвысокой частоты.

Критерий, объединяющий физические свойства пород и обуславливающий эффективность их разрушения электротермическим способом,

$$\Pi_{\text{эт}} = \frac{\alpha E_{\text{пр}} \varepsilon_r \text{tg} \delta}{c \rho \sigma_p (1 - 2\nu)}$$

или

$$\Pi_{\text{эт}} = \Pi_{\text{тб}} \varepsilon_r \text{tg} \delta,$$

где  $\Pi_{\text{тб}}$  – критерий термобурируемости [см. уравнение (4.19)].

Чем больше значение  $\Pi_{\text{эт}}$ , тем легче разрушаются породы при электротермическом способе. Эксперименты показывают, что разрушению легко поддаются породы, у которых  $\Pi_{\text{эт}} \geq 5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Дж}$ .

Электротермическим способом, как и термическим, плохо разрушаются породы пористые и разлагающиеся при высоких температурах, например известняки (уменьшается  $\alpha E_{\text{пр}}$  и, следовательно,  $\Pi_{\text{эт}}$ ).

В области высоких частот с повышением влажности сильно увеличивается теплоемкость и теплопроводность пород, а диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_r$  и  $\text{tg} \delta$  практически не меняются, поэтому увлажнение пород снижает критерий  $\Pi_{\text{эт}}$ .

Повышение температуры вызывает рост  $\varepsilon_r$ ,  $\text{tg} \delta$  и  $\alpha$  пород и, следовательно, улучшает эффективность их разрушения.



Удельная работа разрушения пород при ЭТ воздействии

$$A_3 = A_0 + A_{\text{ф.э}} = \frac{c\rho\sigma_{\text{сж}}(1-2\nu)k_{\text{пр}}}{\alpha E_{\text{пр}}\varepsilon_r \text{tg}\delta},$$

где  $A_{\text{ф.э}}$  – потери энергии при электротермическом разрушении породы.

Соответственно, коэффициент преобразования электрической энергии в механические напряжения

$$\eta_3 = \frac{A_{\text{п}}}{A_0 + A_{\text{ф.э}}} = \frac{\sigma_{\text{сж}}\alpha\varepsilon_r \text{tg}\delta}{2c\rho(1-2\nu)}.$$

Сравнение  $\eta_3$  с механическим методом, как и при термическом разрушении, показывает, что  $\eta_3 \ll 1$ .

$$\sigma_{\text{сж}} < \frac{c\rho(1-2\nu)}{\alpha\varepsilon_r \text{tg}\delta}.$$

Однако при осуществлении выбора между механическим или ЭТ разрушением горных пород только этого сравнения недостаточно.

ЭТ способы обладают целым рядом преимуществ. Это, во-первых, практически полное отсутствие зависимости производительности разрушения от прочности пород. Во-вторых, разрушение породы происходит под действием динамических усилий растяжения, которые возникают при выделении электрической энергии в канале пробоя. В-третьих, рабочим органом, разрушающим породу, является электрический разряд в твердом теле.

Энергоемкость разрушения крепких пород часто бывает меньше, чем слабых. Так, на ЭТ разрушение (отделение от забоя) 1 т роговиков ( $\sigma_{\text{сж}} = 200$  МПа) затрачивалось 40 МДж энергии, а на отделение 1 т песчаника ( $\sigma_{\text{сж}} = 110$  МПа) – 100 МДж.

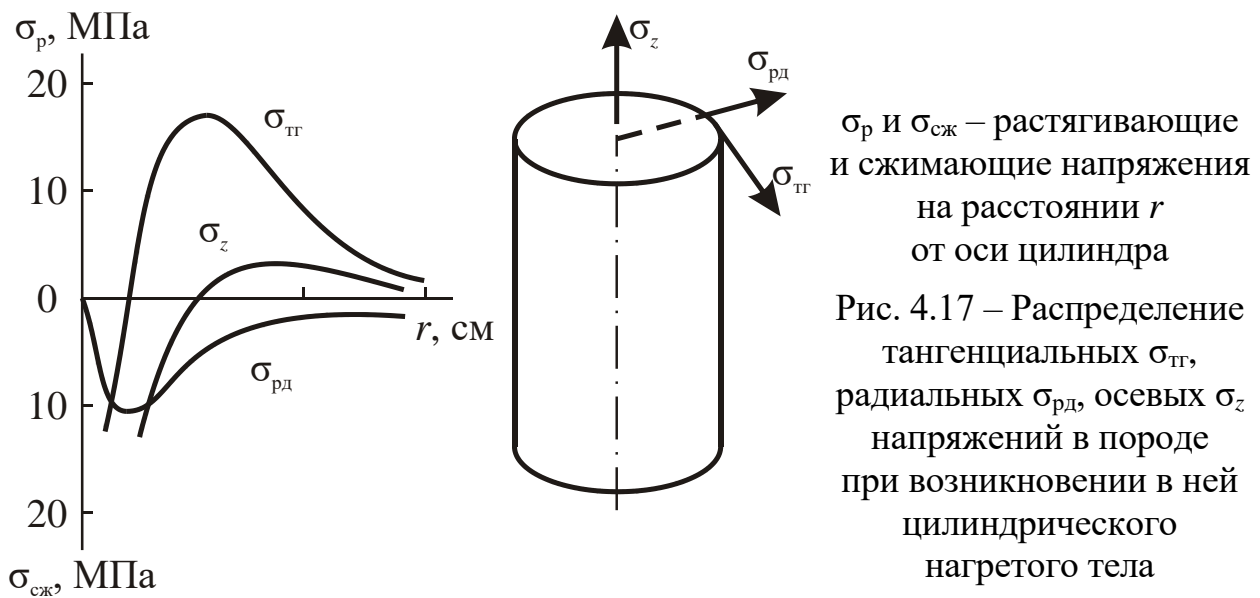
Электротермическим методом разрушают негабариты горных пород, осуществляют откол пород от массива, разрушают мерзлые горные породы.

Разработаны соответствующие установки для ЭТ дробления негабаритов на карьерах. Разрушение железистых кварцитов и хорошо проводящих пород можно осуществлять на частотах 50–500 КГц, время разрушения при этом составляет около 5 мин, энергоемкость – 0,4–1 МДж/м<sup>3</sup>. Для разрушения плохо проводящих горных пород

используют установки ВЧ диапазона. Так, в ИГД им. А. А. Скочинского разработана экспериментальная установка «Электра», способная эффективно разрушать граниты, гнейсы и тому подобные породы. Рекомендовано применять электромагнитное поле частотой 5,7–13,6 МГц и напряжением 5–12 кВ.

Такая передвижная установка мощностью 150 кВт в условиях открытых горных работ позволяет разрушать 25–40 м<sup>3</sup> негабарита в час.

При нагреве куска породы по оси в нем возникают тангенциальные, радиальные и осевые напряжения, которые с увеличением расстояния  $r$  от оси нагрева меняют как свою величину, так и знак, при этом радиальные напряжения всегда сжимающие, тангенциальные – сначала сжимающие, затем растягивающие (рис. 4.17). Разрушение наступает в момент, когда соответствующие напряжения начинают превышать предельные.



Радиус разогретого объема горной породы (рабочего тела)  $R$  со временем  $t$  увеличивается за счет теплопроводности породы по следующему закону:

$$R = r_0 + 3,6 \sqrt{\frac{\lambda t}{c\rho}},$$

где  $r_0$  – радиус исходного нагретого объема породы (в частности, канала пробоя).

Мощность, необходимая для ЭТ разрушения куска горной породы объемом  $V$ ,

$$N = \frac{62\sigma_p \lambda \sqrt{\frac{(1-\nu) V k_{\text{пл}}}{R}}}{\alpha E \ln R},$$

где  $k_{\text{пл}}$  – коэффициент пластичности.

Энергоемкость  $q$  разрушения породы подсчитывается по формуле

$$N = \frac{62\sigma_p \lambda \sqrt{\frac{(1-\nu) k_{\text{пл}} t^{\frac{3}{2}}}{3,6\alpha^2 V}}}{\alpha E \ln 2R}.$$

**Магнитные способы разрушения** пород основаны на их разогреве высокочастотными магнитными полями. Как известно, хорошо проводящие породы и породы-ферромагнетики достаточно хорошо разогреваются в переменных магнитных полях.

Эксперименты показали, что воздействие на породу, имеющую  $\mu = 3$  и  $\rho_s = 10^4$  Ом · м, магнитным полем частотой 0,2 МГц и напряженностью около  $7 \cdot 10^4$  А/м в течение 2 мин приводит к ее растрескиванию. Глубина эффективного прогрева составляет 6–8 см.

**Инфракрасные способы** разрушения основаны на передаче в горную породу электромагнитной энергии инфракрасного диапазона ( $10^{13}$ – $10^{14}$  Гц), излучаемой специальными инфракрасными нагревателями. Нагрев и разрушение породы при этом происходит так же, как и в СВЧ методе.

Этот способ более универсален, так как в инфракрасном диапазоне электрические свойства пород мало отличаются друг от друга (в пределах 20 %).

**Оптическое разрушение** основано на использовании когерентного (лазерного) излучения для концентрации электромагнитных волн оптического диапазона в горной породе, ее нагрева и разрушения.

Так как при этом в узком пучке выделяется большое количество энергии, в зоне ее концентрации порода плавится. Процесс плавления весьма энергоемкий (плавление 1 м<sup>3</sup> породы требует 360 ГДж энергии), поэтому лазерным лучом целесообразно лишь образование

щелей и нарезание блоков в массиве породы. Тогда энергоемкость может быть снижена до 360 МДж/м<sup>3</sup>, что сравнимо с энергоемкостью механического разрушения пород.

### **Комбинированные электротермомеханические способы разрушения пород**

Электротермические способы, подобно термическим, основаны на разрушении пород термонапряжениями, приводящими к растрескиванию пород. В то же время возникновение любой трещины приводит к резкому спаду термических напряжений. Поэтому для отделения кусков породы от массива целесообразно использовать дополнительное механическое воздействие на забой. С этой целью созданы электротермомеханические машины, сочетающие в себе электротермическое и механическое воздействие. Электромагнитное поле, действуя на породу, подготавливает ее к разрушению, которое происходит под воздействием механических нагрузок.

В настоящее время получают развитие **высокочастотные контактные, сверхвысокочастотные и инфракрасные электротермомеханические (ЭТМ) методы разрушения пород.**

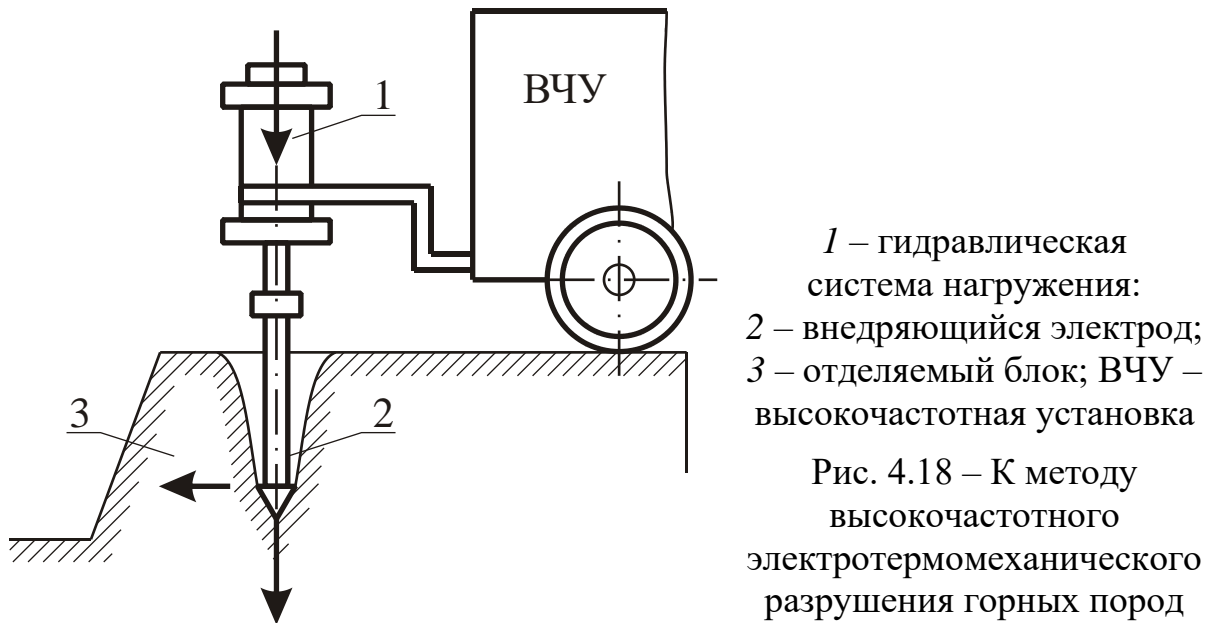
ВЧ ЭТМ методы основаны на использовании электродов, подводящих электромагнитную энергию к породе в качестве механического породоразрушающего инструмента. Механическое воздействие электродов на породу может быть как статическим (давление), так и динамическим.

Примером статического воздействия на породу служит так называемый метод **внедряющегося электрода.**

Данный метод заключается в том, что высокопотенциальный электрод, действуя на породу ВЧ электрическим полем, расплавляет ее в месте контакта и углубляется в нее под действием механических усилий. Вместе с электродом происходит углубление зоны наибольшего разогрева породы. Это позволяет откалывать куски породы от массива за счет растягивающих напряжений.

Метод внедряющегося электрода целесообразно использовать для разрушения мерзлых пород. К электроду, который одновременно представляет собой режущий орган, подводится электрический ток высокой частоты (0,5–2 МГц). За счет выделения тепла происходит оттаивание мерзлой породы вокруг электрода и создается талая область, в которую внедряется электрод под действием механических

усилий. В результате происходит отделение откалываемого блока от мерзлого массива (рис. 4.18).



Скорость внедрения  $v_{\text{вн}}$  электрода в мерзлый массив прямо пропорциональна фактору потерь горных пород  $\varepsilon_r \text{tg} \delta$  и обратно пропорциональна  $\sigma_{\text{сж}}^2$ :

$$v_{\text{вн}} = \frac{k_{\text{ф.э}} \varepsilon_0 \varepsilon_r \text{tg} \delta f U^2 F}{\sigma_{\text{сж}}^2 d^2 a},$$

где  $k_{\text{ф.э}}$  – некоторый коэффициент, учитывающий форму электродов и изменения свойств пород при нагреве;  $U$  – напряжение электрического поля, В;  $F$  – механическое усилие внедрения электрода, Н;  $a, d$  – соответственно половина ширины и толщины электрода, м.

Затраты на рыхление мерзлых пород электротермомеханическим способом в 2 раза ниже, чем буровзрывным.

В ЛГИ на этом принципе создан ВЧ ЭТМ ручной инструмент для разрушения искусственно замороженных пород при проходке подземных выработок мощностью 1,6 кВт, работающий на частоте около 40 МГц.

Установка внедряющегося электрода также весьма эффективна при дроблении кусков скальных пород (негабаритов).

Установлено, что методом внедряющегося электрода хорошо разрушаются различные скальные породы, монзониты, эпидозит, сиениты, гранодиориты, кварц-полевошпатовые порфиры и сульфидные руды.

Породы, которые трудно плавятся (безрудные и жильные кварциты), откалываются только по поверхности. Породы, разлагающиеся при высоких температурах (известняки, мрамор), разрушаются медленно. Внутри них образуется канал из продуктов разложения, в котором невозможно создать большие термические напряжения.

**СВЧ ЭТМ метод** в настоящее время применяется в основном для разрушения мерзлых пород при проходке выработок.

СВЧ метод основан на передаче к нагреваемому массиву электромагнитной энергии частотой  $f = 2000\text{--}3000$  МГц. Эта энергия проникает на глубину  $h_{\text{эм}}$ , обусловленную физическими свойствами пород. С повышением температуры  $h_{\text{эм}}$  уменьшается. Так, при повышении температуры от  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$   $h_{\text{эм}}$  уменьшается в 2–2,5 раза.

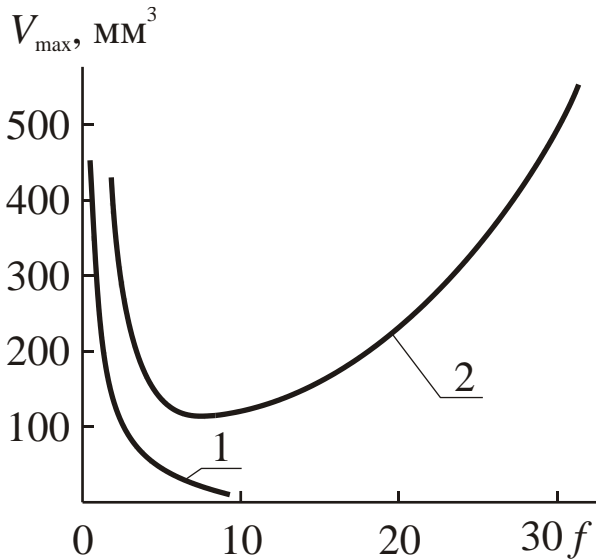
В объеме породы на глубину  $h_{\text{эм}}$  происходит ее нагрев, плавление льда и разупрочнение. Затем разупрочненный объем механическим способом отделяется от массива и извлекается.

