

А.И.СПИВАК

А.Н.ПОПОВ

**МЕХАНИКА
ГОРНЫХ
ПОРОД**

А. И. СПИВАК,
А. Н. ПОПОВ

МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

*Допущено
Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебника для студентов вузов,
обучающихся по специальности
«Бурение нефтяных и газовых скважин».*



МОСКВА
«НЕДРА»
1975

Спивак А. И., Попов А. Н. Механика горных пород. М., «Недра», 1975, 200 с.

В учебнике рассмотрены механические свойства осадочных пород при бурении нефтяных и газовых скважин, методы определения показателей свойств, механизм деформирования и разрушения пород, а также основные факторы, влияющие на деформирование и разрушение пород при статическом и динамическом нагружении. Изложены вопросы энергетики и основные закономерности разрушения пород долотами и вопросы устойчивости стенок скважин во время бурения. Большое вниманиеделено механизму изнашивания вооружения шарошечных долот. Приведены сведения о буримости горных пород.

Учебник предназначен для студентов нефтяных вузов, нефтепромысловых факультетов, других вузов, изучающих курс «Механика горных пород». Он представляет интерес для инженерно-технических работников и научных сотрудников, занимающихся технологией бурения и проектированием породоразрушающих инструментов.

Табл. 37, ил. 90, список лит.—120 назв.

Рецензенты: 1) кафедра бурения Тюменского индустриального института; 2) д-р техн. наук Н. Н. Павлова

С 30803—124
043(01)—75 146—75

ПРЕДИСЛОВИЕ

Первое издание учебника «Механика горных пород» вышло в свет в 1967 году. Учебник был написан впервые. За это время читателями были высказаны пожелания, касающиеся содержания материала и последовательности его изложения; в 1972 году введена специальность 0211 «Бурение нефтяных и газовых скважин», для которой курс «Механика горных пород» является профилирующим.

Кроме того, за последние годы различными научно-исследовательскими организациями выполнен большой объем исследований в области механики горных пород применительно к условиям бурения глубоких скважин в различных нефтегазоносных районах страны. Все это нашло отражение в новом издании книги.

В отличие от первого издания в предлагаемом учебнике значительно расширены теоретические вопросы курса. Поэтому для сохранения объема не включен раздел «Новые методы разрушения горных пород». Материал книги изложен с учетом того, что курс «Механика горных пород» читается перед курсом «Технология бурения глубоких скважин».

При написании учебника использованы материалы исследований, выполненных во ВНИИБТ, в лаборатории геомеханики глубинных зон земной коры института геологии и разработки горючих ископаемых (ИГиРГИ) под руководством докторов техн. наук Р. М. Эйгелеса, Н. Н. Павловой и канд. техн. наук Б. В. Байдюка; материалы исследований МИНХиГП и Грозненского нефтяного института, выполненные под руководством д-ров техн. наук В. В. Симонова, Л. Е. Симонянца и др. В учебнике в значительном объеме использованы материалы исследований, выполненных и в других отраслевых научно-исследовательских и учебных институтах, в частности, материалы исследований отраслевой лаборатории бурения Уфимского нефтяного института.

Авторы выражают глубокую благодарность проф. М. Р. Мавлютову и доц. Н. М. Филимонову, просмотревшим рукопись, чьи замечания и советы помогли устраниТЬ ряд недостатков и повысить качество изложения материала, а также рецензентам д-ру техн. наук Н. Н. Павловой, проф. В. Е. Копылову, докторам В. Г. Абатурову, Г. С. Грязнову, В. П. Дворниченко, представившим развернутые рецензии с конкретными предложениями по улучшению учебника, которые были учтены при доработке рукописи.

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Предмет механики горных пород

Механика горных пород изучает механические процессы в горных породах при сооружении в них различных горных выработок.

Одновременно с механическими процессами в горных породах имеют место и механические процессы в металле инструмента, обуславливающие его износ. Характер и интенсивность этих процессов зависят от свойств пород. Поэтому изучением изнашивания металлов, обусловленного взаимодействием их с горной породой, также занимается механика горных пород.

Теоретические основы механики горных пород базируются на фундаментальных положениях физики твердого тела и механики сплошных сред, которые дают представления о сущности механических процессов в твердых телах и приближенное математическое описание этих процессов. Механика сплошных сред описывает не реальные тела, а их приближенные модели, которые включают в себя лишь наиболее существенные признаки (свойства) реальных тел. Горные породы являются специфичными твердыми телами, математические модели которых очень сложны.

Аналитическое описание механических процессов даже в простых моделях очень громоздко. Поэтому в механике горных пород широко используются частные решения, в основе которых лежат гипотезы о применимости простых моделей тела, удовлетворительно представляющих в конкретном случае горную породу, а также физическое моделирование и экспериментальное исследование механических процессов.

В этой книге вопросы механики горных пород изложены применительно к условиям сооружения буровых скважин — горных выработок цилиндрической формы, у которых при сравнительно малых поперечных размерах (доли метра) длина (глубина) достигает больших величин (нескольких тысяч метров).

Буровая скважина отличается от других горных выработок (шахт, штолен, штреков и т. п.) еще и тем, что она сооружается с помощью специальных инструментов без доступа человека к забою. Это затрудняет изучение механических свойств горных пород в условиях их залегания.

Механические процессы при бурении скважин охватывают, как правило, небольшие объемы породы, находящиеся в усло-

виях всестороннего сжатия под действием горного (в результате вышележащих пород), гидростатического (в результате столба жидкости в скважине) и пластового давлений.

Большое влияние на механические процессы в горных породах, а также на изнашивание инструмента оказывает среда, находящаяся в скважине.

В связи со спецификой изучаемых вопросов эта книга и названа «Механика горных пород» (применительно к процессам разрушения при бурении скважин).

§ 2. Задачи курса и его значение

Девятым пятилетним планом развития народного хозяйства СССР на 1970—1975 гг. предусмотрены высокие темпы добычи нефти и газа.

Решающая роль в выполнении этих задач была отведена разведочному и эксплуатационному бурению. Успешное развитие буровых работ связано с усовершенствованием существующих способов бурения и оптимизацией технологических процессов.

В настоящее время для разрушения горных пород при бурении используются буровые долота различных типов и размеров. Над усовершенствованием современных буровых долот и разработкой новых конструкций работают научно-исследовательские и проектно-конструкторские организации. Эта работа требует глубоких знаний закономерностей разрушения пород, изнашивания долот и методов описания этих закономерностей.

Эти знания необходимы для правильного выбора породоразрушающего инструмента (долота) и режима его работы в горных породах разнообразного минералогического состава и строения. Кроме того, при бурении скважины должна быть обеспечена устойчивость вскрытых пород, для чего необходимо знать условия устойчивости стенок скважины.

Таким образом, основной задачей курса является изучение закономерностей деформирования и разрушения горных пород и методов описания этих процессов применительно к бурению скважин.

Для успешного освоения курса механики горных пород необходимо предварительно изучить некоторые геологические дисциплины, общие курсы физики, химии и другие инженерные дисциплины в объеме, предусмотренном учебным планом нефтепромысловых специальностей вузов. Предполагается также, что читатель знаком хотя бы в общих чертах с технологией бурения скважин и с конструкцией породоразрушающих инструментов.

Вопросы механики горных пород применительно к процессам разрушения их при бурении скважин получили свое развитие благодаря трудам советских ученых, профессоров Л. А. Шрейнера, В. С. Федорова, Е. Ф. Эпштейна и др.

Некоторые вопросы механики горных пород применительно к процессам разрушения при бурении скважин до сих пор являются дискуссионными и требуют дальнейших исследований.

§ 3. Методы разрушения горных пород и способы бурения скважин

В зависимости от вида энергии, реализуемой непосредственно на разрушение горной породы, выделяют ряд методов разрушения пород. К основным относятся механический, электрофизический и термический. Главным при бурении на нефть и газ пока является метод механического воздействия на породу с помощью породоразрушающих инструментов в виде буровых долот и коронок.

Механический метод разрушения пород реализуется в случае вращательного и ударного способов бурения. При вращательном способе бурения порода разрушается вращающимся долотом, находящимся в постоянном контакте с породой. Вращение долота может осуществляться ротором с поверхности земли или забойным двигателем, установленным непосредственно над долотом.

В случае ударного способа бурения долоту сообщается вертикальное возвратно-поступательное движение и скважина как бы выдалбливается ударами долота.

Сочетание ударного и вращательного способов дает ударно-вращательный, или комбинированный, способ бурения.

С другими методами разрушения горных пород можно ознакомиться по первому изданию данного учебника или в книге [70].

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

§ 1. Строение твердых тел

Горные породы являются твердыми телами. Поэтому, прежде чем приступить к их изучению, необходимо познакомиться с наиболее общими вопросами строения и свойств твердых тел.

В твердых телах атомы, ионы или молекулы располагаются в определенном порядке, который повторяется во всех трех измерениях. Такие тела называются *кристаллическими*, а определенный порядок размещения в них частиц вещества — *кристаллической структурой*.

При выделении твердого вещества из раствора или расплава образуются правильные многогранники, очертания которых повторяют кристаллическую структуру вещества. Такие образования получили название *кристаллов*. Однако условия свободного роста отдельных кристаллов в природе создаются сравнительно редко. В основном кристаллизация вещества начинается одновременно в огромном количестве точек (центров кристаллизации). Растущие кристаллы соприкасаются друг с другом, и при дальнейшем их росте кристаллизующееся вещество заполняет пространство между кристаллами, которые превращаются в кристаллические зерна, или *кристаллиты*, неправильной формы. Образующееся при этом твердое тело является поликристаллическим. Однако и в этих случаях в пределах отдельных зерен полностью сохраняется кристаллическая структура вещества.

Примеры кристаллических структур галита (каменной соли) и алмаза приведены на рис. 1. Из рис. 1 видно, что кристаллическая структура напоминает пространственную решетку, в узлах которой находятся материальные частицы вещества (утолщенными линиями выделены элементарные ячейки). Изображение кристаллической структуры в виде решеток весьма наглядно и получило широкое распространение в технической литературе.

Геометрическая теория структуры кристаллов создана французским кристаллографом О. Браве в 1848 г. В зависимости от соотношения размеров элементарной кристаллической ячейки (рис. 2) различают семь кристаллических систем (сингоний):

- 1) кубическая $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$, $a=b=c$;
- 2) гексагональная $\alpha=\gamma=90^\circ$, $\beta=120^\circ$, $a=b \neq c$;
- 3) тетрагональная $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$, $a=c \neq b$;

- 4) тригональная $a = \beta = \gamma \neq 90^\circ$, $a = b = c$;
- 5) ромбическая $a = \beta = \gamma = 90^\circ$, $a \neq b \neq c$;
- 6) моноклинная $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma \neq 90^\circ$, $a \neq b \neq c$;
- 7) триклиническая $\alpha \neq \beta \neq \gamma = 90^\circ$, $a \neq b \neq c$.

Если материальные частицы находятся только в вершинах элементарной ячейки, то такая решетка называется простой

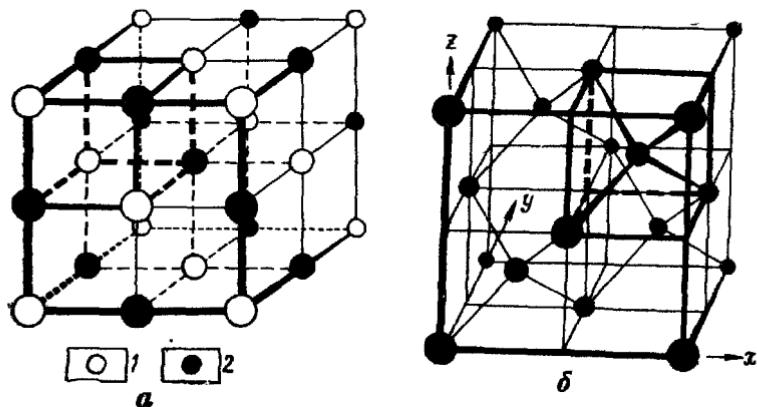


Рис. 1. Структура кристаллов галита *а* и алмаза *б*:
1 — ионы Na ; 2 — ионы Cl

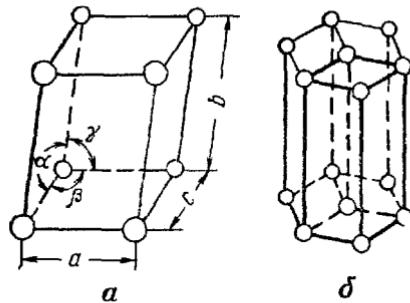


Рис. 2. Элементы кристаллической структуры:

а — элементарная кристаллическая ячейка;
б — гексагональная решетка, состоящая из трех элементарных ячеек

(1), объемноцентрированная (2) и гранецентрированная (3); гексагональная (см. рис. 2, б) — три простейшие ячейки составляют шестигранную призму (4); тетрагональные — простая (5) и объемноцентрированная (6); тригональная — простая (7); ромбическая — простая (8), с центрированным базисом (9), объемноцентрированная (10) и гранецентрированная (11); моноклинные — простая (12) и с центрированным базисом (13); триклиническая — простая (14).

Решетки Браве не исчерпывают все структуры кристаллов. Сложные структуры кристаллов могут быть образованы сово-

или примитивной. Размещение частиц в центре оснований ячейки дает базцентирированную решетку, в центре всех граней — гранецентрированную решетку, в центре ячейки на пересечении пространственных диагоналей — объемноцентрированную решетку. Примеры таких решеток приведены на рис. 3. Существует 14 элементарных кристаллических решеток (решеток Браве): кубическая — простая (1), объемноцентрированная (2) и гранецентрированная (3); гексагональная (см. рис. 2, б) — три простейшие ячейки составляют шестигранную призму (4); тетрагональные — простая (5) и объемноцентрированная (6); тригональная — простая (7); ромбическая — простая (8), с центрированным базисом (9), объемноцентрированная (10) и гранецентрированная (11); моноклинные — простая (12) и с центрированным базисом (13); триклиническая — простая (14).

Решетки Браве не исчерпывают все структуры кристаллов. Сложные структуры кристаллов могут быть образованы сово-

купностью нескольких решеток Браве, как бы вдавинутых одна в другую.

Кристаллы различают не только по типу решетки, но и по виду частиц, находящихся в узлах решетки.

Ионные решетки. В узлах располагаются ионы, имеющие положительный или отрицательный заряд. Ионные решетки

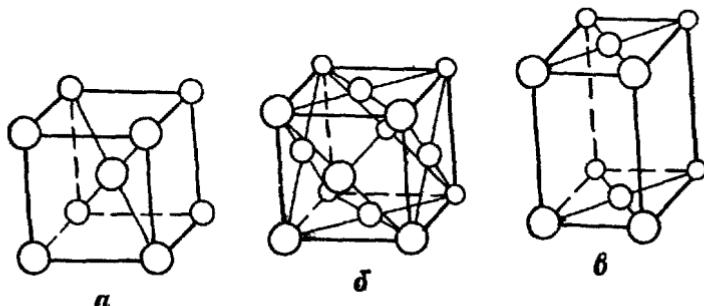


Рис. 3. Примеры решеток Браве:

а — кубическая объемноцентрированная; б — кубическая + гранецентрированная; в — ромбическая с центрированным базисом

присущи неорганическим соединениям (галогены, щелочные металлы, силикаты и т. п.). Классическим примером ионной решетки является пространственная решетка кристаллов каменной соли, в узлах которой чередуются положительные ионы натрия Na^+ и отрицательные ионы хлора Cl^- (см. рис. 1).

Атомные решетки. В узлах решетки находятся атомы. Примером атомной решетки являются решетки кристаллов алмаза С, сфалерита (цинковой обманки) ZnS и др.

Молекулярные решетки. В узлах решетки — обособленные, электрически нейтральные молекулы. Такие решетки характерны главным образом для органических соединений.

В природе очень часто встречаются смешанные решетки — ионно-молекулярные и др.

Небольшую группу составляют аморфные тела, не имеющие кристаллической структуры. По своей природе они скорее относятся к переохлажденным, очень вязким жидкостям, чем к твердым телам. Для минералов (составных частей горных пород) характерны ионно-молекулярные, ионные и атомные решетки.

Более подробно со строением твердых тел можно познакомиться в работах [22, 95].

§ 2. Силы связи в пространственных решетках

Силы связи в пространственных решетках имеют электростатическую природу и обусловлены взаимодействием, главным образом, валентных электронов атомов.

Сила есть мера механического взаимодействия тел.

В статических условиях сила взаимодействия F двух частиц определяется величиной градиента потенциальной энергии U одной частицы относительно другой

$$F = \frac{dU}{dr},$$

где r — расстояние между взаимодействующими частицами.

Из курса физики известно, что чем меньше энергия системы, тем более устойчиво ее состояние. Этот принцип можно проиллюстрировать следующим примером. На горизонтальном основании (рис. 4) находятся два одинаковых предмета A и B . Очевидно, при встряхивании основания потеряет устойчивость и упадет предмет A . Предмет B не изменит своего положения относительно стола. Потенциальная энергия предметов относительно основания соответственно равна

$$U_A = mgh_A; \quad U_B = mgh_B,$$

где m — масса предмета;

g — ускорение силы тяжести;

h_A и h_B — расстояния от основания до центров тяжести соответствующих предметов.

Поскольку $h_A > h_B$, то $U_A > U_B$. Положение предмета B соответствует минимальному значению его потенциальной энергии

относительно основания $U_B = U_{\min}$. При падении предмета A его потенциальная энергия также снижается до величины U_{\min} , и он займет наиболее устойчивое положение.

В соответствии с современным представлением о строении вещества взаимодействие между атомами обусловлено особенностями строения их внешних электронных оболочек. По мере заполнения внешней электронной оболочки увеличивается энергия связи электронов с атомом. Например, энергия отрыва электрона от атома натрия, во внешней оболочке которого всего один электрон, 5,14 эВ, от атома фтора, во внешней оболочке которого не хватает лишь одного электрона, 17,42 эВ, а от атома неона, имеющего заполненную внешнюю оболочку, 21,56 эВ (96). С другой стороны, в соответствии с принципом перехода от менее устойчивого состояния к более устойчивому атомы, имеющие незаполненную электронную оболочку, стремятся заполнить ее присоединением электронов. Энергия присоединения электрона атомом фтора равна

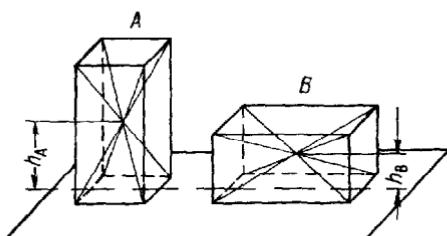


Рис. 4.

—4,08 эВ; атомом натрия — —0,2 эВ; а атомом неона — + 1,2 эВ. Положительная величина энергии свидетельствует о том, что самопроизвольного присоединения электрона к атому неона произойти не может.

Заполнение внешней оболочки возможно только захватом электрона атомом. Чем больше энергия отрыва электрона и чем меньше энергия присоединения, тем более активно атом присоединяет чужой электрон и тем труднее отдает свой. Использование двух величин для характеристики активности элементов неудобно. В связи с этим вводится понятие относительной электроотрицательности. Существует целый ряд методов ее определения, дающих близкие результаты. Например, по Полингу относительная электроотрицательность некоторых элементов представлена в табл. 1.

Таблица 1

Элемент	K	Na	Ca	Mg	Al	Si	H	C	N	Cl	O	F
Относительная электроотрицательность	0,8	0,9	1,0	1,2	1,5	1,8	2,1	2,5	3,0	3,0	3,5	4,0

Относительная электроотрицательность элементов, а также групп элементов, находящихся в узлах кристаллической решетки, оказывает решающее влияние на вид связи в твердом теле.

Ионная схема взаимодействия частиц. При резко различной электроотрицательности происходит практически полный захват электрона атомом с высокой электроотрицательностью (как правило, металлоидом) у атома с низкой электроотрицательностью (металла) с образованием ионов, имеющих противоположные заряды. Математически энергия взаимодействия между двумя одновалентными ионами описывается электрическим уравнением

$$U = -\frac{e^2}{r} + \frac{e^2}{r^n}, \quad (1)$$

где e — заряд электрона;

r — расстояние между ионами;

n — показатель степени ($n=8 \div 12$).

Первое слагаемое уравнения (1) — энергия притяжения ионов, второе слагаемое — энергия отталкивания ядер и электронов. Для наглядности уравнение (1) на рис. 5 представлено графически. Из рис. 5 видно, что зависимость потенциальной энергии взаимодействия ионов от расстояния имеет минимум,

соответствующий определенному расстоянию (r_0) между ионами. Очевидно, сила взаимодействия между частицами

$$F = -\frac{dU}{dr} \Big|_{r=r_0} = 0,$$

т. е. два иона находятся в равновесном состоянии. При попытке сблизить два иона ($r < r_0$) возникает сила отталкивания, а при попытке раздвинуть ($r > r_0$) — сила притяжения. Следовательно, появление внутренних сил, противостоящих внешнему воздействию, непосредственно связано с изменением расстояния между частицами.

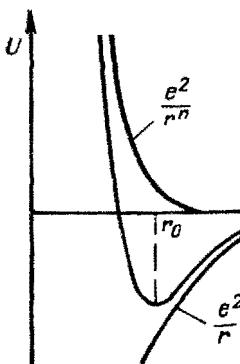


Рис. 5. Энергия как функция расстояния между ионами

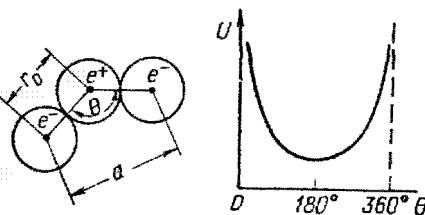
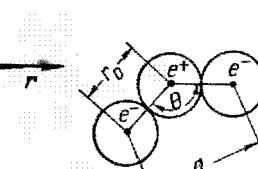


Рис. 6. Схема и график зависимости U от θ для системы трех ионов

Рассмотрим систему из трех ионов (рис. 6). Энергия системы без учета сил отталкивания ядер и электронов равна

$$U = -\frac{2e^+e^-}{r_0} - \frac{(e^-)^2}{a}. \quad (I.2)$$

Из рис. 6 видно, что энергия взаимодействия трех частиц достигает минимума при $a=2r$, что соответствует условию $\theta=180^\circ$.

Для большего числа ионов получим, что минимум потенциальной энергии системы соответствует определенному пространственному распределению частиц. Искажение формы пространственного распределения ионов под действием внешних сил так же, как и изменение расстояний между ионами, повлечет за собой рост потенциальной энергии системы и, как следствие, возникновение внутренних сил, уравновешивающих действие внешних сил.

Ковалентная схема взаимодействия. Ковалентная связь между атомами характерна для элементов, близких по электропотенциальности с частично не заполненной внешней электронной оболочкой. Согласно принципу Паули в определенном квантовом состоянии могут находиться лишь два электрона с противоположными спинами. Застройка оболочки идет сначала одиночными электронами, и лишь после заполнения всех уров-

ней имеет место заполнение этих уровней вторыми, противоположными по спину электронами.

При образовании связи могут взаимодействовать противоположные по спину одноименные электроны внешних оболочек двух атомов, как бы взаимно заполняющие незаполненные уровни взаимодействующих атомов. Такое взаимодействие называется **обменным**. Количество и пространственное распределение ковалентных связей определяется количеством неспаренных электронов и строением внешней электронной оболочки. Последнее определяет жесткое пространственное распределение связей.

Зависимость энергии взаимодействия от расстояния между атомами имеет качественно такой же вид, как и при взаимодействии ионов (см. рис. 5). Наличие минимума потенциальной энергии взаимодействия говорит о существовании определенного равновесного расстояния между атомами, т. е. вновь, как и при ионной схеме взаимодействия, приходим к выводу о правильной внутренней структуре вещества — кристаллической структуре.

При разной электроотрицательности происходит как бы стягивание электронов в сторону более электроотрицательного атома. В этом случае имеет место так называемая полярная ковалентная связь, имеющая некоторые свойства ионной связи. Чем больше разность электроотрицательностей атомов, тем больше степень полярности их связей, тем в большей степени проявляются свойства ионной связи и тем в меньшей степени проявляются свойства ковалентной связи.

Схема взаимодействия в металлических кристаллах. Атомы металлов имеют лишь частично заполненную внешнюю электронную оболочку. С точки зрения электроотрицательности для них логична ковалентная схема взаимодействия. Большое число незаполненных уровней приводит к тому, что в процессе образования кристалла в заполнении внешней электронной оболочки каждого атома принимают участие электроны большего числа соседних атомов, что приводит как бы к обобществлению валентных электронов большой группы атомов и далее в пределах всего кристалла. Именно с обобществлением электронов связывают в настоящее время такие специфические особенности металлических кристаллов, как высокую электропроводность, теплопроводность и пластичность.

Схема взаимодействия в молекулярных кристаллах. В пространственных решетках, в узлах которых находятся молекулы, силы связи обусловлены поляризацией молекул. Молекула нейтральна, однако полной симметрии распределения зарядов нет. Асимметрия зарядов обусловлена или строением самой молекулы (например, молекула воды представляет собой диполь), или вызывается внешним воздействием. Электрические поля взаимодействующих молекул взаимно усиливаются и обуславливают устойчивую связь.

Слоистые кристаллы. Такие кристаллы отличаются тем, что в одном слое (плоскости) может быть ионная связь, а между слоями — молекулярная. Такие кристаллы, например глинистый минерал монтмориллонит, легко разрушаются по плоскостям, параллельным слоям. В других слоистых минералах, таких, как слюда и тальк, отдельные слои связаны более прочно при помощи металлических ионов.

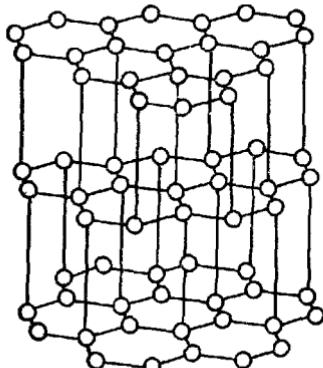


Рис. 7. Схема строения графита (линиями показаны направления ковалентных связей).

ловливает формирование слоев, сравнимо слабо связанных между собой вследствие эффекта отталкивания атомов, окружающих два атома, дающих связь между плоскостями.

§ 3. Теоретическая и реальная прочность твердых тел

Способность твердого тела оказывать сопротивление разрушению от внешнего воздействия (механического, теплового и др.) называется его прочностью. При разрушении рвутся связи между частицами кристаллической структуры без изменения агрегатного состояния вещества.

Под теоретической прочностью понимается прочность твердого тела, имеющего идеальную кристаллическую структуру. Оценку величины теоретической прочности проведем на примере каменной соли. Расчетная схема приведена на рис. 8. В первом приближении учтем только взаимодействие ближайших, противоположно заряженных ионов, лежащих по обе стороны плоскости I—I. Далее принимаем, что зависимость энергии взаимодействия от величины r вблизи положения равновесия описывается выражением

$$U = -U_0 + A \cos \frac{2\pi r}{r_0}, \quad (I.3)$$

где r_0 — равновесное расстояние между ионами при отсутствии внешней нагрузки.

Сила притяжения между парой ионов

$$F = \frac{dU}{dr} = \frac{2\pi A}{r_0} \sin \frac{2\pi r}{r_0}. \quad (I.4)$$

Из выражения (I.4) видно, что сила притяжения достигнет максимального значения при $\sin(2\pi r/r_0) = 1$, что соответствует увеличению расстояния между ионами до $r = 1,25 r_0$.

Силу взаимодействия между парой ионов получим дифференцированием выражения (1)

$$F = \frac{e^2}{r^2} - n \frac{e^2}{r^{n+1}}. \quad (I.5)$$

Второе слагаемое в выражении (1.5) отбрасываем, так как величина его много меньше, чем величина первого слагаемого. Тогда, подставляя значение r , получаем

$$F = \frac{e^2}{(1,25r_0)^2}$$

или в пределах плоскости кристалла, равной 1 см^2 , на которой имеется $N = 1/r_0^2$ пар ионов,

$$p = NF = \frac{e^2}{1,56r_0^4}. \quad (I.6)$$

Подставляя значения заряда электрона $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ СГСЭ и расстояние между атомами в решетке $r_0 = 2,8 \cdot 10^{-10}$ см, получаем в дин/см²

$$p = 0,24 \cdot 10^{12}$$

или в кгс/мм²

$$p \approx 2400.$$

Найденная величина приближенно характеризует теоретическую прочность кристалла. Измеряемая на практике реальная (техническая) прочность в сотни и тысячи раз меньше теоретической. В частности, для каменной соли она составляет всего 0,5 кгс/мм². Несоответствие между теоретической и реальной прочностью твердых тел замечено давно. Было сделано предположение о несовершенстве кристаллической структуры, которое позднее подтвердилось электронномикроскопическими наблюдениями. Кроме того, в специальных условиях получили бездефектные металлические кристаллы («усы»), прочность которых близка к теоретической.

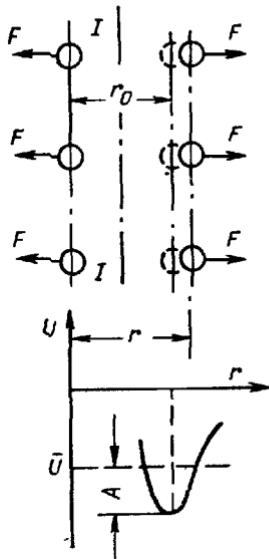


Рис. 8. Расчетная схема теоретической прочности кристалла

§ 4. Дефекты кристаллической структуры

В работе [95] к несовершенствам кристаллической структуры отнесены тепловые колебания, точечные, линейные и поверхностные дефекты.

Тепловые колебания. При обычной температуре частицы, находящиеся в узлах кристаллической решетки, совершают негармонические колебания с амплитудой до 5—10% от межатомного расстояния. Следовательно, частицы обладают опреде-

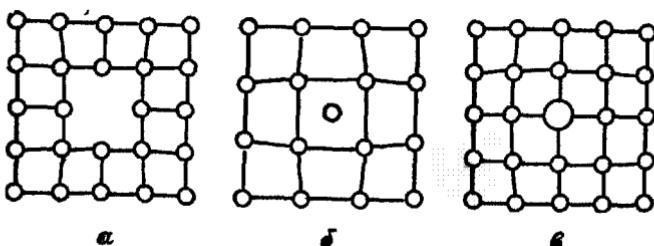


Рис. 9. Точечные дефекты кристаллической структуры:
а — вакансия; б — внедрение в междоузлие; в — внедрение чужеродного атома (иона)

ленной кинетической энергией, которая не учитывалась в процессе рассмотрения идеальной структуры твердых тел. Чем выше температура, тем выше величина кинетической энергии, тем больше ее влияние на строение и свойства твердого тела. Кинетическая энергия всегда положительна и при сложении с потенциальной энергией взаимодействия частиц приводит к увеличению равновесного расстояния между частицами (тепловое расширение тел), а при определенной величине — и к разрушению структуры (плавление тел).

Точечные дефекты. К точечным дефектам кристаллической структуры относятся вакансии — незанятые узлы кристаллической решетки, смещения атомов (ионов) в междоузлие и внедрение в решетку чужеродных атомов или ионов (рис. 9). Во всех случаях имеет место искажение кристаллической структуры и местное ее ослабление.

Линейные дефекты (дислокации). Простейшими видами линейных дефектов являются краевая (рис. 10, а), образованная краем оборванной плоскости, и винтовая (рис. 10, б), образованная смещением одной части кристалла относительно другой, дислокации. Под влиянием внешней нагрузки дислокации легко перемещаются, активно взаимодействуют между собой и с другими дефектами структуры.

Поверхностные дефекты. Поверхность твердого тела может рассматриваться как дефект кристаллической структуры, поскольку частицы на поверхности тела находятся в ином энерге-

тическом состоянии, чем частицы внутри тела. Разность между энергией связи частиц, находящихся на поверхности тела, и энергией связи частиц, расположенных внутри тела, называется *поверхностной энергией*.

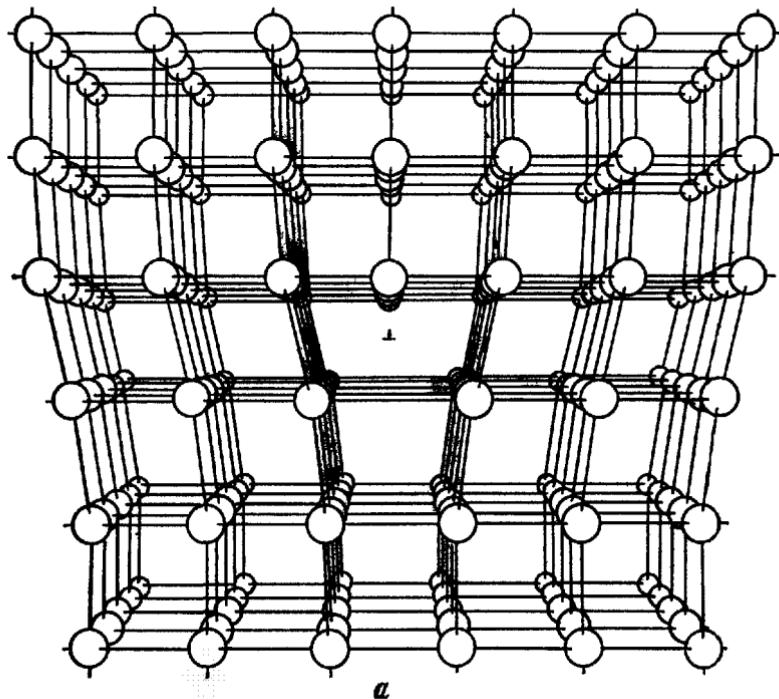
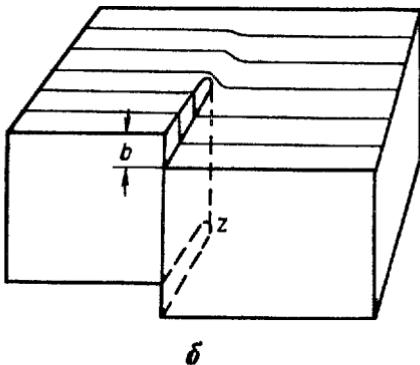


Рис. 10. Краевая *a* и винтовая *б* дислокации:
b — параметр дислокации, *z* — ось дислокации



Обычно твердые тела поликристаллические. Поверхности, разделяющие кристаллиты (зерна), образуют внутренние поверхности твердого тела и также могут рассматриваться как двумерные дефекты кристаллической структуры. Силы связи

между кристаллитами твердого тела имеют также электростатическую природу. Однако для твердых тел и особенно для горных пород [56] характерно весьма значительное ослабление сил связи на границах зерен. Для мономинеральных пород степень ослабления этих связей зависит от характера поверхностей кристаллитов, степени разориентировки их кристаллических решеток и концентрации примесей между кристаллитами. Чем больше относительная разориентировка кристаллической структуры соприкасающихся кристаллитов, тем больше ослабление связей между ними. Кроме того, дислокации, движущиеся под влиянием напряжений в твердом теле, создаваемых внешними силами, могут накапливаться на границах зерен и создавать местные концентрации напряжений, достаточные для образования микротрешин. Еще более существенно ослабление связей в полиминеральных породах, обусловленное дополнительно к перечисленным выше причинам различными параметрами решеток, а в некоторых случаях и различными видами связи в решетках контактирующих кристаллитов.

Наличие дислокаций, их свойства и характер взаимодействия с другими дефектами кристаллической структуры оказывают решающее влияние на поведение твердых тел при приложении к ним внешней нагрузки. Однако сложность происходящих явлений не позволяет предсказать прочность твердых тел, а позволяет лишь с качественной стороны понять сущность деформирования и разрушения твердых тел.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

§ 1. Общие понятия и определения

Механические свойства твердого тела — это его специфические признаки, проявляющиеся при механических процессах, обусловленные природой и внутренним строением тела.

В главе I было показано, что внутренние силы сопротивления твердого тела действию внешних сил возникают как следствие изменения расстояния между узлами решетки или искажения кристаллической решетки, т. е. только в том случае, если внешние силы совершают работу по отношению к рассматриваемому телу.

Деформированием называется процесс изменения размеров или формы твердого тела под действием внешних сил.

Деформация — это относительная величина изменения размера или формы тела.

Сопротивление тела деформированию в рассматриваемой точке принято характеризовать величиной отношения равнодействующей внутренних сил \vec{dR} , действующих на элементарной площадке сечения, проведенного через рассматриваемую точку, к площади dS этой площадки, т. е.

$$\frac{\vec{dR}}{dS} = \vec{p}.$$

Величина \vec{p} векторная и называется *напряжением* в точке.

Обратимой (упругой) деформация называется в том случае, если при устранении внешних сил размеры и форма тела полностью восстанавливаются. Причем внутренние силы совершают работу, равную работе внешних сил, но обратную по знаку.

Необратимой (пластической) деформация называется в том случае, когда с устранением внешних сил форма и размеры тела не восстанавливаются, а работа деформирования больше работы восстановления.

Если при деформировании происходит разрыв связей, то тело разрушается.

Разрушение называется *хрупким*, если необратимая деформация, предшествующая разрушению, практически отсутствует. Этот вид разрушения происходит с минимальным поглощением энергии и при скоростях распространения разрушения, близких к скорости звука.

Разрыв — второй вид разрушения, который наступает при уменьшении сечения образца твердого тела в результате деформирования до исчезающе малых размеров. Хрупкое разрушение и разрыв являются предельными видами разрушения.

Пластическое разрушение — это промежуточный вид, который характеризуется значительной необратимой деформацией, препятствующей разрушению, и явно выраженной поверхностью разрушения. Более полные сведения о видах разрушения можно найти в работе [46].

Прочностью называется способность твердого тела противостоять разрушению от действия внешних сил. Прочность твердых тел характеризуется величиной предельных напряжений, которые могут быть созданы в опасном сечении тела.

Точного математического описания состояния твердого тела нет, поэтому невозможно аналитически охарактеризовать и его механические свойства. Поведение твердого тела в конкретных условиях деформирования может быть описано:

- 1) методом натурных испытаний;
- 2) методом испытания моделей;
- 3) расчетным методом.

Первый метод наиболее надежный, но очень трудоемкий и не всегда доступный. Второй метод менее надежен, но более доступен. Он основан на применении теорий подобия и моделирования в механике и широко применяется при проведении лабораторных экспериментов. Третий метод наименее трудоемкий, но и наименее точный. В основе его лежат показатели механических свойств материала тела, определяемые в стандартных условиях, и гипотеза о математической модели, описывающей это тело в данных условиях.

Все твердые тела по особенностям деформирования и разрушения в стандартных условиях делятся на группы. Для каждой группы тел создается идеализированная математическая модель, включающая в себя лишь наиболее существенные признаки группы. Основными моделями являются:

- 1) упругое тело, или тело Гука (деформируется упруго до разрушения);
- 2) пластическое тело, или тело Сен-Венана (до величины предельных напряжений деформируется упруго, а далее деформируется пластически при постоянной нагрузке);
- 3) вязкое тело, или тело Ньютона (деформируется подобно вязкости жидкости).

Используя комбинации основных моделей, можно получить модели практических всех твердых тел.

Показателями механических свойств твердых тел называются параметры основных моделей. В соответствии с видами моделей выделяют группы упругих, пластических, реологических (вязкостных) и прочностных показателей свойств.

В процессе испытаний можно получить ответы лишь на вопросы, как проявляют себя механические свойства тела в условиях опыта и какая идеализированная модель наиболее полно соответствует данному телу. Поэтому не следует отождествлять механические свойства тел и их показатели.

Рассмотренные методы не могут подменить необходимость изучения сущности процессов деформирования и разрушения твердых тел, так как только в этом случае возможно правильное применение частных решений, основанных на эксперименте, и прогнозирование поведения тел в условиях, для которых нет экспериментальных данных или невозможно провести эксперимент.

§ 2. Напряжения и деформации в упругой области деформирования твердого тела

Упругое твердое тело представляет собой наиболее простую и широко распространенную модель твердого тела, основными признаками которого являются отсутствие остаточной деформации с устранением внешней нагрузки, а также равенство работы деформирования при нагружении и работы восстановления при разгрузке.

Напряженное состояние в точке. Упругое тело находится под действием внешней нагрузки. Для определения напряжений в какой-либо точке тела вырезаем элементарный куб в окрестностях этой точки (рис. 11). Заменяем действие отброшенных частей тела напряжениями на гранях куба, которые разложим по направлениям, параллельным осям координат. Напряжения, перпендикулярные граням куба, называются нормальными и обозначаются σ , а действующие в плоскости грани — касательными и обозначаются τ с соответствующими индексами, как показано на рис. 11.

Из условия равновесия элементарного куба можно записать, что

$$\tau_{xz} = \tau_{zx};$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy};$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}.$$

Таким образом, напряженное состояние в точке описывается шестью компонентами напряжения σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xz} , τ_{yz} , τ_{xy} .

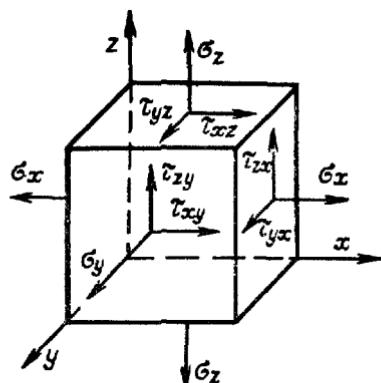


Рис. 11. Компоненты напряжений

Можно подобрать ориентацию граней куба так, что $\sigma_{xz}=0$, $\sigma_{yz}=0$ и $\sigma_{xy}=0$. Тогда грани куба образуют главные площадки, а соответствующие нормальные напряжения, называемые главными нормальными напряжениями, обозначаются σ_1 , σ_2 , σ_3 , причем

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3.$$

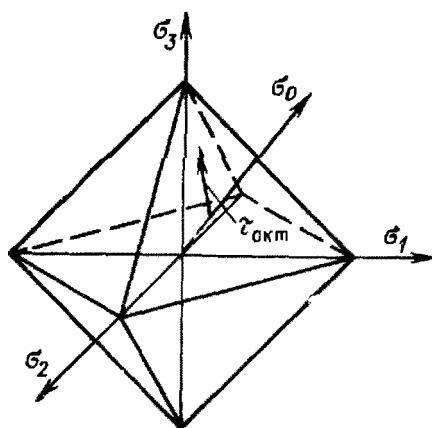
Сумма нормальных напряжений, действующих по трем взаимно перпендикулярным направлениям, есть величина постоянная

$$\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\sigma_0, \quad (\text{II.1})$$

где σ_0 — среднее нормальное напряжение (гидростатическое давление в точке).

По аналогии с главными нормальными напряжениями рассматриваются и главные касательные напряжения, которые

действуют на площадках, соответственно делящих пополам угол между двумя главными напряжениями и проходящими через третье главное напряжение. Величина их может быть определена по формулам



$$\tau_1 = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2};$$

$$\tau_2 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}; \quad (\text{II.2})$$

$$\tau_3 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}.$$

Рис. 12. Октаэдрические напряжения

Октаэдрические напряжения. На направлениях главных напряжений, как на осях координат, построим элементарный октаэдр (рис. 12).

Нетрудно показать, что нормальные напряжения, действующие на гранях октаэдра, равны

$$\sigma_{\text{окт}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \sigma_0, \quad (\text{II.3})$$

а величина касательных напряжений на гранях октаэдра

$$\tau_{\text{окт}} = \frac{2}{3} \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2}$$

или через главные нормальные напряжения

$$\tau_{\text{окт}} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2}. \quad (\text{II.4})$$

В общем случае

$$\tau_{\text{окт}} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)}. \quad (\text{II.5})$$

Величину, пропорциональную касательным октаэдрическим напряжениям и равную

$$\sigma_t = \frac{3}{\sqrt{2}} \tau_{\text{окт}}, \quad (\text{II.6})$$

называют интенсивностью касательных напряжений. Подстановкой значения $\tau_{\text{окт}}$ из выражения (II.4) нетрудно показать, что при одноосном напряженном состоянии (например, растяжении)

$$\sigma_t = \sigma_1.$$

Таким образом, напряженное состояние в точке может быть охарактеризовано двумя компонентами σ_0 и $\tau_{\text{окт}}$ или σ_0 и σ_t .

Обобщенный закон Гука. Деформации растяжения или сжатия принято обозначать ϵ . Согласно закону Гука, величина деформации прямо пропорциональна нормальному напряжению

$$\epsilon = \sigma/E, \quad (\text{II.7})$$

где E — модуль деформации при растяжении и сжатии (модуль Юнга).

Пусть твердое тело находится под действием внешней нагрузки. Напряжения на гранях куба (с ребром равным l), выделенного в объеме тела, распределены равномерно. Тогда под влиянием вертикальной составляющей нагрузки высота куба изменится на величину Δl . Соответствующая деформация

$$\epsilon'_z = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma_z}{E}.$$

Пропорционально величине Δl изменятся и поперечные размеры куба, т. е. $\epsilon'_x = -\mu \epsilon'_z$ и $\epsilon'_y = -\mu \epsilon'_z$. Соответственно под влиянием горизонтальных составляющих нагрузки будет иметь место деформация

$$\epsilon'_x = \frac{\sigma_x}{E}; \quad \epsilon'_y = -\mu \epsilon'_x; \quad \epsilon'_z = -\mu \epsilon'_x$$

и

$$\epsilon''_y = \frac{\sigma_y}{E}; \quad \epsilon''_x = -\mu \epsilon''_y; \quad \epsilon''_z = -\mu \epsilon''_y,$$

где μ — коэффициент Пуассона, связывающий деформации, вызванные одной силой, по взаимно перпендикулярным направлениям.

Просуммируем величины соответствующих деформаций и получим полную деформацию по заданному направлению

$$\varepsilon_z = \varepsilon'_z + \varepsilon''_z + \varepsilon'''_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu (\sigma_x + \sigma_y)].$$

Наряду с деформациями растяжения или сжатия будут иметь место деформации сдвига, величины которых пропорциональны соответствующим касательным напряжениям. Деформация сдвига характеризует искажение первоначальной формы тела, обозначается γ и равна $\operatorname{tg} \alpha$ (рис. 13).

Тогда в соответствии с обозначениями рис. 13

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G}, \quad (\text{II.8})$$

где G — модуль деформации при сдвиге.
Причем

Рис. 13. Деформация сдвига

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}. \quad (\text{II.9})$$

Под действием внешних сил изменяются не только линейные размеры и форма тела, но и его объем. Причем объемная деформация ε_V пропорциональна среднему напряжению

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\sigma_0}{K}, \quad (\text{II.10})$$

где V — начальный объем элементарного куба;

ΔV — изменение объема элементарного куба под действием внешней нагрузки;

K — модуль объемной деформации,

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)}. \quad (\text{II.11})$$

В итоге получаем систему из семи уравнений, связывающих напряжение и деформации элементарного объема упругой модели твердого тела:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu (\sigma_y + \sigma_z)]; & \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu (\sigma_x + \sigma_z)]; & \gamma_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{G}; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu (\sigma_x + \sigma_y)]; & \gamma_{zx} &= \frac{\tau_{zx}}{G}; \\ \varepsilon_V &= \frac{1}{3K} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z). \end{aligned} \quad (\text{II.12})$$

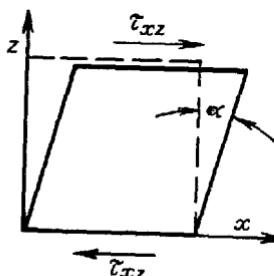


Рис. 13. Деформация сдвига

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}. \quad (\text{II.9})$$

Под действием внешних сил изменяются не только линейные размеры и форма тела, но и его объем. Причем объемная деформация ε_V пропорциональна среднему напряжению

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\sigma_0}{K}, \quad (\text{II.10})$$

где V — начальный объем элементарного куба;

ΔV — изменение объема элементарного куба под действием внешней нагрузки;

K — модуль объемной деформации,

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)}. \quad (\text{II.11})$$

В итоге получаем систему из семи уравнений, связывающих напряжение и деформации элементарного объема упругой модели твердого тела:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu (\sigma_y + \sigma_z)]; & \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu (\sigma_x + \sigma_z)]; & \gamma_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{G}; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu (\sigma_x + \sigma_y)]; & \gamma_{zx} &= \frac{\tau_{zx}}{G}; \\ \varepsilon_V &= \frac{1}{3K} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z). \end{aligned} \quad (\text{II.12})$$

Система уравнений (II.12) называется *обобщенным законом Гука*. Из уравнений (II.12), (II.9) и (II.11) видно, что упругое тело характеризуется двумя показателями упругих свойств — модулем Юнга и коэффициентом Пуассона. Однако полученные уравнения справедливы только для упругого изотропного тела. В природе же часто приходится иметь дело с анизотропными телами, что существенно усложняет их математическое описание.

§ 3. Напряжения и деформации в пластической области деформирования

Закон Гука соблюдается лишь в области малых деформаций. Дальнейшее деформирование приводит или к хрупкому разрушению тел, или к потере пропорциональности между напряжениями и деформациями, а также к появлению пластических (необратимых) деформаций.

Сложный характер зависимостей между деформациями и напряжениями приводит к тому, что нет общей теории поведения твердого тела в условиях пластического деформирования.

В работе [74] для решения большинства задач механики горных пород рекомендуется исходить из следующих общих положений.

1. Направления главных нормальных напряжений и главных деформаций удлинения совпадают.

2. Объемная деформация пропорциональна среднему нормальному напряжению и описывается уравнением (II.10). Причем деформация изменения объема связана с средним нормальным напряжением линейно вплоть до момента разрушения. Если напряженное состояние является всесторонним равномерным сжатием, то материал не разрушается, как бы велико ни было приложенное давление.

3. Главные касательные напряжения пропорциональны главным деформациям сдвига

$$\frac{\gamma_1}{\tau_1} = \frac{\gamma_2}{\tau_2} = \frac{\gamma_3}{\tau_3} = \frac{\kappa}{G}, \quad (\text{II.13})$$

где κ — модуль plasticичности;

G — модуль деформации при сдвиге в пределах пропорциональности.

Модуль plasticичности является величиной переменной, зависящей от напряженного состояния в точке. В общем случае уравнения (уравнения Генки), связывающие деформации и напряжения, имеют вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x - \frac{\varepsilon_V}{3} &= \frac{\kappa}{2G} (\sigma_x - \sigma_0); \quad \gamma_{xy} = \frac{\kappa}{G} \tau_{xy}; \\ \varepsilon_y - \frac{\varepsilon_V}{3} &= \frac{\kappa}{2G} (\sigma_y - \sigma_0); \quad \gamma_{yz} = \frac{\kappa}{G} \tau_{yz}; \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

$$\varepsilon_z - \frac{\varepsilon_V}{3} = \frac{\kappa}{2G}(\sigma_z - \sigma_0); \quad \gamma_{zx} = \frac{\kappa}{G} \tau_{zx}.$$

В большинстве задач механики горных пород величиной ε_V можно пренебречь (условие несжимаемости). В этом случае условие

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \quad (\text{II.15})$$

позволяет решать некоторые задачи, не прибегая к уравнениям Генки.

К моменту перехода от упругого деформирования к пластическому в твердом теле достигается предельное напряженное состояние. Очень важно иметь показатель, однозначно описывающий этот момент при любых условиях нагружения. Попытки отыскать такой универсальный показатель не увенчались успехом.

Рассмотрим условия перехода твердых тел из упругого состояния в пластическое, сформулированные исходя из опытных данных.

Условие Треска — Сен-Венана. Французский инженер Треск высказал предположение, что состояние пластичности наступает тогда, когда во всех точках среды максимальное касательное напряжение достигает определенного значения. Позднее Сен-Венан математически описал это условие

$$2|\tau_2| = |\sigma_1 - \sigma_3| = \sigma_s, \quad (\text{II.16})$$

где σ_s — предел текучести материала при простом растяжении.

Из выражения (II.16) следует, что главное промежуточное напряжение не влияет на состояние текучести, что не всегда подтверждается опытом.

Условие Мизеса. В соответствии с условием Мизеса состояние пластичности наступает тогда, когда удельная упругая энергия формоизменения достигнет определенной величины, характерной для материала данного тела.

Удельная упругая энергия деформирования

$$U = \frac{1}{2}(\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3) = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}{2E}. \quad (\text{II.17})$$

Представим величину U как сумму энергий упругого изменения объема U_0 и упругого изменения формы U_Φ .

Удельная упругая энергия изменения объема

$$U_0 = \frac{1}{2} \varepsilon_V \sigma_0 = \frac{3(1-2\mu)}{2E} \sigma_0^2. \quad (\text{II.18})$$

Тогда удельная упругая энергия изменения формы

$$U_\Phi = U - U_0. \quad (\text{II.19})$$

После подстановки в выражение (II.19) выражений (II.17) и (II.18), а также соответствующих преобразований получим

$$U_{\Phi} = \frac{3}{4} \frac{\tau_{\text{окт}}^2}{G}. \quad (\text{II.20})$$

Из выражения (II.20) следует, что момент достижения предельного состояния при переходе от упругого состояния твердого тела к пластическому однозначно определяется величиной октаэдрических касательных напряжений.

Условие Мизеса учитывает все три главных напряжения и в случае трехосного напряженного состояния дает несколько лучшие результаты, чем условие Треска-Венана.

§ 4. Теории прочности

Испытания прочности материалов твердых тел проводятся обычно в стандартных условиях. В конкретных случаях расчета на прочность напряженное состояние твердого тела может быть самым различным. Существующие теории прочности позволяют с некоторыми допущениями вести прочностные расчеты, опираясь на показатели прочности или пластичности, полученные при стандартных испытаниях, не прибегая к специальным испытаниям в сложном напряженном состоянии.

Современные теории прочности создавались главным образом для конструкционных материалов, а поэтому в качестве предельного состояния принимается достижение предела текучести твердого тела и лишь для хрупких тел — предела прочности.

Классические теории прочности. Первые исследования в области прочности материалов, связанные с именами Леонардо да Винчи и Галилея, привели к созданию **первой теории прочности**, согласно которой предельное состояние достигается тогда, когда достигнет предельного значения одно из главных напряжений:

$$\begin{aligned} & -\sigma_n < \sigma_1 < \sigma_n; \\ & -\sigma_n < \sigma_2 < \sigma_n; \\ & -\sigma_n < \sigma_3 < \sigma_n, \end{aligned} \quad (\text{II.21})$$

где σ_n — предельное значение напряжений, полученное при одновременном растяжении (+) или сжатии (-).

Согласно **второй теории прочности** предельное состояние достигается тогда, когда достигнет предельного значения величина главной деформации. Используя обобщенный закон Гука, это условие можно записать через нормальные напряжения

$$\begin{aligned} & -\sigma_n < \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) < \sigma_n; \\ & -\sigma_n < \sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3) < \sigma_n; \\ & -\sigma_n < \sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2) < \sigma_n. \end{aligned} \quad (\text{II.22})$$

Как первая, так и вторая классические теории прочности не нашли применения и имеют лишь историческое значение.

Третья теория прочности основана на гипотезе, что в процессе разрушения или достижения пластического состояния решающую роль играют касательные напряжения. Условие прочности имеет вид

$$\begin{aligned} &-\tau_n < \tau_1 < \tau_n; \\ &-\tau_n < \tau_2 < \tau_n; \\ &-\tau_n < \tau_3 < \tau_n. \end{aligned} \quad (\text{II.23})$$

Выразим касательные напряжения через главные по формулам (II.2) и получим

$$\begin{aligned} &-\sigma_n < \sigma_2 - \sigma_3 < \sigma_n; \\ &-\sigma_n < \sigma_1 - \sigma_3 < \sigma_n; \\ &-\sigma_n < \sigma_1 - \sigma_2 < \sigma_n. \end{aligned} \quad (\text{II.24})$$

Из выражения (II.24) и (II.16) видно, что третья теория прочности совпадает с условиями Треска—Сен-Венана. Эта теория хорошо согласуется с экспериментом при двухосном напряженном состоянии и нашла широкое применение в технике.

Четвертая, или энергетическая, теория прочности основана на предположении, что разрушение или достижение пластического состояния наступает тогда, когда удельная энергия формоизменения достигает предельного значения. Через главные нормальные напряжения это условие записывается в следующем виде

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \leq 2\sigma_n^2. \quad (\text{II.25})$$

Аналогично было сформулировано условие Мизеса. Запишем выражение (II.20) через главные напряжения

$$U_\Phi = \frac{1}{12G} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]. \quad (\text{II.26})$$

Для случая одноосного растяжения будем иметь $\sigma_1 = \sigma_n$, $\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = 0$. Тогда предельная величина энергии формоизменения равна

$$U_{\Phi n} = \frac{1}{6G} \sigma_n^2. \quad (\text{II.27})$$

Согласно формулировке теории прочности $U_{\Phi n} \geq U_\Phi$. Подставляем значения U_Φ и $U_{\Phi n}$ из выражений (II.26) и (II.27) в это неравенство и получаем выражение (II.25). Следовательно, энергетическая теория прочности полностью совпадает с условием Мизеса. В литературе она известна как теория Губера — Мизеса — Генки. Эта теория прочности широко используется в настоящее время, как и третья теория прочности.

Классические теории прочности применимы только для изотропных материалов с одинаковым сопротивлением разрушению или пределом текучести при одноосных испытаниях на растяжение и сжатие. Горные породы не являются таковыми. Однако однозначность характеристик предельного состояния, получаемая при использовании этих теорий, очень удобна при анализе напряженного состояния в твердых телах. Последнее и определило использование третьей и четвертой теорий прочности в механике горных пород для качественного анализа.

Теория прочности Мора.

В отличие от классических, эта теория учитывает как различные значения сопротивления разрушению при одноосном растяжении и сжатии, так и очевидный факт, что разрушение или состояние пластичности зависит от нормальных напряжений. Эта теория прочности широко применяется в горном деле и строительстве. Характеристикой твердого тела, согласно теории прочности Мора, является зависимость

$$\tau_n = f(\sigma_{cp}), \quad (II.28)$$

где τ_n — предельное значение касательных напряжений,

$$\tau_n = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}; \quad (II.29)$$

σ_{cp} — среднее напряжение,

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}. \quad (II.30)$$

Из выражения (II.30) видно, что теория прочности Мора не учитывает главное промежуточное напряжение.

Для определения вида зависимости (II.28) необходимо провести ряд независимых испытаний, например:

1) растяжение

$$\sigma_1 > 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0;$$

2) сдвиг

$$\sigma_1 = -\sigma_3, \sigma_2 = 0;$$

3) сжатие

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 < 0.$$

Огибающая к кругам Мора, построенным по результатам испытаний (рис. 14), является графическим видом зависимости (II.28).

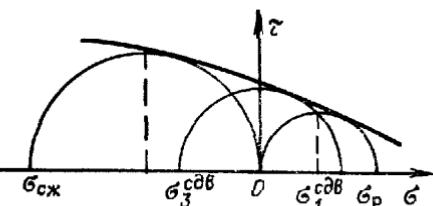


Рис. 14. Огибающая к кругам Мора

В работе [29] отмечается перспективность замены величины $\tau_{\text{п}}$ на величину $\tau_{\text{п.окт}}$, а величины $\sigma_{\text{ср}}$ на величину σ_0 . Тогда условие (II.28) примет вид

$$\tau_{\text{п.окт}} = f(\sigma_0).$$

Так как $\tau_{\text{п.окт}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_{\text{пп}}$, то можно записать условие прочности в виде

$$\sigma_{\text{пп}} = f(\sigma_0), \quad (\text{II.31})$$

где $\sigma_{\text{пп}}$ — предельная интенсивность касательных напряжений; σ_0 — среднее напряжение, определяемое по формуле (II.3).

Это условие прочности учитывает все три главных напряжения. По предложению Филоненко-Бородича, зависимость (II.31) названа обобщенным условием прочности Мора.

§ 5. Некоторые особенности деформирования и разрушения реальных твердых тел

Упругий гистерезис и упругое последействие. Для упругих твердых тел закон Гука выполняется лишь приближенно. В частности, модуль деформации при нагружении несколько меньше

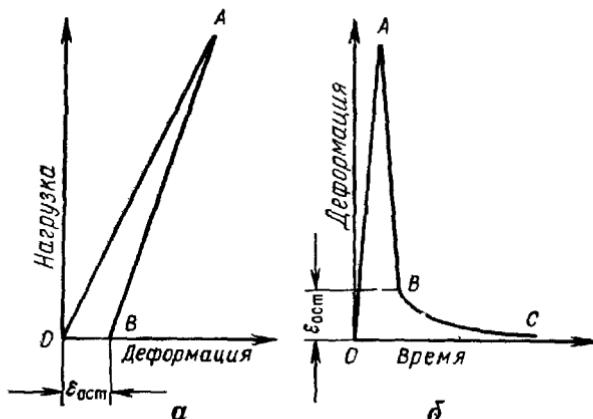


Рис. 15. Упругий гистерезис а и упругое последействие б:

OA — нагружение; AB — разгрузка; BC — уменьшение остаточной деформации во времени

ше, чем при разгрузке, что в случае быстрой разгрузки обуславливает появление остаточной деформации $\epsilon_{\text{ост}}$ (рис. 15, а). Это явление называется *упругим гистерезисом*. Однако с течением времени остаточная деформация исчезает и твердое тело восстанавливает свои размеры (рис. 15, б). Это явление называется *упругим последействием*.

Явления упругого гистерезиса и упругого последействия легко объясняются с точки зрения дефектов кристаллической структуры. Напряжения в твердом теле вызывают направленное движение дислокаций и их перераспределение в соответствии с принципом получения наименьшей упругой энергии деформирования. При быстром снятии нагрузки обратное перераспределение дислокаций идет с быстро уменьшающимся градиентом напряжений и отстает во времени от разгрузки. Последнее проявляется как появление остаточных внутренних напряжений, а следовательно, и остаточной деформации (упругий гистерезис). С течением времени вследствие энергии внутренних напряжений происходит перераспределение дислокаций, внутренние напряжения уменьшаются, уменьшается и остаточная деформация (упругое последействие).

Явления упругого гистерезиса и упругого последействия показывают на наличие зависимости деформации от времени, т. е. на проявление вязкостных свойств твердых тел. В этом случае модель твердого тела можно представить как комбинацию идеально упругого (тела Гука) и вязкого тел. Допустим, что вязкое тело идеально и подчиняется закону внутреннего трения Ньютона

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt},$$

где η — коэффициент вязкости;
 t — время.

При параллельном деформировании двух тел получим выражение

$$\tau = G\gamma + \eta \frac{d\gamma}{dt}, \quad (\text{II.32})$$

которое представляет собой уравнение твердо-вязкого тела (тела Кельвина—Фохта).

Если к рассматриваемому телу к моменту времени $t=0$ приложено напряжение τ_0 , то решение уравнения (II.32) имеет вид

$$\gamma = \frac{\tau_0}{G} \left[1 - \exp \left(- \frac{Gt}{\eta} \right) \right] = \gamma_0 \left[1 - \exp \left(- \frac{Gt}{\eta} \right) \right]. \quad (\text{II.33})$$

Из уравнения (II.33) видно, что при постоянном напряжении деформация приближается к предельному значению γ_0 по экспоненциальному закону.

Если к моменту времени $t=0$ тело деформировано на величину γ_0 и $\tau=0$ (нагрузка снята), то решение уравнения (II.32) примет вид

$$\gamma = \gamma_0 \exp \left(- \frac{Gt}{\eta} \right), \quad (\text{II.34})$$

т. е. деформация стремится к нулю по экспоненциальному закону.