Механические воздействия могут быть осуществлены совмещенным рабочим органом. Этот принцип, например, использован в ЭТМ землеройной машине – бульдозере, где рупоры-излучатели СВЧ энергии расположены непосредственно на рабочем органе – отвале. Используют также разнесенные в пространстве излучатели и рабочие органы. При этом предварительно воздействуют СВЧ полем, затем механическим инструментом.

Сущность **ЭТМ метода инфракрасного нагрева (ИН)** заключается в нагреве забоя инфракрасными нагревателями и последующем механическом разрушении ослабшего из-за появления интенсивной трещиноватости слоя.

ЭТМ ИН метод можно применять как в процессах проходки подземных горных выработок (горизонтальных, вертикальных, наклонных), так и при очистной выемке в подземных условиях и на карьерах.

Сравнение экспериментальных объемов отбитой породы при ударе в случае чисто механического разрушения и после ЭТМ воздействия в зависимости от крепости пород (рис. 4.19) наглядно показывает эффективность ЭТМ ИН метода.



1 – при механическом  
разрушении; 2 – при ЭТМ  
разрушении

Рис. 4.19 – Зависимость объема  
 $V$  отбитой породы  
от ее крепости  $f$

Известно, что механический способ разрушения целесообразно применять в породах с коэффициентом крепости  $f < 6$ . Комбинированный способ значительно расширяет границы применимости безвзрывного разрушения горных пород. При этом в качестве механического воздействующего органа в пластичных породах наиболее применим резец, в прочных скальных породах – ударный механизм.

ЭТМ ИН метод эффективен при модуле Юнга пород  $E > 5 \cdot 10^{11}$  Па и объемном коэффициенте теплового расширения  $\gamma_T > 10^{-5} K^{-1}$ .

Так как при ЭТМ ИН разрушение складывается из механических и термических усилий, приложенных к породе, весь этот процесс зависит от комплекса тепловых и механических свойств пород.

В Московском горном институте проф. Ю. И. Протасовым разработан ЭТМ проходческий комбайн «Ясиноватец-2ЭТМ» с роторным исполнительным органом. Нагревательные элементы нагревают и разупрочняют поверхностный слой породы, а шарошки ее разрушают и отделяют от забоя. Отбитая порода отгружается ковшами на конвейер с защитным пылеподавляющим кожухом. Выработку диаметром 3,6 м в породах с коэффициентом крепости  $f > 10$  этот комбайн проходит со скоростью 1–1,25 м/ч. На исполнительном органе комбайна установлено свыше 30 генераторов ИК излучения общей мощностью 420 кВт и 15 трехлезвийных дисковых шарошек. Для сравнения отметим, что скорость проходки выработки в таких породах только механическим или ЭТ способом составляет всего лишь 0,2 м/ч.

Скорость проходки восстающих выработок ЭТМ способом в апатит-нефелиновых породах с коэффициентом крепости  $f = 8-10$  составляет в смену около 2,5 м при энергоемкости 450 МДж/м<sup>3</sup>.

**Предварительная электромагнитная обработка** полезных ископаемых перед измельчением в мельницах позволяет существенно повысить эффективность их измельчения.

Так, по данным исследований МГИ, при облучении минералов и пород электромагнитным полем частотой 25 МГц и напряженностью 100–300 кВ/м величина затрачиваемой на их дробление работы существенно уменьшается: у магнетита в 2 раза, сфалерита и фосфоритовой руды – в 1,3–1,7 раза.

Так как изменение прочностных и упругих характеристик различных минералов под действием высокочастотного электромагнитного поля неодинаково, это обстоятельство может существенно улучшить эффект раскрытия минеральных зерен при дроблении, а значит, и повысить качество последующего обогащения.

Перспективно сочетание не только механического и электро-термического воздействия на породы, но и другие сочетания, например: электродинамического и механического, электродинамического и электротермического, высокочастотных вибраций и электрогидравлического удара и др.

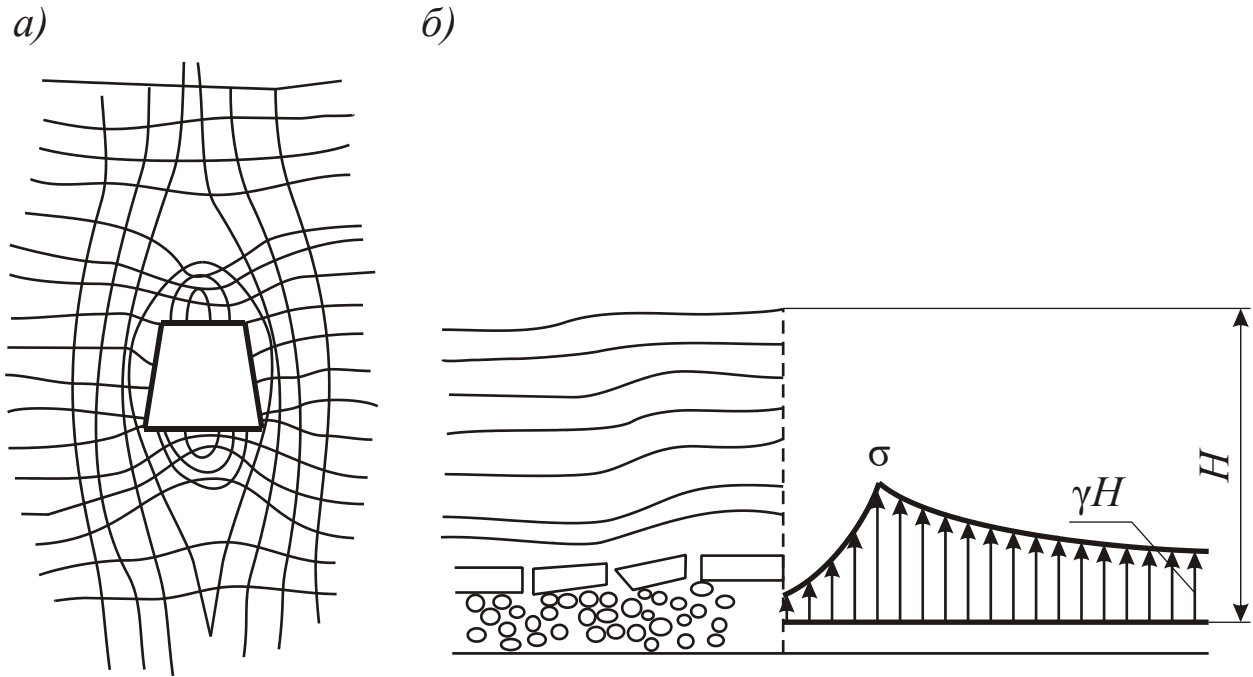
Так, при совместном ЭД и ЭТ воздействии на породы энергоемкость разрушения песчаника снижается до весьма малых значений – 0,36 МДж/м<sup>3</sup> (тепловой пробой – при 30 кВ, ЭД пробой – при 120 кВ), а производительность возрастает в 5 раз по сравнению только с ЭТ или ЭД разрушением.

#### **4.4 Управление горным давлением и тепловым режимом в шахте**

##### **Поддержание подземных горных выработок**

Горное давление при ведении горных работ проявляется в виде повышенной концентрации нагрузок на некотором расстоянии от забоя (рис. 4.20) и, как следствие, в виде деформации и отжима породы в призабойной зоне, прогиба, расслоения, растрескивания и разрушения кровли.





$a$  – изменение главных напряжений в выработке (по И. А. Турчанинову);  
 $b$  – разрушение пород на контуре очистной выработки  
 и эпюр напряжений  $\sigma$  в зоне опорного давления;  
 $H$  – глубина залегания выработки;  
 $\gamma H$  – горное давление в нетронутом массиве

Рис. 4.20 – Проявления горного давления в выработках

Мгновенное высвобождение потенциальной энергии упругой деформации приводит к горным ударам.

Проведение мероприятий, исключающих опасное проявление горного давления, снижающих или регулирующих напряженное и нарушенное состояние массивов пород во времени, называется управлением горным давлением.

В зависимости от типа выработок методы управления горным давлением различны. К ним относятся крепление выработок, оставление целиков, закладка выработанного пространства, управляемое обрушение кровли в выработанном пространстве и др.

Так как при проведении горных выработок нарушается равновесное состояние пород и образуется новое поле напряжений, возникает задача расчета этих напряжений. Величина и характер распределения в массиве нового поля напряжений существенно зависят от состояния массива пород и могут быть различными в зависимости от того, являются ли породы сплошной однородной упругой средой, или средой, состоящей из плит (балок) различной толщины

и прочности, или дезинтегрированной средой, характеризуемой только трением и зацеплением между частицами.

В сплошной однородной среде, подчиняющейся законам теории упругости, новое напряженное состояние зависит от напряжений, имевших место в ненарушенном массиве.

Так, для выработки круглого сечения распределение радиальных  $\sigma_{рд}$  и тангенциальных  $\sigma_{тг}$  напряжений может быть вычислено по следующим формулам (рис. 4.21):

$$\sigma_{рд} = \left[ 1 - \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \right] \left[ 0,5(\sigma_3 + \sigma_1) - 0,5(\sigma_3 - \sigma_1) \left( 1 - \frac{3 \cos 2\theta r_0^2}{r^2} \right) \right]; \quad (4.24)$$

$$\sigma_{тг} = 0,5(\sigma_3 + \sigma_1) \left( 1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) + 0,5(\sigma_3 - \sigma_1) \left( 1 + \frac{3r_0^4}{r^4} \right) \cos 2\theta, \quad (4.25)$$

где  $r_0$  – радиус сечения выработки;  $r, \theta$  – текущие полярные координаты;  $\sigma_3$  и  $\sigma_1$  – компоненты тензора напряжений в нетронутом массиве.

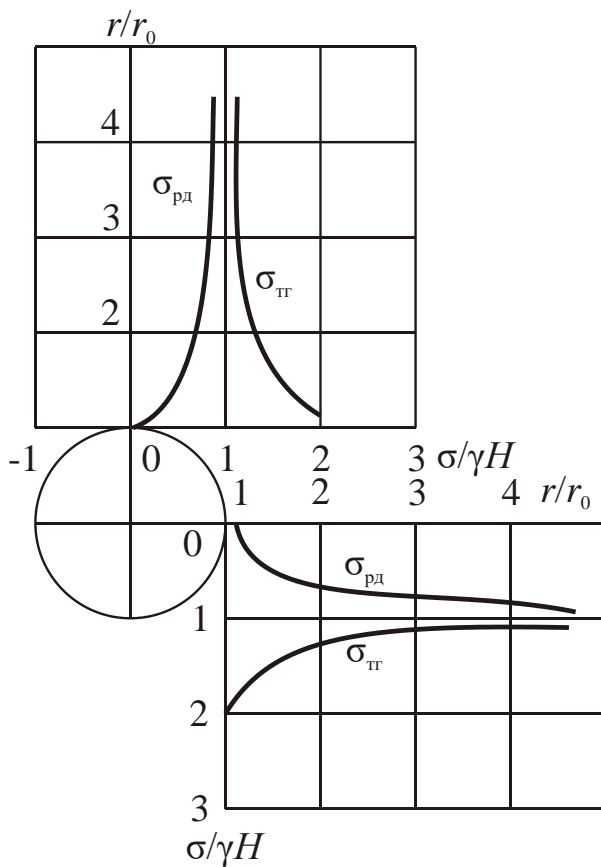


Рис. 4.21 – Эпюры радиальных  $\sigma_{рд}$  и тангенциальных (окружных)  $\sigma_{тг}$  напряжений вокруг горизонтальной выработки круглой формы

Отсюда, если  $\sigma_3 = \sigma_1$  (что встречается в условиях однородных скальных пород), то все напряжения будут сжимающими:

$$\sigma_{рд} = \sigma_0 \left[ 1 - \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \right]$$

и

$$\sigma_{тг} = \sigma_0 \left[ 1 + \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \right],$$

где  $\sigma_0$  – первоначальные напряжения в массиве;  $\sigma_0 = \gamma H$  – для горизонтальных выработок круглого сечения;  $\sigma_0 = \nu \gamma H (1 - \nu)$  – для вертикальных.

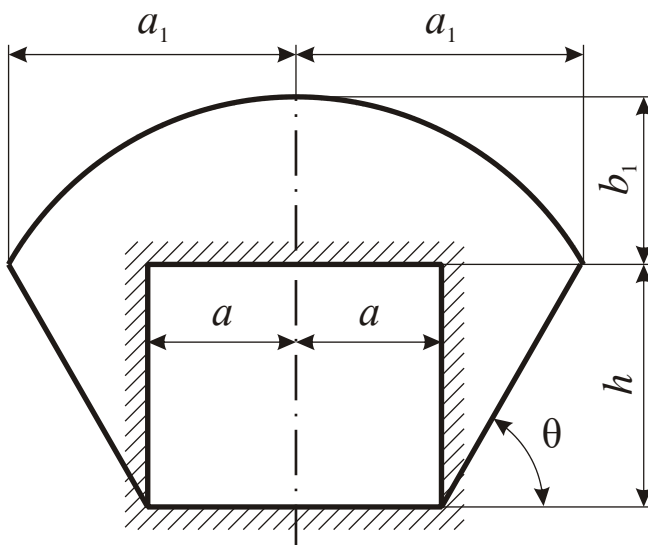
Выработка считается устойчивой, если

$$\sigma_{тг \max} = \frac{\nu \gamma H}{1 - \nu} \leq \sigma'_{сж},$$

где  $\sigma'_{сж}$  – предел прочности породы при двухосном сжатии.

Если в уравнениях (4.24) и (4.25)  $\sigma_1 > \sigma_3$ , то в кровле возникают растягивающие напряжения, а в стенках выработки – сжимающие.

Если выработка проводится в сыпучей среде, то в этом случае на кровлю выработки давит лишь часть породы, оконтуренная так называемым сводом давления (рис. 4.22), в объеме которого порода отделяется от всего массива и при отсутствии крепи обрушается.



$2a$  – ширина выработки;  
 $2a_1$  – ширина свода обрушения;  
 $b_1$  – высота свода обрушения;  
 $\theta$  – угол сдвига пород  
 под действием  
 свода обрушения

Рис. 4.22 – Элементы свода давления (обрушения)

Тогда нагрузка на каждый метр длины кровли горизонтальной выработки

$$F = 2ab\gamma,$$

где  $2a$  – ширина выработки;  $b$  – полная высота свода обрушения (давления).

Высота свода обрушения для рыхлых пород, коэффициент крепости которых  $f < 1$ , может быть определена по формуле

$$b = \frac{a + h \operatorname{ctg} \left( 45^\circ + \frac{\beta}{2} \right)}{f},$$

где  $h$  – высота выработки;  $\beta$  – угол внутреннего сопротивления;  $\beta = \arctg f$ . При  $f = 0$   $b \rightarrow \infty$ , при  $f = 1$  высота свода обрушения равна  $a$  (половине ширины выработки).

Выработки, пройденные в слабых породах, крепят деревянной, металлической, бетонной крепью. Выбор вида крепи определяется степенью устойчивости вмещающих пород. Прочность элементов крепи должна быть больше значения  $k\gamma H$ , где  $k$  – коэффициент концентрации напряжений, равный 2–2,5.

В устойчивых скальных породах выработки оставляют без крепления.

Очистное пространство на время разработки какого-либо участка поддерживают от обрушения либо крепью, либо оставлением целиков определенной формы и размеров (ленточных – при длине целика  $l$ , значительно большей ширины  $b$ , и столбовых – при  $l \approx b$ ).

При проектировании схем поддержания горных выработок и управления горным давлением вычисляют:

- максимальные размеры возможного незакрепленного пространства выработок;
- характер возможного распределения напряжений с целью учета наиболее опасных зон их концентрации;
- конструктивные параметры крепи;
- размеры целиков.

Предельная длина  $L_{\text{пр}}$  устойчивой в незакрепленном состоянии горизонтальной выработки, по В. Д. Слесареву, зависит от предела прочности пород при растяжении  $\sigma_p$  и их объемного веса  $\gamma$  следующим образом:

$$L_{\text{пр}} = 2\sqrt{\frac{\sigma_p H}{\gamma}}. \quad (4.26)$$

В массивах пород блочной структуры следует учитывать горизонтальные размеры заклинившихся элементарных блоков  $d$ . В этом случае предельная длина устойчивой выработки, по С. В. Ветрову, будет значительно меньше:

$$L_{\text{пр}} = 2d \frac{\sigma_{\text{сж}} H}{\gamma} - 1.$$

Расчет размеров целиков производят также на основе прочностных свойств пород. Так, по методу Л. Д. Шевякова нагрузка, приходящаяся на целик

$$F = S\gamma_{\text{ср}}H,$$

где  $S$  – площадь выработанного пространства, приходящаяся на целик;  $\gamma_{\text{ср}}$  – средний объемный вес пород по всей мощности  $H$  налегающих слоев (или свода давления).

Условие устойчивости целика определяется соотношением

$$s\sigma_{\text{сж}} \geq (SH\gamma_{\text{ср}} + sh_0\gamma_{\text{ц}})n,$$

где  $\sigma_{\text{сж}}$  – предел прочности целика при сжатии;  $s$  – площадь поперечного сечения целика;  $h_0$  – высота целика;  $\gamma_{\text{ц}}$  – объемный вес пород целика;  $n$  – коэффициент запаса прочности ( $n = 2-3$ ).