Релаксация и ползучесть. Если деформировать твердое тело на некоторую величину и оставить его в напряженном состоянии в течение длительного времени так, чтобы величина деформации не изменялась, то напряжения внутри тела самопроизвольно уменьшаются (рассосутся). Это явление называется *релаксацией* напряжений.

В тех случаях, когда на твердое тело нагрузка действует длительное время, наблюдается постепенное увеличение дефор-

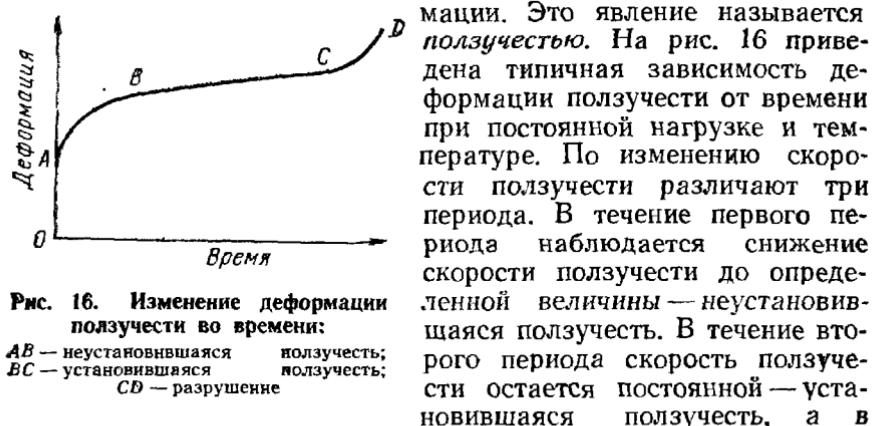


Рис. 16. Изменение деформации ползучести во времени:

AB — неустановившаяся ползучесть;
BC — установившаяся ползучесть;
CD — разрушение

мации. Это явление называется *ползучестью*. На рис. 16 приведена типичная зависимость деформации ползучести от времени при постоянной нагрузке и температуре. По изменению скорости ползучести различают три периода. В течение первого периода наблюдается снижение скорости ползучести до определенной величины — неустановившаяся ползучесть. В течение второго периода скорость ползучести остается постоянной — установившаяся ползучесть, а в

третьем периоде скорость ползучести возрастает и деформирование заканчивается разрушением твердого тела.

Явления релаксации напряжений и ползучести в настоящее время могут быть объяснены с точки зрения несовершенства кристаллической структуры твердого тела. Выше отмечалась легкая подвижность дефектов кристаллической структуры. Деформированное тело обладает определенным избытком потенциальной энергии. Эта энергия является источником движения дислокаций и постепенной перестройки внутренней структуры тела в сторону понижения ее потенциальной энергии. Последнее проявляется при неизменной деформации как рассасывание напряжений (релаксация), а при неизменной нагрузке — как ползучесть. В реальных условиях деформирования релаксация напряжений и ползучесть чаще всего проявляются одновременно и могут быть рассмотрены как появление вязких свойств твердых тел.

Представим деформацию модели тела как сумму упругой γ_u и вязкой γ_v деформаций, которые должны удовлетворять условиям

$$\gamma_v = \tau/G \text{ и } d\gamma_v/dt = \tau/\eta.$$

Скорость деформирования при этом

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{G} \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta}. \quad (\text{II.35})$$

Уравнение (II.35) описывает упруго-вязкое тело Максвелла.

Если к моменту времени $t=0$ тело деформировано на величину γ_0 и далее деформация во времени не изменяется, т. е. $d\gamma/dt=0$, то решение уравнения (II.35) имеет вид

$$\tau = G\gamma_0 \exp\left(-\frac{Gt}{\eta}\right) \quad (\text{II.36})$$

или с учетом, что $G\gamma_0=\tau_0$ (начальное напряжение), получим выражение

$$\tau = \tau_0 \exp\left(-\frac{Gt}{\eta}\right), \quad (\text{II.37})$$

которое и представляет собой уравнение релаксации напряжений.

Если к моменту времени $t=0$ тело не деформировано, а затем приложено постоянное напряжение τ_0 , то общая величина деформации

$$\gamma = \frac{\tau_0}{G} + \frac{\tau}{\eta} t. \quad (\text{II.38})$$

Выражение (II.38) представляет собой простейшее уравнение установившейся ползучести. Из выражений (II.38) и (II.35) видно, что важнейшей временнной характеристикой твердых тел является их вязкость. В общем случае вязкость твердых тел зависит от большого числа факторов (температуры тела, вида напряженного состояния, характера приложения нагрузки и т. д.). Для решения практических задач часто приходится использовать более сложные модели деформируемых тел, описание которых можно найти в работах [69, 74].

Усталостное разрушение твердых тел. Наблюдения показывают, что при циклическом изменении напряженного состояния твердые тела разрушаются в результате нагрузки значительно меньшей разрушающей, определенной при однократном деформировании. Такое явление называется усталостью материала твердого тела. Причем, с увеличением числа циклов величина разрушающей нагрузки монотонно уменьшается. В качестве характеристики сопротивления материала усталостному разрушению в машиностроении принимают величину напряжений, при которых материал выдерживает 10^7 циклов нагружений.

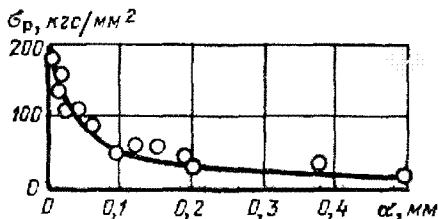


Рис. 17. Влияние масштабного фактора на прочность стеклянных нитей

Явления усталости материала твердых тел также могут быть объяснены несовершенством кристаллического строения твердых тел. Непрерывно, от цикла к циклу, происходит накопление внутренних изменений в структуре вследствие движения дислокаций и их взаимодействия с другими дефектами структуры. Упорядоченное движение дислокаций приводит к их скоплению у границ зерен и других дефектов структуры, что вызывает значительные местные концентрации напряжений, а следовательно, и снижение сопротивления твердого тела разрушению.

Масштабный фактор. Под масштабным фактором понимается зависимость прочности твердых тел от их линейных размеров. Экспериментально установлено, что образцы материала меньших размеров, при прочих равных условиях, обладают большей удельной прочностью, чем образцы больших размеров. Заметное увеличение прочности наблюдается, когда размер образцов меньше 0,1—0,5 мм. Характерное уменьшение прочности с увеличением размера приведено на рис. 17. Кристаллиты и зерна горных пород имеют такой размер, когда влияние масштабного фактора существенно. Поэтому обычно мелкозернистые породы более прочны, чем крупнозернистые.

§ 6. Энергетические законы разрушения [диспергирования] хрупких тел

В основу определения расхода энергии на дробление (диспергирование) твердых тел положены энергетические законы разрушения Риттингера и Кирпичева.

По закону Риттингера (1867 г.) «работа, затраченная при дроблении, пропорциональна вновь полученной (обнаженной) поверхности измельченного материала или степени измельчения».

По закону Кирпичева (1874 г.) «энергия, требуемая для одинакового изменения формы геометрически подобных и однородных тел, изменяется как объемы или веса этих тел». Этот закон иногда называют законом подобия и формулируют другими словами: энергия, затрачиваемая на дробление геометрически подобных тел при одинаковом напряженном состоянии, пропорциональна объемам разрушаемых тел.

По этим законам предполагается, что при механическом разрушении физическая природа тела остается неизменной и разрушаемые тела структурно однородные.

П. А. Ребиндер предложил пользоваться единым законом дробления, исходя из того, что вся работа дробления A складывается из работы A_V , затрачиваемой на деформирование дробимого тела, которая определяется по закону Кирпичева, и работы A_S , расходуемой на образование новой поверхности и определяемой по закону Риттингера, т. е.

$$A = A_S + A_V. \quad (\text{II.39})$$

С. Е. Андреев [8], исследуя дробление руд показал, что

$$A_S = k_1 D^2, \quad (\text{II.40})$$

$$A_V = k_2 D^3, \quad (\text{II.41})$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты пропорциональности, величина которых зависит от дробимости материала и степени его измельчения;

D — диаметр дробимого тела.

Решающее влияние на затраты энергии в процессе разрушения оказывает дисперсность (величина, обратная линейным размерам тела) продуктов разрушения.

Это связано с тем, что площадь вновь образуемых поверхностей при каждой последующей стадии дробления увеличивается по сравнению с предыдущей, а суммарная работа по закону Риттингера с увеличением дисперсности растет по степенному закону. Если же исходить из закона подобия, то зависимость работы разрушения от дисперсности продуктов разрушения будет линейной (рис. 18), так как объем тела при каждой стадии дробления и работа разрушения будут постоянными, а суммарная работа до заданной дисперсности будет равна произведению постоянной величины работы на число стадий дробления.

В случае дробления тела больших размеров, т. е. при малой дисперсности, затраты работы по закону подобия будут большими, чем по закону Риттингера. Точка A пересечения кривых на рис. 18 соответствует размеру частиц 0,5—1,0 мм.

В связи с этим Л. А. Шрейнер показал, что в случае использования закона подобия необходимо учитывать масштабный фактор, т. е. необходимо учитывать увеличение прочности тела при уменьшении его линейных размеров.

Работу разрушения единицы объема по закону Кирпичева можно представить в виде

$$A_V = \frac{(\sigma'_{\text{сж}})^2}{2E_{\text{сж}}}, \quad (\text{II.42})$$

где $\sigma'_{\text{сж}}$ — прочность на сжатие при данных линейных размерах дробимого тела.

Изменение $\sigma'_{\text{сж}}$ с изменением линейных размеров тела Л. А. Шрейнер [108] представляет в виде

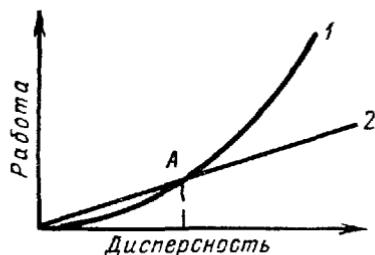


Рис. 18. Зависимость работы разрушения от дисперсности продуктов разрушения:

1 — по закону Риттингера, 2 — по закону Кирпичева

$$\sigma'_{сж} = \frac{a}{l} + \sigma_{сж}, \quad (II.43)$$

где a — постоянный коэффициент;

l — линейные размеры тела;

$\sigma_{сж}$ — прочность на сжатие относительно больших образцов, когда влиянием масштабного фактора можно пренебречь.

Подставив в выражение (II.42) вместо $\sigma'_{сж}$ его значение из равенства (II.43), получим

$$A_V = \frac{1}{2E_{сж}} \left(\frac{a}{l} + \sigma_{сж} \right)^2. \quad (II.44)$$

Выраженный таким образом закон подобия должен находиться в большем соответствии с практическими данными дробления. По формуле (II.44) можно определить величину работы разрушения единицы объема при дроблении для известных первоначальных размеров частиц.

По размерам частиц, образующихся в процессе бурения скважин, можно судить об эффективности разрушения горных пород различным породоразрушающим инструментом для различных режимов его работы. Так, если во время бурения в продуктах разрушения горных пород преобладает мелкая фракция, то, очевидно, с энергетической точки зрения процесс разрушения будет малоэффективный, поскольку в этом случае большое количество энергии затрачивается на образование новой поверхности, которая в продуктах разрушения будет огромной. Мелкие фракции продуктов разрушения горных пород в процессе бурения создают дополнительные трудности, засоряя промывочные жидкости и изменяя их свойства.

Полностью избежать получения мелких и весьма мелких фракций при бурении невозможно, так как их образование является закономерным следствием самого процесса разрушения горных пород. Однако с энергетической точки зрения следует стремиться к тому, чтобы количество мелких фракций в продуктах разрушения горных пород при бурении скважин было минимальным.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ГОРНЫХ ПОРОДАХ

§ 1. Состав и строение горных пород

Горные породы, как твердые тела, имеют преимущественно кристаллическое строение. Аморфные горные породы имеют незначительное распространение. По поведению в процессе деформирования они могут быть с некоторым приближением отнесены к одной из групп горных пород, имеющих кристаллическое строение. Поэтому отдельно аморфные горные породы не рассматриваются.

Горные породы состоят из зерен (кристаллитов) природных химических соединений, называемых минералами, и представляют собой агрегаты минеральных зерен. Основную роль в образовании минералов имеют девять химических элементов — кислород, кремний, алюминий, железо, кальций, натрий, калий, магний и титан, которые, согласно данным А. П. Виноградова, составляют 99,5 % массы земной коры.

В настоящее время известно около 2000 минералов, но существенное участие в строении горных пород принимают лишь несколько десятков. Эти минералы называются породообразующими.

Наиболее распространены в природе силикаты, которые составляют около 75 % массы земной коры. К ним относятся полевые шпаты, слюды, глинистые минералы (каолинит, монтмориллонит и др.). Следующими по распространению идут окислы и гидроокислы, составляющие около 17 % массы земной коры. К ним относятся кварц SiO_2 , опал $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, гематит Fe_2O_3 и др. Далее следуют карбонаты, составляющие около 1,7 % массы земной коры. К ним относятся кальцит CaCO_3 , доломит $\text{Ca}, \text{Mg}(\text{CO}_3)_2$ и т. п. Менее одного процента от массы земной коры составляют сульфаты, к которым относятся гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ангидрит CaSO_4 , сульфиды, к которым относится пирит FeS_2 ; галоиды, к которым относится галит NaCl , сильвин KCl , бишофит $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, карналлит $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и др. Последние группы минералов хотя и составляют незначительную долю от массы земной коры, но принимают существенное участие в составе пород нефтяных и газовых месторождений.

Горная порода, состоящая из одного минерала, называется мономинеральной, а состоящая из нескольких минералов — полиминеральной. Примером мономинеральных пород могут служить доломит, известняк, кварцевые песчаники и т. д.

Примером полиминеральных пород могут служить гранит, глина, полимиктовые песчаники и др.

По происхождению различают магматические, метаморфические и осадочные горные породы. Нефтяные и газовые месторождения СССР сложены в основном глинистыми породами, песчаниками, известняками, доломитами, ангидритами, гипсами. Реже встречаются галечники, брекчии, мергели, каменная соль, кремний и некоторые другие породы. Все эти породы осадочного происхождения, поэтому в дальнейшем будут рассматриваться главным образом осадочные горные породы, наиболее часто встречающиеся при бурении нефтяных и газовых скважин.

Осадочные горные породы составляют не более 3% от массы земной коры. Их можно разделить на две большие группы: кристаллические и обломочные. Подгруппа глинистых пород рассматривается авторами совместно с обломочными породами, хотя они и занимают особое положение. Среди осадочных пород на долю кристаллических приходится около 25%, на долю обломочных — около 21% и на долю глинистых — около 54%.

Строение горных пород характеризуется двумя основными признаками — структурой и текстурой.

Под *структурой* породы понимают особенности строения, которые обусловлены размером, формой и характером поверхности слагающих породу минеральных зерен кристаллических пород или обломков обломочных пород.

Под *текстурой* породы понимают особенности, которые обусловлены взаимным пространственным расположением минеральных зерен кристаллических пород или обломков обломочных пород. К текстурным признакам относятся слоистость, сланцеватость, пористость и трещиноватость.

Слоистость пород обусловлена чередованием при накоплении пород с различной зернистостью или размером обломков, пород разного состава и пород с разной ориентировкой зерен или обломков. В зависимости от толщины слоев различают листовые, тонкослоистые, среднеслоистые и массивные породы.

Сланцеватость проявляется в виде способности горной породы раскалываться на тонкие пластинки по параллельным плоскостям. Она обусловлена деформированием горных пород в процессе их уплотнения, а также при тектонических процессах. Положение плоскостей сланцеватости соответствует ориентировке площадок с наибольшей интенсивностью касательных напряжений. В общем случае плоскости слоистости и сланцеватости не совпадают.

Пористость горных пород равна отношению объема пор (пустот) к объему всей породы. Это так называемая абсолютная, или физическая, пористость. Различают еще и эффективную пористость, которая всегда меньше абсолютной, так как учитывает только те поры, которые сообщаются между собой.

Как правило, обломочные горные породы имеют большую пористость, чем кристаллические.

Трещиноватость пород обусловлена тектоническими и физико-химическими процессами в земной коре. Трещиноватость определяется размерами, густотой и взаимным расположением трещин. Более подробно с вопросом о трещиноватости можно познакомиться в работе [70].

Анизотропным называется тело, у которого показатели свойств одинаковы в параллельных направлениях и неодинаковы в непараллельных направлениях.

Структурные и текстурные особенности существенно влияют как на показатели механических свойств пород, так и на их анизотропность.

§ 2. Кристаллические осадочные породы

Осадочные кристаллические породы образуются в результате выпадения солей из водных растворов или в результате химических реакций, происходящих в земной коре. К кристаллическим осадочным породам относятся органогенные породы, являющиеся продуктами жизнедеятельности организмов.

Большинство пород этой группы имеет смешанное биохимическое происхождение. В табл. 2 приведены наиболее распространенные породы этой группы. Из табл. 2 видно, что кристал-

Таблица 2

Название подгрупп	Название горных пород	
	органогенные	хемогенные
Карбонатные	Известняк коралловый Известняк-ракушечник Известняк д detritusовый Мел Мергель	Известняк плотный Известняк олиговий Известковый туф Натечный известняк Доломит Мергель
Сульфатные	—	Гипс Ангидрит
Кремнистые	Диатомит	Трепел Опока Кремнистый туф Кремень
Галоидные	—	Каменная соль

Таблица 3

Структура	Величина кристаллов, мм	Краткая характеристика
Крупнокристаллическая	>1,0	Кристаллы легко различаются, невооруженным глазом
Среднекристаллическая	0,1—1,0	Кристаллы различаются невооруженным глазом, однако для изучения их необходима лупа
Скрытокристаллическая	0,01—0,1	Кристаллы различаются под микроскопом
Пелитоморфная	<0,01	Кристаллы и их форма различаются только под микроскопом

лические породы в основном мономинеральные. Это позволяет разделить их на подгруппы по классам минералов.

По А. В. Пустовалову различают другие виды структур кристаллических пород (табл. 3).

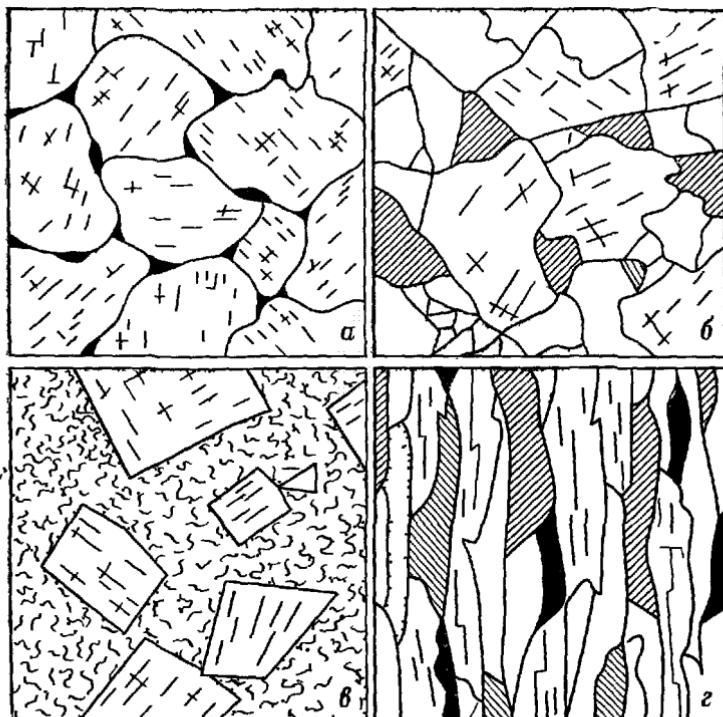


Рис. 19. Типы кристаллических структур:

а — равномерно зернистая, б — разнозернистая, в — порфировая, г — волокнистая

Кристаллические породы различаются между собой также и по соотношению размеров кристаллитов в данной породе. Если в породе все кристаллиты одинакового размера, то такая структура называется равномерно зернистой; если же порода содержит кристаллиты различного размера, то структура называется разнозернистой. Различают еще так называемую порфировую структуру, отличающуюся вкраплением кристаллов больших размеров в общий фон мелкозернистой породы. На рис. 19 показаны различные типы кристаллических структур.

Кристаллические породы в большинстве случаев массивные, плотные, реже — пористые. Пористость хемогенных пород чаще всего вторичная, обусловленная наличием трещин или каналов выщелачивания. Отдельные разновидности известняков и доломитов имеют пористость до 33 %.

§ 3. Обломочные осадочные породы

К обломочным осадочным горным породам относят продукты механического и физико-химического разрушения ранее существовавших горных пород с последующим их переносом водой или ветром и осаждением без растворения и перекристаллизации. К этой же группе относят породы, образовавшиеся на месте разрушения. По размерам обломков горные породы подразделяются на четыре основные структурные подгруппы (табл. 4).

Грубообломочные породы представляют собой обломки главным образом магматических и метаморфических пород. Пространство между обломками заполнено песчаными мелкоземлистыми и глинистыми породами. Грубообломочные породы в разрезах нефтяных и газовых месторождений распространены незначительно.

Песчаные породы, к которым относятся пески (рыхлые) и песчаники (сцементированные), в зависимости от состава минеральных зерен бывают кварцевыми и полимиктовыми. Первые состоят из зерен кварца, вторые — из зерен различных минералов. Полимиктовые пески и песчаники могут состоять из зерен слюды, роговой обманки, пироксена, полевых шпатов и т. д. Полимиктовые пески, содержащие в основном полевые шпаты, называются аркозовыми.

Пески и песчаники различаются по размерам зерен: грубо-зернистые (2—1 мм), крупнозернистые (1—0,5 мм), среднезернистые (0,5—0,25 мм), мелкозернистые (0,25—0,10 мм), однородные (размер зерен постоянен) и разнозернистые (размер зерен разный).

Мелкоземлистые породы (алевриты) занимают промежуточное положение между песчаными и глинистыми. К этим породам относятся главным образом осадки континентального происхождения: супеси, суглинки и лёсс. Большое распространение имеют также сцементированные породы — алевролиты.

Таблица 4

Размеры обломков, мм	Название пород, характер и сложение обломков							
	рыхлые		сцементированные		основные структуры			
	угловатые	окатанные	угловатые	окатанные				
>1000	Глыбы	Крупные валуны	Брекчия	Конгломерат	Грубообломочные (псефиты)			
100—1000	Мелкие глыбы	Валуны						
10—100	Щебень	Галечник						
2—10	Дресва	Гравий						
0,10—2,00	Песок		Песчаник		Песчаные (псаммиты)			
0,01—0,10	Алеврит		Алевролит		Мелкоземлистые (алевриты)			
<0,01	Пелит (глина)		Аргиллит		Глинистые (пелиты)			

К глинистым породам (пелитам) относятся глины, аргиллиты и глинистые сланцы. Аргиллиты обычно сцементированы халцедоном (SiO_2), вследствие чего они имеют высокую прочность. Если аргиллит легко раскалывается по плоскостям сланцеватости, то его называют глинистым сланцем.

Наиболее существенными текстурными признаками обломочных пород являются слоистость и пористость. Пористость обломочных пород гранулярная и имеет значительную величину (табл. 5).

Таблица 5

Порода	Пористость, %	Порода	Пористость, %
Глины	6,0—45,0	Пески	3,0—39,0
Аргиллиты	0,5—4,0	Песчаники	0,6—33,0

Рыхлые горные породы делятся на два вида — несвязные и связные (глинистые). Большое влияние на свойства этих пород оказывает вода, заполняющая поры. Горные породы — тела гидрофильные, т. е. хорошо смачиваются водой. Вода в порах горных пород может быть в различных состояниях. По А. Ф. Лебедеву состояния воды следующие.

1. Гигроскопическая вода в виде мономолекулярного слоя. Силы связи этой воды с поверхностью обусловлены поверхностной энергией твердого тела и полярностью молекул воды. Эта вода не растворяет солей, не передает гидростатического давления, не замерзает и не движется.

2. Пленочная вода составляет следующие за гигроскопической водой слои. Силы связи с поверхностью твердого тела быстро уменьшаются, и вода, удаленная от поверхности, хотя и не передает гидростатического давления, но способна к перемещению в сторону выравнивания толщины пленок.

Гигроскопическая и пленочная вода составляют так называемую физически связанный воду. Толщина слоя такой воды имеет порядок 0,25—0,50 мк. Остальная часть воды называется гравитационной. Она растворяет соли, замерзает, передает гидростатическое давление.

Чем больше удельная поверхность горной породы, чем больше в ней содержится физически связанный воды, тем больше ее влияние на механические свойства.

Количество воды, содержащейся в породе, оценивается по влажности W в процентах

$$W = \frac{G_{\text{п}} - G_{\text{с}}}{G_{\text{п}}} 100, \quad (\text{III.1})$$

где $G_{\text{п}}$ — масса влажной породы;

$G_{\text{с}}$ — масса скелета породы.

В несвязных горных породах силы сцепления между частицами весьма малы. Такая порода сохраняет свою форму благодаря силам внутреннего трения между частицами. Сопротивление сдвигу таких пород определяется по формуле

$$\tau = \tau_{\text{с}} + f\sigma_0, \quad (\text{III.2})$$

где τ — сопротивление сдвигу;

$\tau_{\text{с}}$ — прочность на сдвиг, зависящая от сцепления частиц;

f — коэффициент внутреннего трения;

σ_0 — среднее нормальное напряжение.

Выражение (III.2) соответствует огибающей кругов Мора, и описывает прочностные свойства сыпучих тел.

Силы связи в связных глинистых горных породах имеют физико-химическую природу и обусловлены особым коллоидным состоянием глинистых минералов. Рассмотрим принцип взаимодействия глинистых частиц на примере монтмориллонита. Кристаллы монтмориллонита имеют трехслойное строение (рис. 20, а). Атомы кремния или алюминия частично замещены в решетке атомами алюминия, марганца, железа. Замещение атома кремния атомом алюминия сопровождается захватом последним недостающего для образования четырех связей электрона у атома щелочного или щелочноземельного металла из

внешней среды. Аналогичное явление наблюдается и при замещении атома алюминия (рис. 20, а).

Однако атом щелочного или щелочноземельного металла не может войти в решетку и оказывается сравнительно слабо связанным с глинистой частицей. Эти атомы легко переходят в раствор в водной среде в виде катионов и принимают активное участие в реакциях замещения. В связи с этим они получили название обменных ионов (или ионов обменного комплекса).

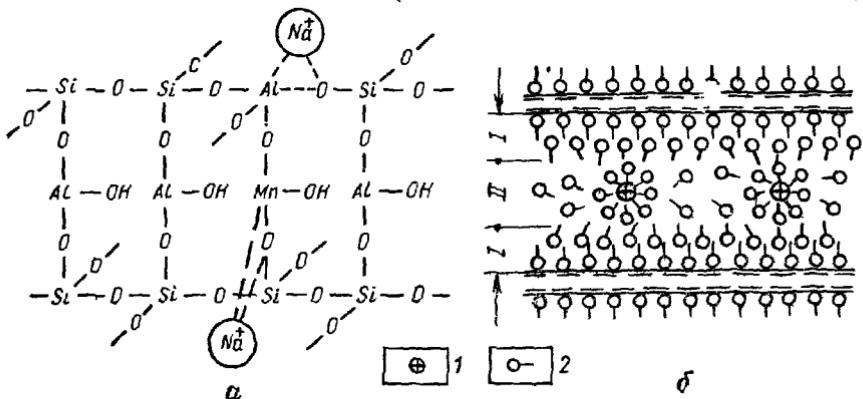


Рис. 20. Схемы строения монтмориллонита а и взаимодействия глинистых частиц б:

1 — катион; 2 — молекула воды (диполь); I — физически связанная вода; II — диффузный слой

Глинистые породы формируются в водной среде. В этих условиях глинистые частицы отдают обменные катионы в раствор и приобретают отрицательный заряд, обуславливающий образование прочной гидратной пленки. Катионы также окружены ассоциациями молекул воды. Из схемы на рис. 20, б видно, что пленка физически связанной воды имеет внешний отрицательный заряд, а ассоциации воды вокруг катионов — положительный заряд. Взаимодействие этих зарядов обуславливает связность глинистых частиц. Нетрудно видеть, что силы взаимодействия будут существенно зависеть от толщины диффузного слоя воды. Увеличение толщины диффузного слоя в результате свободной воды приводит к потере связности глинистой породы и приобретению ею свойств текучести. Уменьшение толщины диффузного слоя ведет также к увеличению сил взаимодействия, а следовательно, и к увеличению прочностных свойств глинистых пород. Наличие диффузного слоя обуславливает высокую пластичность глин. При высушивании глинистые породы переходят в твердое состояние.

Следовательно, в зависимости от содержания воды в глинистых породах они могут быть в твердом, пластическом или текучем состоянии.

Цементирование обломочных пород может идти одновременно с накоплением обломков и позднее в процессе преобразования осадка в горную породу вследствие химического разложения отдельных минералов или выпадения химических осадков из воды, движущейся между обломками.

По составу цементы могут быть кремнистые, карбонатные, сульфатные, железистые, глинистые, битуминозные и другие (цементы расположены в порядке уменьшения их прочности).

По строению выделяют следующие четыре типа цементов (рис. 21).

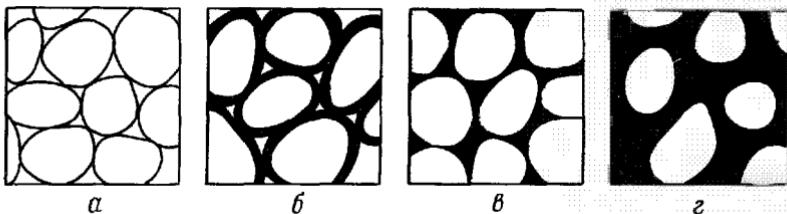


Рис. 21. Типы цементов обломочных пород:

а — контактный; б — пленочный; в — поровый; г — базальный

1. Контактный — отлагается в местах контакта обломков.

2. Пленочный — каждый обломок окружен пленкой цементирующего вещества. Если цемент того же состава, что и обломки, такой цемент называется регенерационным или цементом разрастания.

3. Поровый — цементирующее вещество заполняет поры между обломками.

4. Базальный — обломки породы как бы погружены в цементирующее вещество и не контактируют друг с другом.

В глинистых породах в процессе их уплотнения происходит отжатие свободной воды. На контактах глинистых частиц откладываются гипс, кальцит, соли железа, которые цементируют глинистую породу. Силы связи постепенно приобретают кристаллизационный характер. При перемягчении глины или при растворении отложений солей, глины вновь приобретают пластичные свойства.

Более глубокие преобразования глинистых пород связаны с их дегидратацией, цементированием кремнистым цементом и частичной перекристаллизацией. В результате образуются твердые, плотные, не размокающие в воде аргиллиты.

В заключение следует отметить, что минералогический состав обломочных пород весьма различен, но он не является определяющим при названии породы. Главными признаками этих пород являются их строение, а также наличие, состав и строение цемента. Однако с точки зрения изнашивания взаимодействующих с ними деталей и инструментов минералогический состав пород имеет решающее значение.

§ 4. Неоднородность горных пород

Вследствие того, что большинство горных пород полиминеральные и, как правило, никаких закономерностей в распределении отдельных минералов в них не наблюдается, горные породы являются телами неоднородными по минеральному составу.

Горные породы в большинстве своем разнозернистые, причем зерна в ее массе распределены совершенно случайно. В одних местах сконцентрированы, например, крупные зерна, а в других — мелкие или среднего размера. Это приводит к неоднородности пород по распределению зерен в их массе.

Распределение пор в массе породы носит также случайный характер как по размеру, так и по их форме. Поры в различной степени изолированы друг от друга или, наоборот, имеют различный характер сообщения между собой. Наблюдениями установлено, что в плоскости простираания пластов поры сообщаются значительно лучше, чем по восстанию пластов [107]. Таким образом, горные породы неоднородны и по пористости.

Степень уплотнения горных пород зависит от глубины их залегания: чем глубже залегает та или иная порода, тем она больше уплотнена. Кроме того, уплотнение пород зависит от характера складчатости и от положения на структуре — на крыльях складок породы более уплотнены, чем на куполе. При динамических и физико-химических процессах, происходящих в земной коре, в горных породах возникает разного рода трещиноватость как по величине, так и по направлению. Распределение ее случайно, и, следовательно, горные породы неоднородны и по степени уплотнения, и по трещиноватости.

Неоднородность горных пород существенно влияет на их поведение в процессе бурения скважин.

Неоднородность пород и анизотропия свойств затрудняет выбор общих моделей и получение аналитических решений, удовлетворительно описывающих механические процессы. С целью упрощения моделей показатели механических свойств горных пород определяются различными методами. Выбор метода испытания обусловливается существенными признаками того процесса, который предстоит описать.

ПОКАЗАТЕЛИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ И ГОРНЫХ ПОРОД И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

§ 1. Простые виды механических испытаний минералов и горных пород

Механические испытания минералов и пород на одноосное растяжение и сжатие, а также на изгиб и на сдвиг принято называть простыми. Показатели механических свойств, полученные при этих испытаниях, являются основными характеристиками пород при использовании аналитических решений и теорий прочности для качественной и количественной оценки поведения их в процессе деформирования. В случае простых механических испытаний образцов напряженное состояние в них по ряду причин всегда является сложным, но наиболее существенными напряжениями являются те, которые обусловлены основным видом деформирования. Схемы испытания подбираются так, чтобы влияние осложняющих факторов было по возможности малым.

Одноосное сжатие. Испытанию подвергаются образцы минералов или горных пород цилиндрической формы и прямоугольного сечения. Размеры образцов зависят от принятой методики испытаний. В соответствии с Международным стандартом, принятым Международным бюро по механике горных пород, требования к образцам и методике испытаний следующие.

1. Форма образцов цилиндрическая, диаметр 40—45 мм. Отношение длины образца l к диаметру d

$$l/d = 1 \pm 0,05. \quad (\text{IV.1})$$

Торцевые поверхности шлифуются. Отклонение от параллельности торцов не более 0,05 мм по диаметру основания образца, отклонения от перпендикулярности торцов к образующей цилиндра не более 0,05 мм; выпуклость торцов не более 0,003 мм.

2. Испытательный пресс должен иметь полированные плиты, причем одну из плит на шаровой опоре.

3. Скорость нагружения 5—10 кгс/см²·с. Образец деформируется до разрушения.

4. По максимальной нагрузке определяется прочность образца на сжатие.

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{P_{\text{max}}}{F} \quad (\text{IV.2})$$

(F — начальная площадь поперечного сечения образца).

Если отношение l/d существенно отличается от единицы, то необходимо сделать пересчет по формуле

$$\sigma_{сж}' = \frac{9\sigma_{сж}}{7 + 2d/l} \quad (IV.3)$$

($\sigma_{сж}'$ — прочность на сжатие нестандартного образца).

Проведение в процессе испытания дискретной или непрерывной записи нагрузки и изменения длины образца позволяют определить модуль деформации при сжатии

$$E_{сж} = \frac{\Delta P l}{\Delta F} \quad (IV.4)$$

(Δl — изменение длины образца, соответствующее изменению нагрузки на величину ΔP).

Измерения изменений диаметра образца позволяют вычислить коэффициент Пуассона по формуле

$$\mu_{сж} = \frac{\Delta d}{\Delta l} \quad (IV.5)$$

(Δd — увеличение диаметра образца, соответствующее изменению длины на величину Δl).

Растяжение. Испытания горных пород и минералов на растяжение проводятся значительно реже. Механические испытания пород при одноосном растяжении являются весьма трудоемкими по техническому выполнению и главным образом по причине трудности изготовления необходимых для испытаний образцов.

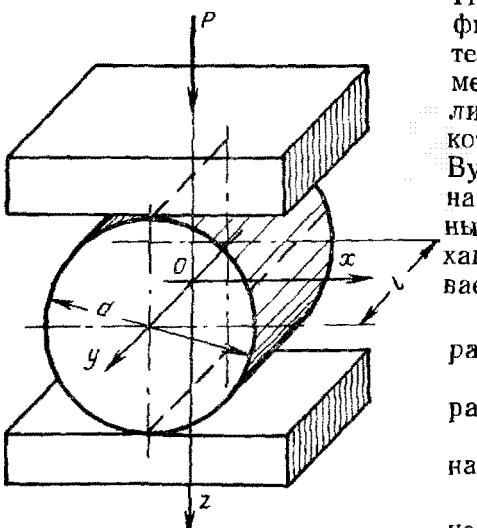


Рис. 22. Схема испытания на растяжение цилиндрического образца методом раздавливания

По мнению авторов монографии [35], наиболее представительным и точным является метод прямого растяжения цилиндрических образцов, концы которых заливаются сплавом Вуда. Как и при испытании на сжатие, могут быть получены следующие показатели механических свойств испытуемых минералов или пород:

- 1) предел прочности на растяжение σ_p ;
- 2) модуль деформации при растяжении E_p ;
- 3) коэффициент Пуассона μ_p .

Значительное распространение получили косвенные методы определения предела прочности на растяжение горных пород. Среди них следует

отметить «бразильский» метод раздавливания цилиндрических образцов равномерно распределенной нагрузкой, прикладываемой к диаметрально противоположным образующим (рис. 22). Предел прочности на растяжение определяется по формуле Герца

$$\sigma_p = \frac{2P_l}{\pi d}, \quad (\text{IV.6})$$

(P_l — нагрузка на единицу длины образца).

Но при этом не учтено появление сжимающих напряжений вдоль продольной оси образца в результате сил трения о плиты. Из условия недеформируемости плит получим

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)] = 0,$$

отсюда

$$\sigma_y = \mu(\sigma_z + \sigma_x). \quad (\text{IV.7})$$

Причем при

$$z = x = 0 \quad \sigma_x = \sigma_p.$$

Решение с учетом возникновения сложного напряженного состояния в цилиндрическом образце приведено в работе [118] и имеет вид

$$\sigma_p = \frac{2P_l}{\pi d} (1 + \mu)(1 + 2\mu). \quad (\text{IV.8})$$

Однако величина коэффициента Пуассона определяется для горных пород с низкой точностью. Для всего диапазона изменения коэффициента Пуассона величина $\frac{2}{\pi}(1+\mu)(1+2\mu)$ изменяется от 0,64 до 1,91. Для хрупких пород коэффициент Пуассона по данным [118] изменяется в пределах 0,10—0,25; тогда с ошибкой, не превышающей 20%, σ_p можно определить по формуле

$$\sigma_p = P_l/d. \quad (\text{IV.9})$$

При проведении испытаний должно соблюдаться условие $d/l \geq 1$. Этот метод испытания рекомендован Международным бюро по механике горных пород.

Изгиб. Испытание горных пород и минералов на изгиб проводится по одной из трех схем (рис. 23). На изгиб испытываются образцы пород цилиндрические или прямоугольного сечения при отношении $l/h > 8$ для исключения влияния поперечных сил (h — высота сечения, l — длина образца). Прочность на изгиб вычисляется по формуле

$$\sigma_u = M/W, \quad (\text{IV.10})$$

где M — максимальный изгибающий момент при испытании до разрушения;

W — момент сопротивления сечения изгибу.

Для прямоугольного сечения

$$W = bh^2/6 \quad (\text{IV.11})$$

(b — ширина сечения).

Для круглого сечения диаметром d

$$W = \pi d^3/32. \quad (\text{IV.12})$$

При регистрации нагрузки и перемещения точек приложения силы можно определить модуль деформации при изгибе E_u .

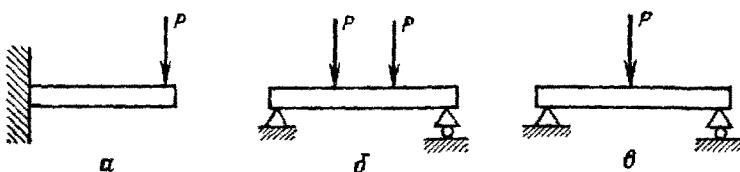


Рис. 23. Схемы испытания на изгиб:

a — изгиб консоли; *b* — четырехточечная схема; *c* — трехточечная схема

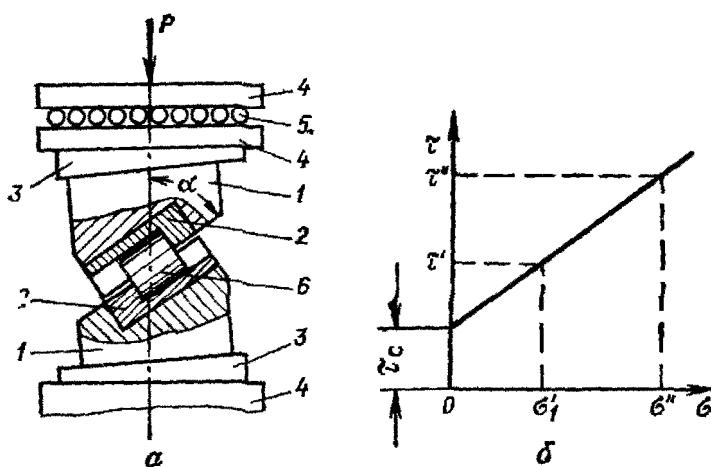


Рис. 24. Схема испытания *a* и обработка результатов *b* при срезе со сжатием:

1 — матрицы; 2 — вкладыши; 3 — клинья; 4 — пластины; 5 — ролики; 6 — образец породы

Сдвиг. Определение показателей механических свойств горных пород при сдвиге осуществляется в процессе испытаний на срез и кручение. Рассмотрим методику определения прочности горных пород на срез со сжатием [35]. Схема испытания приведена на рис. 24, *a*. При испытаниях рекомендуются цилиндри-

ческие образцы диаметром $42 \pm 0,1$ мм; высотой $42 \pm 2,5$ мм. Допуски на параллельность, выпуклость торцов, а также перпендикулярность их к образующей цилиндра 0,05 мм.

Углы наклона матриц 30, 45 и 60° , клиньев 5° , что позволяет менять угол наклона среза в пределах от 25 до 65° через каждые 5° .

После испытания рассчитываются нормальные напряжения в плоскости среза:

$$\sigma = \frac{P}{F} \sin \alpha, \quad (\text{IV.13})$$

где P — максимальная нагрузка;

F — площадь среза;

α — угол наклона плоскости среза к линии действия силы P .

Сопротивление срезу при данном нормальном напряжении составит

$$\tau = \frac{P}{F} \cos \alpha. \quad (\text{IV.14})$$

Испытания ведутся как минимум при двух значениях угла: 30 и 50° . Затем экстраполяцией получают значение τ_c при $\sigma = 0$ (рис. 24, б), которое и принимается в качестве показателя механических свойств.

Более полные сведения о схемах, оборудовании и методиках испытаний горных пород при простых видах нагружения содержатся в монографиях [35, 118].

При испытаниях могут иметь место случайные ошибки, связанные с измерениями, а также разброс данных вследствие неоднородности характеризуемых горных пород. Поэтому необходимо провести ряд независимых испытаний (как правило, не менее трех) и найти среднее арифметическое значение измеряемой характеристики. Более строго число испытаний определяется в зависимости от требуемой точности оценки показателей механических свойств изучаемого объекта.

§ 2. Особенности поведения минералов при деформировании

В природных условиях минералы в подавляющем большинстве образуют зерна небольших размеров и лишь в редких случаях образуют крупные монокристаллы, пригодные для изучения их механических свойств. Только освоение методов выращивания искусственных кристаллов позволило расширить эти исследования [117]. Для испытания минералов при простых видах нагружения из них вырезаются цилиндрические образцы.

Имеющиеся в литературе данные позволяют получить только самые общие представления о поведении минералов в процессах

растяжения и сжатия. Характер разрушения при растяжении и сжатии минералов может быть пластичным и хрупким. В случае хрупкого разрушения прочность образцов на сжатие всегда значительно выше, чем на растяжение.

Большое влияние на характер деформирования и величину показателей механических свойств оказывает наличие примесей, входящих в кристаллическую решетку. Например, по данным Д. П. Григорьева, незначительная примесь Са в решетке галита (NaCl) повышает предел текучести последнего в несколько раз.

У всех минералов, даже кристаллизующихся в кубической сингонии, резко выражена анизотропия показателей механических свойств, т. е. величина упругих, пластических и прочностных показателей зависит от ориентации вырезанного для испытания образца в кристалле. Анизотропия может проявляться не только в виде различия механических характеристик, но и в виде различного характера разрушения (в одном направлении кристалл разрушается хрупко, а в другом — разрушению предшествует большая пластическая деформация).

Приближенная оценка показателей упругих свойств минералов ведется путем усреднения значений по различным кристаллографическим направлениям. Методика усреднения изложена в работе [18].

Усредненные значения показателей упругих свойств некоторых породообразующих минералов приведены в табл. 6.

Анизотропия прочностных свойств кристаллов часто проявляется в виде спайности.

Спайностью называется способность кристаллов некоторых минералов раскалываться по определенным плоскостям, параллельным действительным или возможным граням кристаллических решеток. *Плоскостями спайности* называются плоскости, по которым происходит раскалывание кристаллов при ударе или

Таблица 6

Минерал	Модуль Юнга $E \cdot 10^{-6}$, кгс/см ²	Модуль сдвига $G \cdot 10^{-6}$, кгс/см ²	Модуль объемного сжатия К 10^{-6} кгс/см ²	Коэффициент Пуассона, μ
Ортоклаз	6,3	2,4	5,2	0,29
Нефелин	7,7	3,1	5,1	0,24
Кальцит	8,4	3,3	7,2	0,28
Кварц	9,6	4,4	3,7	0,08
Авгит	14,4	5,8	9,5	0,24
Оливин	21,7	8,7	13,1	0,24

расщеплении. Согласно правилу Браве плоскости спайности располагаются между наиболее удаленными кристаллографическими плоскостями.

Пластическое деформирование кристаллов. Механизм пластического деформирования кристаллов зависит как от структуры и типа связи в кристаллической решетке, так и от вида напряженного состояния и направления деформирования. Различают два основных механизма пластического деформирования: смещение по плоскостям скольжения и двойникование. Нередко оба механизма проявляются одновременно.

Если при испытании кристалла появляются видимые линии сдвигов или следы скольжения, то в этом случае пластическое деформирование обусловлено скольжением. Плоскости и направления скольжения в кристалле не зависят от направления действующих сил, а располагаются в направлениях наименьшего сопротивления сдвигу кристалла. Причем плоскости скольжения распределены не равномерно по кристаллу, а приурочены к отдельным сечениям, где сопротивление сдвигу в наибольшей степени ослаблено наличием дефектов кристаллической структуры. Деформирование путем скольжения хорошо иллюстрируется схемой Иоффе (рис. 25, а).

Если плоскость скольжения расположена неблагоприятно по отношению к действующей на кристалл силе, то увеличение внешней нагрузки приводит к накоплению в кристалле значительной упругой энергии. В результате накопленной упругой энергии до наступления разрушения в ряде кристаллов происходит переброс решетки в новое положение и образуется механический двойник. Опыты показывают, что двойниковая часть кристалла является зеркальным отражением решетки исходного кристалла в некоторой плоскости, называемой плоскостью двойникования (рис. 25, б).

Следует отметить, что с пластической деформацией связанны значительные изменения структуры и свойств кристаллических веществ. Но даже при весьма больших степенях деформирования кристаллическое состояние и тип кристаллической структуры сохраняются, изменяется только форма кристалла. На характер деформирования влияют различные факторы, такие, как тип напряженного состояния, скорость процесса, окружающая среда, температура и др. Все эти факторы при определенных условиях и сочетаниях могут привести к уменьшению

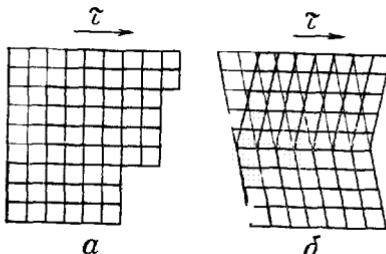


Рис. 25. Механизм пластического деформирования кристалла:
а — скольжение (схема Иоффе); б — двойникование

или к повышению пластичности и хрупкости твердого тела. Поэтому даже в одном и том же теле можно наблюдать либо хрупкость, либо пластичность.

§ 3. Твердость минералов

Прочностные свойства минералов принято оценивать по показателю твердости. Понятие твердости впервые было введено в минералогии. В 1882 г. Моос составил шкалу твердости, в которую было включено десять минералов, принятых в качестве эталона: тальк, гипс, кальцит, флюорит, апатит, ортоклаз, кварц, топаз, корунд и алмаз. Твердость талька принята за единицу, твердость алмаза условно равна десяти.

Каждый предыдущий минерал мягче, чем следующий. Более твердым считался тот минерал, которым можно сделать царапину на поверхности другого, более мягкого минерала, т. е. Моос понимал под *твёрдостью способность одного тела оказывать сопротивление проникновению в него другого тела*. Это толкование твердости остается основным и в настоящее время, хотя и не является исчерпывающим. Шкала твердости Мооса широко применяется в минералогии и сейчас. Физически более строгое толкование твердости было дано Герцем. За меру твердости Герц принимал величину удельного давления в момент достижения предельного состояния в центре вдавливаемой поверхности.

По методу Герца в поверхность тела вдавливается лиза из того же материала, что и сама поверхность. Этот метод очень сложен и не нашел широкого применения.

По мнению В. Д. Кузнецова, мерой твердости может являться и поверхностная энергия твердых тел.

В настоящее время широко распространены методы измерения твердости, основанные на вдавливании в поверхность испытываемого тела более твердого стандартного наконечника (сфера, конус, пирамида) до получения пластического отпечатка. Эти методы не имеют того строгого физического смысла, как метод Герца, но отличаются простотой измерения.

Кроме вдавливания, твердость иногда оценивают царапанием и шлифованием. В этих случаях вдавливание является первичным процессом, так как нельзя произвести ни царапания, ни шлифования (последнее можно рассматривать как многократное царапание) без вдавливания.

Для определения твердости минералов используют в основном метод вдавливания. Но при вдавливании различных наконечников в минералы, являющиеся в своем большинстве телами хрупкими, не всегда можно получить четкий отпечаток, необходимый для количественной оценки твердости. Было обнаружено, что если вдавливать в хрупкие тела заостренные наконечники с большими углами при вершине под очень малыми на-

грузками, то на поверхности этих тел образуются микроотпечатки без следов хрупкого разрушения. Этот метод получил название метода микротвердости.

При определении микротвердости вдавливаемым наконечником является алмазная пирамида. На рис. 26, а показана квадратная пирамида Виккерса с углом при вершине между гранями 136° , а на рис. 26, б — ромбическая пирамида Кнупа, имеющая разные углы между ребрами при вершине 130 и $172,5^\circ$.

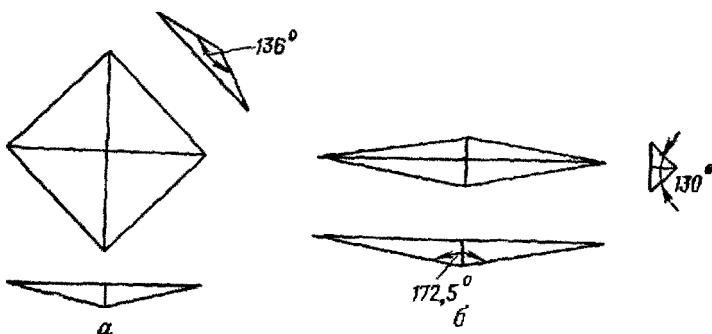


Рис. 26. Алмазные пирамиды:
а — квадратная Виккерса; б — ромбическая Кнупа

Микротвердость измеряется с помощью приборов ПМТ-2 и ПМТ-3, разработанных М. М. Хрущовым и Е. С. Берковичем [104].

Общий вид прибора ПМТ-3 приведен на рис. 27. Прибор состоит из микроскопа с окулярным микрометром, осветителя и механизма вдавливания алмазной пирамиды.

Суть методики измерения микротвердости сводится к следующему:

1) изучаемый образец установить на предметном столике микроскопа под объективом и, наблюдая вид поверхности, с помощью координатных винтов выбрать место измерения твердости;

2) вращением предметного столика образец перевести под механизм нагружения пирамиды;

3) вдавить пирамиду под заданной нагрузкой в течение 5—10 с;

4) обратным вращением предметного столика перевести образец под объектив и измерить длину диагонали полученного отпечатка.

Величина нагрузки подбирается в зависимости от ожидаемой микротвердости поверхности минерала. В комплекте прибора имеются специальные грузы массой 2, 5, 10, 20, 50, 100 и 200 г.

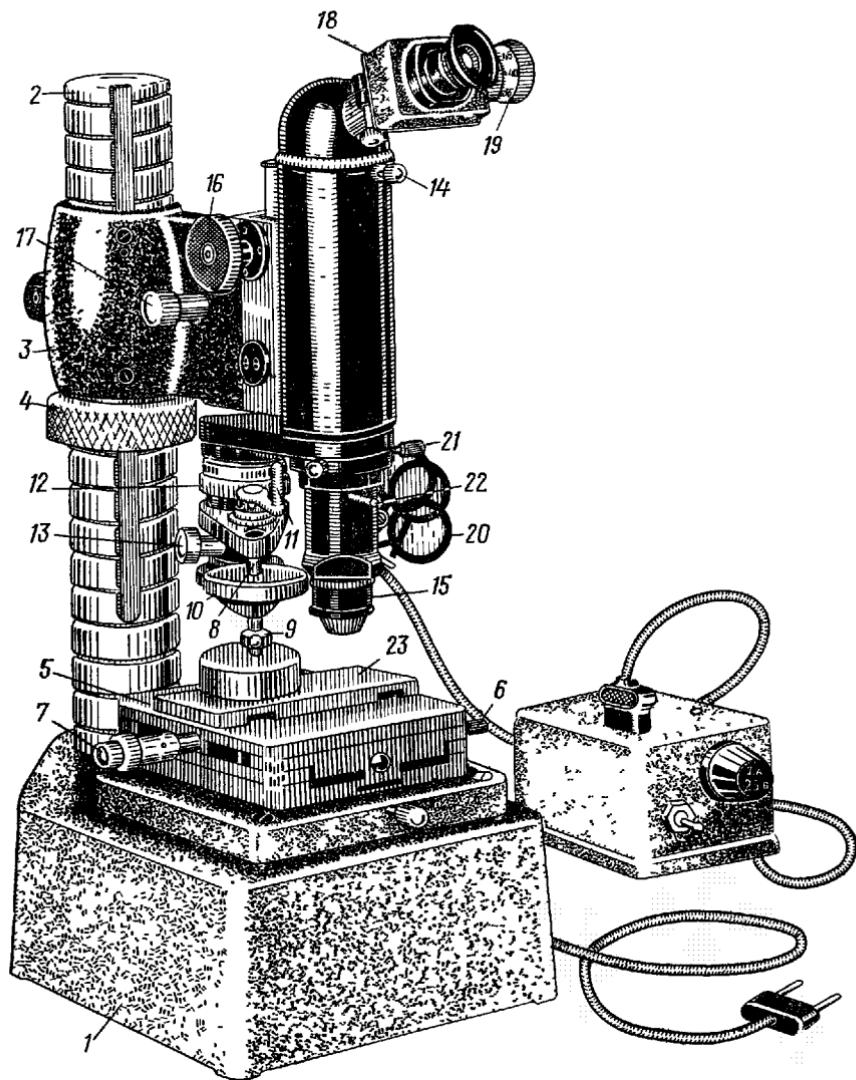


Рис. 27. Прибор ПМТ-3 для определения микротвердости:

1 — станция, 2 — стойка, 3 — кронштейн, 4 — гайка; 5 — предметный столик; 6 — рукоятка; 7 — координатный винт, 8 — нагружающий механизм; 9 — пирамида; 10 — груз; 11 — ручка арретира, 12 — регулировочная гайка; 13 — закрепляющий винт; 14 — тубус; 15 — объектив, 16 — макроподача, 17 — микроподача, 18 — окуляр-микрометр; 19 — отсчетный барабанчик, 20 — освещительное устройство; 21 — центровочный винт, 22 — диафрагмый барабанчик, 23 — подставка

Более подробное описание устройства прибора ПМТ-3 и методики работы с ним можно найти в работе [104].

С помощью прибора ПМТ-3 можно определять твердость (микротвердость) минералов, не только представленных монокристаллами, но и микротвердость отдельных минералов, входящих в состав любой, преимущественно крупнокристаллической породы.

При испытании на микротвердость, как и при обычном испытании на твердость по методу вдавливания пирамиды, величина твердости определяется как частное от деления нагрузки P на боковую поверхность F отпечатка в предположении, что углы у отпечатка такие же, как у пирамиды

$$H_m = P/F \quad (IV.15)$$

(H_m — микротвердость).

В свою очередь

$$F = \frac{d^2}{2 \sin \alpha/2},$$

где d — длина диагонали отпечатка в мм;

α — угол при вершине пирамиды, равный 136° .

Тогда в окончательном виде формула (IV.15) имеет вид

$$H_m = \frac{1.854P}{d^2}. \quad (IV.16)$$

Для ускорения вычислений величины твердости обычно пользуются готовыми таблицами, приложенными к прибору. Для установления числа твердости H_m делают, как правило, не менее трех отпечатков, измеряют обе диагонали каждого отпечатка и в формулу (IV.16) подставляют среднеарифметическое значение.

Таблица 7

Название минерала	Твердость по шкале Мооса	Твердость по Герцу, кгс/мм ²	Микротвердость, кгс/мм ²
Тальк	1	5	2,5
Гипс	2	—	30
Кальцит	3	92	110
Флюорит	4	110	190
Апатит	5	240	540
Ортоклаз	6	250	790
Кварц	7	308	1 120
Топаз	8	525	1 500
Корунд	9	1150	2 300
Алмаз	10	—	10 000

В табл. 7 приведены значения твердости по Герцу и микротвердость эталонных минералов шкалы Мооса.

Из табл. 7 видно, что величина твердости зависит от метода ее определения. Это говорит о том, что нельзя непосредственно сопоставлять показатели твердости, если даже они имеют одинаковую размерность, но получены разными методами.

§ 4. Показатели механических свойств горных пород при простых видах деформирования

Неоднородность горных пород по составу и строению, значительные колебания сил сцепления между кристаллитами в кристаллических породах, между цементом и обломками, а также между кристаллитами цемента обломочных пород обусловливают резкие отличия в показателях механических свойств пород и их породообразующих минералов даже в тех случаях, когда порода является мономинеральной.

Упругие свойства горных пород. В общем случае горные породы не соответствуют модели упругого тела. Для них характерны явления упругого гистерезиса и упругого последействия. Вид зависимости напряжений от деформации зависит от скорости нагружения [110]. Поэтому следует помнить, что определение показателей упругих свойств горных пород не означает, что горные породы — идеально упругие тела, а преследует цель оценить проявление упругих свойств в более сложной модели тела при стандартных методах испытания.

Для минералов и некоторых горных пород зависимость нагрузки от перемещения при деформировании линейная, т. е. как бы выполняется закон Гука. Модуль упругости в этом случае можно определить по формуле (IV.4).

Для многих горных пород зависимость нагрузки от перемещения не является линейной. При небольшой кривизне модуль упругости E можно с достаточной точностью определить по формуле (IV.4). Если же кривизна значительна, то график нагрузка — перемещение разбивается на ряд участков с одинаковым шагом по нагрузке. Отдельно для каждого участка, как для прямолинейного, по выражению (IV.4) определяется значение модуля упругости E . Среднее значение модуля вычисляют по формуле

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{t=n} E_i \quad (\text{IV.17})$$

(n — число участков).

В табл. 8 приведены модули Юнга для некоторых горных пород, полученные при одноосном сжатии.

Таблица 8

Горная порода	Модуль Юнга $E \cdot 10^{-5}$ кгс/см ²	Горная порода	Модуль Юнга $E \cdot 10^{-5}$ кгс/см ²
Глинистые сланцы	1,5—2,5	Доломиты	2,1—16,5
Песчаники	3,3—7,8	Граниты	До 6,0
Известняки	1,3—8,5	Базальты	До 9,7
Мрамор	3,9—9,2	Кварциты	7,5—10,0

Экспериментально [73, 107, 108] установлено, что проявление упругих свойств горных пород зависит от ряда факторов.

Прежде всего величина модуля Юнга для горных пород (в отличие от породообразующих минералов) зависит от вида деформации и величины приложенной нагрузки, особенно в области больших нагрузок. Установлено, что между величинами модулей Юнга при растяжении E_p , изгибе E_u и сжатии E_{ck} существует неравенство

$$E_p < E_u \ll E_{ck}. \quad (\text{IV.18})$$

Модуль Юнга при изгибе в 1,1—1,3 раза больше, чем при растяжении, и составляет 0,25—0,35 от модуля Юнга при сжатии.

Если основной породообразующий минерал, входящий в состав породы, имеет высокий модуль Юнга, то и порода имеет высокий модуль, но модуль Юнга породы E_p всегда будет меньше модуля упругости минерала E_m , т. е. $E_p < E_m$. Это объясняется тем, что величина модуля Юнга главным образом зависит от сил взаимодействия в кристаллических решетках, которые в горных породах по местам контактов зерен значительно слабее, чем внутри зерен минералов. Поэтому модуль Юнга породы в целом не может превышать максимальную величину модуля минералов, слагающих данную породу.

В табл. 9 приводятся величины модуля Юнга для некоторых горных пород, полученные Е. А. Герчиковым при различных напряжениях сжатия.

Из табл. 9 видно, что с увеличением напряжения сжатия величина модуля Юнга породы увеличивается.

На величину модуля упругости горных пород влияют природные факторы. При прочих одинаковых условиях мелкокристаллические породы имеют более высокий модуль Юнга, чем крупнокристаллические. В данном случае существенно влияет масштабный фактор. Например, если для крупнокристаллических песчаников $E_{ck} = 2,77 \cdot 10^5$ кгс/см², то для среднекристаллических $E_{ck} = 2,86 \cdot 10^5$ кгс/см², а для мелкокристаллических $E_{ck} = 3,0 \cdot 10^5$ кгс/см².

Таблица 9

Порода	Напряжение сжатия, кгс/см ²	Модуль Юнга, кгс/см ²
Глина	0—10 40—50	86 367
Глинистый мергель	0—10 20—30	355 1863
Известняк	10—20 40—50	873 · 10 ³ 125 · 10 ⁴

Установлено [107], что при прочих одинаковых условиях повышение песчанистости породы ведет к увеличению ее модуля Юнга. Модуль Юнга у глинистых сланцев возрастает по мере увеличения их карбонатности. Значительно влияют на величину модуля Юнга состав и строение цементирующего вещества у обломочных горных пород. Так, например, песчаники с карбонатным цементом обладают большим модулем Юнга, чем те, которые имеют глинистый цемент.

Значительно влияет на величину модуля Юнга пористость пород: как правило, с увеличением пористости модуль Юнга породы уменьшается.

Упругие свойства горных пород зависят от их слоистости и сланцеватости. Для глинистых сланцев в направлении, перпендикулярном к сланцеватости, модуль Юнга меньше, чем в направлении, параллельном ей [108].

Кроме слоистости и сланцеватости, на величину модуля Юнга влияет влажность породы. При прочих одинаковых условиях с увеличением влажности E уменьшается. Например, при увеличении влажности глинистой породы от 3 до 14% модуль Юнга уменьшается от $7,3 \cdot 10^3$ до $3,2 \cdot 10^3$ кгс/см², а при увеличении влажности от 14 до 23% модуль Юнга уменьшается от $3,2 \cdot 10^3$ до $0,3 \cdot 10^3$ кгс/см².