Отсюда

$$\frac{s}{S} = \frac{H\gamma_{\text{ср}}}{\frac{\sigma_{\text{сж}}}{n}} - h_0\gamma_{\text{ц}}.$$

С целью приближения расчетов к реальному состоянию массива пород учитывают однородность пород целика по прочностным свойствам, их трещиноватость, а также угол падения залежи  $\alpha$  и соотношение ширины  $a$  и высоты  $h_0$  целика:

$$s = \frac{H\gamma_{\text{ср}}S \cos \alpha \sqrt{\frac{h_0}{a}}}{\left( \frac{\sigma_{\text{сж}}}{n} - h_0\gamma_{\text{ц}} \right) k_{\text{м}}},$$

где  $k_m$  – коэффициент однородности рудного массива,  
 $k_m = k_{тр} \left( 1 - \frac{3s_n}{\sigma_{сж}} \right)$ ;  $s_n$  – среднее квадратичное отклонение предела

прочности пород при сжатии, характеризующее однородность пород;  
 $k_{тр}$  – коэффициент трещиноватости рудного массива.

Во всех расчетах, кроме выбора правильных исходных уравнений, соответствующих данному состоянию массива, необходимо использование достоверных значений прочности  $\sigma_{сж}$  и  $\sigma_p$  массива пород. При этом, в первую очередь, надо учитывать строение массива, в частности наличие слабых прослоек.

Так, приведенный предел прочности целика со слабыми прожилками  $\sigma_{пр}$  значительно ниже однородной породы, слагающей целик, и может быть рассчитан по формуле, предложенной В. Г. Безкаравайным

$$\sigma_{пр} = \left( \frac{\sigma_{сл}}{\sigma_0} \right) \sqrt{\frac{m}{h_0}} \sigma_0 \left[ 1 - \left( \frac{0,165 k_{сл} \sqrt{\frac{2h}{h_0}}}{k_{сл.ср}} \right) \right],$$

где  $\sigma_{сл}$  – прочность слабого прослойка;  $h_0$  – высота целика;  $m$  – мощность прослойка;  $h$  – удаление прослойка от середины целика;  $k_{сл}$ ,  $k_{сл.ср}$  – коэффициенты снижения прочности при положении прослойка сверху или снизу и посередине соответственно.

В расчетах устойчивости подземных горных выработок следует применять прочностные параметры пород, определенные при длительных нагружениях. Известно, что срок службы шахтных стволов составляет  $(3,5-4,5) \cdot 10^5$  ч, капитальных выработок (квершлагов, штреков) –  $(0,8-1,0) \cdot 10^5$  ч, откаточных штреков –  $2 \cdot 10^4$  ч и т. д. Все это время выработки должны находиться в устойчивом состоянии.

Породы в кровле и стенках выработки во времени проходят следующие стадии деформирования: упругую деформацию сразу после проходки, пластическую деформацию (ползучесть), разрывные деформации, уплотнение под крепью; породы в почве выработки, – соответственно, упругую деформацию и релаксацию напряжений.

В связи с этим проф. А. А. Борисовым предложено рассчитывать предельную длину незакрепленной горизонтальной выработки

с учетом коэффициента ползучести пород  $k_{пз}$ . Тогда формула (4.26) приобретает следующий вид:

$$L_{пр} = k_{пз} \sqrt{\frac{0,04\sigma_{сж}H}{n\gamma}},$$

где  $k_{пз} = 0,5-0,7$ ;  $n$  – запас прочности ( $n \approx 4$ ).

Естественно, что чем больше запас прочности, тем устойчивее будут выработки. Однако неоправданное завышение запасов прочности приводит к весьма большим потерям полезного ископаемого в целиках (до 60 % на калийных рудниках). Поэтому большое значение имеет повышение надежности и достоверности расчетов горного давления и параметров целика.

В результате разработки месторождения происходит обрушение или оседание пород над выработанным пространством, которое может достигнуть поверхности земли (сдвигание пород) (рис. 4.23). Площадь поверхности, захватываемая сдвижением, зависит от величины углов сдвижения  $\delta$ .

Процесс сдвижения обусловлен геологическими факторами и геометрическими размерами рудных тел, тектоническими и гидрогеологическими явлениями, системой разработки, прочностными свойствами массивов и их трещиноватостью.

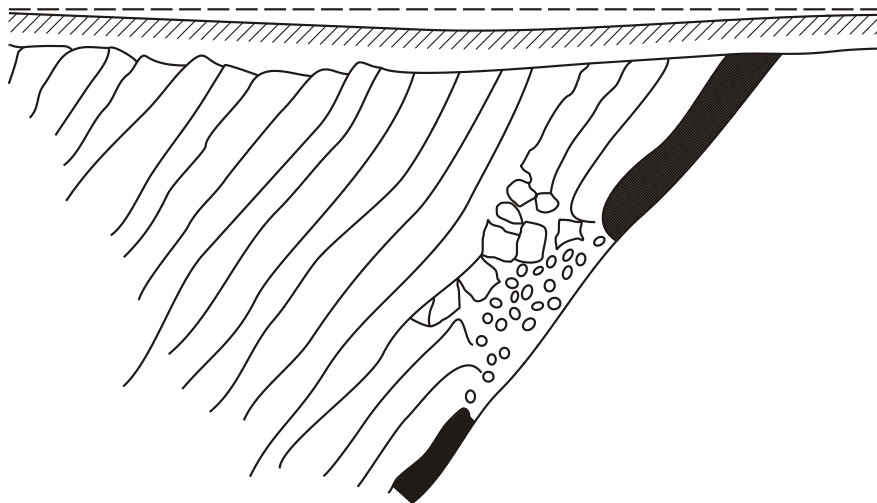


Рис. 4.23 – Сдвигание пород при разработке крутого пласта

Аналитический учет всех указанных факторов практически невозможен. Установлены лишь отдельные эмпирические зависимости. Так, обнаружено, что угол сдвижения  $\delta$  зависит от коэффициента крепости горных пород.

Для месторождений, сложенных слоистыми породами,

$$\delta = 55 + 1,5f - 0,45\alpha,$$

где  $\alpha$  – угол падения пород.

Устойчивость вмещающих горных пород и руд не только оказывает существенное влияние на выбор метода управления горным давлением, но и предопределяет вообще выбор той или иной системы разработки месторождения.

Так, если в устойчивых рудах и вмещающих породах применимы практически все системы разработки, то в неустойчивых вмещающих породах предпочтительны системы с отбойкой из магазинов, этажно-камерная, с магазинированием и т. д., а в неустойчивых рудах – системы с обрушением руды и пород, с креплением и последующим обрушением вмещающих пород и др.

### **Устойчивость бортов карьеров и отвалов**

Устойчивость уступов и бортов карьеров обеспечивается правильным выбором углов откоса и высоты бортов и уступов. При этом важнейшими факторами, обуславливающими значения конечных величин расчета, являются нарушенность массива и их трещиноватость.

Теоретически в ненарушенном массиве высота вертикального уступа может быть очень большой  $\left( H = \frac{\sigma_{сж}}{\gamma} \right)$ .

Фактически допустимая величина уступа может оказаться весьма малой из-за трещиноватости, наличия грунтовых вод и воздействия технологических процессов, в первую очередь взрывных работ.

Предельную высоту вертикального откоса  $h$ , по Г. Л. Фисенко, рассчитывают следующим образом:

$$h = \frac{2C \operatorname{ctg} \left( 90 - \frac{\varphi}{2} \right)}{\gamma},$$

где  $C$  – сцепление;  $\varphi$  – угол внутреннего трения пород.

Если в массиве существуют плоскости ослабления, направленные в сторону выемки под углом  $\beta > \varphi$ , то



$$h = \frac{C_{\text{тр}} \cos \varphi_{\text{тр}}}{\alpha \cos \beta \sin(\beta - \varphi_{\text{тр}}) \gamma},$$

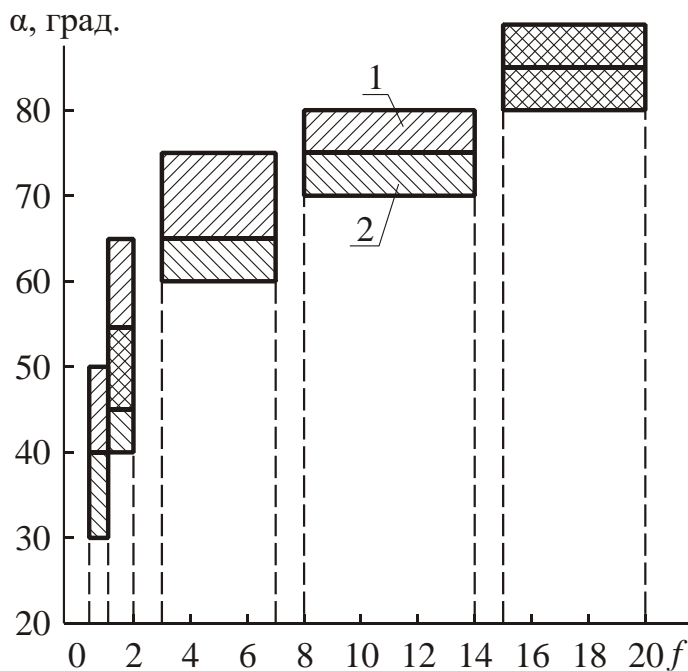
где  $\varphi_{\text{тр}}$  и  $C_{\text{тр}}$  – соответственно угол внутреннего трения и сцепление по плоскости ослабления (трещине);  $\alpha$  – угол устойчивого откоса.

Предельную глубину карьера по условию устойчивости бортов, ослабленных трещинами и плоскостями напластования, определяют по формуле Г. Л. Фисенко:

$$H = \frac{2C \operatorname{ctg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)}{\gamma \left[1 - \operatorname{ctg} \alpha_y \operatorname{tg} \frac{\varphi_0}{2}\right]},$$

где  $\varphi$  и  $\varphi_0$  – углы внутреннего трения пород соответственно по напластованию и под углом к напластованию.

Практика показывает, что достаточно надежно угол откоса уступа можно оценить по крепости горных пород, слагающих массив (рис. 4.24).



1 – рабочий уступ;  
2 – нерабочий уступ;  
высота уступа равна 5–12 м  
Рис. 4.24 – Зависимость угла откоса уступа  $\alpha$  карьера от крепости пород

Чем меньше угол откоса уступа или борта карьера, тем надежнее и дольше стоит откос. Однако неоправданное занижение углов откоса борта карьера приводит к значительному росту вскрышных работ.

Объем породы, подлежащей выемке из карьера, подсчитывается по формуле

$$V = S_{\text{д}} H_k + 0,5 P H_k^2 \text{ctg} \gamma + 0,3 \pi H_k^3 \text{ctg}^2 \gamma,$$

где  $S_{\text{д}}$  – площадь дна карьера;  $H_k$  – глубина карьера;  $P$  – периметр дна;  $\gamma$  – усредненный угол откоса бортов.

Так, при глубине карьера 200 м уменьшение угла откоса борта карьера с  $60^\circ$  до  $50^\circ$  приводит к возрастанию объема непроезжих горных работ в 1,6 раза (на 4 млн  $\text{м}^3$ ).

Малые углы откосов отвалов пород увеличивают площади, занимаемые ими, что также крайне нежелательно. Так, при открытом способе добычи, например, на каждый миллион тонн добытого угля приходится от 20 до 35 га нарушенных земель.

### **Борьба с проявлением внезапных выбросов угля и газа**

На участках месторождения, опасных по выбросу угля и газа или горным ударам, проводят мероприятия по предотвращению опасных явлений.

Все мероприятия подразделяются на технологические, физические и физико-химические.

**Технологические мероприятия** связаны с выбором соответствующих систем разработки, организационных мероприятий, техники и технологии, скорости продвижения забоев, обеспечивающих снижение до минимума вероятности возникновения внезапного выброса или опасных последствий выброса.

**Физические мероприятия** – это меры предварительного воздействия на угольные пласты с целью ликвидации факторов, обуславливающих выброс. К ним относятся дегазация угольных пластов путем бурения опережающих скважин, увлажнение угольных пластов через скважины, обеспечивающее повышение пластичности и трещиноватости пласта, удаление газов. Воду нагнетают под давлением  $(0,8–0,85) \gamma H$ . В ряде случаев используют камуфлетное и сотрясательное взрывание, приводящее к растрескиванию массива, увеличению газоотдачи и иногда и к преднамеренному инициированию выброса в условиях отсутствия в забое людей и техники с целью разгрузки массива от скопившейся потенциальной энергии.

В связи с этим представляет интерес **практическое использование потенциальной** энергии пласта для целей добывания. Это

направление разрабатывается проф. И. М. Петуховым и А. В. Докукиным.

Так, увеличение бара добычного комбайна до 2,2 м на шахтах Кизеловского угольного бассейна привело к возникновению микроударов в забое пласта, в результате чего происходило саморазрыхление угля, позволившее обходиться без предварительного рыхления угля буровзрывным способом. В результате интенсивность подвигания лавы увеличилась в 2 раза.

Использование выбросов и горных ударов для рыхления пород и углей наиболее целесообразно в так называемых схемах безлюдной выемки угля (при отсутствии людей непосредственно в очистном забое). Так, в процессе безлюдной выемки угля канатными пилами осуществлялось предварительное инициирование выбросов посредством вибрационного воздействия на пласт. Показатель эффективности работы канатных пил возрос при этом с 1–5 до 20–100.

Дегазацию угольных пластов осуществляют также путем **гидроразрыва** пласта.

Проф. А. С. Бурчаковым предложено предварительное **тепловое воздействие** на угольный пласт, основанное на использовании зависимости, согласно которой максимальная величина сорбции метана  $\Delta a$  зависит от изменения температуры  $\Delta T$  углей:

$$\Delta a = -A\Delta T,$$

где  $\Delta a$  – прирост сорбционной емкости угля, м<sup>3</sup>/т горной массы;  $A$  – коэффициент, при давлении 1–10 МПа для углей с выходом летучих 5–50 % равный 0,5–0,2 м<sup>3</sup>/т · К.

Тепловое воздействие осуществляют в две стадии. В первую стадию в скважину нагнетают насыщенный пар при температуре 300 °С. Во вторую стадию в пласт нагнетают воду при температуре 125 °С и давлении 12 МПа. После этого скважина закрывается и выдерживается 3–4 мес.

Осуществление теплового воздействия на пласт по данной методике позволило снизить природную газоносность угля на 9,6 м<sup>3</sup>/т и достичь коэффициента дегазации, равного 0,75.

Снижения напряжений в призабойной части пласта можно достигнуть интенсивным его **охлаждением**.

**Физико-химическое воздействие** на угольный пласт осуществляют с целью либо его упрочнения и консервации свободного метана в пласте, либо снижения количества метана в пласте.

**Упрочнение пласта** производят нагнетанием в него различных смол (например, мочевиноформальдегидной).

**Снижение метана** в пласте в соответствии с исследованиями проф. Э. М. Москаленко можно осуществить микробиологическим воздействием: в пласт нагнетают раствор, насыщенный бактериями, пожирающими метан.

### **Тепловой режим шахт и рудников**

При подземной разработке месторождений полезных ископаемых задача регулирования теплового режима горных выработок имеет важное значение, особенно на больших глубинах и в районах вечной мерзлоты.

Источники тепловыделения в горных породах можно подразделить на источники, связанные с **физическими и химическими явлениями** в породных массивах, и технологические, обусловленные **технологическими процессами**.

В первую группу входят тепловыделения из породного массива, подземных вод, перемещаемых пород, в результате окислительных реакций и др., во вторую – тепловыделения из-за электрических потерь и потерь механической энергии при работе машин и механизмов, из-за адиабатического сжатия воздуха при движении по выработкам, тепловыделения рабочих.

Тепловыделения породного массива  $Q_T$  зависят от величины коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ :

$$Q_T = \alpha(t_{ст} - t)Pl,$$

где  $t_{ст}$  и  $t$  – температура стенок выработки и воздуха соответственно;  $P$  – периметр выработки;  $l$  – длина выработки.

В соответствии с нормами промышленной санитарии температура воздуха в зоне работы людей должна быть не выше 26 °С при соответствующей скорости движения вентиляционной струи.

Параметры вентиляционных струй рассчитывают с учетом тепловых свойств массивов горных пород, омываемых воздушным потоком. Так, температура воздуха в воздухоподающем стволе  $T_B$  на глубине  $H$  возрастает по сравнению с температурой поступающего в ствол воздуха  $T_{BH}$ .

$$T_B = T_{BH} + RH + 0,5(\Gamma - R)H^2 Pmf(t),$$

где  $R$  – конвективный градиент, образующийся от абсолютных источников тепла,  $K/м$ ;  $\Gamma$  – геотермический градиент пород,  $K/м$ ;  $P$  – функция, зависящая от тепловых свойств породы:

$$P = \frac{0,9\lambda\Pi}{Qc_V\sqrt{a}},$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности породного массива;  $Q$  – количество подаваемого воздуха;  $c_V$  – объемная теплоемкость воздуха;  $a$  – температуропроводность пород;  $m$  – коэффициент, учитывающий фактор времени:

$$m = \frac{2\sqrt{t}}{\sqrt{t} + \sqrt{t_1}},$$

где  $t$  и  $t_1$  – время, истекшее соответственно с момента начала и окончания проведения выработки;

$$f(t) = 1 + 0,454\sqrt{\frac{at}{D^2}},$$

где  $D$  – диаметр выработки, м.

Проветривание выработок на больших глубинах и в скальных породах обеспечивает постепенное снижение их температуры. При проветривании выработок, пройденных в мерзлых породах, наоборот, происходит нагревание окружающего выработки породного массива.