В горных породах необратимые деформации появляются даже при незначительных нагрузках по сравнению с разрушающими, хотя при этом и не нарушается (в пределах точности опытов) прямая пропорциональность между напряжениями и деформациями.

Необратимые деформации в случае многократного деформирования становятся равными нулю, а упругие свойства пород возрастают.

В связи с этим К. В. Руппенейт различает модуль Юнга E , получаемый при однократном нагружении, нормальный модуль-

E_n , получаемый в результате исключения необратимых деформаций методом многократной нагрузки и разгрузки (выкачивание остаточных деформаций), и так называемый динамический модуль E_d , величина которого вычисляется по скорости распространения упругих волн.

Перечисленные три значения модуля всегда различны и подчиняются неравенству $E < E_n < E_d$, причем модуль E меньше нормального модуля упругости в 1,2—1,5 раза и меньше пинамического модуля в 2,0—2,2 раза.

Для более полной характеристики упругих свойств пород желательно определять все три значения модуля, но для сравнения упругих свойств пород и при расчетах достаточно определять только модуль Юнга, получаемый в случае однократного нагружения.

Таким образом, модуль упругости горных пород зависит от их минералогического состава, вида нагружения и величины приложенной нагрузки, от структуры, текстуры и глубины залегания пород, от состава и строения цементирующего вещества у обломочных пород, от степени влажности, песчанистости и карбонатности пород.

Необходимо отметить, что для потребностей технологии бурения скважин рассмотренные выше модули упругости для простых напряженных состояний не всегда могут оказаться пригодными. Для этих целей модуль упругости горных пород определяется при сложном напряженном состоянии.

Коэффициент Пуассона. Для определения коэффициента Пуассона необходимо измерить поперечные и продольные деформации, так как

$$\mu = \epsilon_x / \epsilon_y, \quad (IV.19)$$

где μ — коэффициент Пуассона;
 ϵ_x — поперечная деформация,
 ϵ_y — продольная деформация.

Точность определения коэффициента Пуассона значительно ниже, чем модулей упругости. Однако вполне установлено, что для горных пород они колеблются в пределах от 0,10 до 0,45, что видно из табл. 10, в которой приведены величины μ для некоторых горных пород.

Таблица 10

Порода	μ	Порода	μ
Глины пластичные	0,38—0,45	Каменная соль	0,44
Глины плотные	0,25—0,35	Песчаники	0,30—0,35
Глинистые сланцы	0,10—0,20	Гранит	0,26—0,29
Известняки	0,28—0,33		

На величину коэффициента Пуассона влияет тот же комплекс факторов, что и на модуль упругости, а именно: метод определения ($\mu_p < \mu_{ск}$), структура, текстура и глубина залегания породы (чем глубже залегает порода, чем плотнее она и старше по возрасту, тем меньше для нее μ) и другие факторы.

Модуль деформации при сдвиге. В практике исследований горных пород модуль деформации при сдвиге G определяется лишь в тех случаях, когда испытываются образцы горных пород на кручение.

Модуль G нетрудно вычислить, если известны модуль Юнга и коэффициент Пуассона из выражения (II.9). Однако, учитывая нелинейность зависимостей между напряжениями и деформациями для горных пород и большое различие между E_p и $E_{ск}$, такая оценка модуля G будет весьма приближенной.

Прочность горных пород при простых видах деформирования. Под прочностными характеристиками горных пород чаще всего понимают значения их временного сопротивления в процессе одноосного сжатия, растяжения, изгиба и сдвига.

В табл. 11 показана прочность при одноосном сжатии для некоторых горных пород, слагающих нефтяные месторождения Башкирии (по данным УфНИИ).

Таблица 11

Порода	$\sigma_{ск}, кгс/см^2$	Порода	$\sigma_{ск}, кгс/см^2$
Известняки пелитоморфные	830—1320	Доломиты мелкокристаллические	2500
Известняки мелкокристаллические	1060—1700	Алевролиты	420—1200
Известняки органогенно-обломочные	1300—2000	Песчаники	290—800
Известняки окремнельые	2000—2600	Мергели алевритистые	1340—1770
		Ангидриты	1500—1940*

* Ангидриты, по-видимому, частично доломитизированы.

Из табл. 11 видно, что прочность при одноосном сжатии для одноименных пород колеблется в широких пределах. Вместе с тем прочность пород разного минералогического состава иногда имеет одну и ту же величину. Эти данные показывают, что на прочность горных пород влияют не только их минералогический состав, но и ряд других факторов, в частности структура и текстура породы, глубина залегания и т. п.

В табл. 12 приведены пределы прочности на растяжение σ_p и изгиб σ_b в сравнении с $\sigma_{ск}$ для некоторых пород. Данные получены при растяжении и сжатии перпендикулярно слоистости песчаников.

Из табл. 12 видно, что прочность при одноосном сжатии значительно превышает прочность на изгиб и на растяжение.

В табл. 13 показана относительная прочность некоторых горных пород при различных видах испытаний.

Таблица 12

Порода	Пределы прочности, кгс/см ²		
	σ_p	σ_i	σ_{sjk}
Песчаники крупиокристаллические . . .	51,4	103,0	1420
Песчаники среднекристаллические . . .	52,0	131,0	1510
Песчаники мелкокристаллические . . .	79,5	249,0	1850
Глинистые сланцы*	17,0—80,0	40,0—360,0	140,0—610,0
Песчано-глинистые сланцы*	32,0	35,0	180,0
Гипсы	19,0	60,0	170,0
Известняки с гипсом	24,0	65,0	420,0

* Пределы прочности у этих пород определялись при приложении нагрузки вдоль напластования.

Из табл. 13 видно, что чем большую роль играют растягивающие напряжения при данном виде испытаний, тем меньше прочность горной породы в этих условиях напряженного состояния.

Данные о прочности горных пород на сдвиг показывают, что в подавляющем числе случаев она несколько выше, чем прочность на изгиб.

Таблица 13

Горная порода	Относительная прочность, %			
	сжатие	сдвиг	изгиб	растяжение
Граниты	100	9	8	2—4
Песчаники	100	10—12	6—20	2—5
Известняки	100	15	8—10	4—10

Рассматривая прочность горных пород в зависимости от вида испытания, нетрудно заметить, что наибольшее сопротивление горные породы оказывают в случае сжатия, а при других видах испытаний их прочность невелика, т. е. имеет место неравенство

$$\sigma_{sjk} \gg \tau_c \geq \sigma_i \geq \sigma_p. \quad (\text{IV.20})$$

В заключение следует отметить, что с точки зрения разрушения горных пород наивыгоднейшим видом деформирования

является растяжение. Поэтому во время конструирования породоразрушающих инструментов следует учитывать этот фактор.

Условие $\sigma_{сж} \gg \sigma_p$, а также зависимость прочностных и упругих характеристик от большого числа технических и природных факторов делают невозможным использование классических теорий прочности для количественных решений задач механики горных пород.

Натурные испытания горных пород в скважинах осуществить очень сложно. Поэтому большое значение имеет изучение деформирования и разрушения горных пород в условиях, моделирующих их естественное залегание, вскрытие их скважиной и воздействие на них породоразрушающих инструментов.

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ВСЕСТОРОННЕГО СЖАТИЯ

§ 1. Напряженное состояние горных пород в условиях залегания

Напряженное состояние горных пород в земной коре обусловлено давлением вышележащих пород и тектоническими процессами.

При отсутствии тектонических движений на участке земной коры напряженное состояние горных пород осесимметрично относительно вертикали, что позволяет охарактеризовать его двумя компонентами в цилиндрической системе координат:

$$\sigma_z = \sigma_3 \text{ и } \sigma_r = \sigma_1 = \sigma_2.$$

Вертикальные напряжения σ_z обусловлены весом вышележащих горных пород

$$\sigma_z = -\gamma z, \quad (V.1)$$

где γ — средняя плотность вышележащих горных пород;

z — глубина залегания горных пород.

Горные породы в процессе сжатия вертикальным давлением не свободны в деформировании в поперечном направлении. Из условия

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu (\sigma_z + \sigma_r)] = 0$$

получим, что

$$\sigma_r = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_z, \quad (V.2)$$

или, подставляя значение σ_z из выражения (V.1), получаем формулу Н. А. Динника для упругого напряженного состояния горных пород

$$\sigma_r = -\frac{\mu}{1-\mu} \gamma z. \quad (V.3)$$

В общем случае

$$\sigma_r = -\lambda \gamma z. \quad (V.4)$$

Величина λ называется коэффициентом бокового распора. В результате релаксации происходит выравнивание напряжений в земной коре, т. е. $\lambda \rightarrow 1$.

В работе [110] отмечается, что в большинстве случаев можно принять, что $\lambda=1$ и $\sigma_z=\sigma_r$. Это значит, что горные породы находятся в условиях равномерного всестороннего сжатия. В этом случае напряженное состояние будет характеризоваться средним нормальным напряжением

$$\sigma_0 = \sigma_z = \sigma_r.$$

Если принять, что $\gamma=2,5 \text{ г}/\text{см}^3$, то при $z=1000 \text{ м}$ величина σ_0 составит $250 \text{ кгс}/\text{см}^2$, при $z=10000 \text{ м}$ $\sigma_0=2500 \text{ кгс}/\text{см}^2$ и т. д.

Естественные напряжения в земной коре принято называть *горным давлением*.

Вертикальную составляющую горного давления σ_z называют *геостатическим или полным горным давлением*, а горизонтальную составляющую σ_r — *боковым давлением*.

Пористые горные породы всегда насыщены жидкостью или газом. Давление поровой жидкости принято называть *пластовым*.

В нормальных условиях величина пластового давления p приблизительно равна гидростатическому давлению воды

$$p = \gamma z. \quad (\text{V.5})$$

В некоторых случаях пластовое давление может значительно превышать гидростатическое. Причем, вероятность встречи с аномально высоким пластовым давлением с глубиной залегания горных пород увеличивается. Аномально высокие пластовые давления наиболее широко распространены в районах активной тектонической деятельности.

Рассмотрим влияние давления жидкости в порах на напряженное состояние скелета пористой горной породы. Возьмем идеальную модель пористого твердого тела и вырежем из нее единичный элемент (рис. 28). Сверху на единичную площадку действует геостатическое давление

$$p_t = \gamma z. \quad (\text{V.6})$$

Если бы все вертикальное давление воспринималось скелетом породы, то напряжение в скелете в сечении I—I было бы максимальным

$$\sigma_{\max} = -p_t/v \quad (\text{V.7})$$

(v — доля единичной площади, занимаемая скелетом в рассматриваемом сечении).

Однако жидкость, находящаяся в порах, воспринимает нагрузку, равную $p(1-v)$. Следовательно, напряжение в скелете

$$\sigma_c = -\frac{p_t - p(1-v)}{v} = -\left[\sigma_{\max} - p\left(\frac{1-v}{v}\right)\right]. \quad (\text{V.8})$$

Обозначим $\frac{1-v}{v} = \eta$, тогда

$$\sigma_c = -(\sigma_{\max} - \eta p). \quad (\text{V.9})$$

Величина η зависит от пористости и структуры порового пространства. Из формулы (V.9) видно, что по мере увеличения пластового давления наблюдается уменьшение вертикальной нагрузки на скелет. Если $p = p_r$, то

$$\sigma_c = -p_r.$$

Следовательно, по мере приближения пластового давления к геостатическому напряженное состояние скелета будет стремиться к равномерному всестороннему сжатию. Более полно вопросы напряженного состояния и деформирования пористых пород изложены в работах [31, 56].

Из курса геологии известно, что с увеличением глубины залегания горных пород повышается и их температура с сред-

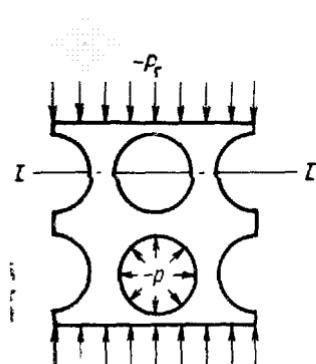


Рис. 28. Модель пористой породы:
 p_r — горное давление; p — пластовое давление

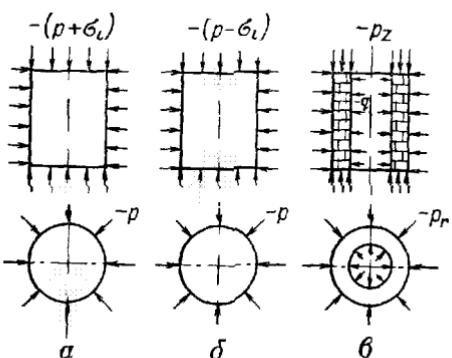


Рис. 29. Основные схемы испытания образцов пород при всестороннем сжатии:
а — схема Кармана; б — схема Бокера; в — полый цилиндр

ним градиентом около $0,03^\circ \text{C}/\text{м}$. Однако величина градиента для различных участков земной коры меняется в широких пределах. В работе [9] приводятся следующие ожидаемые температуры горных пород:

Прикаспийская впадина — на глубине залегания 12—14 км до 300°C ;

Западный склон среднего Урала — на глубине залегания 15 км до 200°C ;

Азербайджан — на глубине 8—10 км до 400°C ;

Курильские острова — на глубине 15 км до 600°C .

Основные схемы лабораторного изучения деформирования и разрушения горных пород в условиях всестороннего сжатия приведены на рис. 29. По схеме Кармана (рис 29, а) испытываются цилиндрические образцы, предварительно нагруженные всесторонним равномерным давлением p и нагретые до требуе-

мой температуры T , на сжатие вдоль оси вращения цилиндра. В процессе испытания увеличивается нагрузка на торцевые поверхности образца

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \sigma_3 = -(p + \sigma_i); \\ \sigma_r &= \sigma_1 = \sigma_2 = -p \\ T &= \text{const.}\end{aligned}\quad (\text{V.10})$$

Измерение продольных и поперечных деформаций как функций изменения напряжения σ_z позволяет получить значения предела текучести породы, временного сопротивления сжатию, модуля Юнга и коэффициента Пуассона.

По схеме Бокера (рис. 29, б) испытываются на растяжение (выдавливание) под действием бокового давления со стороны цилиндрической поверхности предварительно нагруженные, как и по схеме Кармана, цилиндрические образцы. В процессе испытания снижается нагрузка на торцевые поверхности

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \sigma_1 = -(p - \sigma_i); \\ \sigma_r &= \sigma_2 = \sigma_3 = -p; \\ T &= \text{const.}\end{aligned}\quad (\text{V.11})$$

Обработка результатов измерения позволяет также получить прочностные и упругие характеристики горных пород.

По третьей схеме испытываются полые цилиндры [110]. Возможны два варианта испытания. Эта схема позволяет получить

$$\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$$

и резко неоднородное напряженное состояние по толщине стенки полого образца.

Лабораторные установки, реализующие описанные схемы, и методика работы на них описаны в монографиях [9, 110].

§ 2. Всестороннее равномерное сжатие горных пород. Сжимаемость пород

Условие, когда все три главные сжимающие напряжения равны, т. е. $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, называется равномерным всесторонним сжатием. Из выражений (II.2) и (II.5) следует, что в этом случае касательные напряжения равны нулю. Из третьей и четвертой теорий прочности следует, что, как бы велико ни было среднее давление ($\sigma_0 = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$), в горных породах не должно возникать ни остаточных деформаций, ни разрушений. Горная порода должна деформироваться только упруго в соответствии с законом Гука (II.10).

Эти выводы хорошо подтверждаются при испытаниях плотных, однородных горных пород. В процессе деформирования пористых горных пород наблюдаются не только остаточные

деформации, но и их разрушение, так как напряженное состояние скелета породы существенно отличается от равномерного всестороннего сжатия.

Испытания при равномерном всестороннем сжатии проводятся для изучения сжимаемости горных пород и минералов. Сжимаемость минералов и пород характеризуется коэффициентом объемного сжатия β и модулем объемной деформации при сжатии.

Под коэффициентом объемного сжатия β понимают относительное уменьшение объема V с увеличением давления на 1 кгс/см², т. е.

$$\beta = \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dp}, \quad (V.12)$$

(V_0 — первоначальный объем при нормальных давлении и температуре).

Если в процессе деформирования соблюдается закон Гука, то

$$\frac{dV}{dp} = -\frac{V_0 - V}{p}. \quad (V.13)$$

Подставив (V.13) в выражение (V.12), получим

$$\beta = \frac{V_0 - V}{V_0 p} = \frac{\varepsilon_V}{p}, \quad (V.14)$$

а так как $p = \sigma_0$, то $\beta = 1/K$, где K модуль объемной деформации, определяемый по формуле (II.11)

В табл. 14 приведены коэффициенты объемного сжатия для некоторых минералов и горных пород по данным Адамса.

Из табл. 14 видно, что коэффициент β для большинства минералов и горных пород составляет 10^{-6} и даже 10^{-7} см²/кгс, т. е. объем пород с увеличением давления на 1 кгс/см² уменьшается на несколько миллионных или даже десятимиллионных долей от их первоначального объема.

Таблица 14

Минерал или порода	Коэффициент объемного сжатия $\beta \cdot 10^6$ при давлении, кгс/см ²	
	2000	10000
Алмаз	0,18	0,18
Оlivин	0,84	0,84
Кальцит	1,39	1,39
Полевые шпаты	1,51—1,88	1,34—1,68
Кварц	2,63	2,31
Каменная соль	4,01	3,53
Гранит	2,12	1,88
Сиенит	1,87	1,68
Габбро	1,20	1,17

По мере увеличения давления коэффициент β для таких минералов, как алмаз, оливин и кальцит (при указанных в табл. 14 давлениях), не изменяется, а для таких минералов, как полевые шпаты, кварц и каменная соль, коэффициент сжимаемости уменьшается. Коэффициент сжимаемости горных пород с увеличением давления, как правило, уменьшается в большей степени, чем слагающих их минералов. Это в значительной степени обусловлено уплотнением пород, так как их пористость не равна нулю. Для минералов уменьшение коэффициента сжимаемости с ростом давления не может быть объяснено уплотнением (хотя уплотнение структуры вследствие залечивания дефектов может иметь место). В этом случае главную роль играет закономерность роста сил отталкивания при сближении частиц.

Коэффициент сжимаемости у горных пород всегда больше и лишь в отдельных случаях равен среднему коэффициенту объемного сжатия минералов, входящих в состав данной породы. Это объясняется менее плотным сложением горной породы, наличием большого количества дефектов на внутренних поверхностях (поверхностях зерен).

§ 3. Особенности деформирования и разрушения горных пород в условиях неравномерного всестороннего сжатия

С точки зрения устойчивости горных пород, слагающих стенки скважины, и разрушения их на забое наиболее интересен случай неравномерного всестороннего сжатия, которое имеет место, если хотя бы одно главное напряжение не равно двум другим. В общем случае имеет место условие

$$\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3. \quad (V.15)$$

Наиболее полно исследования закономерностей деформирования горных пород в условиях неравномерного всестороннего сжатия описаны в работах [9, 76, 110]. Рассмотрим основные результаты этих исследований.

Результаты испытаний по приведенным выше схемам (см. рис. 29) имеют вид зависимостей

$$\sigma_i = f(\epsilon) \quad (V.16)$$

при определенных значениях начальной величины среднего давления p . Обобщенный вид зависимости (V.16) приведен на рис. 30. На отрезках $0a_1$, $0a_2$, $0a_3$ и $0a_4$ соблюдается закон Гука. На отрезках кривой a_2b_2 , a_3b_3 , a_4b_4 имеет место переходный процесс, заканчивающийся или установившимся пластическим деформированием (отрезки b_2c_2 , b_3c_3 , b_4c_4), или хрупким разрушением (отрезок ac_1). Если пластические сдвиги локализуются в определенных зонах образца, то развитие деформирования со-

проводится уменьшением σ_i и заканчивается разрушением образца. В этом случае модуль пластиичности или отрицателен, или равен нулю.

Если пластические сдвиги равномерно распределены по образцу, то наблюдается упрочнение, т. е. развитие деформирования идет лишь при увеличивающемся напряжении (отрезок b_4c_4). Однако и этот процесс заканчивается второй переходной зоной c_4d_4 и далее локализацией деформации и разрушением.

Величина напряжений, соответствующая точкам a_1, a_2, a_3 и a_4 , обозначается σ_{is} и называется пределом текучести породы. Величина напряжений, отвечающая условию

$$d\sigma_i/d\varepsilon = 0,$$

соответствует прочности породы и обозначается σ_{ic} .

Из рис. 30 видно, что с увеличением всестороннего сжатия увеличивается как предел текучести, так и прочность породы. Кроме того, наблюдается пластического деформирования (от хрупкого разрушения до деформирования с упрочнением). В табл. 15 приведены значения предела текучести σ_{is} и предела прочности σ_{ic} образцов горных пород при статических испытаниях по данным [110].

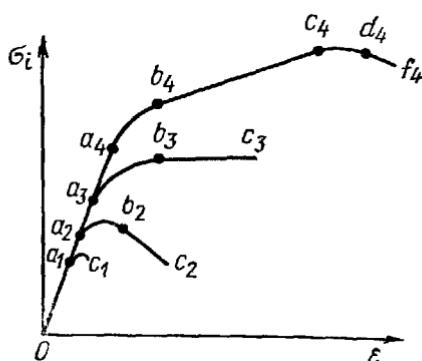


Рис. 30. Обобщенный вид зависимостей σ_i от ε при различных значениях начального всестороннего сжатия $|p_1| < |p_2| < |p_3| < |p_4|$

и изменение процесса пластического деформирования (от хрупкого разрушения до деформирования с упрочнением). В табл. 15 приведены значения предела текучести σ_{is} и предела прочности σ_{ic} образцов горных пород при статических испытаниях по данным [110].

Таблица 15

Горная порода	p , кгс/см ²	σ_{is} кгс/см ²	σ_{ic} кгс/см ²
Каменная соль	0* 880	— 350	260 1130
Мрамор	0 900 2200	— 2300 3400	635 3600 4300
Доломит	0 965	— —	1000 3515
Песчаник	0 950	— —	520 2280

* Одноосное сжатие, при одноосном сжатии можно принять $\sigma_{is}=\sigma_{ic}$.

Из табл. 15 видно, что предел текучести каменной соли с увеличением среднего давления изменяется мало, тогда как предел прочности увеличился более чем в 4 раза. Более существенно увеличение σ_{is} и σ_{ic} у мрамора. Доломит и песчаник при заданных начальных давлениях пластичных свойств не проявляют, однако предел прочности увеличился в 3—4 раза. Пластическая деформация зависит от всестороннего сжатия, вида породы и ее строения. По данным Б. В. Байдюка [9], у некоторых разновидностей известняков пластическая деформация достигает 0,07 при давлении 500 кгс/см² и 0,30 при давлении 1000 кгс/см², у ангидритов от 0,05 до 0,30 при давлениях 1000—1500 кгс/см², а у алевролитов от 0,05 до 0,25 при давлениях 500—2000 кгс/см.

Величина октаэдрических касательных напряжений при испытаниях по схемам Кармана (BA) и Бокера (CA)

Рис. 31. График зависимости σ_i от σ_0 и характер изменения напряжений при испытаниях по схемам Кармана (BA) и Бокера (CA)

$$\tau_{окт} = \frac{1}{3} \sqrt{(p - p)^2 + [p - (p + \sigma_i)]^2 + [p - (p + \sigma_i)]^2} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_i. \quad (V.17)$$

Из выражения (V.17) следует, что величина σ_i равна интенсивности касательных напряжений.

Таким образом, на основании испытаний при всестороннем неравномерном сжатии по рассмотренным выше схемам непосредственно могут быть получены зависимости

$$\sigma_{is} = f(\sigma_0), \quad (V.18)$$

соответствующие обобщенному условию прочности Мора (II.31), где

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3).$$

Общий вид зависимости (V.18) приведен на рис. 31.

Существующие методики испытания при всестороннем сжатии не обеспечивают условия $\sigma_0 = \text{const}$. В случае испытания по первой схеме имеет место увеличение всестороннего сжатия

$$\sigma_0 = - \left(p + \frac{\sigma_t}{3} \right), \quad (V.19)$$

т. е. нагружение идет по линии BA , а σ_0 меняется от p_1 до p_{0A} (см. рис. 31). При испытании по второй схеме имеет место уменьшение всестороннего сжатия

$$\sigma_0 = - \left(p - \frac{\sigma_i}{3} \right). \quad (\text{V.20})$$

Нагружение в этом случае идет по линии CA , а величина всестороннего сжатия уменьшается от p_{1B} до p_{0A} . Отсюда следует, что при использовании разных схем нагружения можно получить различный характер нагружения и наиболее полно воспроизвести реальный процесс деформирования горных пород. Возможности схем испытаний значительно расширяются при варьирующих значениях бокового давления.

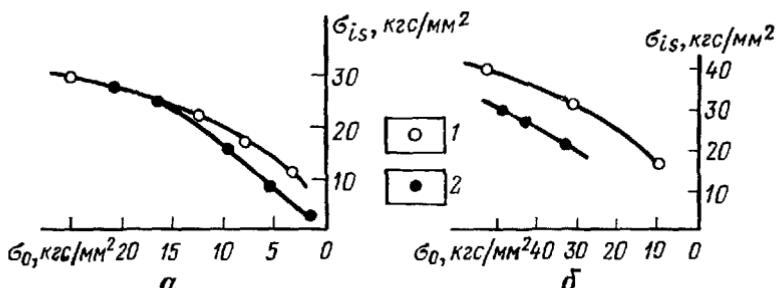


Рис. 32. Зависимости σ_{is} от σ_0 ангидрита *a* и слоистого доломита *b*:
1 — схема Кармана; 2 — схема Бокера

На рис. 32 приведены характерные графики зависимости σ_{is} от σ_0 для изотропной (*a*) и анизотропной (*b*) пород [110]. Из рис. 32 видно, что величина предела текучести породы в обоих случаях существенно зависит от характера изменения среднего давления. Для анизотропных пород это влияние больше, чем для изотропных. С ростом среднего давления влияние характера его изменения уменьшается.

Влияние температуры [110] сводится главным образом к уменьшению предела текучести σ_{is} . Для большинства осадочных пород нагрев до 200°C приводит к уменьшению величины σ_{is} на 15—20%. Для каменной соли предел текучести уменьшается в несколько раз. В пластической области деформирования наблюдается алгебраическое увеличение модуля plasticности.

§ 4. Напряженное состояние горных пород вокруг бурящейся скважины

Вскрытие горных пород скважиной существенно изменяет их напряженное состояние, так как давление в скважине, как правило, ниже бокового давления горных пород. Стенки скважины

остаются длительное время незакрепленными и подвергаются как переменным нагрузкам так и физико-химическому воздействию промывочной жидкости. Все эти факторы отрицательно влияют на устойчивость горных пород стенок скважины и могут вызвать их значительное деформирование и обваливание. В настоящее время с ростом глубин бурения проблема устойчивости стенок скважины стоит весьма остро. В последнее время появился целый ряд работ [34, 75, 76], освещавших различные стороны этой проблемы.

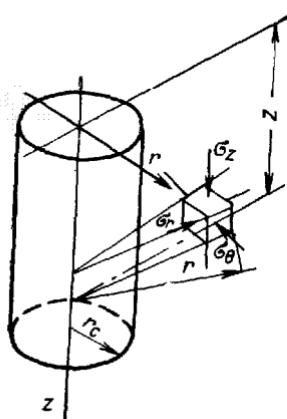


Рис. 33. Расчетная схема для определения напряжений вокруг вертикальной скважины

напряженного состояния пород описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}\sigma_{zp} &= -\gamma z; \\ \sigma_{rp} &= (\lambda\gamma - \gamma_1) z \frac{r_c^2}{r^2} - \lambda\gamma z; \\ \sigma_{\theta p} &= -(\lambda\gamma - \gamma_1) z \frac{r_c^2}{r^2} - \lambda\gamma z,\end{aligned}\quad (V.21)$$

где γ_1 — удельный вес жидкости, заполняющей скважину.

На рис. 34 упругое распределение напряжений по горизонтальному направлению от оси скважины представлено в виде графиков зависимости в относительных координатах

$$\frac{\sigma}{\sigma_z} = f\left(\frac{r}{r_c}\right).$$

Из рис. 34 видно, что наибольшее изменение напряженного состояния горных пород имеет место на стенке скважины и обусловлено разностью между боковым давлением в горных породах $\lambda\gamma z$ и гидростатическим давлением в скважине $\gamma_1 z$.

С уменьшением гидростатического давления в скважине уменьшаются радиальные напряжения σ_{rp} на стенке и возрастают тангенциальные напряжения $\sigma_{\theta p}$. Причем, напряжения $\sigma_{\theta p}$ в пределе могут превысить величину горного давления до двух раз (при $\gamma_1=0, \lambda=1$).

Термические напряжения в горных породах. В общем случае температура промывочной жидкости не равна температуре горных пород, вскрытых скважиной. Охлаждение или нагревание стенок скважины вызывает возникновение термических напряжений в горных породах. В работе [7] приведены следующие уравнения для расчета термоупругих напряжений:

$$\begin{aligned}\sigma_{zT} &= \frac{\alpha E (T_c - T_0)}{2(1-\mu) \ln \frac{r_T}{r_c}} \left[1 - 2 \ln \frac{r_T}{r} - \frac{2r_c^2}{r_T^2 - r_c^2} \ln \frac{r_T}{r_c} \right]; \\ \sigma_{rT} &= \frac{\alpha E (T_c - T_0)}{2(1-\mu) \ln \frac{r_T}{r_c}} \left[-\ln \frac{r_T}{r} - \frac{r_c^2 (r^2 - r_T^2)}{r (r_T^2 - r_c^2)} \ln \frac{r_T}{r_c} \right]; \quad (V.22) \\ \sigma_{\theta T} &= \frac{\alpha E (T_c - T_0)}{2(1-\mu) \ln \frac{r_T}{r_c}} \left[1 - \ln \frac{r_T}{r} - \frac{r_c^2 (r^2 - r_T^2)}{r^2 (r_T^2 - r_c^2)} \ln \frac{r_T}{r_c} \right].\end{aligned}$$

где α — коэффициент линейного теплового расширения;
 E — модуль Юнга;
 μ — коэффициент Пуассона;
 T_c — температура на стенке скважины;
 T_0 — температура горных пород до вскрытия скважиной;
 r_T — радиус теплового влияния скважины, определяемый по формуле

$$r_T \approx 2\sqrt{at}, \quad (V.23)$$

где a — коэффициент температуропроводности;
 t — время от начала нагрева или охлаждения.

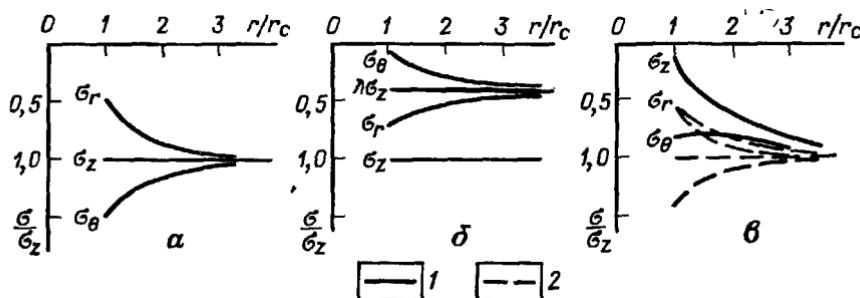


Рис. 34. Упругое распределение напряжений в горных породах:
 $a - \lambda=1, \gamma_1=0,5 \gamma$; $b - \lambda=0,4, \gamma_1=0,7 \gamma$; $c - \lambda=1, \gamma_1=0,6 \gamma$; $1 - \Delta T=70^\circ \text{C}$ (охлаждение); $2 - \Delta T=0$

В работе [10] показано, что при перепаде температур более 10°C термические напряжения имеют тот же порядок, что и напряжения, обусловленные разностью между боковым давлением пород и гидростатическим давлением в скважине. На рис. 34

показано изменение распределения напряжений при охлаждении пород на 70° С. Из рис. 34, в видно, что при охлаждении величины всех компонент напряжений снижаются. Одновременно изменяется и соотношение между компонентами напряжений.

Гидродинамические колебания давления в скважине также вызывают изменения напряженного состояния горных пород. Давление в скважине возрастает выше гидростатического при работе насосов во время бурения за счет гидравлических сопротивлений движению жидкости и во время спуска инструмента за счет поджатия жидкости. Во время подъема инструмента давление снижается вследствие поршневого эффекта, а также при снижении уровня жидкости в скважине. Изменение напряженного состояния в этом случае может быть определено следующим образом:

$$\Delta\sigma_z = 0,$$

так как изменение гидродинамического давления не влияет на геостатическое давление;

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_r &= \sigma_{rp} - \left[(\lambda p_r - p_c) \frac{r_c^2}{r^2} - \lambda p_r \right]; \\ \Delta\sigma_\theta &= \sigma_{\theta p} + \left[(\lambda p_r - p_c) \frac{r_c^2}{r^2} + \lambda p_r \right],\end{aligned}\quad (V.24)$$

где p_c — величина гидродинамического давления в скважине на глубине z , равная

$$p_c = \gamma_1 z + \Delta p, \quad (V.25)$$

(Δp — гидродинамическое изменение давления в скважине).

Очевидно, наиболее неблагоприятные условия для горных пород создаются при снижении давления в скважине, т. е. при подъеме бурильного инструмента из скважины, если имеет место неравенство

$$\lambda p_r > \gamma_1 z.$$

Используя принцип независимости действия сил, складываем напряжения, обусловленные различными факторами, и получаем

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \sigma_{zp} + \sigma_z; \\ \sigma_r &= \sigma_{rp} + \sigma_{rt} + \Delta\sigma_r; \\ \sigma_\theta &= \sigma_{\theta p} + \sigma_{\theta t} + \Delta\sigma_\theta.\end{aligned}\quad (V.26)$$

Результирующие напряжения характеризуют упругое распределение напряжения вокруг бурящейся скважины.

§ 5. Условия устойчивости ствола скважины

Потеря устойчивости и разрушение горных пород стенок скважины могут произойти при достижении предельного состояния. При этом будет иметь место или хрупкое разрушение, или пластическое течение. В работе [47] предлагается для оценки предельного состояния использовать условие текучести Мизеса

$$(\sigma_r - \sigma_0)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_0 - \sigma_z)^2 \leq 2\sigma_s^2, \quad (V.27)$$

где σ_s — предел текучести горной породы при одноосном сжатии.

Для того, чтобы не допустить потери устойчивости горных пород стенок, необходимо соответственно подобрать давление в скважине. А выбор давления в скважине можно свести к выбору удельного веса промывочной жидкости. При действии только разности горного и гидростатического давлений уравнение для выбора удельного веса промывочной жидкости имеет вид

$$\gamma_1 \geq \lambda \gamma - 0,57 \frac{\sigma_s}{z}. \quad (V.28)$$

Если предел текучести породы существенно зависит от величины всестороннего сжатия, то в выражение (V.28) нужно подставить величину σ_{is} , соответствующую среднему давлению

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} (\sigma_r + \sigma_0 + \sigma_z).$$

В этом случае при вычислении необходимо воспользоваться методом последовательных приближений. В первом приближении можно принять

$$\sigma_0 = \frac{1+2\lambda}{3} \gamma z. \quad (V.29)$$

При напряженном состоянии горных пород, близком к предельному, существенное влияние на устойчивость горных пород оказывает режим работы скважины. В процессе промывки скважины температура стенок изменяется в одном направлении, а при остановках циркуляции наблюдается обратное изменение температуры горных пород, вскрытых скважиной. Частота циклов нагрева и охлаждения равна числу рейсов долота в сутки. Циклическое нагревание и охлаждение даже с небольшой амплитудой может привести к появлению усталостных явлений на стенках скважины. В связи с этим необходимо рассмотреть вопрос о длительной прочности горных пород ствола скважины. Этот вопрос изучен сравнительно слабо. Экспериментальное изучение [76] показало, что первоначально (в пределах десятка циклов нагружения) наблюдается увеличение предела текучести образцов (упрочнение), а далее наблюдается снижение предела

текущести. Закономерности изменения предела текучести породы при изменении температуры такие же, как и при изменении давления. Все сказанное выше хорошо иллюстрируется графиками зависимости предела текучести, зафиксированного по величине σ_z от времени (рис. 35) при испытании по схеме полых цилиндров (см. рис. 29, б). Кривые 1 и 2 (рис. 35) получены при $T = -25^\circ\text{C}$, внешнем давлении 700 кгс/см² и колебаниях внутреннего давления q с периодом 120 с:

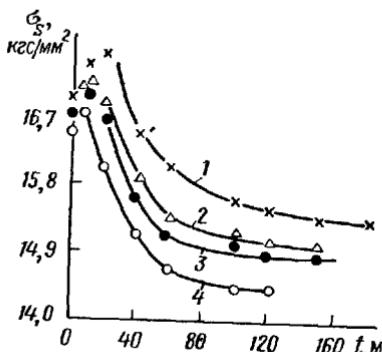


Рис. 35. Изменение предела текучести образцов пород во времени

баний давления и температуры, а также наличия перепада температуры между жидкостью и горной породой. По данным [72], длительная прочность горных пород для условий скважины составляет 0,85—0,95 от первоначальной.

Для определения условий устойчивости горных пород стенок скважины в работе [78] рекомендуется экспериментально определять величину разности горного и гидростатического давлений, соответствующую началу разрушения по схеме испытания полых цилиндров

$$P_{ct} = p_e - p_c.$$

Показатель P_{ct} назван статической прочностью горной породы. Далее определение условия устойчивости стенок скважины сводится к определению удельного веса промывочной жидкости по формуле

$$\gamma_1 \geq \gamma - \frac{P_{ct}}{1,5z} \quad (\text{V.30})$$

(1,5 — запас прочности).

§ 6. Гидроразрыв пласта

Увеличивать бесконечно гидростатическое давление в скважине нельзя, так как может произойти гидравлический разрыв горных пород или раскрытие ранее существовавших трещин, что приведет к уходу в пласт промывочной жидкости. Внешне в про-

=25°C, внешнем давлении 700 кгс/см² и колебаниях внутреннего давления q с периодом 120 с:

1) $q_{min}=300$ кгс/см², $q_{max}=350$ кгс/см²;

2) $q_{min}=300$ кгс/см², $q_{max}=400$ кгс/см².

Кривые 3 и 4 получены при тех же условиях, но при наличии разности температур между образцом и жидкостью 50°C.

Из рис. 35 видно, что длительная прочность образцов пород значительно ниже первоначальной. Степень уменьшения прочности зависит от амплитуды колебаний давления и температуры между жидкостью и горной породой. По данным [72], длительная прочность горных пород для условий скважины составляет 0,85—0,95 от первоначальной.

Для определения условий устойчивости горных пород стенок скважины в работе [78] рекомендуется экспериментально определять величину разности горного и гидростатического давлений, соответствующую началу разрушения по схеме испытания полых цилиндров

$$P_{ct} = p_e - p_c.$$

Показатель P_{ct} назван статической прочностью горной породы. Далее определение условия устойчивости стенок скважины сводится к определению удельного веса промывочной жидкости по формуле

$$\gamma_1 \geq \gamma - \frac{P_{ct}}{1,5z} \quad (\text{V.30})$$

(1,5 — запас прочности).

§ 6. Гидроразрыв пласта

Увеличивать бесконечно гидростатическое давление в скважине нельзя, так как может произойти гидравлический разрыв горных пород или раскрытие ранее существовавших трещин, что приведет к уходу в пласт промывочной жидкости. Внешне в про-

цессе бурения гидроразрыв пластов проявляется как резкое увеличение поглощения жидкости скважиной при превышении определенного давления. На рис. 36 приведен характерный график зависимости изменения давления в скважине (p_c) при проведении экспериментального разрыва пласта нагнетанием в скважину жидкости с постоянным расходом. Вначале давление монотонно растет до определенной критической величины (p_{kp}), а затем снижается и далее остается постоянным, называемым давлением нагнетания (p_n). Скачок давления $\Delta p = p_{kp} - p_n$ обусловлен образованием начальной трещины. Промысловые наблюдения [32] показывают, что скачок давления в большинстве случаев отсутствует. На основании этого в работе делается вывод, что при гидроразрыве происходит в основном раскрытие естественных нарушений сплошности горных пород.

В случае гидроразрыва на стенке скважины должны быть растягивающие напряжения. Основным фактором, препятствующим гидроразрыву, является горное давление.

Анализ формул (V.21) показывает, что при упругом распределении напряжений вокруг скважины растягивающими могут быть только тангенциальные напряжения σ_θ . При $r = r_c$ из выражения (V.21) следует, что

$$\sigma_\theta = p_c - 2\lambda p_r, \quad (V.31)$$

где p_c — давление в скважине на рассматриваемой глубине.

Отсюда следует, что условию $\sigma_\theta > 0$ соответствует условие

$$p_c > 2\lambda p_r. \quad (V.32)$$

Значения коэффициента Пуассона для большинства горных пород лежат в пределах $\mu = 0,1 \div 0,3$, что соответствует значениям $\lambda = 0,11 \div 0,43$. Подставляя в выражение (V.32), получаем

$$p_c > (0,22 \div 0,86) p_r.$$

В нормальных условиях пластовое давление

$$p \approx 0,4 p_r.$$

Нагнетание жидкости в пласт возможно, если $p_c > p$. Отсюда

$$p_c > (0,40 \div 0,86) p_r,$$

что хорошо согласуется с данными о критическом давлении гидроразрыва, проведенными в работах [32, 50], согласно которым

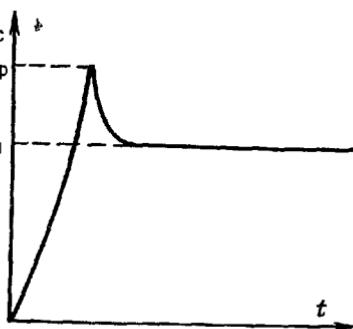


Рис. 36. Изменение давления в скважине при гидроразрыве (по Ю. П. Желтову)

$$p_{kp} \simeq (0,49 \div 0,91) p_r.$$

Следовательно, логично предположение о возникновении или раскрытии вертикальных трещин в горных породах. Такое объяснение гидроразрыва выдвигалось Скоттом, Бирденом, Говардом и др.

С. А. Христиановичем была выдвинута другая гипотеза. В результате пластических деформаций наименее прочных пород (как правило, глинистых) может произойти разгрузка горного давления вокруг скважины. Тогда возможно раскрытие и горизонтальных трещин при давлении, меньшем горного. Прямых исследований ориентации трещин очень мало.

Важной характеристикой горных пород является критическое давление гидроразрыва (p_{kp}). Аналитически определить его не представляется возможным. Определение значений p_{kp} проводится опытным путем.

Колебания температуры и гидродинамического давления в бурящейся скважине приводят к снижению величины критического давления гидроразрыва. В связи с этим должен рассматриваться вопрос о длительной прочности ствола скважины.

В работе [75] на величину допустимого давления в скважине рекомендуется наложить следующее ограничение:

$$p_c \leq (0,85 \div 0,90) p_{kp}.$$

§ 7. Влияние среды на деформирование и разрушение горных пород, слагающих стенки скважины

Горные породы в условиях естественного залегания, а также при вскрытии их скважиной подвергаются воздействию, главным образом, жидкой среды.

Механизму действия среды на твердые тела посвящены работы акад. П. А. Ребиндера и его школы. Этими работами установлено, что изменения под действием среды процессов деформирования и разрушения твердых тел в основном обусловлены физико-химическими явлениями, протекающими на поверхности раздела твердое тело — среда, к которым относятся смачивание, адсорбция и растворение.

По степени смачивания жидкостями все твердые тела делятся на две группы — гидрофильные и гидрофобные. Гидрофильные тела лучше смачиваются водой, хуже углеводородными жидкостями, а гидрофобные — наоборот. Почти все разрушающиеся в процессе бурения скважин горные породы являются телами гидрофильными, т. е. хорошо смачиваются водой.

Под *адсорбией* понимается концентрирование веществ из газа или раствора, происходящее на поверхности твердого тела или жидкости. Адсорбирующееся вещество называется *адсор-*

батом, а тело, на поверхности которого происходит адсорбция, адсорбентом.

Концентрация адсорбата в поверхностном слое в процессе адсорбции будет тем выше, чем больше его физико-химическое свойство по отношению к адсорбенту и чем сильнее адсорбат понижает поверхностную энергию адсорбента. Такие вещества называются поверхностно-активными, или сокращенно ПАВ.

Скорость адсорбции веществ из раствора на поверхность твердого тела невелика и обусловлена скоростью диффузии в жидкости. Для ускорения этого процесса прибегают к перемешиванию растворов. Очевидно, при адсорбции пористой и трещиноватой поверхностью горной породы перемешивание раствора будет играть весьма малую роль.

При смачивании и пропитке горных пород водой наблюдается уменьшение их прочности. Особенно сильно снижается прочность в случае пропитки водой пористых пород. Пористость и тонкая трещиноватость пород позволяют воде проникать в глубь породы и смачивать ее. У смоченной горной породы ослабевают силы сцепления по границам зерен, вследствие чего понижается ее прочность.

Например, прочность на сжатие наиболее пористых горных пород (известняков и песчаников) после их насыщения водой уменьшается на 25—45%.

При пропитке водой массивных горных пород, пористость которых невелика, прочность снижается незначительно.

Добавки к воде поверхностно активных веществ повышают ее активность.

Исследования П. А. Ребиндера, Л. А. Шрейнера, К. Ф. Жигача показали, что жидкость и особенно адсорбируемые поверхностно-активные вещества при проникновении в поры и трещины помимо уменьшения свободной энергии твердого тела создают расклинивающий эффект и уменьшают внутреннее трение в твердом теле при деформировании, что в конечном счете приводит к уменьшению прочности, известному под названием *эффект Ребиндера*.

В разрезах южных месторождений значительные интервалы сложены глинами, которые в результате смачивания их пресной водой интенсивно набухают. В разрезах месторождений, расположенных на Русской платформе, встречаются осыпающиеся глинистые горные породы, не набухающие в воде. Эти горные породы имеют плитчатое или оскольчатое строение. Вода, отфильтровываясь из промывочной жидкости, проникает по границам осколков (блоков) и резко снижает их устойчивость. Под действием переменного давления и механического воздействия бурильного инструмента такие горные породы осыпаются в скважину, осложняя бурение.

До последнего времени основной движущей силой для проникновения воды в горные породы считалось наличие положи-

тельного перепада давления между скважиной и пластом. В настоящее время все большее внимание исследователей привлекает явление осмоса, как одно из движущих сил набухания, уменьшения прочности и обваливания глинистых пород.

Оsmосом называется такое явление, при котором молекулы растворителя (в нашем случае воды) проходят через пористую среду, а молекулы растворенного вещества задерживаются, т. е. наблюдается движение растворителя из области с низкой концентрацией растворенного вещества, в область с высокой концентрацией.

Концентрация ионов в диффузном слое глинистых пород очень велика и обусловлена отжатием свободной воды в процессе уплотнения пород. Разгрузка пород при вскрытии скважиной и контакт с промывочной жидкостью создают благоприятные условия для активного всасывания воды глинистой породой.

Критические значения удельного веса промывочной жидкости, полученные расчетные путем [11] при различной влажности глин двух месторождений приведены в таблице.

Глина	Влажность* % мас.	Критическая величина удельного веса промывочной жидкости в $\text{гс}/\text{см}^3$ при глубине залегания глин, м				
		1000	2000	3000	5000	10 000
Кыновская (Ромашкинское месторождение, Татарская АССР)	2—3	0,00	0,30	0,72	1,12	1,52
	5	1,08	1,26	1,62	1,85	2,05
	8—9	2,20	2,35	2,40	2,44	2,47
Понтическая (Азербайджанская ССР)	4	0,00	0,06	0,50	0,94	1,39
	8	1,32	1,39	1,53	1,75	1,96
	11	1,56	1,87	1,98	2,10	2,21
	13	2,25	2,38	2,42	2,45	2,48

* Критическая влажность различных глинистых пород колеблется в пределах 5—22%.

Из таблицы видно, что вследствие незначительного увлажнения глинистых пород глубина их устойчивого залегания резко уменьшается. Например, для обеспечения устойчивого залегания этих глин на глубине 2000 м необходимо: для кыновской глины с влажностью 5% иметь промывочную жидкость, заполняющую скважину, удельного веса $1,26 \text{ гс}/\text{см}^3$, а при влажности 8—9% — $2,35 \text{ гс}/\text{см}^3$; для понтической глины при влажности 8% — $1,39 \text{ гс}/\text{см}^3$, а при влажности 13% — $2,38 \text{ гс}/\text{см}^3$, т. е. с увеличением влажности глин резко теряется их устойчивость.

При разбуривании солевых отложений промывочная жидкость вызывает их интенсивное растворение. Проникая по трещинам, вода расширяет их, нарушает связь между кристаллами и вызывает их обрушение.

Названные причины нарушения устойчивости ствола скважины с увеличением удельного веса промывочной жидкости не только не уменьшают обвалообразование, а, наоборот, увеличивают его, так как с увеличением перепада давления от скважины к пласту увеличится и скорость фильтрации промывочной жидкости.

В рассмотренных случаях основными средствами профилактики обвалообразований является подбор промывочных жидкостей, не взаимодействующих с горными породами и не растворяющих их.

§ 8. Проявление вязкостных свойств горных пород

Вязкостные (реологические) свойства горных пород, слагающих стенки скважины, с увеличением глубины бурения начинают приобретать все большее значение. При современных глубинах бурения проявление реологических свойств существенно у глинистых, галоидных и сернокислых подгрупп горных пород. Названные подгруппы горных пород проявляют значительную склонность к ползучести при недостаточном противодавлении со стороны скважины.

В практике бурения могут возникнуть следующие основные задачи, требующие учета реологических свойств пород:

1) определить удельный вес промывочной жидкости (противодавление на стенку скважины) из условия, чтобы изменение диаметра скважины за определенное время (например, время бурения скважины, время между рейсами долота) не превышало допустимую величину;

2) при заданном удельном весе промывочной жидкости определить время, за которое изменение диаметра скважины достигнет предельной величины;

3) определить величину давления пород на обсадную колонну, а также определить нагрузку на колонну при направленном сдвигении пород, склонных к ползучести.

Частные решения этих задач приводятся в работах [12, 30, 51, 90].

В общем случае деформация и скорость деформирования пород зависят от величины напряжений и скорости их изменения, времени действия напряжений, свойств жидкости, заполняющей скважину, температуры и др. Одновременный учет всех этих факторов делает задачи чрезвычайно громоздкими и сложными. Поэтому на основании лабораторных испытаний или промысловых наблюдений подбирается наиболее подходя-

щая модель реального деформируемого тела, имеющая математическое описание [69], определяются требуемые характеристики пород и, исходя из конкретных условий, ведется решение той или иной задачи

Более подробное рассмотрение этих вопросов требует знакомства с основами теорий пластичности и ползучести, а также с их математическим аппаратом.

Экспериментальное изучение ползучести пород приствольной зоны скважины и влияния на ползучесть глинистых горных пород различных факторов авторами работ [75, 76] проводилось на полых образцах пород в условиях всестороннего сжатия (см. рис. 29, в).

Были получены следующие основные результаты.

Ползучесть глинистых пород наблюдается практически при любом неравномерном напряженном состоянии. В случае напряженного состояния, близкого к пределу текучести пород, скважина буквально «заплывала» на глазах.

На кривых ползучести четко выделяются лишь области неустановившейся и установившейся ползучести (см. рис. 16). Время неустановившейся ползучести для условий испытаний составляло не более 30 мин.

Существенное влияние наряду со статическим противодавлением со стороны скважины оказывают температура пород и физико-химическое воздействие среды. Подбор неактивных сред позволяет существенно уменьшить скорость ползучести пород. Колебания противодавления в скважине также интенсифицируют процесс деформирования пород. Аналогичное влияние оказывает и колебание температуры жидкости в скважине.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ И ПОКАЗАТЕЛИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВДАВЛИВАНИИ

§ 1. Основные схемы взаимодействия элементов вооружения долота с горной породой

Процессы деформирования и разрушения горных пород на забое скважины весьма сложны и обусловливаются рядом геологических и технических факторов. Горные породы забоя скважины находятся в сложном напряженном состоянии, которое определяется соотношением горного, пластового и гидростатического давлений, пьезопроводностью пород и конфигурацией забоя. Разрушение забоя в процессе бурения производится не сразу по всей площади, а дискретно. На участках разрушения с помощью рабочих элементов породоразрушающего инструмента напряженное состояние меняется таким образом, чтобы достичь предельного состояния по возможности в большем объеме породы и вызвать местное ее разрушение.

По принципу взаимодействия с горной породой все механические породоразрушающие инструменты можно разделить на три большие группы: режуще-скалывающие, дробящие и дробяще-скалывающие.

Схема взаимодействия режуще-скалывающего инструмента с горной породой приведена на рис. 37, а. Из схемы видно, что элемент вооружения долота, перемещаясь со скоростью v_c , срезает (скалывает) горную породу. Параметры работы: скорость движения v_c , силы P и F и свойства среды — основными характеристиками условий разрушения породы по первой схеме. Долотом дробящего действия (рис. 37, б) наносятся прямые удары по поверхности забоя скважины. Динамический процесс деформирования и разрушения описывается уравнениями кинетической энергии (T_k) инструмента и потенциальной энергии деформирования породы (U)

$$T_k = \frac{mv_0^2}{2}, \quad (VI.1)$$

где m — масса долота и ударной штанги;

v_0 — скорость в момент соударения долота с горной породой.

$$U = \int_0^{\delta_0} P(\delta) d\delta, \quad (VI.2)$$

где δ_0 — максимальная глубина погружения долота в породу; P — сопротивление горной породы внедрению долота.

Условие $T_k = U$ является основным при анализе ударного взаимодействия инструмента с горной породой.

Еще более сложна схема взаимодействия элементов вооружения долот дробяще-скользящего типа (рис. 37, в). Взаимодействующий с породой зуб долота вдавливается в породу силой R и одновременно участвует в обусловленных кинематикой

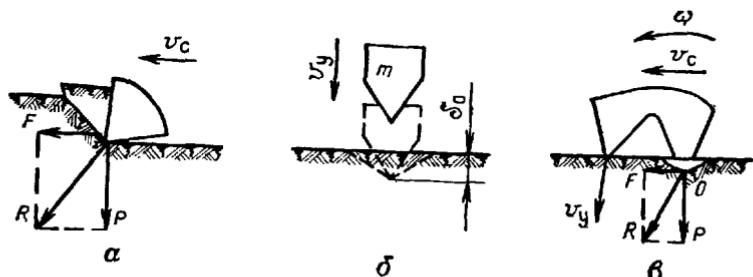


Рис. 37. Схемы взаимодействия элементов вооружения долот с горной породой:

а — резание — скальвание; *б* — дробление; *в* — дробление — скальвание

долота переносом движения (v_c) и относительном вращательном движении с угловой скоростью, равной скорости вращения шарошки (ω). Одновременно соседний зуб движется к поверхности породы со скоростью v_y и наносит удар по поверхности породы

$$\vec{v}_y = \vec{v}_c + \vec{v}_\omega, \quad (\text{VI.3})$$

где $v_\omega = \omega r$ (здесь r — расстояние от вершины зуба до мгновенного центра вращения шарошки). В следующие моменты времени происходит перераспределение нагрузки с первого зуба на второй, и далее первый зуб выходит из контакта с горной породой.

Таким образом, каждый элемент вооружения шарошечного долота периодически оказывает на горную породу сложное дробяще-скользящее действие.

Основным параметром, характеризующим взаимодействие элемента вооружения долота с горной породой, также является реализуемая энергия, которая определяется по формуле

$$A = \frac{A_0 \eta}{t \Sigma z}, \quad (\text{VI.4})$$

где A — работа, совершаемая элементом за одно взаимодействие с горной породой;

A_0 — работа, совершаемая долотом за один оборот;

η — коэффициент передачи мощности вооружению долота;

i — передаточное отношение от долота к шарошке;

Σz — число элементов вооружения долота.

Работа A_0 или измеряется непосредственно, или рассчитывается. Параметры взаимодействия v_y , v_c и частота взаимодействия рассчитываются в соответствии с кинематикой долот [20, 57, 59, 79]. Расчет по формуле (VI.4) позволяет определить лишь среднее значение работы взаимодействия, так как элементы вооружения долот работают в различных сочетаниях, учесть которые можно лишь статистическими методами. Результаты оценочных расчетов названных параметров для трехшарошечного долота 1В-190Т ($\Sigma z=150$; $i \approx 1,5$; $\eta=0,8$) при скорости вращения 1 об/с приведены в таблице.

Частота взаимодействия, 1/с	Скорость переносного движения, м/с	Скорость удара, м/с	Работа взаимодействия кгс·м
1,5	До 0,08	До 0,12	До 3

Для низкооборотного (роторного) способа бурения характерны скорости вращения долота 1—3 об/с, для высокооборотного способа соответственно 10—20 об/с.

§ 2. Разрушение горных пород при бурении

При вращательном бурении энергия на разрушение горных пород отбирается от вращающегося инструмента путем нагружения долота осевой нагрузкой (прижатием долота к забою скважины). Измерение энергии, реализуемой долотом на забое, связано с большими техническими трудностями. Наблюдения показывают, что в конкретных условиях бурения момент сопротивления вращению долота может быть приближенно определен через осевую нагрузку, т. е. осевую нагрузку можно рассматривать условно как параметр реализуемой энергии. Это допущение широко используется при изучении разрушения горных пород в процессе бурения скважин. С точки зрения изменения напряженного состояния в горной породе и связанного с ним процесса ее разрушения

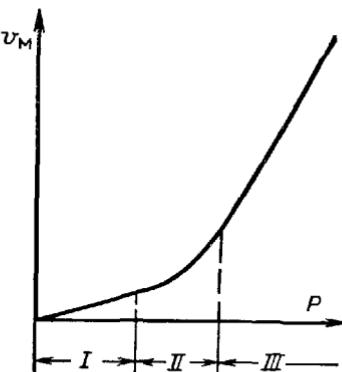


Рис. 38. График зависимости скорости разрушения породы от нагрузки

наибольший интерес представляют исследования при переменных значениях нагрузки и постоянной скорости вращения. Типичный график зависимости скорости разрушения породы (механической скорости бурения v_m) от нагрузки на долото приведен на рис. 38. А Шрейнер [108] выделяет три характерных области изменения осевой нагрузки, в которых имеют место

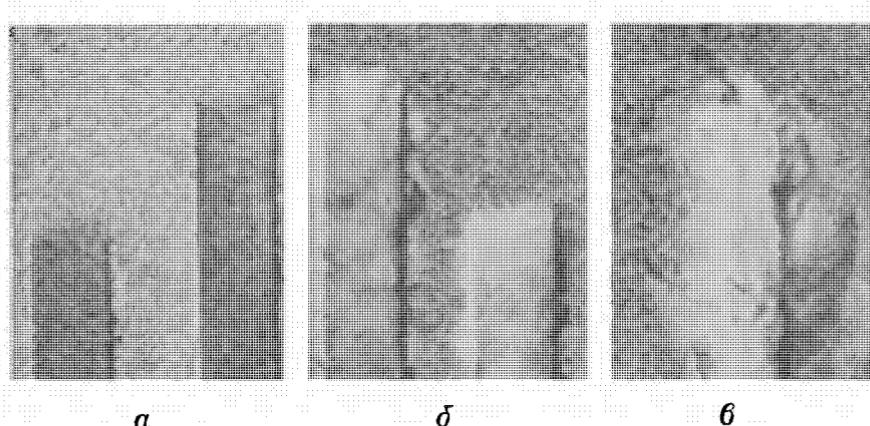


Рис. 39 Вид поверхности горной породы (ангидрита) при поверхностном *a*, усталостном *b* и объемном *c* разрушении

различные процессы разрушения породы. Эти области обозначены соответственно *I*, *II* и *III*.

На рис. 39 приведены фотографии разрушающей поверхности ангидрита в лабораторных условиях дисковым элементом, соответствующие *I* (*a*), *II* (*b*) и *III* (*c*) областям изменения осевой нагрузки на породоразрушающий элемент.

I область. Скорость разрушения горной породы прямо пропорциональна нагрузке и весьма мала. Никаких видимых разрушений на поверхности контакта горной породы с инструментом нет (см. рис. 39, *a*). Образование выработки в горной породе идет путем постепенного снятия с поверхности тончайших слоев породы, т. е. путем истирания вследствие работы сил трения. Такой процесс разрушения породы называется *поверхностным истиранием*.

II область (переходная). Прямая пропорциональность между скоростью разрушения горной породы и нагрузкой при переходе из первой области во вторую нарушается (см. рис. 38). На поверхности контакта горной породы с инструментом видна хорошо развитая трещиноватость (см. рис. 39, *b*), обусловленная усталостными явлениями при многократном воздействии породоразрушающего инструмента на породу. В результате наряду со снятием тонких поверхностных слоев истира-

нием наблюдается выкрашивание значительных объемов с поверхности породы. Такой процесс разрушения породы называется *усталостным*.

III область. Напряженное состояние в горной породе достигло предельного значения. При этом интенсивно разрушается порода в области, прилегающей к поверхности контакта породы с породоразрушающим инструментом (см. рис. 39, в). Скорость разрушения с ростом нагрузки быстро возрастает (см. рис. 38). Такой процесс разрушения горной породы называется *объемным*.

Следует помнить, что при работе элементов вооружения долот на забое одновременно имеют место во второй области изменения нагрузки усталостный и поверхностный процессы разрушения, а в третьей области — объемный, усталостный и поверхностный процессы разрушения. Поэтому четкой границы между областями провести нельзя. Области выделяются по основному вкладу того или иного процесса в общий объем разрушения.

Рассмотренные области выделяются в процессе разрушения пород всеми типами долот.

§ 3. Напряженное состояние в горных породах при вдавливании

Рассмотренные выше схемы взаимодействия элементов вооружения долот с горной породой показали, что разрушение пород забоя скважины осуществляется последовательным деформированием отдельных участков поверхности при одновременном действии нормальной и касательной нагрузок. Общего решения о напряженном состоянии горных пород в процессе бурения нет. Однако для качественного рассмотрения напряженного состояния можно воспользоваться частными решениями для идеализированных схем нагружения с допущением, что горная порода изотропна, подчиняется закону Гука, а упругие характеристики ее не зависят от напряженного состояния и скорости нагружения.

Элементы вооружения породоразрушающих инструментов могут иметь различную конфигурацию рабочей поверхности. В одних случаях это резцы с плоской или скругленной поверхностью режущей кромки, в других — это зубья в виде клина с плоской или скругленной вершиной, а в третьих — это штыри со сферической головкой. Отсюда возникают и три задачи о распределении напряжений в упругом твердом теле:

- 1) распределение напряжений при вдавливании индентора с плоской рабочей поверхностью;
- 2) распределение напряжений при вдавливании индентора с цилиндрической рабочей поверхностью;

3) распределение напряжений при вдавливании индентора со сферической рабочей поверхностью.

В основе решения этих задач лежит классическая задача Буссинеска о действии сосредоточенной силы на упругое полупространство.