Поэтому основное требование техники безопасности для шахт, расположенных в районах вечной мерзлоты – предотвращение прогрессирующего оттаивания мерзлых пород вокруг выработок, вызывающего деформирование крепи, ее вдавливание в почву, оползание выработок и т. д.

#### **4.5 Способы оценки состояния породного массива и технологических параметров при освоении подземного пространства**

##### **Свойства пород как источники информации**

Получение информации об изменениях состава и состояния массива горных пород в различных технологических процессах их

добычи и переработки является одной из важнейших задач современного горного производства.

Система контроля и управления технологическим процессом включает многие этапы, среди которых исходным является фиксация величины контролируемого переменного параметра.

В физике горных пород рассматриваются процессы получения информации только о горных породах. Это осуществляется разнообразными датчиками, основанными на физических свойствах пород и закономерностях их изменения под воздействием внешних полей, механизмов, технологических процессов.

Иногда в породе закладывается определенный искусственный элемент, на который воздействует порода и изменения которого затем передаются регистрирующему прибору.

Информация от породы может поступать также через датчик к регистрирующему прибору непосредственно, при этом информатором служит сама горная порода.

Сигнал, поступающий на регистрирующий прибор может быть либо следствием естественных процессов в горной породе, либо ее ответом на воздействие внешнего измерительного поля. В первом случае измерения называются пассивными, во втором – активными.

Технологические методы контроля подразделяются на следующие группы:

- методы контроля напряженного состояния, устойчивости и нарушенности массивов пород и горных выработок в процессе ведения горных работ;

- методы получения своевременной информации об опасных участках в массивах пород, способных нарушить режим работы предприятия или понизить качество полезного ископаемого (включениях крепких пород, карстах, сильно разрушенных зонах, плывунах, водонаполненных полостях и т. д.);

- методы прогноза опасных динамических явлений в массивах горных пород – внезапных выбросов угля и газа, горных ударов, обрушений и вывалов;

- методы определения и контроля качества полезных ископаемых (содержания полезных компонентов, содержания вредных примесей, например, золы и серы в углях, влажности, других качественных характеристик, по которым существуют определенные требования);

➤ методы контроля эффективности различных технологических процессов – режимов работы породоразрушающих механизмов с целью согласования их со свойствами пород, направления движения угольных комбайнов по пласту и др.

### **Контроль напряженного состояния, устойчивости и нарушенности массивов и выработок**

В результате наблюдений за напряженным состоянием пород устанавливают:

- величину напряжений в породах, окружающих выработку, в целиках и крепи;
- изменения напряжений во времени и пространстве;
- величину деформации выработок, целиков и крепи;
- степень нарушенности несущих конструкций и массивов, и ее изменения во времени.

Эти данные позволяют прогнозировать опасное состояние на отдельных участках шахты или карьера и, следовательно, заблаговременно принимать меры по предотвращению или локализации обрушений.

Наблюдения за откосами и бортами карьеров и отвалов осуществляют преимущественно маркшейдерской съемкой – **методом реперов**. Для этого по наиболее опасным направлениям в массиве пород забивают реперы, относительное сдвижение которых в плане и по высоте регулярно контролируют при помощи теодолита и нивелира. На основании измерений получают информацию о скорости и направлении смещения отдельных участков массива и устанавливают необходимые профилактические мероприятия.

Метод реперов применим лишь при условии начавшейся деформации массива. Часто же необходимо заранее определить степень его устойчивости, для чего используют различные физические методы.

Существенным фактором, обуславливающим **устойчивость горных массивов**, является степень их трещиноватости и нарушенности. Для количественной оценки этого параметра можно воспользоваться скоростью прохождения упругих волн  $v$ , так как она зависит от трещиноватости пород. Как известно, отношение скоростей распространения упругих колебаний в нарушенном массиве и монолите может служить характеристикой нарушенности массива  $A_i$ .

Оценить **нарушенность массива** можно также по отношению скоростей распространения продольных и поперечных волн  $\frac{v_p}{v_s}$ . Как

известно, большие значения  $\frac{v_p}{v_s}$  соответствуют более нарушенным

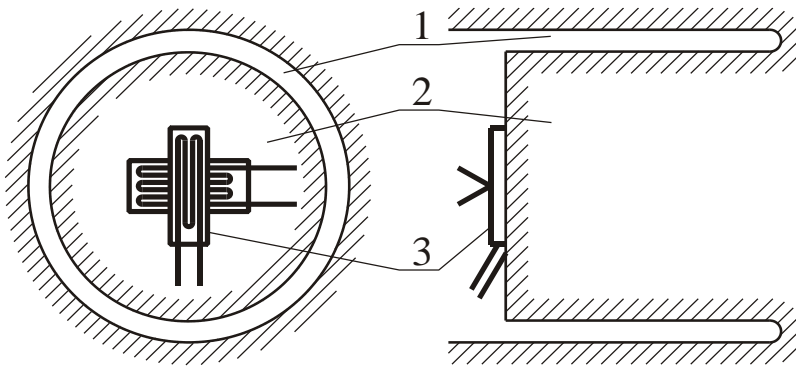
породам. Непосредственно с нарушенностью пород связан также коэффициент поглощения упругих колебаний  $\theta$ , характеризующий состояние массива.

Степень нарушенности массива и его напряженное состояние определяют также по измерениям его **электрической проводимости**. Последняя, как и скорость распространения упругих волн, зависит от напряженного состояния пород. Поэтому, заранее установив подобную закономерность для пород определенного месторождения и введя поправки на влажность и возможную нарушенность массива, можно непосредственно по величинам  $\nu$  или  $\sigma$ , определить величину напряжений в бортах карьера.

В подземных условиях наиболее распространенный механический метод **оценки напряжений** – это метод разгрузки, основанный на способности элемента массива упруго восстанавливать первоначальную форму после его отделения от основного нагруженного массива. Этот метод применяют в различных вариантах, одним из них является метод торцовых измерений (схема ВНИМИ).

В изучаемом массиве на требуемую глубину пробуривают скважину (рис. 4.25). Забой скважины выравнивают и на него наклеивают тензодатчики – электрические, фотоупругие или муаровые. Затем буровой коронкой создают разгрузочную щель и получают керн, т. е. отделяют элемент с датчиками от остального массива. Очевидно, если этот элемент до отделения испытывал напряжения  $a$ , действующие в массиве, то после отделения он должен расшириться на величину относительной деформации  $e$ , регистрируемую тензодатчиком и зависящую от  $a$  и упругих свойств породы.





1 – разгрузочная щель;  
2 – керн; 3 – тензодатчики

Рис. 4.25 – Схема измерения напряжений методом полной разгрузки в глубине горного массива

Таким образом, зная упругие свойства породы, можно вычислить напряжения в породе.

Для того чтобы учесть как вертикальные, так и горизонтальные напряжения, на забой скважины наклеивают в строго ориентированном положении от двух до четырех датчиков. Если два датчика расположены друг относительно друга под углом  $90^\circ$  и строго ориентированы по направлению главных нормальных напряжений, то, измерив по ним  $\varepsilon_z$  и  $\varepsilon_x$ , можно рассчитать напряжения:

- нормальное вертикальное

$$\sigma_{\max(z)} = \frac{E(\varepsilon_z + \nu\varepsilon_x)}{1 - \nu^2};$$

- нормальное горизонтальное

$$\sigma_{\min(x)} = \frac{E(\varepsilon'_x + \nu\varepsilon_z)}{1 - \nu^2};$$

- касательное максимальное

$$\tau_{\max} = \frac{E(\varepsilon_x - \nu\varepsilon_z)}{2(1 + \nu^2)}.$$

Напряжения в массиве можно исследовать также замером деформации скважин при помощи деформометров. Известно, что в общем случае зависимость между напряжениями  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xy}$  и изменением  $\Delta D$  диаметра  $D$  круглого отверстия для изотропной, однородной и упругой пластинки описывается следующим уравнением:

$$\Delta D = \frac{D(\sigma_x - \sigma_y) + 2(\sigma_x - \sigma_y)(1 - \nu^2)\cos 2\varphi + 4\tau_{xy}(1 - \nu^2)\sin 2\varphi - \nu\sigma_z}{E},$$

где  $\varphi$  – угол между началом отсчета и направлением измерения.

Если  $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ , то, измерив изменение диаметра скважины в направлениях  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $90^\circ$ , получим систему уравнений

$$\Delta D_{0,90} = \frac{D(\sigma_x + \sigma_y) \pm 2(\sigma_x - \sigma_y)(1 - \nu^2) - \nu\sigma_z}{E};$$

$$\Delta D_{30} = \frac{D(\sigma_x + \sigma_y) - (\sigma_x - \sigma_y)(1 - \nu^2) - \nu\sigma_z}{E},$$

по которой можно рассчитать все действующие в массиве напряжения.

Если массив испытывает вертикальные одноосные напряжения, то

$$\sigma_z = \frac{\Delta DE}{D\nu}.$$

Деформометры, применяемые для замера изменений диаметра скважин, бывают механические, на базе тензодатчиков электрического сопротивления, индукционные, емкостные и др.

Деформометрами можно измерять не только изменение диаметра скважин, но и величину отслоения кровли, изменения поперечных размеров целиков, а также контролировать процесс пучения пород почвы или стенок подземных выработок. Для перечисленных целей удобны емкостные и индукционные датчики, так как они могут быть включены в схему радиопередатчика. Это позволяет передавать информацию о состоянии контролируемого участка на приемный пульт посредством радиосигналов. Таким образом, можно создать целую систему контроля за устойчивостью выработок горного предприятия.

Используются также методы, основанные на покрытии стенок выработок оптически активными материалами, муаровыми сетками и др. **Поляризационно-оптический метод** основан на способности большинства прозрачных изотропных материалов (стекло, эпоксидная смола и т. д.) под воздействием напряжений приобретать свойства двойного лучепреломления. Величина двойного лучепреломления зависит от напряжений и может быть измерена оптическим методом.

**Метод муаровых сеток** основан на принципе механической интерференции, возникающей при наложении двух сеток одна на другую.

**Использование закономерностей распространения упругих колебаний.** Существуют пассивный и активный методы исследования упругих колебаний, применяемые с целью определения устойчивости и напряжений в массивах. **Пассивный метод** основан на наблюдениях за естественными упругими импульсами, возникающими в массиве горных пород при изменении его напряженного состояния. Рост напряжений в породе сопровождается раскрытием в ней микротрещин, вызывающим эффект потрескивания массива (акустическая эмиссия).

Определив при помощи специального прибора – геофона – частоту возникновения звуковых импульсов, можно оценить напряженное состояние массива. Выявлено, что в шахтах Криворожского бассейна 30–40 звуковых импульсов в минуту характеризуют возможность возникновения местных вывалов породы, а более 40 – неустойчивое состояние, предшествующее обрушению пород на изучаемом участке.

Сейсмоакустический метод широко применяется на шахтах Донбасса. В Карагандинском бассейне проф. Ю. А. Векслером испытан метод частотного анализа акустической эмиссии пласта после механического воздействия на забой, что дает дополнительную информацию о состоянии массива.

**Активные акустические методы** основаны на зависимости скорости и коэффициента поглощения упругих волн как от напряженного состояния пород, так и от степени их трещиноватости. Для монолитного образца связь между давлением  $\sigma$ , приложенным к образцу, и скоростью распространения  $v_p$  упругих волн может быть описана следующим обобщенным эмпирическим выражением:

$$\sigma = a(v_p)^n,$$

где  $a$  и  $n$  – коэффициенты, зависящие от типа пород.

Используется также зависимость коэффициентов поглощения упругих волн от напряжений. Так, в целом

$$\frac{\sigma'_{\Pi}}{\sigma''_{\Pi}} = \frac{k_1 \theta''_{\Pi}}{\theta'_{\Pi}},$$

где  $k_1$  – некоторый коэффициент;  $\theta'_{\text{ц}}$  и  $\theta''_{\text{ц}}$  – коэффициенты поглощения, соответствующие двум различным напряжениям  $\sigma'_{\text{ц}}$  и  $\sigma''_{\text{ц}}$  в целике.

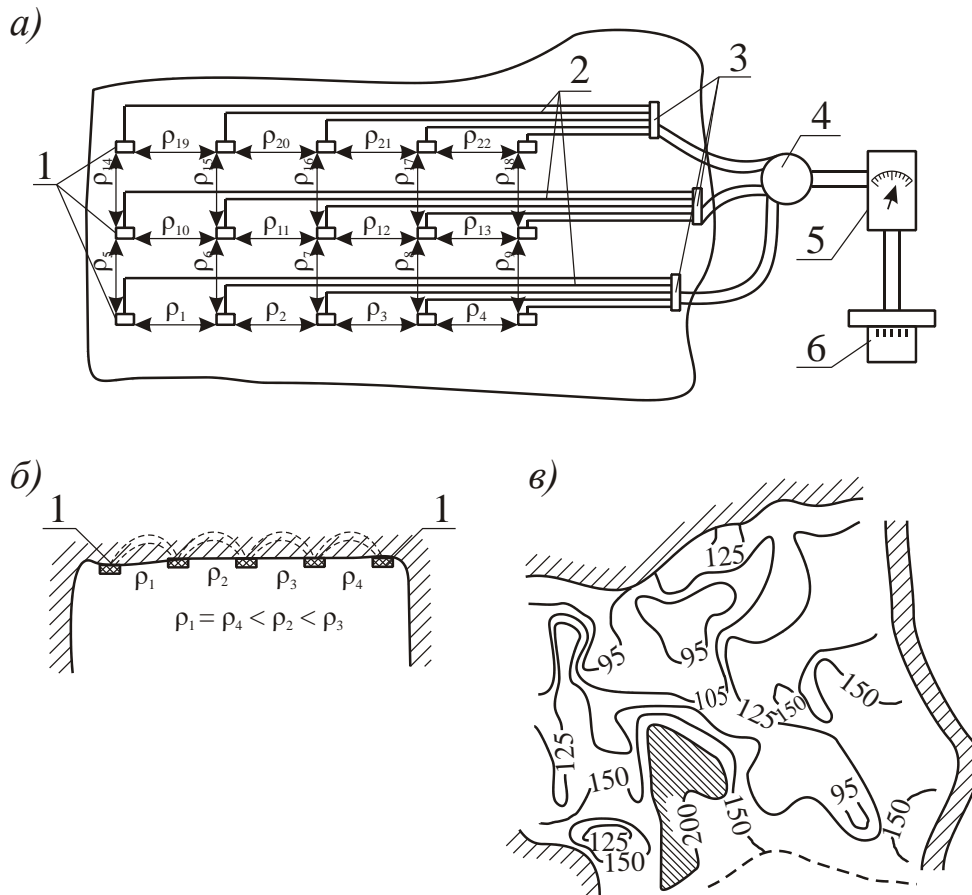
**Электрические и магнитные методы.** Как известно, с повышением давления электрическая проводимость пород  $\sigma_{\text{э}}$  замеренная по направлению действия давления, чаще всего возрастает. Одновременно она уменьшается с увеличением степени трещиноватости сухих пород. При одноосных напряжениях в целике наибольшая сеть трещин возникает в вертикальном или близком к вертикальному направлении. Поэтому, замерив  $\sigma_{\text{э.в}}$  по высоте целика и  $\sigma_{\text{э.ш}}$  по его ширине, можно установить отношение  $\frac{\sigma_{\text{э.в}}}{\sigma_{\text{э.ш}}}$ , которое характеризует

степень устойчивости данного целика. Увеличение  $\frac{\sigma_{\text{э.в}}}{\sigma_{\text{э.ш}}}$  во времени будет указывать на снижение устойчивости целика.

Явление увеличения электрического сопротивления сухих пород с их растрескиванием использовано в разработанной в МГИ системе контроля нарушенности и заколообразования в кровле подземных горных выработок и очистных камер на рудниках цветной металлургии (рис. 4.26). Электроды-датчики размещают равномерно по контролируемой площади. Через определенные промежутки времени производят измерение электрического сопротивления между каждой парой электродов по всей площади кровли камеры. По полученным данным строятся изоомы области сопротивления. Увеличенные в определенных участках значения сопротивления, их рост со временем и перемещение дают информацию о наличии, развитии и перемещении зон, склонных к обрушению.

Изменение **диэлектрической проницаемости** массивов пород с повышением давления также можно использовать для создания датчика напряженного состояния пород. Установлено, что  $\epsilon_r$  каменных углей Кузбасса при нагружении до 11 МПа возрастает для разных углей по-разному – от 1,15 до 6 раз.

Поскольку распространение и поглощение электромагнитных волн в породах зависит от их электрических свойств, а последние с изменением давления изменяются, на этой основе можно осуществить радиоволновый метод контроля напряжений в породах.



а – общая схема измерений; 1 – электроды; 2 – провода; 3 – разъемы; 4 – переключатель; 5 – омметр; 6 – цифропечатающая машинка; б – схема прохождения токов при измерении сопротивления попарно между электродами; в – построение по результатам измерений карты изоом площади кровли. Заштрихован наиболее опасный по вывалу участок

Рис. 4.26 – Схема электрометрической системы обнаружения мест заколообразования

Для бесконтактного измерения малых деформаций горных пород при проявлении горного давления в МГИ предложены **оптические квантовые генераторы** (лазеры).