С методами решения перечисленных задач можно ознакомиться в работах по теории упругости, а применительно к разрушению горных пород — в работах Л. А. Шрейнера, В. С. Владиславлева, Б. В. Байдюка, Н. Н. Павловой, Р. М. Эйгелеса и др. Решения задач весьма громоздки, и приводить их в данной работе нецелесообразно. Рассмотрим и проанализируем

Рис. 40. Расчетная схема при вдавливании жесткого штампа

основные результаты этих решений. Следует отметить, что модули деформации материалов породоразрушающего инструмента на порядок и более больше, чем модули деформации горных пород. Поэтому принимаем вдавливаемые элементы абсолютно жесткими.

1. Распределение напряжений при вдавливании цилиндрического штампа с плоским основанием. Жесткий штамп с плоским основанием вдавливается в упругое полупространство силой P , действующей по оси z (рис. 40). Задача осесимметрична, поэтому решение ее дается в цилиндрических координатах (задача Чаплыгина — Садовского). Распределение давления по площади круга описывается уравнением

$$p = \frac{P}{2\pi a \sqrt{a^2 - r^2}} \quad (VI.5)$$

(a — радиус штампа).

Из анализа формулы (VI.5) видно, что если $r=0$, то

$$p = \frac{P}{2\pi a^2}, \quad (VI.6)$$

а если $r=a$, то $p=\infty$, т. е. распределение напряжений на площади контакта весьма неравномерно — минимальные напряжения расположены в центре, а максимальные — на контуре контакта.

Экспериментальными работами Л. А. Шрейнера и других установлено, что распределение давлений по плоскости контакта неравномерно только в начальный период вдавливания, а затем его можно принять равномерно распределенным, т. е.

$$p = \frac{P}{\pi a^2}. \quad (\text{VI.7})$$

Перемещение штампа для случая неравномерного распределения давления определяется по формуле

$$\delta = \frac{P(1-\mu^2)}{2aE}, \quad (\text{VI.8})$$

а при равномерном распределении давления [17]:

$$\delta = 0,54 \frac{P(1-\mu^2)}{aE}, \quad (\text{VI.9})$$

где μ — коэффициент Пуассона;
 E — модуль Юнга.

В работе [114] дан анализ напряженного состояния упругого полупространства при вдавливании жесткого штампа для условия равномерного распределения давления по площадке контакта. Анализ показал, что под штампом расположена область I всестороннего сжатия, ограниченная поверхностью $\sigma_1=0$ (рис. 41). Размеры этой области определяются радиусом площадки контакта и коэффициентом Пуассона. Область I всестороннего сжатия окружена областью II, где одно из главных напряжений больше нуля (растягивающее). Область II ограничена снизу поверхностью $\sigma_2=0$. Далее расположена область III, где $\sigma_1>0$ и $\sigma_2>0$.

Величины главных напряжений при $p=\text{const}$ и $r=0$ можно определить по формулам С. П. Тимошенко:

$$\frac{\sigma_1}{p} = \frac{\sigma_2}{p} = -\frac{1+2\mu}{2} + \frac{(1+\mu)z'}{\sqrt{1+(z')^2}} - \frac{1}{2} \left[\frac{z'}{1+(z')^2} \right]^3. \quad (\text{VI.10})$$

$$\frac{\sigma_3}{p} = -1 + \left[\frac{z'}{1+(z')^2} \right]^3$$

$$(z' = z/a).$$

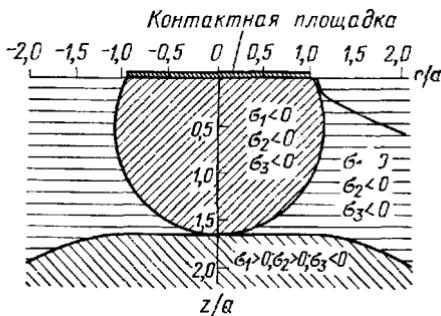


Рис. 41. Области напряженного состояния

Для оценки соотношения величин σ_1 , σ_2 и σ_3 рассмотрим изменение главных напряжений на оси симметрии z (рис. 42).

Из рис. 42 видно, что с удалением от поверхности контакта сжимающие напряжения уменьшаются, причем наиболее быстро σ_1 и σ_2 , которые на некоторой глубине переходят в растягивающие. Однако величина растягивающих напряжений не превышает 10% от величины нормального давления.

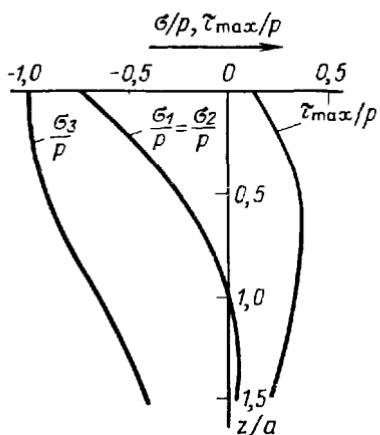


Рис. 42. Изменение напряжений в полупространстве на оси симметрии ($r=0$) при $\mu=0,25$

максимальные касательные напряжения вначале возрастают и достигают максимального значения на глубине z_m

$$\frac{z_m}{a} = \sqrt{\frac{2(1+\mu)}{7-2\mu}}. \quad (\text{VI.11})$$

Значение наибольшего максимального касательного напряжения можно определить по формуле С. П. Тимошенко

$$\frac{\tau_{\max}}{p} = \frac{1}{2} \left[\frac{(1-2\mu)}{2} + \frac{2}{9} \sqrt{2(1+\mu)^3} \right]. \quad (\text{VI.12})$$

Однако эти напряжения не являются наибольшими. Наибольшие напряжения имеют место на контуре штампа. Далее зона максимума максимальных касательных напряжений в виде языка уходит вглубь и к оси симметрии z . Точки упругого полупространства, прилегающие к контуру штампа, являются особыми. Компоненты напряженного состояния при подходе к контуру из глубины полупространства можно определить по формулам Лява:

$$\frac{\sigma_z}{p} = \frac{1}{2\pi} (-2\varphi + \sin 2\varphi);$$

В качестве основной характеристики напряженного состояния твердого тела при вдавливании в работах [108, 114] приняты максимальные касательные напряжения. На рис. 43 приведено распределение максимальных касательных напряжений в деформируемом полупространстве в окрестностях штампа в относительных величинах

$$\frac{\tau_{\max}}{p} = f\left(\frac{z}{a}; \frac{r}{a}\right).$$

Из рис. 43 видно, что линии равных максимальных касательных напряжений замыкаются на контуре штампа. По мере удаления от поверхности тела при $r=0$

$$\begin{aligned}\frac{\sigma_r}{p} &= \frac{1}{2\pi} [(1 - 2\mu)\pi - 2\varphi - \sin 2\varphi]; \\ \frac{\sigma_\theta}{p} &= -\frac{1}{2\pi} [(1 - 2\mu)\pi + 4\mu\varphi]; \\ \frac{\tau_{rz}}{p} &= -\frac{1}{\pi} \sin^2 \varphi,\end{aligned}\quad (\text{VI.13})$$

где φ — угол в плоскости zOr между положительным направлением оси r и направлением подхода (см. рис. 40).

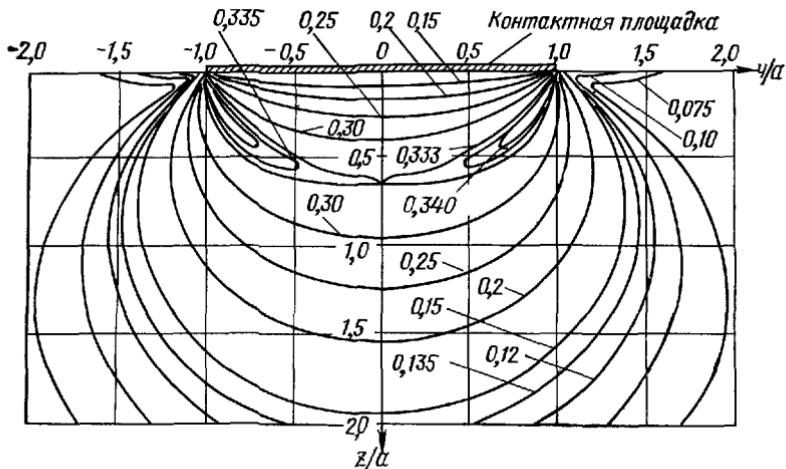


Рис. 43. Линии равных относительных касательных напряжений в полупространстве под штампом при $\mu=0,3$

На основании формул (VI.13) Р. М. Эйгелес получил следующее выражение для наибольшего в полупространстве максимального касательного напряжения:

$$\frac{\tau_{\max}}{p} = \frac{1}{2\pi} \left[1 + \sqrt{1 + \pi^2 \left(\frac{1-2\mu}{2} \right)^2} \right]. \quad (\text{VI.14})$$

Из выражений (VI.12) и (VI.14) видно, что относительная величина наибольших максимальных касательных напряжений зависит только от коэффициента Пуассона.

В табл. 16 приведены экстремальные величины относительных касательных напряжений, рассчитанные по формулам (VI.12) и (VI.14) для крайних и среднего значений коэффициента Пуассона.

Из табл. 16 видно, что максимальные касательные напряжения под кромкой штампа лишь на 5—10% больше, чем на оси z при $z=z_m$. Смягчение условий на кромке и приближение их к реальным (скругление кромок, учет их деформирования) су-

Таблица 16

Коэффициент Пуассона, μ	0	0,25	0,5
τ_{\max}/p при $z = 0, r = a$	0,45	0,36	0,32
τ_{\max}/p при $z = z_m, r = 0$	0,41	0,34	0,29

щественно уменьшают это различие. Поэтому для реальных твердых тел в большинстве случаев не проводится раскрытие неопределенности напряжений в особых точках.

В работе [110] приведено распределение октаэдрических касательных напряжений в полупространстве под штампом. Характер распределения их аналогичен распределению максимальных касательных напряжений. Следовательно, аналогично будет и распределение интенсивности касательных напряжений, так как

$$\sigma_i = \frac{3}{\sqrt{2}} \tau_{\text{окт.}}$$

На оси симметрии, т. е. при $r=0$, равенство компонент напряжений $\sigma_1=\sigma_2$ приводит, согласно выражениям (II.2) и (II.6), к условию

$$\sigma_i = 2\tau_{\max}. \quad (\text{VI.15})$$

Следовательно, и для координат максимального значения интенсивности касательных напряжений справедливо выражение (VI.11).

2. Распределение напряжений при вдавливании жесткой сферы. При отсутствии нагрузки сфера контактирует с поверхностью твердого тела в точке. По мере увеличения нагрузки на сферу формируется круговая площадка контакта. Решение о радиусе площадки контакта, распределении давления на площадке и о вертикальном перемещении точек поверхности получено Герцем. Расчетная схема приведена на рис. 44, а.

Радиус a площадки контакта

$$a = \sqrt[3]{\frac{3PR_c(1-\mu^2)}{4E}} \quad (\text{VI.16})$$

(R_c — радиус сферы).

Наибольшее давление в центре площадки равно

$$p_0 = \frac{3P}{2\pi a^2}. \quad (\text{VI.17})$$

а распределение давления по диаметральному сечению площадки контакта описывается уравнением эллипса (рис. 44, б)

$$p = p_0 \sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}}. \quad (\text{VI.18})$$

Наибольшее перемещение центральной точки контакта равно

$$\delta_0 = \frac{3P(1-\mu^2)}{4aE}. \quad (\text{VI.19})$$

Анализ напряженного состояния в твердом теле с применением ЭЦВМ проведен Р. М. Эйгелесом [114]. Исследования показали, что структура поля напряжений под сферой такая же, как и под цилиндрическим штампом. Отличием является то, что область всестороннего сжатия при вдавливании сферы значительно меньше, чем при вдавливании штампа. Распределение

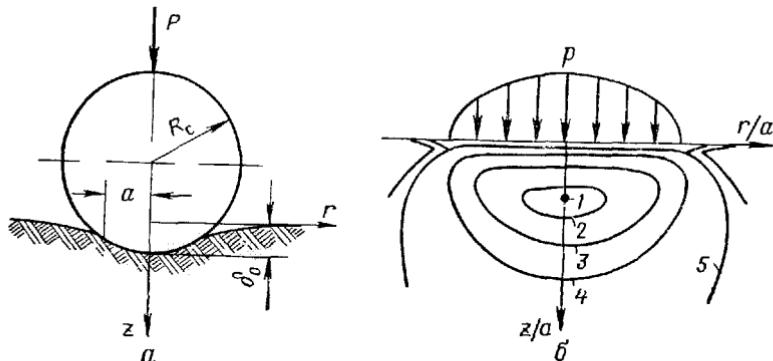


Рис. 44. Расчетная схема а, распределение давления и линии равных значений τ_{\max}/p_0 б при вдавливании сферы ($\mu=0,30$):

№ кривой на рисунке	1	2	3	4	5
значение τ_{\max}/p_0	0,31	0,30	0,25	0,20	0,10

максимальных касательных напряжений в относительных величинах при вдавливании сферы приведено на рис. 44, б. Из рис. 44, б видно, что наибольшее значение максимальных касательных напряжений имеет место на оси симметрии на некоторой глубине от поверхности контакта (около $0,5 a$), а также на контуре давления, т. е. имеются две экстремальные зоны.

Значения главных напряжений и максимальных касательных напряжений на оси симметрии можно рассчитать по формулам

$$\frac{\sigma_1}{p_0} = \frac{\sigma_2}{p_0} = -(1+\mu) \left(1 - z' \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{1}{z'} \right) + \frac{1}{2[1+(z')^2]}; \quad (\text{VI.20})$$

$$\frac{\sigma_3}{p_0} = -\frac{1}{1+(z')^2},$$

$$(z' = z/a).$$

Из выражения (VI.20) нетрудно получить формулу для расчета максимальных касательных напряжений

$$\frac{\tau_{\max}}{p_0} = -\frac{1}{2}(1+\mu) \left(1 - z' \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{1}{z'} \right) - \frac{3}{2[1+(z')^2]}. \quad (\text{VI.21})$$

Напряжения на контуре давления ($z=0$, $r=a$) равны

$$\frac{\sigma_1}{p_0} = -\frac{\sigma_3}{p_0} = \frac{1-2\mu}{3}; \quad (\text{VI.22})$$

$$\sigma_2 = \sigma_z = 0.$$

Отсюда максимальные касательные напряжения при подходе к контуру снаружи

$$\frac{\tau_{\max}}{p_0} = \frac{1-2\mu}{3}. \quad (\text{VI.23})$$

В табл. 17 приведены относительные величины наибольших касательных напряжений в экстремальных зонах.

Таблица 17

Коэффициент Пуассона, μ	0	0.25	0.50
τ_{\max}/p_0 при $z = 0$, $r = a$	0,33	0,17	0
τ_{\max}/p_0 при $z = z_m$, $r = 0$	0,39	0,32	0,27

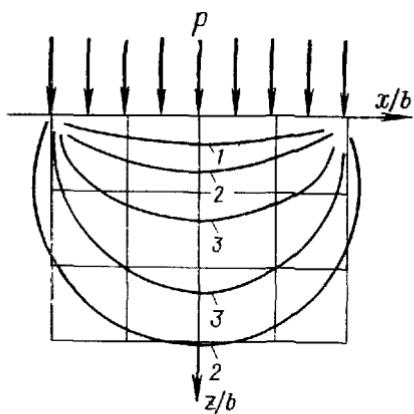


Рис. 45. Расчетная схема и линии равных значений σ_1/p_0 при вдавливании прямоугольного штампа ($\mu = 0,25$):

№ кривой на рисунке	1	2	3
значение σ_1/p_0	0,50	0,55	0,60

Как и в случае с цилиндрическим штампом, принимаем, что удельное давление одинаково по всей поверхности полосы. Допущение о равномерной нагрузке по длине полосы позволяет рассмотреть распределение напряжений только в одном сечении, перпендикулярном длиной оси полосы. Расчетная схема приведена на рис. 45. В работе [103] имеются таблицы для опреде-

Из табл. 17 видно, что с уменьшением коэффициента Пуассона уменьшается и разность между величинами максимальных касательных напряжений в экстремальных зонах.

3. Распределение напряжений при вдавливании прямоугольного штампа. Фрезерованные зубья шарошечных долот имеют практически плоскую поверхность контакта в виде прямоугольника. Решение задачи о распределении напряжений под прямоугольным штампом громоздко. Однако в случае отношения длины прямоугольника к ширине больше пяти можно воспользоваться решением задачи о распределении напряжений под бесконечно длинной полосой [103].

ления компонент напряжений σ_z , σ_x и σ_{xz} в твердом теле. Компоненту σ_y найдем из условия

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu (\sigma_x + \sigma_z)] = 0,$$

так как продольная деформация бесконечно длинной полосы невозможна. Отсюда

$$\sigma_y = \mu (\sigma_x + \sigma_z). \quad (\text{VI.24})$$

В качестве однозначной характеристики напряженного состояния в твердом теле принимаем интенсивность касательных напряжений

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_z - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 6\tau_{xz}^2}. \quad (\text{VI.25})$$

Распределение интенсивности касательных напряжений в относительных величинах при $\mu = 0,25$ также приведено на рис. 45. Из рис. 45 видно, что распределение интенсивности касательных напряжений под полосой аналогично распределению максимальных касательных напряжений под штампом (см. рис. 43). Следует отметить, что величина максимальной интенсивности касательных напряжений и глубина экстремальной зоны так же, как и при вдавливании штампа, зависят только от величины коэффициента Пуассона.

4. Распределение напряжений при вдавливании жесткого цилиндра по образующей. В общем случае криволинейная поверхность инструмента контактирует с горной породой на определенной длине. Как правило, ширина формируемой в процессе вдавливания площадки контакта значительно меньше ее длины. Поэтому, как и в предыдущем случае, упростим задачу, приняв длину контакта бесконечной (задача Герца). Расчетная схема приведена на рис. 46, а. Половина ширины площадки контакта равна

$$b = 2 \sqrt{\frac{P_1 (1 - \mu^2) R}{\pi E}}, \quad (\text{VI.26})$$

где P_1 — нагрузка на единицу длины образующей цилиндра; R — радиус цилиндра.

Распределение удельного давления по ширине контакта следует эллиптическому закону (рис. 46, б)

$$p = p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{b^2}}. \quad (\text{VI.27})$$

(p_0 — максимальное нормальное давление на площадке контакта);

$$p_0 = \sqrt{\frac{P_1 E}{\pi (1 - \mu^2) R}}. \quad (\text{VI.28})$$

Расчет компонент напряжений σ_z , σ_x , σ_y и τ_{xz} можно провести по формулам, приведенным в работах [86, 87]. Далее, по формуле (VI.25) определим интенсивность касательных напряжений. На рис. 46, б приведено распределение интенсивности касательных напряжений в относительных координатах при $\mu = 0,25$. Из рис. 46, б видно, что максимальная интенсивность

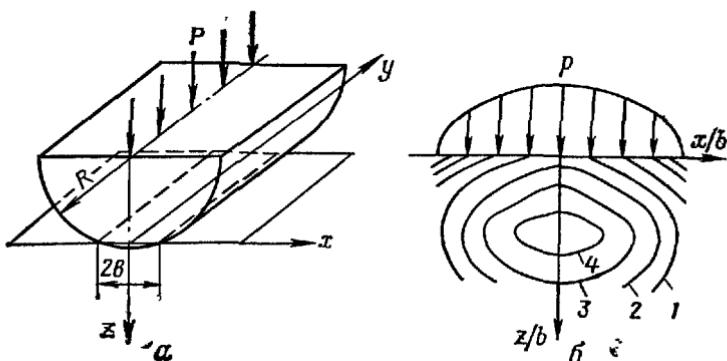


Рис. 46. Расчетная схема а, распределение давления и линии равных значений σ_t/p_0 б при вдавливании цилиндра по образующей ($\mu=0,25$):

№ кривой на рисунке	1	2	3	4
значение α_t/p_0	0,48	0,51	0,54	0,57

касательных напряжений имеет место в плоскости симметрии на некоторой глубине от поверхности. Относительная величина максимальной интенсивности касательных напряжений и координата максимума также зависят только от коэффициента Пуассона.

В заключение следует отметить, что по характеру напряженного состояния в горных породах вдавливаемые инденторы можно разделить на две основные группы: 1) с плоской рабочей поверхностью; 2) с криволинейной рабочей поверхностью.

§ 4. Влияние касательной нагрузки на распределение напряжений в горной породе

Из схем взаимодействия элементов вооружения с горной породой (см. рис. 37) видно, что одновременно с нормальной нагрузкой действует значительная касательная нагрузка. Рассмотрим влияние касательной нагрузки на распределение напряжений в полупространстве под элементом вооружения долота, имеющим плоскую рабочую поверхность в виде полосы. В качестве однозначной характеристики напряженного состояния в полупространстве принимаем интенсивность касательных напря-

жений, определяемую по формуле (VI.25). Согласно гипотезе Лоренца принимаем, что касательные напряжения на площадке контакта прямо пропорциональны нормальному давлению, т. е.

$$\tau/p = \omega = \text{const.} \quad (\text{VI.29})$$

Как и ранее, принимаем, что нормальное давление равномерно распределено по ширине и длине полосы. Для этого случая компоненты напряжений σ_x , σ_z и τ_{xz} определяем отдельно для нормальной и касательной нагрузок по формулам или таблицам, приведенным в работе [103], а затем складываем их,

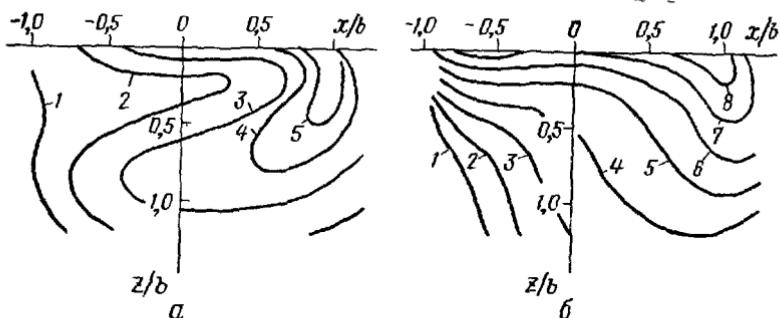


Рис. 47. Линии равных значений σ_t/p при вдавливании прямоугольного штампа при $\omega=0,2$ а и при $\omega=0,4$ б ($\mu=0,25$):

№ кривой на	рисунке	1	2	3	4	5	6	7	8
значение	σ_t/p	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,85	0,95

используя принцип независимости действия сил. Компоненту σ_y определим по формуле (VI.24).

По результатам расчета в относительных величинах построены линии равной интенсивности касательных напряжений, приведенные на рис. 47. Из сопоставления рис. 47 и рис. 45 видно, что при наличии касательной нагрузки имеют место искажение напряженного состояния, смещение экстремальной зоны в направлении действия касательной нагрузки под край полосы и рост интенсивности касательных напряжений в экстремальной зоне. Чем больше относительная величина касательной нагрузки, тем больше искажение напряженного состояния и тем больше рост интенсивности касательных напряжений в экстремальной зоне.

Аналогичный расчет напряженного состояния в полупространстве выполнен для случая вдавливания бесконечного цилиндра по образующей. По результатам расчета построены линии равной интенсивности касательных напряжений (рис. 48). Из рис. 48 видно, что, как и в случае полосы, имеет место искажение напряженного состояния в полупространстве. При неболь-

ших значениях касательной нагрузки ($\omega \leq 0,2$) появляется вторая экстремальная зона, прилегающая к поверхности контакта цилиндра с деформируемым телом. По мере увеличения касательной нагрузки происходит дальнейшее искажение напряженного состояния и растет величина интенсивности касательных напряжений. Причем, наибольший рост интенсивности касатель-

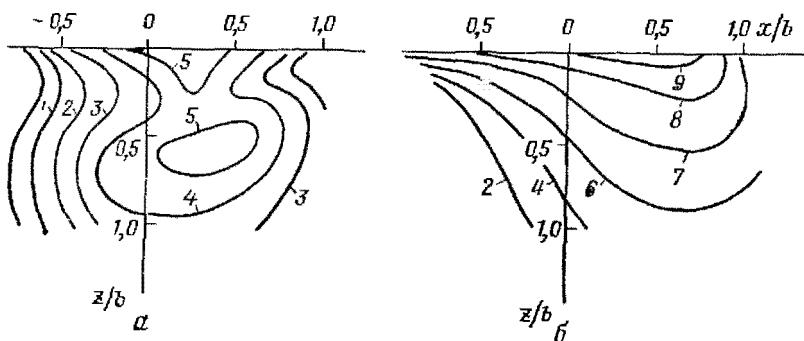


Рис. 48. Линии равных значений σ_t/p_0 при вдавливании цилиндра по образующей при $\omega=0,2$ а и при $\omega=0,4$ б ($\mu=0,25$):

№ кривой на рисунке	1	2	3	4	5	6	7	8	9
значение $/p_0$	0,49	0,51	0,54	0,57	0,60	0,63	0,68	0,74	0,85

ных напряжений наблюдается в зоне, прилегающей к поверхности контакта. Если $\omega=0,2$, то интенсивности касательных напряжений в обеих экстремальных зонах становятся примерно равными, а при $\omega>0,2$ интенсивность касательных напряжений во второй зоне становится больше, чем в первой.

Расчет напряженного состояния в относительных величинах позволяет сравнительно легко провести количественную оценку влияния касательной нагрузки на величину максимальной интенсивности касательных напряжений в экстремальных зонах, так как

$$\sigma_{t \max} / p = \kappa, \quad (\text{VI.30})$$

где κ — максимальная относительная интенсивность касательных напряжений в экстремальной зоне.

Тогда при вдавливании элемента с плоской рабочей поверхностью

$$\sigma_{t \max} = \kappa p, \quad (\text{VI.31})$$

а при вдавливании с криволинейной рабочей поверхностью

$$\sigma_{t \max} = \kappa p_0. \quad (\text{VI.32})$$

Значения параметра κ при $\mu=0,25$ для основных конфигураций элементов вооружения долот приведены в табл. 18.

Таблица 18

ω	0	0,2	0,4
Полоса $x_{\text{п}}$	0,61	0,81	1,06
Штамп $x_{\text{ш}}$	0,68	—	—
Цилиндр $x_{\text{ц}}$	0,58	0,62	0,88
Сфера $x_{\text{с}}$	0,64	—	—

В процессе определения параметра κ при $\omega=0$ учитывались только экстремальные зоны на оси симметрии инденторов. Физический смысл параметра κ — величина интенсивности касательных напряжений при нормальном давлении, равном единице. Сопоставление величины $x_{\text{п}}$ с $x_{\text{ш}}$ и $x_{\text{п}}$ с $x_{\text{с}}$ показывает, что осесимметричные инденторы создают большую интенсивность касательных напряжений, чем в виде полосы или боковой поверхности длинного цилиндра. Кроме того, из табл. 18 видно, что влияние касательной нагрузки при вдавливании инденторов с плоской поверхностью более существенно, чем при вдавливании инденторов с криволинейной поверхностью.

§ 5. Механизм разрушения горных пород при вдавливании штампа

Напряженное состояние в реальных горных породах значительно сложней, чем в идеально-упругом теле, что связано с анизотропией упругих свойств и дискретным сложением пород. Однако следует ожидать, что и в реальных породах напряженное состояние качественно будет аналогичным, если размеры обломков или кристаллитов будут значительно меньше, чем размеры контакта вдавливаемого элемента.

С увеличением нагрузки на вдавливаемый элемент напряжения в горной породе возрастают и в конечном счете достигают предельного значения. Дальнейшее увеличение нагрузки приведет либо к появлению пластической деформации, либо к разрушению породы. Сложность напряженного состояния и зависимость предельной характеристики пород от вида и величины напряженного состояния не позволяют четко выделить границы перехода от упругого деформирования к пластическому и далее к разрушению. В настоящее время эти вопросы усиленно изучаются, так как именно они лежат в основе процессов разрушения горных пород механическими способами. Этим вопросам посвящены работы Л. А. Шрейнера, Б. В. Байдюка, Н. Н. Павловой, Р. М. Эйгелеса, Ю. Я. Эстрена, Н. М. Филимонова, М. Р. Мавлютова, К. И. Вдовина, В. В. Симонова и др.

При вдавливании штампа, в силу особенностей распределения напряжений, объективно возможно достижение предельного

состояния в двух экстремальных зонах: на контуре, где имеют место условия чистого сдвига, и на оси симметрии на глубине $z=z_m$. Именно эти два момента лежат в основе выделения Р. М. Эйгелесом двух механизмов разрушения горных пород.

В соответствии с первым механизмом разрушения пород при некоторой нагрузке на штамп в экстремальной зоне, прилегающей снаружи к контуру штампа, образуется кольцевая трещина, уходящая вглубь в виде конуса (рис. 49, а). Жесткость штампа значительно выше, чем горной породы, а поэтому поперечная деформация породы, прилегающей к штампу, незначительна. Следовательно, возможны некоторое раскрытие трещины и отсутствие давления на стенку трещины со стороны конуса. С увеличением нагрузки увеличивается глубина развития трещины. По мере удаления от поверхности влияние штампа на поперечную деформацию конуса уменьшается, и на некоторой глубине раскрытие трещины оказывается невозможным. При дальнейшем нагружении штампа поперечная деформация конуса будет ограничиваться окружающей его породой и, следовательно, будет

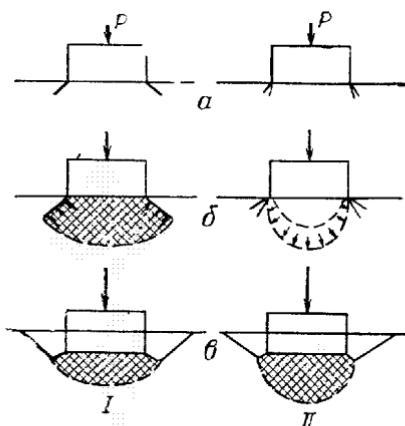


Рис. 49. Схемы хрупкого разрушения пород по Р. М. Эйгелесу I, по Н. Н. Павловой и Л. А. Шрейнеру II:

а — образование кольцевой трещины и сдвигов за контуром штампа, б — развитие зон предельного состояния; в — хрупкое разрушение

увеличиваться давление со стороны конуса на окружающую породу (матрицу) (рис. 49, б). Давление со стороны конуса стремится сдвинуть или оторвать матрицу. Ранее было показано, что сопротивление пород сдвигу и тем более отрыву весьма мало. При достижении некоторого критического давления происходит отрыв матрицы с образованием лунки (рис. 49, в). Отрыв матрицы сопровождается снижением бокового давления на конус и его разрушением. Штамп скачком погружается на значительную глубину.

В соответствии с вторым механизмом разрушения развитие области предельного состояния у контура штампа быстро затухает. Основную роль играет развитие области предельного состояния от оси симметрии штампа, т. е. от первой экстремальной зоны (см. рис. 49, а) в направлении к контуру с образованием серповидной области предельного состояния (см. рис. 49, б). По мере увеличения нагрузки на штамп растут объем предельной области и давление в ней. Следовательно, растет и нагрузка,

действующая со стороны серповидной области на окружающую породу (матрицу). Далее процесс разрушения ничем не отличается от описанного по первому механизму разрушения.

В пористых горных породах большое влияние на механизм деформирования и разрушения оказывает уплотнение пород, которое сопровождается большим погружением штампа. Последнее, в свою очередь, затрудняет развитие трещин отрыва, в результате чего большинство горных пород, хрупких при плотном сложении, будучи сильно пористыми, не дают хрупкого разрушения.

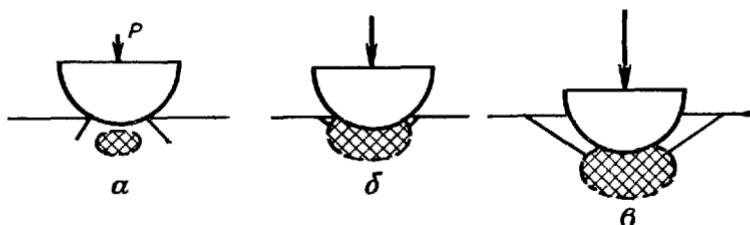


Рис. 50. Схема разрушения породы при вдавливании сферы:
α — образование кольцевой трещины и зоны предельного состояния; б — образование кольцевого скола, в — образование лунки (хрупкое разрушение)

При вдавливании сферы механизм разрушения горных пород имеет некоторые особенности, связанные с иным, чем при вдавливании штампа, распределением напряжений и с непрерывным увеличением площади нагружения.