**Радиометрические методы.** На зависимости поглощения гамма-излучения от плотности пород основан радиометрический метод измерения напряжений. С увеличением давления число гамма-импульсов, прошедших поперек направления давления через некоторый объем горной породы, заметно уменьшается. Радиометрический метод используют для контроля за пучащими породами, так как пучение пород всегда сопровождается их разрыхлением и, следовательно, снижением плотности.

Так, по данным проф. А. А. Борисова, для углей Гуково-Зверовского угленосного района вертикальные напряжения зависят от измеренной  $\gamma$ -методом объемной массы пород следующим образом:

$$\sigma_{\text{верт}} = 5 \cdot 10^8 \left( A + \sqrt{B + C\rho} \right),$$

где  $A, B, C$  – некоторые коэффициенты.

Интенсивность естественного  $\gamma$ -излучения пород также зависит от их напряженного состояния. Радиоактивность плагиогранита под нагрузкой сначала уменьшается (до значений нагрузок 70–90 % от разрушающих), затем (перед разрушением) резко возрастает.

Измерения радиоактивности пород в шахте также показали, что в зоне опорного давления (примерно 0,9–1,2 м от забоя) интенсивность  $\gamma$ -излучения уменьшается примерно на 40 %.

### **Обнаружение включений и опасных зон в массивах пород**

Нарушение режима работы горного предприятия может произойти не только в связи с проявлением горного давления, но и при встрече добычных машин с неожиданными препятствиями: крупными включениями крепких пород, карстами, заполненными водой, сильно разрушенными зонами, плывунами и т. д. Поэтому необходимо осуществлять непрерывный контроль за строением и составом разрабатываемого массива пород перед забоем на расстоянии 5–20 м.

Для технологической разведки (интроскопии) можно использовать практически все ранее описанные локальные методы изучения строения и состава массивов пород. Однако небольшая глубина разработки и объекты контроля обуславливают особенности применения этих методов в горном производстве.

Так, при геофизической разведке ультразвук не находит применения из-за малых баз возможного прозвучивания (до нескольких метров). В то же время в горной практике на принципе отражения упругих колебаний разработан ультразвуковой датчик, позволяющий обнаруживать твердые доломито-углистые включения в каменном угле впереди работающего роторного экскаватора и различные инородные геологические тела при подземной разработке (рис. 4.27).

Так как две породы могут иметь одинаковые значения одних параметров и различные значения других, выбор того или иного способа интроскопии в конкретном случае зависит от возможности обнаружить границу контакта разных тел данным способом.

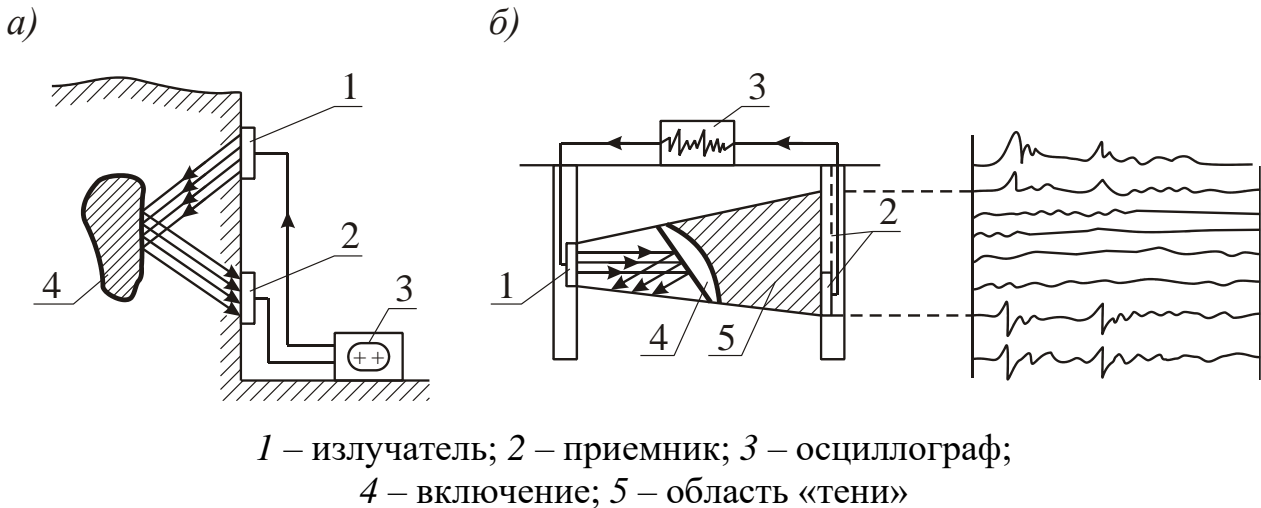


Рис. 4.27 – Обнаружение инородного включения в массиве пород методами отражения (а) и просвечивания (б)

**Акустическими методами** можно обнаруживать контакты двух пород, если их удельные волновые сопротивления различны. Так, изменение скорости распространения упругих колебаний при замерзании влажных пород используется для определения мощности мерзлых слоев. Акустическим методом можно выявлять трещиноватые зоны в скальных породах, заполненные льдом.

**Метод электрометрии** может быть использован для прогноза водоносных зон на угольных шахтах, так как удельное электрическое сопротивление увлажненной зоны значительно меньше сопротивления вмещающей среды. Этот метод используется на шахтах Подмосковского угольного бассейна.

Для выделения пористых и трещинно-кавернозных участков в однородном по химическому составу разрезе карбонатных пород можно применить **метод вызванной поляризации**.

Коэффициенты поляризуемости трещиноватого блока зависят от степени раскрытия заполненных водой трещин и их электрического сопротивления.

Получена следующая формула связи эффективной пористости  $P_{эф}$  и коэффициента поляризуемости вдоль трещин  $\eta_{||}$ :

$$P_{эф} = \left[ \frac{1 + (m + 1)\rho_{э2}\eta_{||}}{(\eta - \eta_{||})m\rho_{э1}} \right]^{-1},$$

где  $m$  – число трещин;  $\rho_{э1}$  и  $\rho_{э2}$  – удельное электрическое сопротивление соответственно нетрещиноватой породы и трещин, запол-

ненных водой;  $\eta$  – коэффициент поляризуемости нетрещиноватого блока породы.

Изменения **магнитной проницаемости** руд с изменением температуры используются в методах обнаружения участков массива с повышенной температурой.

С целью выявления тепловых аномалий проводят также **геотермические** наблюдения через опережающие шпурь. Интерпретация этих аномалий позволяет судить о том, что может встретиться на пути проведения выработки: подземные воды, скопление газов, рудные включения и т. д.

### **Прогноз опасных динамических явлений в массивах горных пород**

**Прогноз областей потенциальной удароопасности.** Так как причиной горных ударов служит комплекс различных факторов: физические свойства пород, повышенные напряжения, состояние массивов, – прогноз горных ударов тем более надежен, чем больше учтено факторов, обуславливающих удароопасность.

Приблизительно потенциальную удароопасность угольного пласта оценивают коэффициентом нагруженности  $k_H$ :

$$k_H = \frac{k_K (\gamma H a_\alpha + \sigma_T)}{\sigma_{сж}},$$

где  $k_K$  – коэффициент концентрации напряжений;  $\gamma$  – объемный вес горных пород;  $H$  – глубина залегания пласта;  $a_\alpha$  – коэффициент влияния угла падения;  $\sigma_T$  – тектонические напряжения;  $\sigma_{сж}$  – предел прочности пласта при сжатии.

Удароопасность, по Я. А. Бичу (ВНИМИ), определяют по параметру  $D_y$ :

$$D_y = \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_3) \cdot 10^{-6}}{l},$$

где  $(\sigma_{\max} - \sigma_3)$  – разность, напряжений, зарегистрированных в максимуме опорного давления и на кромке забоя;  $l$  – расстояние до максимума напряжений;

$$\sigma_{\max} = k_K \gamma H;$$



$$\sigma_3 = \gamma H e^{-0,27l}.$$

Если  $D_y > 10 \text{ Н/м}^3$ , пласт считается удароопасным.

Если  $D_y < 10 \text{ Н/м}^3$ , пласт неудароопасен. Так, для условий Кузбасса  $D_y$  удароопасных пластов составляет 10,7–12,7  $\text{Н/м}^3$ , неудароопасных – 1,1–7,2  $\text{Н/м}^3$ .

В соответствии с представлениями Я. Б. Фридмана вероятность горного удара возрастает с увеличением  $\beta$  – отношения максимальной растягивающей компоненты  $\sigma_{p \max}$  главных напряжений, испытываемых породой, к максимальным касательным напряжениям  $\tau_{\max}$ :

$$\beta = \frac{\sigma_{p \max}}{\tau_{\max}}.$$

При одном и том же напряженном состоянии различные породы имеют разную склонность к проявлению горных ударов.

Наиболее объективным, по мнению Я. А. Бича, критерием способности горных пород вызывать горные удары является отношение работы упругого  $A_y$  к работе неупругого  $A_{пл}$  деформирования породы, которую можно либо замерить графически по площади кривой напряжения – деформации (как, например, в случае подсчета коэффициента пластичности), либо рассчитать аналитически по известным прочностным и деформационным свойствам пород.

Если отношение  $\frac{A_y}{A_{пл}} < 1$ , то разрушение пород сопровождается динамическими явлениями, характеризующими горный удар. Если же  $\frac{A_y}{A_{пл}} > 1$ , разрушение происходит спокойно, без удара.

**Прогноз областей потенциальной выбросоопасности.** При выбросе угля и газа существенную роль играют кроме вышеперечисленных характеристик пород также давление газа, величина газоотдачи в угольных пластах и т. д.

По методике ИГД им. А. А. Скочинского выбросоопасность угольного пласта оценивается крепостью, характеристиками нарушенности, неоднородности, показателями структуры пласта и т. д.

Показатель  $B$ , характеризующий выбросоопасность, определяют по специальной номограмме (рис. 4.28), предварительно рассчитав показатели действующих сил  $F_d$  и устойчивости пластов  $M$ :

$$F_d = P_{\sigma} \cdot 10^{-5} + 0,1H;$$

$$M = M_H - s_{M.H},$$

где  $P_{\sigma}$  – давление газов, Па;  $H$  – глубина разработки, м;  $M_H$  – устойчивость пласта без учета его неоднородности ( $M_H = f - b$ );  $f$  – обобщенный показатель прочности пласта с учетом его нарушенности ( $f = 2,6 - 10^{-6} \sigma_{сж} - 11,4$ );  $b$  – обобщенный показатель структуры пласта с учетом его мощности  $m$  и числа  $n$  пачек в пласте ( $b = m + 1,6n + 0,1$ );  $s_{M.H}$  – среднеквадратичное отклонение показателя устойчивости пласта  $M_H$ , характеризующее его неоднородность.

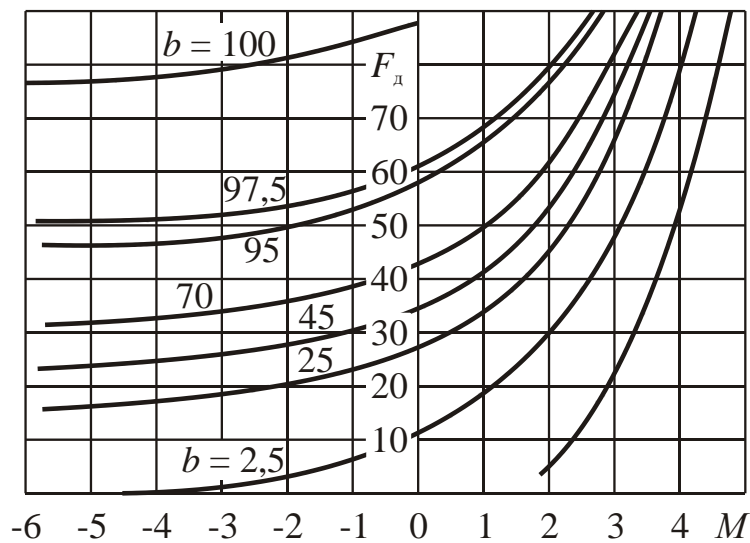


Рис. 4.28 – Номограмма ИГД им. А. А. Скочинского для определения выбросоопасности угольных пластов Кузбасса

При  $B < 25$  % угольный пласт считается неопасным по выбросам, при  $B > 45$  % – опасным. В пластах, которые характеризуются показателем  $B = 25$ –45 %, внезапные выбросы угля и газа возможны.

Исследования МГИ показали, что выбросоопасность угольных пластов в значительной степени обусловлена крепостью, микротрещиноватостью и микрохрупкостью углей. Получен структурный показатель выбросоопасности углей

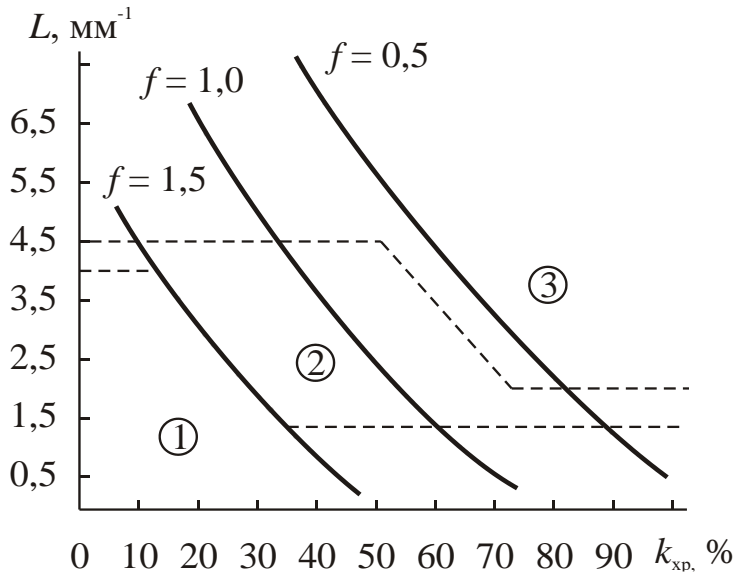
$$B = L + 0,06k_{xp} - 22f,$$

где  $L$  – микротрещиноватость углей,  $\text{мм}^{-1}$ ;  $k_{xp}$  – микрохрупкость, %;  $f$  – крепость углей.

При  $B > 20$  пласты не выбросоопасны; при  $B < 11,5$  пласты потенциально выбросоопасны, при  $11,5 < B < 20$  выбросоопасность

пластов (промежуточная группа) обуславливается дополнительными факторами: насыщенностью газами, горным давлением и другими.

Для каменных углей Донбасса из участков с различной степенью выбросоопасности Л. А. Темеевой построена соответствующая номограмма прогноза выбросоопасности по величинам  $L$ ,  $k_{xp}$  и  $f$  (рис. 4.29).



- 1 — угли, склонные к выбросам;
- 2 — промежуточные;
- 3 — не опасные по выбросам

Рис. 4.29 — Номограмма для оценки потенциальной выбросоопасности углей Донбасса по их микротрещиноватости  $L$ , микрохрупкости  $k_{xp}$  и крепости  $f$

Таким образом, для оценки выбросоопасности угольных пластов необходимо в натуре измерять их прочность, проницаемость, степень нарушенности и структуру.

Наряду с этим создаются методы непосредственного контроля за состоянием горных пород и фиксацией в массивах характерных признаков, предшествующих внезапному выбросу угля и пыли.

Так, в Донбассе используется пассивный акустический метод, фиксирующий шумность угольных пластов. При этом установлено, что критерием выбросоопасных зон можно считать более чем двукратное превышение интенсивности потрескиваний над средним уровнем.

На базе исследований, проведенных Карагандинским политехническим институтом (Ю. А. Векслер), разработан сейсмоакустический метод контроля выбросоопасности в комбайновых забоях подготовительных выработок. Этот метод заключается в регистрации и частотном анализе акустической эмиссии пласта после механического воздействия комбайна на забой.

Наступление выбросоопасного состояния характеризуется сдвигом частотного диапазона акустической эмиссии пласта в область более низких частот — ниже 100 Гц (рис. 4.30). Установлено

также, что сама интенсивность потрескиваний не является определяющим фактором для условий Карагандинского бассейна.

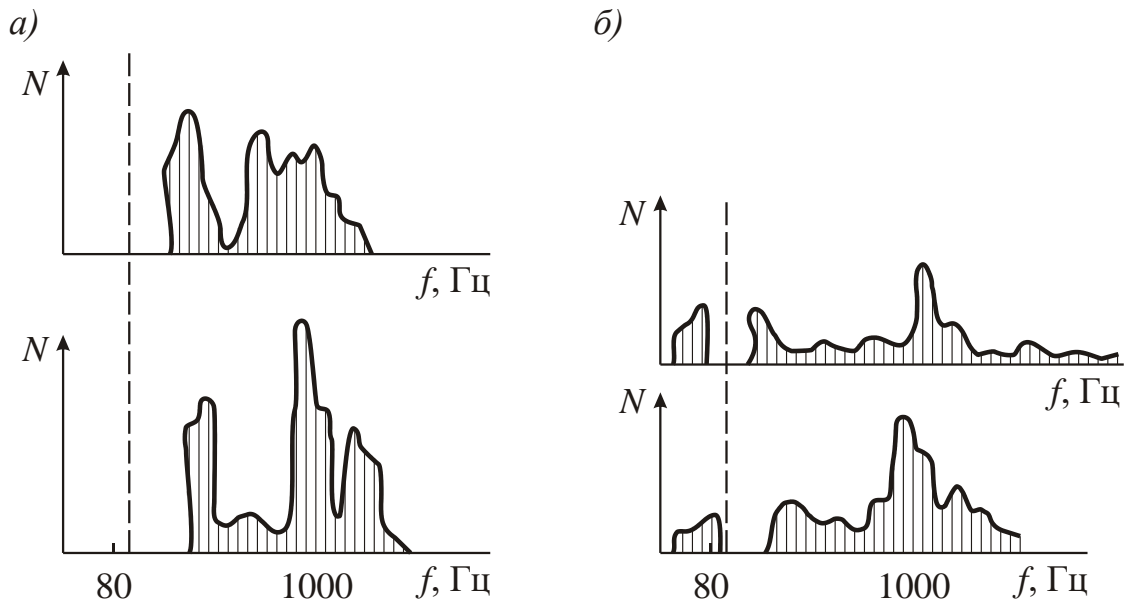


Рис. 4.30 – Распределение количества импульсов  $N$  акустической эмиссии по частоте  $f$  в зонах невыбросоопасных (а) и выбросоопасных (б) пластов (по Ю. А. Векслеру)

### Качество полезного ископаемого и его контроль

Понятие «качество полезного ископаемого» – очень емкое. Конкретное содержание его зависит от вида полезного ископаемого и технологии дальнейшей обработки и переработки. На каждой стадии последовательной цепочки горно-производственных операций существуют свои частные требования к качеству продукта, обусловленные особенностями последующей операции.

Под качеством подразумевают либо в отдельности, либо в том или ином наборе или во всей совокупности такие понятия, как крупность, гранулометрический состав, прочность отдельных кусков горной массы, способность не разрушаться и не образовывать пыли в условиях высоких температур, определенное процентное содержание (не ниже) полезного компонента, определенное процентное содержание (не выше) для данного вида сырья вредных компонентов, определенная допустимая влажность и т. д.

Широким диапазоном качественных характеристик должны удовлетворять, например, строительные полезные ископаемые и ископаемые угли.

**Параметры качества ископаемых углей.** Качество углей как объекта технологического использования оценивается следующими параметрами:

➤ теплота сгорания – количество теплоты, выделяемое при полном сгорании 1 кг угля; характеризует угли как энергетическое топливо;

➤ зольность  $A^c$  – относительное массовое содержание несгорающего остатка, образующегося из минеральных примесей в угле при полном его сгорании. В каменных и бурых углях зольность может достигать 45 %, в горючих сланцах – 50–80 %. Зола уменьшает теплоту сгорания, загрязняет поверхность нагрева и вследствие этого снижает интенсивность теплообмена, вызывает износ нагревательных устройств, загрязняет атмосферу;

➤ термохимическая стойкость – свойство углей сопротивляться химическому разложению при нагревании; термохимическая стойкость возрастает с увеличением степени углефикации углей;

➤ спекаемость – свойство углей размягчаться при нагревании без допуска воздуха, переходить в пластическое состояние в интервале температур 350–450 °С и образовывать твердый спекшийся кусок. Спекаемость углей определяют при коксовании их в тигле в виде навески тонкоизмельченного порошка. Толщина образовавшегося пластического слоя  $Y$ , мм, служит показателем спекаемости. Дополнительно к этому полученный спекшийся образец подвергают раздавливанию. Величина требуемого для раздавливания усилия также характеризует степень спекаемости угля;

➤ коксуемость – свойство углей образовывать при нагревании кокс. Коксуемость определяют методом лабораторного коксования углей в специальной установке с одновременной фиксацией различных происходящих при этом эффектов: изменения объема угля, разности температур размягчения и затвердевания углей, изменения температуры по высоте загрузки и др.;

➤ выход летучих веществ  $V^T$  – количество выделяющихся газов при нагреве углей без доступа воздуха, выраженное объемом газов на единицу массы угля или относительным массовым количеством летучих веществ в процентах.

За основные показатели при промышленной классификации углей и антрацитов принимают: для каменных углей – выход летучих веществ  $V^T$  и спекаемость, выраженную толщиной пластического

слоя  $Y$  или характеристикой нелетучего остатка; для бурых углей – содержание влаги в рабочем топливе  $\omega^p$ ; для антрацитов – выход летучих веществ и теплоту сгорания  $Q_6^r$ .

**Антрациты** характеризуются:

➤ объемным выходом летучих веществ менее  $0,22 \text{ м}^3/\text{кг}$  (9 %) и теплотой сгорания  $Q_6^r$  около  $35 \text{ МДж/кг}$ ;

**Каменные угли** подразделяют на десять технологических марок:

➤ тощие ( $T$ ) –  $V^r = 9\text{--}17 \%$ ; нелетучий остаток порошкообразный, слипшийся, слабоспекшийся;

➤ слабоспекающиеся ( $CC$ ) –  $V^r = 11\text{--}32 \%$ , нелетучий остаток слабоспекшийся;

➤ отощено-спекающиеся ( $OC$ ) –  $V^r = 15\text{--}28 \%$ ; остаток спекшийся;

➤ коксовые вторые ( $K2$ ) –  $V^r = 17\text{--}21 \%$ ,  $Y = 6\text{--}11 \text{ мм}$ ;

➤ коксовые ( $K$ ) –  $V^r = 24\text{--}33 \%$ ;  $Y = 12\text{--}8 \text{ мм}$ ;

➤ коксовые жирные ( $KЖ$ ) –  $V^r = 18\text{--}33 \%$ ;  $Y = 19\text{--}25 \text{ мм}$ ;

➤ жирные ( $Ж$ ) –  $V^r = 27\text{--}35 \%$ ;  $Y = 8\text{--}20 \text{ мм}$ ;

➤ газовые жирные ( $ГЖ$ ) –  $V^r = 30\text{--}37 \%$ ;  $Y = 6\text{--}5 \text{ мм}$ ;

➤ газовые ( $Г$ ) –  $V^r = 35\text{--}43 \%$ ;  $Y = 6\text{--}15 \text{ мм}$ ;

➤ длиннопламенные ( $Д$ ) –  $V^r \geq 37 \%$ ; нелетучий остаток порошкообразный слипшийся.

**Бурые угли** подразделяют на три технологические группы: Б1 – с влажностью  $\omega_p > 40 \%$ ; Б2 –  $\omega_p = 30\text{--}40 \%$ ; Б3 –  $\omega_p < 30 \%$ .

На долю каменных углей приходится  $63,1 \%$  общих запасов углей в стране (примерно  $5000 \text{ млрд т}$ ).

По бассейнам угли характеризуются следующими показателями качества.

Угли Карагандинского бассейна относятся к маркам Ж, КЖ, К2, зольность их средняя и высокая ( $7\text{--}37 \%$ ), содержание серы  $0,5\text{--}2,5 \%$ , выход летучих  $23\text{--}24 \%$ , толщина пластического слоя  $8\text{--}30 \text{ мм}$ .

Печорский бассейн имеет запасы жирных углей для коксования. Длиннопламенные и газовые угли составляют  $40 \%$  общих запасов. Зольность углей  $12\text{--}25 \%$ . Коксовые угли отличаются низким содержанием серы ( $0,56 \%$ ) и фосфора ( $0,004\text{--}0,02 \%$ ) и высокой спекаемостью.

Угли Подмосковного угольного бассейна бурые, высокозольные (25–30 %), с высоким содержанием серы (2–6 %), с высокой влажностью. Теплота сгорания 11,3 МДж/кг.

Угли Кизеловского бассейна – газовые (слабоспекающиеся и жирные), высокозольные, с высоким содержанием серы.

Бурые угли Канско-Ачинского бассейна являются хорошим энергетическим топливом и сырьем для газификации. Зольность углей 8–16 %, влажность 30–45 %, теплота сгорания 11,7–16 МДж/кг. Большая часть всего добытого угля (73 %) используется для энергетических целей, остальная – для коксования.

Угли и антрациты Донецкого бассейна имеют зольность 14–16 %.

**Параметры качества строительных материалов** (щебня, гравия и песка) определяются соответствующими государственными стандартами (например, ГОСТ 8267-93), в которых регламентируется средний размер частиц, гранулометрический состав, форма частиц, прочность, морозостойкость, содержание пылевидных, глинистых, сернистых, органических примесей.

Щебень, гравий, песок могут использоваться либо непосредственно для строительных целей, либо как заполнитель для бетона.

По размеру зерен, например, гравий и щебень должны соответствовать одной из четырех групп: 5–10 мм; 10–20 мм; 20–40 мм; 40–70 мм; по гранулометрическому составу – содержание зерен крупнее верхнего и мельче нижнего размера должно быть не более 5 %. Государственными стандартами регламентируется содержание в массе зерен пластинчатой и игловатой формы не более 30 %.

По прочности, определяемой параметром дробимости, щебень подразделяется на ряд марок. Например, марка щебня 1200 соответствует дробимости щебня в сухом состоянии 6 %, а марка 200 – дробимости от 29 до 35 %.

По морозостойкости щебень подразделяется на семь групп в зависимости от количества циклов замораживания – оттаивания, которые выдерживает порода (15, 25, 50, 100, 150, 200, 300).

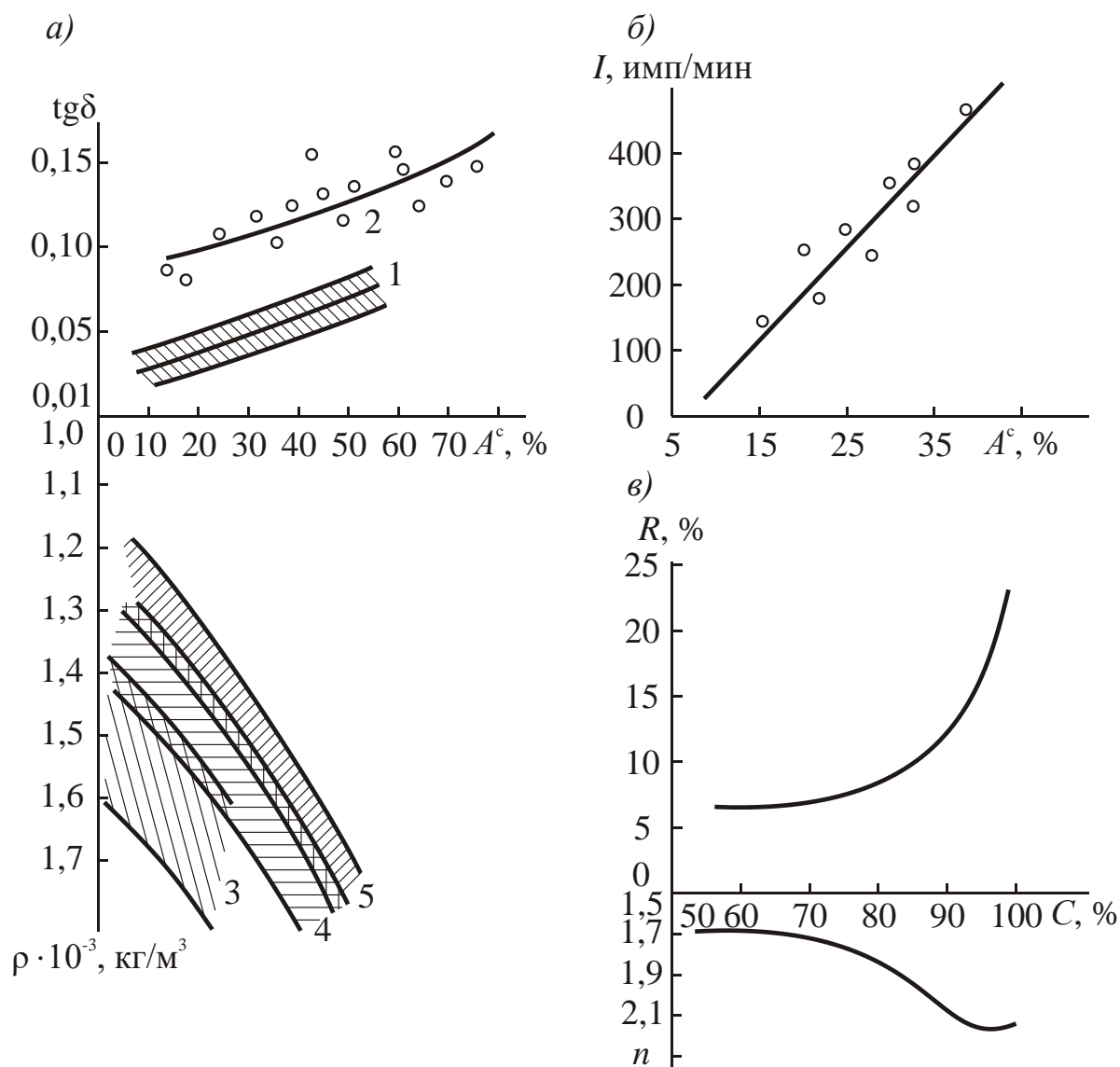
Допустимое содержание пылевидных и глинистых частиц в щебне должно составлять не более 1–3 % в зависимости от его марки.

Таким образом, оценка качества полезного ископаемого предполагает определение либо характеристик строения породы, либо физических или химических параметров, либо состава и влажности.

**Контроль зольности каменных углей.** Обычный метод контроля зольности – это сжигание в стандартных условиях (при температуре печи 815 °С) навески угля и взвешивание минерального остатка. Процесс этот длится 3 ч (ГОСТ 11022-95 / ИСО 1171-97).

Исследованиями установлено, что от зольности углей зависят практически все их физические свойства. Так, известно, что с увеличением зольности углей возрастает скорость распространения в них ультразвука, с увеличением степени метаморфизации углей повышается их диэлектрическая проницаемость и величина диэлектрических потерь, определенным образом меняется их отражательная способность (рис. 4.31).

Для некоторых угольных бассейнов (например, Подмосковного) вычислены корреляционные зависимости, по которым можно судить о зольности углей по величине их объемной массы.





$\operatorname{tg} \delta$  газовых углей Донбасса (1), бурых углей Александрийского месторождения (2) (по Э. И. Аршу), объемной массы антрацитов (3), каменных (4) и бурых углей (5) ( $a$ ), радиоактивности  $I$  углей ( $b$ ) от их зольности  $A^c$ ; коэффициента отражения  $R$  и коэффициента преломления света  $n$  от содержания углерода  $C$  в каменном угле ( $e$ )

Рис. 4.31 – Зависимость физических свойств углей от их качественных характеристик

Существует связь между зольностью углей и содержанием в них тория, %, которая может быть представлена так:

$$\text{Th} = (0,13A^c + 6,66) \cdot 10^{-4}.$$

Поэтому общая интенсивность  $I$  естественного гамма-излучения, имп./мин, зависит от зольности углей и описывается следующим уравнением:

$$I = 11,42A^c - 39,4.$$

В конструкциях датчиков зольности углей используют наиболее четкие для конкретного месторождения зависимости свойств от зольности.

**Контроль качества естественных строительных материалов** можно осуществлять непосредственно по физическим свойствам пород. При этом целесообразно иметь наименьшее число параметров, достаточных для оценки качества.

На производстве контролируют прочность строительных материалов, нарушенность блоков и т. д.

При контроле качества заполнителей для бетонов распространение получил экспресс-метод оценки прочности кусков породы неправильной формы. Метод основан на расколе куска породы между двумя конусными (заостренными) стержнями.

Установлено, что

$$\sigma_p = (0,95 \div 1,05) \sigma_{p.ck},$$

где  $\sigma_{p.ck}$  – предел прочности породы при расколе данным способом  $\left( \sigma_{p.ck} = \frac{F_p}{S_p} \right)$ ;  $F_p$  – нагрузка, при которой происходит раскол;  $S_p$  – площадь раскола куска породы.

Для контроля качества облицовочного и строительного камня в МГИ проф. В. С. Ямщиковым с сотрудниками разработана

ультразвуковая корреляционная аппаратура по дефектоскопии блоков природного камня.

### **Определение и контроль состава полезных ископаемых**

Из существующих методов определения состава наиболее распространен прямой метод химического анализа, заключающийся в отборе пород в соответствующей точке технологического звена и анализе их на содержание искоемых элементов в лаборатории. Такой метод обладает высокой точностью, но продолжителен по времени. Поэтому оперативный и тем более непрерывный контроль качества с одновременной регулировкой параметров процесса возможен только на базе физических датчиков состава.

Выделяют пять групп физических методов контроля.

**Рентгеновские методы.** В эту группу входят методы, основанные на воздействии рентгеновского излучения на горные породы. Наиболее широко используется рентгеноспектральный метод. Посредством этого метода определяют характеристический спектр вторичного рентгеновского излучения, присущий каждому химическому элементу, и таким образом устанавливают присутствие этих элементов в породе. Он применим не только в лабораторных условиях, но и непосредственно в технологическом потоке в сочетании с автоматическими пробоотборниками и механизмами подготовки проб.

**Радиационные методы.** Эти методы основаны на действии ядерных излучений на ядра и оболочки атомов различных элементов. За счет ядерных реакций возникает поток вторичных частиц, а в ряде случаев наводится вторичная радиоактивность. Интенсивность вторичных излучений служит исходной информативной характеристикой содержания того или иного элемента. К данной группе относятся также различные методы ядерных реакций на заряженных частицах. Известны, например, **альфанейтронный метод**, основанный на возбуждении ядерных реакций и создании потока нейтронов в легких элементах облучением их  $\alpha$ -частицами; **метод ядерных реакций на нейтронах**, основанный на облучении вещества потоком нейтронов и фиксации ответных потоков различных частиц; **метод ядерного гамма-резонанса** (эффект Мессбауэра), использующий явление резонансного поглощения  $\gamma$ -квантов.

**Полярографические методы** объединяют физико-химические методы контроля за содержанием полезного элемента (или, в отличие

от предыдущих методов, полезного минерала). Данные методы основаны на определении зависимости того или иного параметра тока, проходящего через электролитическую ячейку с контролируемым раствором, от приложенного к электродам напряжения. Указанное обстоятельство обуславливает необходимость предварительного растворения минералов.

**Оптико-спектральные методы.** **Эмиссионный**, основанный на регистрации характерного оптического спектра сжигаемых минералов; **адсорбционный**, основанный на определении спектров поглощения газов и жидкостей; **люминесцентный** – заключающийся в изучении спектров люминесценции вещества, возбуждаемых ультрафиолетовыми лучами.

**Методы, основанные на физических свойствах минералов.** Для простейших скалярных параметров (например, плотности) пригодна формула арифметического средневзвешенного, поэтому, измерив параметр  $X$  и зная параметры  $X_i$  составляющих компонентов для двух минеральной породы, можно непосредственно вычислить относительное объемное содержание  $V$  того или иного минерала в породе.

В случае трехкомпонентной горной породы необходимо вместо одного параметра, определенного экспериментально для данной породы, иметь два: например, дополнительно к плотности  $\rho_0$  – удельную теплоемкость породы  $c$ , которая также зависит от состава.

Действительно, так как

$$\begin{aligned}\rho_0 c_{\text{ср}} &= \rho_{01} V_1 + \rho_{02} V_2 + \rho_{03} (1 - V_1 - V_2); \\ c_{\text{ср}} &= c_1 V_1 + c_2 V_2 + c_3 (1 - V_1 - V_2),\end{aligned}$$

после преобразований получим

$$V_1 = \frac{(\rho_{0\text{ср}} - \rho_{03})(c_2 - c_3) - (c_{\text{ср}} - c_3)(\rho_{02} - \rho_{03})}{(\rho_{01} - \rho_{03})(c_2 - c_3) - (c_1 - c_3)(\rho_{0\text{ср}} - \rho_{03})}.$$

Так как на величину определяемых характеристик влияет не только состав пород, но и другие факторы (строение, температура и т. д.), одиночные измерения часто не дают нужной точности. Для повышения точности измерений используют один из следующих приемов:

➤ обеспечивают постоянство второстепенных факторов во всех измерениях;

- выбирают такие параметры измерительного поля (например, частоту), при которых влияние второстепенных факторов минимально;
- осуществляют перекрестное определение содержания полезного компонента.

В последнем случае используют не одну, а несколько зависимостей физического параметра от состава породы.

Например, для двухкомпонентной горной породы вдоль слоистости

$$\rho_0 = \rho_{01}V_1' + \rho_{02}(1 - V_1');$$

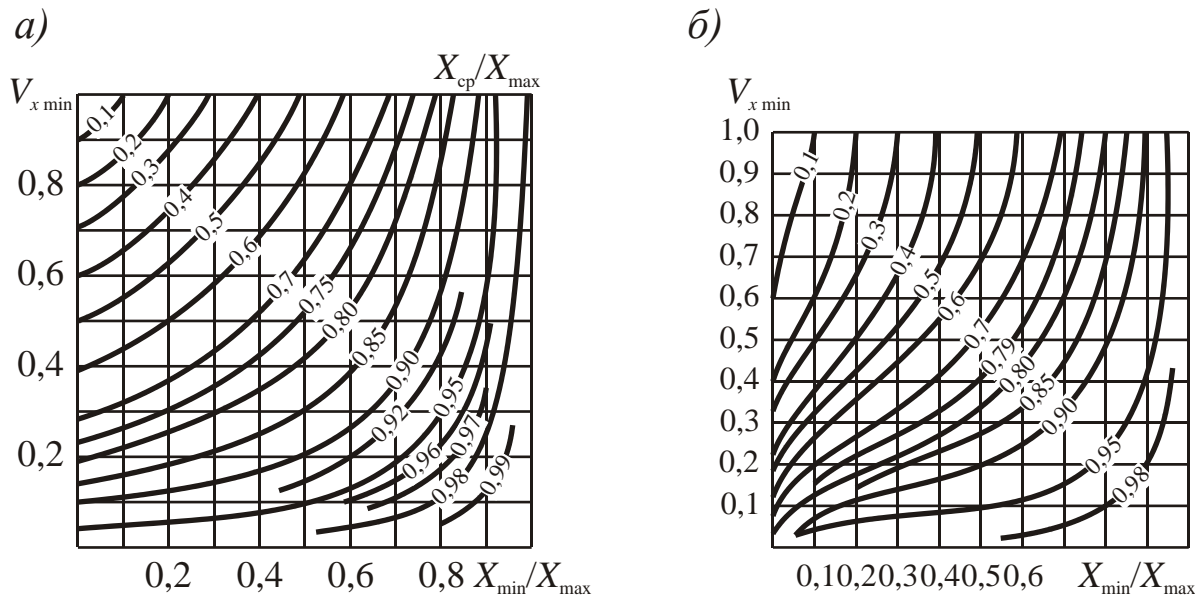
$$c_V = c_{V1}V_1'' + c_{V2}(1 - V_1'');$$

$$\lambda = \lambda_1V_1''' + \lambda_2(1 - V_1''').$$

Рассчитанные по этим уравнениям относительные объемы первого компонента  $V_1'$ ,  $V_1''$  и  $V_1'''$  отличаются друг от друга из-за влияния на  $\rho_0$ ,  $c_V$  и  $\lambda$  побочных факторов. Однако это влияние для разных свойств различно. Поэтому среднее значение  $V_{1\text{ср}}$  будет более близко к истинному.

Связь между свойствами минералов, средним значением физического параметра и объемным содержанием компонента, имеющего меньшее значение параметра, для физических характеристик может быть представлена соответствующими номограммами (рис. 4.32).

Распространены емкостные, электрические, магнитные, плотностные, термографические и другие методы определения состава полезных ископаемых.



*a* – для скалярного параметра; *б* – для тензорного параметра;  
 $X_{\min}$ ,  $X_{\max}$ ,  $X_{\text{ср}}$  – соответственно минимальное, максимальное значение параметров слагающих породу минералов и искомое среднее значение параметра породы;  $V_{x \min}$  – относительное объемное содержание в породе минерала с минимальным значением физического параметра

Рис. 4.32 – Зависимости физического параметра двухкомпонентной породы от минерального состава

**Емкостные (диэлектрические) методы** основаны на зависимости  $\epsilon_r$  и  $\text{tg}\delta$  пород от их минерального состава.

Определение  $\epsilon_r$  и  $\text{tg}\delta$  или параметров, пропорциональных им, осуществляют различными приемами:

- измерением поглощения электромагнитных волн в предварительно высушенной пробе и определением содержания компонента по тарировочному графику зависимости коэффициента поглощения от содержания компонента;

- сравнением показаний двух генераторов, один из которых подключен к эталонному образцу.

**В электрических (кондуктометрических) методах** используют зависимость удельного электрического сопротивления пород от содержания в них хорошо проводящего компонента. Так как электрическая проводимость пород особенно сильно зависит от их строения и влажности, с целью получения достоверных результатов пробы должны быть измельчены и высушены.

**Магнитные методы** основаны на зависимости магнитной проницаемости породы от содержания в ней ферромагнитных минералов. Эти методы могут быть использованы для контроля качества

измельченной магнетитовой руды на конвейерной ленте и в пульповодах.

При сравнительных измерениях одним датчиком измеряют магнитную восприимчивость  $\Delta\chi_{\text{э}}$  эталона, другим –  $\Delta\chi_{\text{м}}$  пробы. Объемное содержание полезного компонента в пробе вычисляют по формуле

$$V_{\text{м}} = \frac{V_{\text{э}}\Delta\chi_{\text{м}}}{\Delta\chi_{\text{э}}},$$

где  $V_{\text{э}}$  – объемное содержание полезного компонента в эталоне.

Предварительный обжиг некоторых руд приводит к появлению ферромагнитных компонентов. В этих случаях магнитные методы определения содержания полезного компонента можно применять для руд, не имеющих минералов-ферромагнетиков в исходном составе.

Так, обжиг халькопирита при температуре 800–900 °С приводит к образованию магнетита согласно реакции



Содержание в руде магнетита полностью соответствует содержанию в ней халькопирита. Таким образом, магнитный метод с предварительным обжигом пробы позволяет определить содержание меди в сульфидной руде. А так как существуют корреляционные связи между содержанием в полиметаллической руде меди, цинка и других металлов, этот метод в конечном счете может дать полные сведения о содержании всех полезных компонентов в руде данного месторождения.

**В плотностных методах** используют различия минералов по плотности. Так, если анализируемую руду можно представить как двухкомпонентную, причем компоненты существенно различаются по своим объемным массам  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , то можно использовать метод определения объемной массы смеси  $\rho_{\text{ср}}$ , по которому вычисляют объемное содержание полезного компонента  $V$ :

$$V = \frac{\rho_{\text{ср}} - \rho_2}{\rho_1 - \rho_2}.$$

Подобный метод контроля степени разубоживания руды нашел применение, например, на Иртышском полиметаллическом

руднике, где средняя объемная масса пород  $\rho_{\Pi}$  составляет  $2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  
а руд –  $\rho_p = 3,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

Объемное разубоживание руды  $R_{об}$ , %, определяют по формуле

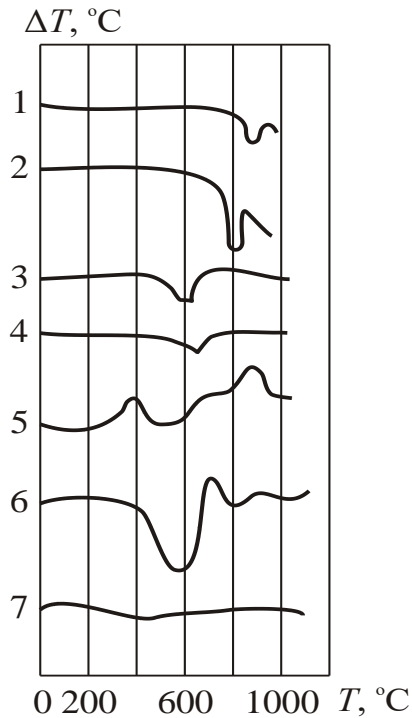
$$R_{об} = \frac{100(\rho_p - M_{\text{в}} k_p)}{V_{\text{в}} k_z (\rho_p - \rho_{\Pi})},$$

где  $M_{\text{в}}$  – масса руды в вагоне;  $k_p$  и  $k_z$  – коэффициенты соответственно разрыхления руды в вагоне и заполнения вагона (значения их определяют как средние по шахте);  $V_{\text{в}}$  – вместимость вагона.

Значения  $\rho_p$  и  $\rho_{\Pi}$  регулярно уточняют для конкретных участков, по отношению к которым определяется  $R_{об}$ .

Опыт применения такого метода в течение нескольких лет показал, что по сравнению с химическим анализом проб ошибки определения содержания меди не превышают 5 %, содержания свинца и цинка – 8 %.

Термографический метод основан на аномальных изменениях температуры нагреваемых минералов. Кривая изменения температуры большинства минералов при их нагреве носит нелинейный характер, имеет ряд областей резкого повышения или понижения. Эти эффекты связаны с экзо- или эндотермическими фазовыми превращениями минералов. Температурные аномалии для каждого минерала строго определены и постоянны (рис. 4.33). Лишь незначительное число минералов не имеет аномальных изменений температуры (термоинертны), например, полевые шпаты, измененный нефелин и др. Поэтому по характерным аномалиям на термограммах можно судить о наличии тех или иных минералов в породе.



1 – галит; 2 – сильвинит; 3 – кварц;  
4 – гематит; 5 – магнетит; 6 – сидерит;  
7 – ортоклаз;  $\Delta T$  – приrost температуры  
пробы по сравнению с температурой  
нагревателя  $T$

Рис. 4.33 – Термограммы  
некоторых минералов

### Контроль влажности

Оценка влажности пород в настоящее время наиболее часто осуществляется прямым методом – сушкой породы и последующим взвешиванием ее с целью установления массы содержащейся в породе воды.

Более перспективны физические методы оценки влажности, основанные на известных зависимостях свойств пород от влажности.

**Весовой метод** основан на законе Архимеда. Если породу взвесить в воздухе  $G$ , а затем взвесить ее в воде  $G_1$ , то при постоянном удельном весе породы  $\gamma_0$  можно определить влажность  $\omega$ :

$$\omega = \frac{\gamma_0 - \frac{G}{G - G_1}}{\gamma_0 - 1}.$$

**Тепловой метод.** Нагрев влажной пробы сопровождается парообразованием. Давление пара возрастает и стабилизируется через 1 мин после начала сушки. Величина этого давления является функцией влажности породы.

К этому методу близок **термоакустический метод** контроля влажности, при котором фиксируют не давление пара, а степень изменения частоты собственных колебаний  $f_0$  некоторой гидрофильной



мембраны, расположенной в области действия паров. Частота  $f_0$  зависит от влажности пород.

**Метод теплопроводности** основан на зависимости величины коэффициента теплопроводности от влажности пород.

**Метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР).** Если в магнитное поле мощного постоянного магнита внести воду и одновременно воздействовать на нее высокочастотным магнитным полем, то протоны воды придут в колебательное движение.

При определенной частоте переменного поля протоны переходят в состояние резонанса. Этому моменту соответствует наибольшее поглощение водой энергии магнитного поля. Если в поле магнита внести влажную породу и достичь состояния магнитного резонанса, то величина этого резонанса будет прямо пропорциональна числу протонов воды, т. е. влажности образца.

**Нейтронный метод** основан на явлении поглощения потока нейтронов атомами водорода.

Для случая, когда источником быстрых нейтронов служит полоний-бериллиевый генератор интенсивностью около  $2,5 \cdot 10^6$  част., установлена следующая зависимость между интенсивностью медленных нейтронов  $I$  (скоростью счета) и влажностью  $\omega$ , %:

$$I = 1225 + 4\omega + 1219\omega^2 - 1,53\omega^3 + 0,1\omega^4.$$

**Емкостные методы** основаны на зависимости  $\epsilon_r$  горных пород от их влажности. В этих методах в качестве датчика применяют плоский или цилиндрический конденсатор. Непосредственное соприкосновение датчика с породой не обязательно.

Так как при контроле влажности в качестве основной выступает зависимость свойств пород от содержания в них воды, зависимость этих свойств от минерального состава становится помехой и должна быть максимально уменьшена или исключена. При этом можно использовать различное влияние влажности на диэлектрическую проницаемость пород, установленную при высоких и низких частотах электромагнитного поля.

Например, определяется диэлектрическая проницаемость породы при высокой частоте, что соответствует значению  $\epsilon_{r1}$  данной практически сухой горной породы. Затем определяется диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{r2}$  при низкой частоте электрического поля.

Отношение  $\frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1}}$  связано с влажностью породы.

**Кондуктометрические влагомеры** принципиально не отличаются от подобных датчиков состава горных пород.

Существенна зависимость показаний прибора от состояния поверхности контролируемой породы, ее гранулометрического состава и надежности контакта с электродами.

Измеряя электрическую проводимость образцов пород, можно установить параметр непрерывности токопроводящих каналов  $K_{н.к}$ :

$$K_{н.к} = \frac{\sigma_{э.в}}{\sigma_{э.т}},$$

где  $\sigma_{э.в}$  – замеренная удельная электрическая проводимость влажной породы;  $\sigma_{э.т}$  – удельная электрическая проводимость породы, полученная расчетным путем по известным проводимостям слагающих породу минералов и процентному содержанию хорошо проводящих включений из условия, что включения располагаются изолированно друг от друга.

Величина  $K_{н.к}$  связана с влажностью пород и их проницаемостью. Этим же методом можно определить открытую пористость пород.

## 4.6 Физические процессы в обогащении полезных ископаемых

### Процессы контроля за отдельными технологическими операциями

**Контроль за режимом работы добычных комбайнов.** Установлено, что минимальным удельным энергозатратам при добыче угля соответствует работа комбайна при постоянном отношении скорости его подачи  $v_{п}$  к скорости резания  $v_{пз}$ :

$$\frac{v_{п}}{v_{пз}} = \text{const}.$$

Таким образом, при работе добычного комбайна необходимо поддерживать постоянное отношение  $\frac{v_{п}}{v_{пз}}$ . Скорость резания зависит от физических свойств углей, конструкции исполнительного органа

и мощности электродвигателя комбайна. С изменением свойств углей происходит изменение и момента сил резания исполнительным органом. Так, при встрече зубков комбайна с породным прослойком момент сил  $M_{\Pi}$  возрастает по следующему закону:

$$M_{\Pi} = M_y \left( 1 - \frac{n_{\Pi}}{n_o} + \frac{f_{\Pi} n_{\Pi}}{f_y n_y} \right),$$

где  $M_y$  – момент сил резания по углю;  $n_{\Pi}$ ,  $n_o$  и  $n_y$  – число линий резания соответственно по породному прослойку, общее и по углю;  $f_{\Pi}$  и  $f_y$  – коэффициенты крепости соответственно породного прослойка и угля.

В настоящее время в качестве параметра, пропорционального прочности породы, принимают усилия, возникающие в исполнительном органе, которые можно определять, например, тензодатчиками.

При добыче угля необходимо осуществлять автоматизацию направления движения комбайна. Чтобы устранить внедрение комбайна в почву или кровлю пласта и обеспечить оставление предохранительной пачки угля заданной толщины, применяют датчики, реагирующие на границу раздела двух сред – угля и породы.

В качестве таких датчиков можно применять устройства, фиксирующие различия в электрической проводимости, скорости распространения упругих волн, скорости распространения электромагнитных колебаний, поглощения  $\gamma$ -лучей в углях и вмещающих породах.

По принципу отражения ультразвуковой волны работают, например, ультразвуковые датчики, которые по времени прохождения прямого и отраженного лучей от плоскости раздела уголь – порода позволяют определить расстояние от комбайна до границы между углем и вмещающей породой.

Примерно так же решается эта задача и с помощью гамма-излучения, и радиоволновыми методами.

**Контроль упрочнения горных пород** необходим для своевременного прекращения этого процесса, а также обнаружения зон, в которых по тем или иным причинам упрочнение не происходит. Для этих целей используют физические характеристики, легко фиксируемые в натуре и в то же время различающиеся у исходного и упрочненного массивов.

Так, для контроля за толщиной ледопородного цилиндра используют различие в скоростях распространения упругих волн в мерзлой и незамерзшей породах. С увеличением толщины промерзшего слоя пород скорость распространения упругих волн возрастает.

Для этих же целей применяют термокаротаж, так как коэффициент теплопроводности пород возрастает с увеличением степени их промерзания.

Оценить качество цементации, битумизации или силикатизации массивов пород можно посредством проведения контрольных измерений их электрической проводимости. Упрочнение пород указанными методами приводит к росту их электрического сопротивления, причем величина его прямо пропорциональна толщине упрочненного слоя.

**Контроль процесса дробления горных пород.** При дроблении горных пород в дробилках осуществляют контроль за степенью их загрузки и гранулометрическим составом продуктов дроблений. Интересны методы регулирования загрузки мельниц по уровню шума в них. Разработаны различные схемы звукометрических регуляторов, позволяющих быстро оценивать состояние мельницы. Уровень шума, кроме всего прочего, определяется прочностными и упругими параметрами дробимой руды.

Для определения гранулометрического состава ферромагнитных руд используют прибор, индукционный датчик которого устанавливается под лентой конвейера. Ферромагнитная руда, находящаяся над датчиком, замыкает его магнитную цепь. ЭДС импульса зависит от магнитной проницаемости  $\mu$  материала и размера его кусков. Большие куски руды наводят импульсы большей амплитуды и длительности. Если магнитная проницаемость руды примерно постоянна, то по сигналу можно судить о ее гранулометрическом составе.

**Контроль процесса обогащения горных пород.** В процессе обогащения необходимо следить за различными характеристиками обогащаемого продукта. С этой целью используют различные ранее установленные зависимости свойств пород от состава и строения. Широко применяют акустические методы, основанные на акустических свойствах пород.

Акустическим методом можно осуществить контроль концентрации суспензий. Наиболее рационально при этом использовать

такую характеристику, как коэффициент поглощения ультразвука  $\theta$ . Очевидно, что для жидкой среды, содержащей частицы,

$$\theta = \theta_{\text{в}} + \theta_{\text{т}} + \theta_{\text{р}},$$

где  $\theta_{\text{в}}$  и  $\theta_{\text{т}}$  – коэффициенты поглощения, обусловленные соответственно внутренним трением жидкости и ее теплопроводностью;  $\theta_{\text{р}}$  – коэффициент поглощения упругих колебаний в твердых частицах, взвешенных в жидкости.

Так как  $\theta_{\text{в}} + \theta_{\text{т}} = \text{const}$ , измерив значение  $\theta$ , можно определить  $\theta_{\text{р}}$ . Последняя величина прямо пропорциональна объемному содержанию твердых частиц в пульпе.

Установлены корреляционные зависимости скорости распространения  $v_{\text{р}}$  и коэффициента поглощения  $\theta$  ультразвука от плотности  $\rho_0$  хвостов угольного шлама:

$$v_{\text{р}} = 1460 - 0,13 \cdot 10^{-3} \rho_0;$$

$$\theta = 13 + 3 \cdot 10^{-4} \rho_0;$$

и от его зольности  $A^{\text{с}}$ , %:

$$v_{\text{р}} = 1440 + 0,13 A^{\text{с}};$$

$$\theta = 65 + 0,7 A^{\text{с}}.$$

Эти зависимости можно использовать для анализа процесса флотации каменного угля.

**Радиосвязь в подземных горных выработках.** Обязательным условием полной автоматизации горного предприятия является немедленная передача необходимой информации в пределах подземных горных выработок, а также с поверхности в горные выработки, и наоборот.

Наиболее подходящим способом передачи информации является радиосвязь. Однако при этом необходимо решить задачи распространения электромагнитных волн в пределах горных выработок и через массив горных пород. Дальность распространения электромагнитных волн даже по выработкам зависит от электрических свойств пород месторождения.

При распространении сантиметровых радиоволн в прямолинейной выработке мощность излучения, поступившего на приемную

антенну от однократно отраженного луча, будет определяться коэффициентом отражения  $R$ . Например, для горизонтально поляризованных волн

$$R_{11} = \frac{\sqrt{\varepsilon_r} \sin \gamma - 1}{\sqrt{\varepsilon_r} \sin \gamma + 1},$$

где  $\varepsilon_r$  – диэлектрическая проницаемость пород, слагающих выработку;  $\gamma$  – угол встречи электромагнитной волны со стенками выработок.

При радиосвязи через массив пород основное влияние на дальность приема оказывают два фактора: поглощение электромагнитных колебаний и эффективность излучателей.

С увеличением частоты, как известно, поглощение сильно возрастает, однако при этом улучшается излучающая способность антенн. Таким образом, для конкретных условий необходимо выбирать оптимальную частоту.

Оптимальная частота радиосвязи  $f_{\text{опт}}$ , кГц, зависит от удельного электрического сопротивления пород  $\rho_{\text{э}}$ :

$$f_{\text{опт}} = \frac{3,8 \cdot 10^3 \rho_{\text{э}}}{r^2},$$

где  $r$  – дальность радиосвязи.

Дальности прямой связи через массив в зависимости от свойств пород составляют 100–1000 м, в частности в сульфидных рудах 100–150 м, в углях 150–200 м и в кварцитах 1000 м. При использовании металлических направляющих можно получить дальность распространения радиоволн, равную 5–7 км.

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
1 Основные понятия в физике горных пород.....	5
1.1 Минералы, горные породы и полезные ископаемые .....	5
1.1.1 Минералы и горные породы.....	5
1.1.2 Строение, состав и состояние пород и массивов .....	8
1.2 Физико-технические свойства горных пород.....	13
1.3 Классификации горных пород по физическим и физико-техническим свойствам .....	15
1.3.1 Классификация пород по физическим свойствам.....	15
1.3.2 Классификации пород по физико-техническим свойствам .....	18
1.4 Физические процессы в горных породах .....	23
2 Физико-технические свойства и процессы в образцах горных пород.....	25
2.1 Механические свойства образцов горных пород .....	26
2.1.1 Общие положения.....	26
2.1.2 Плотностные свойства пород .....	26
2.1.3 Напряжения и деформации в породах.....	28
2.1.4 Прочностные свойства пород.....	33
2.1.5 Пластические и реологические свойства пород.....	44
2.2 Гидравлические и газодинамические свойства образцов горных пород.....	50
2.3 Тепловые свойства горных пород и массивов.....	56
2.3.1 Теплоемкость горных пород.....	56
2.3.2 Теплопроводность и температуропроводность горных пород .....	57
2.3.3 Тепловое расширение пород .....	62
2.3.4 Термические напряжения в горных породах.....	64
2.4 Электромагнитные свойства образцов горных пород .....	66
2.4.1 Электрические свойства пород .....	66
2.4.2 Электрическая поляризация минералов и пород .....	67
2.4.3 Магнитные свойства пород .....	70
2.5 Горно-технологические параметры горных пород .....	73
2.5.1 Крепость горных пород.....	73
2.5.2 Хрупкость и пластичность пород .....	74
2.5.3 Твердость пород.....	76
2.5.4 Вязкость, дробимость и абразивность пород .....	78

3	Физико-технические свойства горных пород и процессы в массиве и разрыхленных породах .....	81
3.1	Строение, состав и состояние массивов горных пород .....	81
3.1.1	Основные особенности строения и состава горных пород в массиве .....	81
3.1.2	Физическое состояние горных пород в массиве .....	85
3.1.3	Упругие колебания в массивах горных пород.....	90
3.1.4	Распространение электромагнитных волн в массивах горных пород .....	92
3.1.5	Основные методы определения свойств породных массивов в натурных условиях.....	97
3.2	Оценка физико-технических параметров горных пород в массиве .....	111
3.2.1	Методы исследования физических свойств горных пород в массиве .....	111
3.2.2	Анализ физико-технических параметров горных пород в массиве .....	120
3.2.3	Особые явления в массивах горных пород при их разработке .....	126
3.3	Строение, состав и состояние разрыхленных горных пород .....	130
3.4	Физико-технические параметры разрыхленных горных пород .....	139
4	Физические процессы горного производства при освоении подземного пространства .....	155
4.1	Подготовка подземного массива к разработке .....	155
4.2	Механическое разрушение, дробление и транспортиро вание пород .....	164
4.3	Немеханические и комбинированные способы разрушения пород .....	195
4.4	Управление горным давлением и тепловым режимом в шахте.....	216
4.5	Способы оценки состояния породного массива и технологических параметров при освоении подземного пространства .....	229
4.6	Физические процессы в обогащении полезных ископаемых .....	258
	Содержание .....	263
	Литература.....	265



## ЛИТЕРАТУРА

1. Горная энциклопедия. В 5 т. Т. 1. Аа – лава – Геосистема / гл. ред. Е. А. Козловский. – Москва : Советская энциклопедия, 1984. – 560 с.
2. Горная энциклопедия. В 5 т. Т. 2. Геосферы – Кенай / гл. ред. Е. А. Козловский. – Москва : Советская энциклопедия, 1986. – 575 с.
3. Горная энциклопедия. В 5 т. Т. 3. Кенган – Орт / гл. ред. Е. А. Козловский. – Москва : Советская энциклопедия, 1987. – 592 с.
4. Горная энциклопедия. В 5 т. Т. 4. Ортин – Социосфера / гл. ред. Е. А. Козловский. – Москва : Советская энциклопедия, 1989. – 623 с.
5. Горная энциклопедия. В 5 т. Т. 5. СССР – Яшма / гл. ред. Е. А. Козловский. – Москва : Советская энциклопедия, 1991. – 541 с.
6. ГОСТ 21153.0-75. Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний. – Введ. 1976-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1982. – 3 с.
7. ГОСТ 21153.1-75. Породы горные. Метод определения коэффициента крепости по Протоdjяконову. – Введ. 1976-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1975. – 3 с.
8. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – Введ. 1986-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 2001. – 7 с.
9. ГОСТ 21153.3-85. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении. – Введ. 1987-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1986. – 14 с.
10. ГОСТ 21153.5-88. Породы горные. Метод определения предела прочности при срезе со сжатием. – Введ. 1989-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1988. – 7 с.
11. ГОСТ 21153.6-75 Породы горные. Метод определения предела прочности при изгибе. – Введ. 1976-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1981. – 3 с.
12. ГОСТ 21153.7-75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн. – Введ. 01.07.1976. – Москва : Изд-во стандартов, 1982. – 7 с.
13. ГОСТ 21153.8-88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. – Введ. 1989-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1988. – 15 с.

14. ГОСТ 2160-92. Топливо твердое минеральное. Методы определения плотности. – Введ. 1993–07–01. – Москва : Изд-во стандартов, 2002. – 6 с.

15. ГОСТ 25493-82. Породы горные. Метод определения удельной теплоемкости и коэффициента температуропроводности. – Введ. 01.01.1984. – Москва : Изд-во стандартов, 1983. – 6 с.

16. ГОСТ 25494-82. Породы горные. Метод определения удельного электрического сопротивления. – Введ. 01.01.1984. – Москва : Изд-во стандартов, 1983. – 7 с.

17. ГОСТ 25495-82. Породы горные. Метод определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. – Введ. 01.01.1984. – Москва : Изд-во стандартов, 1983. – 6 с.

18. ГОСТ 25499-82. Породы горные. Метод определения коэффициента теплопроводности. – Введ. 01.01.1984. – Москва : Изд-во стандартов, 1983. – 6 с.

19. ГОСТ 26450.0-85. Породы горные. Общие требования к отбору и подготовке проб для определения коллекторских свойств. – Введ. 01.07.1986. – Москва : Изд-во стандартов, 1985. – 4 с.

20. ГОСТ 26450.1-85. Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением. – Введ. 01.07.1986. – Москва : Изд-во стандартов, 1985. – 8 с.

21. ГОСТ 26450.2-85. Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации. – Введ. 01.07.1986. – Москва : Изд-во стандартов, 1985. – 16 с.

22. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – Введ. 1985–07–01. – Москва : Стандартинформ, 2005. – 17 с.

23. ГОСТ Р 50544-93. Породы горные. Термины и определения. – Введ. 01.07.1994. – Москва : Изд-во стандартов, 1993. – 47 с.

24. Обзор горно-геологических и геомеханических условий эксплуатации железорудных месторождений Горной Шории и Хакасии, склонных к горным ударам (Техническое описание) / А. В. Дерюшев, В. И. Бояркин, А. М. Нохрин [и др.] ; ВостНИГРИ. – Новокузнецк, 1988. – 41 с.

25. Определение свойств горных пород : справ. пособие / Л. И. Барон, Б. М. Логунцов, Е. З. Позин. – Москва : Госгортехиздат, 1962. – 332 с.

26. Основы горного дела : учеб. для студентов вузов, обучающ. по направлению «Горн. дело» (квалификация – бакалавр техники и технологии ) и по специальности «Физ. процессы горн. или нефтегаз. пр-ва» направления подготовки «Горное дело» / В. И. Городниченко, А. П. Дмитриев. – Москва : Горная книга, Изд-во Москов. гос. горн. ун-та, 2008. – 464 с.

27. Основы физики горных пород : учеб. для вузов / В. В. Ржевский, Г. Я. Новик. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1984. – 359 с.

28. Основы физики горных пород : учеб. для студентов горн. специальностей вузов / В. В. Ржевский, Г. Я. Новик. – 5-е изд. – Москва : Кн. дом «ЛИБРОКОМ», 2010. – 360 с.

29. Свойства горных пород и методы их определения / Е. И. Ильницкая, Р. И. Тедер, Е. С. Ватолин, М. Ф. Кунтыш ; под. ред. М. М. Протоद्याконова. – Москва : Недра, 1969. – 392 с.

30. Термическое разрушение горных пород / А. П. Дмитриев, С. А. Гончаров, Л. Н. Германович. – Москва : Недра, 1990. – 255 с.

31. Термодинамические процессы : учеб. для студентов вузов, обучающ. по специальности «Физ. процессы горн. или нефтегаз. пр-ва» направления подготовки «Горное дело» / С. А. Гончаров, К. И. Наумов. – Москва : Горная книга, 2009. – 397 с.

32. Структуры и текстуры магматических и метаморфических горных пород : учеб.-методич. комплекс / А. И. Чернышев ; Томск. гос. ун-т, Ин-т дистанц. образования. – Электрон. текстовые, граф. дан. и прикладн. прогр. (25 Mb). – Томск, 2007. – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM) : 12 см ; в контейнере 14×13 см. – Систем. требования : ПК Intel Celeron 1,8 GHz, 512 Mb; Windows XP; SVGA, SB, DVD-ROM 8x.

33. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна : справочник / Г. Г. Штумпф, Ю. А. Рыжков, В. А. Шаламанов, А. И. Петров. – Москва : Недра, 1994. – 447 с. : ил.

34. Физические методы разрушения горных пород. Ч. 1. Тепловые методы разрушения : учеб. пособие / А. Д. Дмитриев, Г. А. Янченко ; Моск. горн. ин-т. – Москва, 1980. – 64 с.

35. Физические методы разрушения. Ч. 2. Электрические комбинированные методы разрушения : учеб. пособие / А. П. Дмитриев, К. И. Наумов, Г. А. Янченко ; Моск. горн. ин-т. – Москва, 1982. – 84 с.

36. Экспериментальная физика и механика горных пород / А. Н. Ставрогин, Б. Г. Тарасов. – Санкт-Петербург : Наука, 2001. – 228 с.

37. Электромагнитные процессы : учеб. для студентов вузов, обучающ. по специальности «Физические процессы горного нефтегазового производства» направления подготовки «Горное дело» / О. М. Гридин, С. А. Гончаров. – Москва : Изд-во Моков. гос. горн. ун-т, Горная книга, 2009. – 498 с.

**МАСАЕВ Юрий Алексеевич  
БУДНИКОВ Павел Михайлович  
МАСАЕВ Владислав Юрьевич**

**ФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД  
(ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ГОРНЫХ ПОРОД)**

*Учебное пособие*

Редактор О. А. Салтымакова

Подписано в печать 12.05.2025. Формат 60×84/16  
Бумага офсетная. Гарнитура «TimesNewRoman». Уч.-изд. л. 16,75  
Тираж 100 экз. Заказ.....  
Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28  
Издательский центр Кузбасского государственного технического  
университета имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4 а