Наблюдения показывают, что у большинства горных пород в процессе вдавливания сферы предельное состояние возникает за контуром давления (рис. 50, а) в зоне, где имеет место условие чистого сдвига (см. табл. 17). Однако развитие этой области в глубину незначительно, так как напряженное состояние с глубиной быстро уменьшается. При достижении предельного состояния в зоне на оси симметрии наблюдается быстрый рост области предельного состояния во всех направлениях. Кольцевая трещина ограничивает рост области предельного состояния у поверхности в радиальном направлении. Увеличивающееся по мере роста нагрузки давление со стороны области предельного состояния на поверхность трещины вызывает скол породы, прилегающей к сфере за контуром давления (рис. 50, б). Однако существенной разгрузки в силу особенностей распределения давления по площадке контакта в зоне предельного состояния не происходит, так как не происходит и разрушения предельно нагруженной породы, прилегающей к поверхности сферы.

С дальнейшим увеличением нагрузки процесс деформирования и разрушения в значительной степени аналогичен процессу при вдавливании штампа. Наличие кругового скола резко

снижает интенсивность прироста площади давления с ростом нагрузки. При этом быстро развивается область предельного состояния, растет давление на вмещающую неразрушенную породу (матрицу). Под действием давления происходит скол (или отрыв) матрицы с разгрузкой и разрушением области предельного состояния (ядра) и с образованием значительной зоны хрупкого разрушения (рис. 50, б).

При деформировании горных пород с низким модулем упругости и особенно пористых пород имеет место быстрое увеличение площади давления вследствие деформирования и уплотнения породы и медленный рост напряжений. Последнее обуславливает малый объем зоны хрупкого разрушения или ее полное отсутствие.

§ 6. Особенности деформирования пород при вдавливании заостренных наконечников (конуса, клина)

Заостренные наконечники можно рассматривать как инденторы, радиусы кривизны вдавливаемых поверхностей у которых близки к нулю. Предельное состояние под заостренным наконечником возникает при весьма малых нагрузках. В этом случае формируется уравновешивающая нагрузку поверхность дефор-

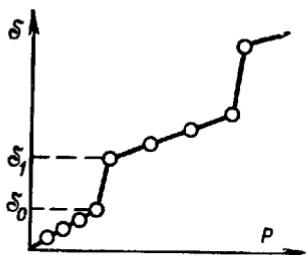


Рис. 51. График зависимости глубины вдавливания клина в горную породу от нагрузки

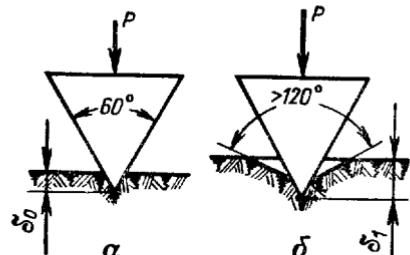


Рис. 52. К механизму разрушения горной породы при вдавливании клина

мируемого тела, прилегающая к граням клина или к поверхности конуса.

В процессе вдавливания заостренных наконечников в пластичные тела монотонно увеличивается уравновешивающая поверхность. Образование лунки в этом случае происходит за счет пластического вытеснения материала вдавливаемым наконечником.

На рис. 51 показан график зависимости глубины погружения δ от нагрузки P при вдавливании клина с углом при вершине 60° в хрупкую горную породу. В начальный период происходит пластическое деформирование (рис. 52, а), и на этом

участке глубина погружения прямо пропорциональна нагрузке до величины δ_0 . Затем глубина погружения скачкообразно возрастает вследствие хрупкого разрушения до величины δ_1 , причем погружение на эту глубину происходит при нагрузке P , не значительно превышающей нагрузку, соответствующую глубине погружения δ_0 .

При дальнейшем вдавливании вследствие упругой и пластической деформации глубина погружения растет очень медленно вплоть до нового скачка погружения и т. д.

Таким образом, процесс разрушения горных пород при вдавливании заостренных наконечников носит скачкообразный характер, причем каждый новый скачок в погружении больше, чем предыдущий. Это связано с тем, что с увеличением глубины вдавливания площадь контактной поверхности тоже увеличивается.

Скалывание породы под вдавливаемым наконечником происходит под углом, большим 120° . Этот угол (рис. 52, б) называют естественным углом скалывания. Такой характер разрушения горных пород при вдавливании заостренных наконечников, как отмечает Л. А. Шрейнер, связан с условиями напряженного состояния под вдавливающим наконечником.

В процессе вдавливания заостренных наконечников с углами при вершине, близкими к углу скалывания, условия напряженного состояния приближаются к условиям, наблюдаемым в процессе вдавливания сферы.

Скачкообразный характер разрушения горных пород наблюдается не только во время вдавливания в них заостренных наконечников, но и при вдавливании притупленного клина, цилиндрического штампа и др. С помощью скоростной киносъемки установлено, что во время разрушения горных пород шарошечными долотами внедрение зубьев долот в породу носит также скачкообразный характер.

§ 7. Определение показателей механических свойств горных пород методом статического вдавливания штампа

Впервые метод вдавливания для оценки сопротивления горных пород разрушению при бурении был предложен Е. Ф. Эпштейном.

По этому методу в образец породы вдавливается резец в виде острого двустороннего клина с углом при вершине 60° . Вдавливание клина производится до некоторой нагрузки, затем нагрузка снимается и измеряется глубина образовавшейся лунки. По глубине лунки определяется площадь контакта между резцом и породой. Затем по нагрузке и площади контакта определяется сопротивление вдавливанию, которое Е. Ф. Эп-

штейн вначале назвал критическим напряжением, а впоследствии агрегатной твердостью породы.

Агрегатная твердость вычисляется по формуле

$$p_a = \frac{P}{2\delta l \operatorname{tg} \alpha/2}, \quad (\text{VI.33})$$

где p_a — твердость;

P — нагрузка на резец;

δ — глубина лунки;

l — длина лезвия резца;

α — угол при вершине;

При вдавливании заостренных наконечников разрушение горных пород носит скачкообразный характер, что затрудняет вычисление площади истинного контакта между резцом и породой по глубине вдавливания. Поэтому метод вдавливания клина можно применять только для измерения сопротивления горных пород, обладающих значительной пластичностью.

Л. А. Шрейнер, анализируя методы, предложенные для измерения сопротивления горных пород вдавливанию, и методы измерения твердости вдавливанием, пришел к выводу о необходимости принципиально изменить способ измерения.

Суть выводов Л. А. Шрейнера сводится к следующему. Если при определении твердости пластичных тел задается нагрузка, а измеряется площадь или глубина полученного под индентором отпечатка, то для горных пород, следует задать площадь контакта и измерять нагрузку на индентор, под действием которой происходит деформирование и разрушение породы.

Наиболее удобной геометрической формой индентора является цилиндрический штамп с плоским основанием. В этом случае не происходит увеличения площади контакта в процессе вдавливания, которое наблюдается во время вдавливания конуса, пирамиды, двугранной призмы — клина и сферы.

Метод вдавливания штампа позволяет не только определять твердость горных пород, но и оценивать их упругие и пластические характеристики. Кроме того, этот метод позволяет определять показатели механических свойств на небольших образцах горных пород, как правило, на кернах, извлекаемых в процессе бурения скважин с различных глубин залегания. Последнее в свою очередь позволяет определить механические характеристики практически всех горных пород, встречаемых при бурении скважин.

Методика определения показателей механических свойств горных пород методом вдавливания штампа по ГОСТ 12288—66. Для определения механических свойств горных пород методом вдавливания штампа необходимо иметь образцы пород (в виде кернов или кубиков) высотой 30—50 мм и диаметром 40—60 мм. Эти образцы должны иметь две плоско-параллельные поверх-

ности, которые получаются шлифованием с помощью абразивного порошка.

В подготовленные образцы горных пород вдавливаются штампы, форма и размеры которых показаны на рис. 53. Штампы изготавливаются из инструментальной стали с последующей закалкой (рис. 53, а) или из твердого сплава (рис. 53, б). Штампы из твердого сплава используют для испытания очень твердых пород.

При испытании плотных и однородно пористых пород можно использовать штампы площадью до 2 mm^2 , а для пород с величиной зерна больше 0,25 мм лучше использовать штампы площадью 3 mm^2 . Для сильно пористых и малопрочных пород необходимы штампы с площадью основания 5 mm^2 и более. Эти площади примерно соответствуют практической тупизне зубьев шарошечных долот.

Определять показатели механических свойств пород методом вдавливания штампа можно на гидравлических прессах с предельной нагрузкой не менее 1000 кгс [109]. Однако обработка экспериментальных данных, полученных на таких установках, требует больших затрат времени и труда.

В настоящее время для автоматической записи графиков в координатах глубина внедрения штампа — нагрузка выпущены специальные установки УМГП-3 и УМГП-4, спроектированные ВНИИКАнефтегаз совместно с ИГиРГИ. Принцип действия установок основывается на методе, разработанном в лаборатории механики горных пород под руководством проф. Л. А. Шрейнера.

Установка УМГП-3 рассчитана на нагрузку 0—100, 0—250, 0—500 и 0—1000 кгс с предельной величиной внедрения 750 мк и дает возможность получать в процессе работы на одной ленте несколько графиков зависимости нагрузки от величины внедрения (погружения) штампа, снятых в различных местах образца, что позволяет судить об однородности образца и наблюдать в процессе испытаний за разбросом значений. Последнее определяет необходимое количество опытов на одном образце.

Испытания ведутся при весьма малой скорости нагружения штампа, поэтому в литературе широко используется другое название метода — метод статического вдавливания штампа.

Штамп в образец породы вдавливается до тех пор, пока при некоторой предельной нагрузке не произойдет хрупкое разрушение

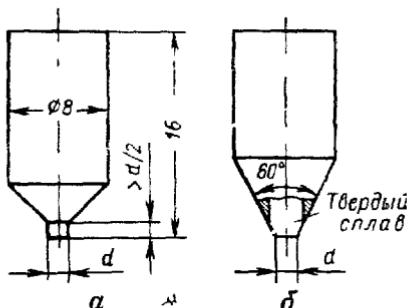


Рис. 53. Цилиндрические штампы

ние породы под штампом или не будет исчерпана величина внедрения.

Обработка результатов испытаний. Все горные породы по характеру поведения при вдавливании штампа делятся на три класса: I—хрупкие; II—пластично-хрупкие; III—высокопластичные и сильно пористые.

Каждому классу пород соответствуют характерные графики, которые строятся в координатах — по оси ординат — нагрузка P в кгс, а по оси абсцисс — погружение штампа δ в мм.

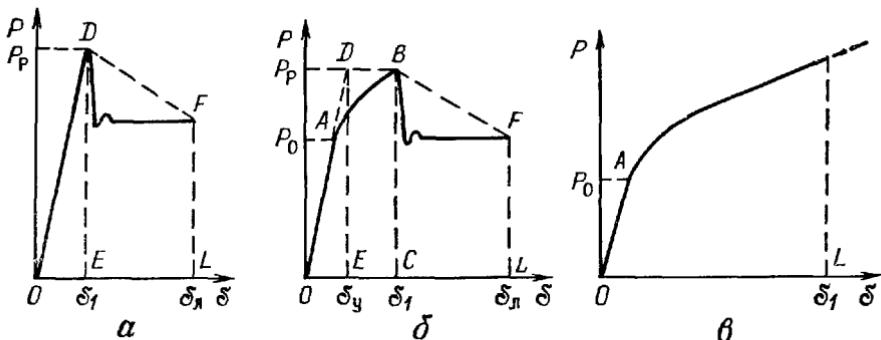


Рис. 54. Характерные графики нагрузка — глубина вдавливания штампа для:
а — хрупких пород (кварцит), б — пластично-хрупких пород (ангибит), в — высоко
пластичных и сильно пористых пород

На рис. 54, а приведен характерный график зависимости нагрузки от погружения штампа для хрупких горных пород. Из рис. 54, а видно, что при деформировании вплоть до момента хрупкого разрушения соблюдается закон Гука. По величине наибольшей нагрузки определяется твердость по штампу породы

$$p_{ш} = P_p / S, \quad (VI.34)$$

где $p_{ш}$ — твердость по штампу;

P_p — нагрузка в момент хрупкого разрушения породы под штампом;

S — площадь основания вдавливаемого штампа.

На рис. 54, б показан характерный график деформирования пластично-хрупких пород. В данном случае при нагрузке, большей P_0 , имеет место нарушение закона Гука. Это явление первоначально [104] целиком связывалось с развитием пластических деформаций. Позднее [102] было показано, что большую роль, а в некоторых случаях и основную, играет уплотнение породы в зоне предельного состояния.

Для пластично-хрупких пород помимо твердости по штампу, определяемой по формуле (VI.34), определяется предел текучести

$$p_0 = P_0 / S. \quad (VI.35)$$

В качестве показателя пластичности пород принято отношение

$$k = A_p/A_y, \quad (\text{VI.36})$$

где A_p — работа деформирования до момента разрушения,

A_y — работа упругого деформирования.

Из рис. 54 видно, что

$$A_p = \int_0^{\delta_1} P(\delta) d\delta,$$

$$A_y = \frac{1}{2} P_p \delta_y.$$

Для пород первого класса $\delta_1 = \delta_y$, следовательно, $k = 1$. Величины работ A_p и A_y определяются, как правило, графически, путем измерения площадей, т. е.

$$A_p = \text{пл. } OABC \text{ m}, \quad (\text{VI.37})$$

$$A_y = \text{пл. } ODE \text{ m} \quad (\text{VI.38})$$

(m — масштаб графика нагрузка — глубина вдавливания штампа в размерности работы)

Тогда формула для определения показателя k примет вид

$$k = \frac{\text{пл. } OABC}{\text{пл. } ODE} \quad (\text{VI.39})$$

Этот показатель Л. А. Шрейнера и О. П. Петрова называют коэффициентом пластичности.

В случае необходимости в формулу (VI.36) может быть введена поправка на упругое деформирование штампа. Чаще всего работа упругого деформирования штампа оказывается незначительной по сравнению с величинами A_p и A_y и в расчетах не учитывается.

При вдавливании штампа в высокопластичные или очень пористые горные породы крупного разрушения не происходит. Характерный график зависимости нагрузки от глубины вдавливания штампа в такие породы приведен на рис. 54, в, из которого видно, что в этом случае нельзя определить ни твердость по штампу, ни коэффициент пластичности. По величине нагрузки P_0 из формулы (VI.35) вычисляется предел текучести породы. Коэффициент пластичности условно принимается равным бесконечности.

По начальному участку графиков, где имеет место прямая пропорциональность между нагрузкой и глубиной погружения штампа, можно определить модуль деформации при вдавливании

$$C = \frac{E}{1 - \mu^2} = \frac{P}{d\delta} \quad (\text{VI.40})$$

где C — модуль деформации при вдавливании;
 P — нагрузка на штамп;
 d — диаметр штампа;
 δ — погружение штампа, соответствующее изменению нагрузки от нуля до величины P .

Далее, если для данного образца известно значение коэффициента Пуассона, можно вычислить модуль Юнга. При приближенных расчетах модуля Юнга принимают $\mu=0,25$. В работе [109] отмечается, что вычисленный таким образом модуль E всегда меньше, чем при испытании на сжатие.

Важной характеристикой механических свойств горных пород является удельная объемная работа разрушения, которая определяется путем деления общей работы, затраченной до момента разрушения, на объем лунки, образовавшейся при разрушении, т. е.

$$A_V = A_p/V, \quad (\text{VI.41})$$

где V — объем лунки разрушения.

Определение величин разрушенных объемов породы сопряжено с некоторыми трудностями, так как размеры лунок зависят не только от механических свойств, но и от структурных особенностей пород. Поэтому объем нельзя определить каким-либо способом вычисления, величину его можно получить путем непосредственного измерения каждой лунки разрушения.

Объем лунок можно определить следующим способом: заполнить их пластилином или парафином, затем парафин извлечь и взвесить. Объем лунки вычисляется путем деления массы парафина на его плотность, т. е.

$$V = Q/\rho, \quad (\text{VI.42})$$

где Q — масса материала слепка лунки;

ρ — плотность материала слепка лунок.

Более точным является метод заполнения лунок парафином из специального тигелька. Избыток парафина срезается и возвращается в тигельку. Вес парафина в лунке определяется по разности весов тигелька до заливки и после заливки. Объем вычисляется также по формуле (VI.42).

Для пород III класса общая работа до разрушения вычисляется условно. В этом случае график нагрузка — перемещение (см. рис. 54) продолжают до глубины вдавливания, равной диаметру штампа. Такое допущение принято на основании изучения глубин разрушения наиболее пластичных горных пород.

Влияние масштабного фактора. Показатели механических свойств горных пород определяют при вдавливании штампов с различной площадью основания: от 1 до 5 mm^2 и более.

Исследования [109, 110], посвященные изучению влияния размеров вдавливаемого штампа на величины твердости и объемной работы разрушения, показали, что масштабный фактор (размер

штампов) заметно влияет на механические характеристики только в том случае, если диаметры штампов равны 1,5—2 мм. При больших диаметрах штампов наблюдается стабилизация твердости пород. Аналогичная по характеру зависимость получена и для объемной работы разрушения. Коэффициент пластичности пород с увеличением диаметров штампов в диапазоне от 1 до 10 мм хотя и повышается, но весьма незначительно.

Данные, полученные во время вдавливания сфер различных диаметров, показывают, что влияние масштабного фактора при диаметре контактной поверхности более 1,5—2,0 мм также несущественно.

Таким образом, при определении механических свойств горных пород во избежание влияния масштабного фактора следует использовать штампы диаметром не менее 1,5—2,0 мм.

Воспроизводимость результатов. При определении механических характеристик горных пород, являющихся телами неоднородными и имеющими большую степень дефектности, наблюдаются значительные колебания между отдельными величинами, полученными при измерениях. Проверка показала, что лучшая воспроизводимость их получается для величин твердости пород, отклонения от среднего значения у которых составляли 3—15% [109]. Для предела текучести и коэффициента пластичности отклонения составляли 15—20%; особенно плохая воспроизводимость наблюдается на сильно пористых и неоднородно пористых породах. В таких случаях следует применять штампы с большей площадью основания.

Воспроизводимость результатов зависит также от тщательности подготовки образцов горных пород и штампов перед испытаниями. При прочих одинаковых условиях воспроизводимость будет лучшей, если нагружение непрерывно.

Большие колебания между отдельными значениями показателей механических свойств пород в результате параллельных испытаний не позволяют распространять результаты одного испытания на весь образец породы. Для характеристики образца породы проводится ряд независимых испытаний (три на образцах с хорошей воспроизводимостью результатов и пять—десять на образцах с плохой воспроизводимостью результатов) и в качестве показателей свойств берется их среднеарифметическое значение.

§ 8. Классификация горных пород

На основании фактических данных, полученных при вдавливании штампа в образцы многочисленных горных пород, оказалось возможным дать несколько классификационных шкал по отдельным механическим характеристикам [109].

Классификационная шкала по твердости. Все породы по твердости по штампу разделены на три группы: мягкие, средние,

Таблица 19

I группа				
Категория	1	2	3	4
Твердость p_{sh} , кгс/мм ²	<10	10—25	25—50	50—100
II группа				
Категория	5	6	7	8
Твердость p_{sh} , кгс/мм ²	100—150	150—200	200—300	300—400
III группа				
Категория	9	10	11	12
Твердость p_{sh} , кгс/мм ²	400—500	500—600	600—700	>700

твёрдые. Каждая группа в свою очередь разделена на четыре категории, т. е. всего принято двенадцать категорий твердости (табл. 19).

К I группе преимущественно относятся породы высокопластичные и сильно пористые. Из пород, встречаемых при бурении нефтяных и газовых скважин, сюда относятся глинистые, аргиллиты и наиболее пористые разновидности алевролитов, песчаников и известняков.

Ко II группе по твердости относятся в основном породы из класса пластично-хрупких. В частности, сюда относятся алевролиты, известняки, ангидриты, доломиты и песчаники.

К III группе пород по твердости относятся преимущественно породы из класса хрупких. Это в основном изверженные и метаморфические породы. Из класса пород, встречаемых при бурении нефтяных и газовых скважин, в эту группу входят кремни, кварциты, а также окремнелые разновидности известняков и доломитов.

Классификационная шкала, приведенная в табл. 19, не только по внешнему виду, но и по существу совпадает со шкалой крепости горных пород, принятой в практике геологоразведочного бурения.

Классификационная шкала по модулю Юнга. По модулю Юнга все горные породы разделены на восемь категорий (табл. 20).

Таблица 20

Категория	1	2	3	4	5	6	7	8
E , кгс/мм ²	<250 500	250— 1000	500— 2500	1000— 5000	2500— 7500	5000— 10 000	7500— 10 000	>10 000

Классификационная шкала по пластичности. По величине коэффициента пластичности все горные породы разделены на шесть категорий (табл. 21).

К первой категории относятся хрупкие горные породы, со второй по пятую — пластично-хрупкие, а к шестой — высоко-пластичные и сильно пористые.

Таблица 21

Категория	1	2	3	4	5	6
K	1	$>1-2$	2—3	3—4	4—6	$6-\infty$

Для примера в табл. 22 приведены данные о механических характеристиках некоторых групп осадочных горных пород.

Таблица 22

Порода	Твердость p_w , кгс/мм ²	Предел теку- чести ρ_0 , кгс/мм ²	Модуль Юнга, $E \cdot 10^{-5}$, кгс/см ²	Коэффициент пластичности
Глины	—	2—14	0,1—0,3	∞
Глинистые сланцы	20—170	15—95	0,5—3,0	1,3—3,3
Ангидриты	95—150	40—95	1,8—5,4	2,9—4,3
Песчаники и алевролиты	20—330	15—210	0,5—3,5	1,3—4,3
Известняки	85—250	35—150	1,5—4,0	1,5—7,0
Доломиты	100—320	50—240	5,0—9,0	1,5—6,0
Кремни и окремнелые породы	360—700	330—700	10,0	1,0—2,3

Из табл. 22 видно, что во всех характеристиках наблюдается значительный разброс величин. Это связано с тем, что на механические свойства пород отдельных групп влияет не только минералогический состав, но и их строение.

§ 9. Влияние различных факторов на деформирование и разрушение горных пород при вдавливании

Влияние состава и строения горных пород. Обобщение экспериментального материала показало, что твердость плотных осадочных пород находится в прямой зависимости от твердости их породообразующих минералов. Твердость обломочных пород типа песчаников и алевролитов главным образом зависит от минерального состава и строения цементирующего вещества.

Твердость обломочных пород одинакового минералогического состава, скрепленных глинистым цементом, почти в 3 раза меньше твердости аналогичных пород, но скрепленных

ных карбонатным цементом. В зависимости от типа структуры цемента наибольшую твердость имеют породы с базальным цементом.

Пластичность плотных горных пород также зависит от их минералогического состава, и, за исключением глин, коэффициенты пластичности для них не превышают 7. У карбонатных пород пластичность увеличивается с уменьшением размеров зерен.

Пористость и степень выветрелости существенно изменяют твердость и пластичность пород: с увеличением пористости и степени выветрелости твердость пород уменьшается, а коэффициент пластичности увеличивается. Следует учитывать, что пористость и выветрелость повышают коэффициент пластичности вследствие уплотнения породы под вдавливаемым штампом, т. е. за счет неупругого уменьшения деформируемого объема.

И. С. Финогеновым установлено, что твердость глинисто-карбонатных пород (глина, известковистая глина, глинистый известняк, и известняк) с увеличением степени карбонатности резко увеличивается, особенно при карбонатности породы выше 50%*. Это связано с тем, что по мере увеличения карбонатности породы увеличивается роль кристаллизационных связей между частицами и понижается роль коллоидных связей.

Твердость некарбонатных глин, глинистых мергелей и мергелей увеличивается прямо пропорционально увеличению в них содержания частиц полевых шпатов, кварца и других твердых минералов, особенно если их содержится более 20%.

Твердость карбонатных пород резко возрастает при окремнении. В работе [109] отмечается, что кремнезем даже в случае его небольшого содержания в породе (до 10%) резко повышает ее твердость и предел текучести.

В последние годы появилось значительное количество работ, в которых для отдельных районов даются эмпирические формулы, позволяющие по косвенным признакам, таким, как плотность, пористость, карбонатность, глинистость, скорость распространения упругих волн, определяемым по геофизическим данным, приближенно определить показатели механических свойств пород при вдавливании [6, 88, 89].

Влияние жидкких сред. Кроме минералогического состава и строения на характер деформирования и разрушения горных пород при вдавливании существенно влияет степень увлажнения. При насыщении пород водой и водным раствором поверхностно-активных веществ сопротивление пород разрушению значительно снижается. Это связано с ослаблением сил сцепления в породе. С другой стороны, известны факты [107], когда порода, насыщенная водой, оказывает большее сопротивление

* Степень карбонатности и коэффициент пористости породы можно сравнительно просто и точно определить по данным промысловой геофизики.

разрушению, чем сухая. Это может наблюдаться только в породах очень пористых (типа песчаников), имеющих большие размеры пор, которые в свою очередь полностью заполнены водой. В этом случае вода создает дополнительное сопротивление внедрению разрушающего инструмента в породу. Причем дополнительное сопротивление разрушению, видимо, больше, чем ослабление сил сцепления в породе за счет воды. Твердость глинистых пород, имеющих высокую пористость, при увлажнении резко уменьшается, так как эти породы наиболее гидрофильны.

По результатам исследований К. М. Садиленко, твердость, предел текучести и коэффициент пластичности, определяемые методом вдавливания штампа, пород типа мрамор, пелитоморфный известняк и известняк при смачивании водой, содержащей поверхностно-активные вещества, понижаются. Например, по сравнению с твердостью, определяемой в воздушной среде, твердость мрамора с пористостью 1,2% при смачивании его водой понижается на 12%, а при смачивании 1%-ным водным раствором олеата натрия — на 23%. При этом особенно резко понижаются коэффициент пластичности и удельная работа разрушения.

В том случае, когда породы смачиваются водой и другими жидкими средами, наряду с понижением твердости и коэффициента пластичности у некоторых из них уменьшаются и линейные размеры зон разрушения, а следовательно, и объем. По данным К. М. Садиленко, объем лунок при вдавливании штампа в сухой пелитоморфный известняк в 5—6 раз больше, чем при вдавливании штампа в тот же известняк, пропитанный водой. Если этот же известняк пропитывается углеводородной жидкостью, менее активной по отношению к породе, чем вода, объем лунок также будет меньшим, чем в сухом известняке, но только в 2 раза. Уменьшение объема лунок в случае пропитки горной породы активной жидкостью связано с уменьшением уплотнения породы, так как поры заняты жидкостью. Чем активней жидкость, тем она лучше заполняет поры породы и тем больше ее влияние на разрушение породы.

Влияние всестороннего сжатия. С увеличением глубины залегания пород увеличивается их плотность и уменьшается пористость. Кроме того, породы на глубине находятся в условиях всестороннего сжатия. Последнее существенно изменяет характер и сопротивление разрушению пород.

Б. В. Булатов, изучая механические свойства горных пород в условиях всестороннего сжатия путем вдавливания цилиндрических штампов на созданной им установке высокого давления (до 1000 кгс/см²), подтвердил ранее существовавшее мнение о том, что твердость и предел текучести горных пород с увеличением всестороннего сжатия увеличиваются.

Всестороннее сжатие значительно влияет на изменение величины твердости, особенно у тех пород, у которых твердость

в атмосферных условиях меньше. Например, твердость известковистой глины с увеличением давления от атмосферного до 1000 кгс/см² увеличивается с 38,5 до 138 кгс/мм², т. е. в 3,6 раза, а твердость доломита в тех же условиях увеличивается с 367 до 494 кгс/мм², т. е. всего в 1,3 раза.

С увеличением всестороннего сжатия (с ростом глубины залегания) увеличивается и коэффициент пластичности. Например, у глинисто-карбонатных пород с твердостью $p_{\text{ш}}$ до 188 кгс/мм² и $K \geq 2,2$ уже при давлении 150—200 кгс/см² не происходит хрупкого разрушения под штампом, т. е. эти породы как бы переходят в класс высокопластичных.

Методикой В. В. Булатова предусмотрена изоляция образца породы от окружающей его жидкости до момента нагружения штампа. Это обуславливает большую разность давлений на свободной поверхности образца и в порах внутри образца, где давление близко к атмосферному. Опыты И. Д. Сфериной [109] показали, что при более строгом моделировании условий залегания пород влияние всестороннего сжатия проявляется значительно меньше.

Л. А. Шрейнер, Б. В. Байдюк, Н. Н. Павлова и другие отмечают, что в процессе бурения глубоких скважин во время вдавливания зуба долота в породу забоя на трещину скола, возникающую под зубом, накладывается действие нормальной составляющей от гидростатического давления столба промывочной жидкости. Это давление противодействует разрушению (отрыву) породы по плоскости трещин. В свою очередь нормальная составляющая тем больше, чем больше угол ψ между направлением трещины и плоскостью забоя. Этую зависимость представляют в виде.

$$\sigma_n = p \cos^2 \psi.$$

Отсюда следует, что при больших p скол породы возможен только по плоскости с большей величиной угла ψ . Чем больше давление, тем больше должен быть угол ψ и тем меньше, следовательно, диаметр лунки разрушения. Этим, по-видимому, и объясняется тот факт, что при высоких давлениях зоны разрушения практически равны площади контакта внедряемого в породу наконечника [20].

Влияние состояния поверхности горной породы. При определении показателей механических свойств горных пород методом вдавливания штампа предусматривается определенная подготовка поверхности горной породы. При решении контактной задачи предполагалось равномерное распределение давления на горную породу. Очевидно, наличие выступов и впадин на поверхности горной породы приведет к неравномерному распределению давления. При увеличении нагрузки первоначально происходит смятие выступов, что способствует выравниванию давления на поверхности. Если величина шероховатости

очень большая, то выравнивание давления может и не произойти до момента достижения предельного состояния и последующего хрупкого разрушения в пределах наиболее крупных выступов. Такое разрушение не способствует выравниванию давления под штампом, а приводит лишь к перераспределению давления на неразрушенные участки. Следовательно, наличие шероховатостей поверхности должно приводить к снижению сопротивления породы разрушению при вдавливании. Изучение процессов разрушения пород при вдавливании штампов в неподготовленную породу, выполненное под руководством проф. Л. И. Барона, показало, что

$$p_k \approx 0,62 p_{sh},$$

где p_k — среднее давление штампа на неподготовленную поверхность породы, соответствующее хрупкому разрушению.

Показатель p_k назван контактной прочностью горной породы и рекомендован Институтом горного дела им. А. А. Скочинского в качестве характеристики твердости горной породы.

Аналогичное понижение сопротивления хрупкому разрушению отмечено при изучении влияния слоя разрушенной породы на процесс вдавливания

штампа [48]. На рис. 55 приведены характерные графики нагрузка — перемещение при вдавливании штампа в мрамор по методике Л. А. Шрейнера (I) и через слой мраморной крошки (II). Из рис. 55 видно, что во втором случае первоначально происходит вытеснение и уплотнение крошки (отрезок 0— δ_1)

Далее перемещение штампа пропорционально нагрузке. Однако предел текучести и хрупкое разрушение наступает значительно раньше, чем при вдавливании в подготовленную поверхность, а глубина полученной зоны разрушения почти вдвое меньше, чем в первом случае. Авторы исследования связывают это явление с изменением распределения напряжений под штампом при наличии шлама.

Влияние касательной нагрузки. Анализ упругого напряженного состояния в горных породах при одновременном действии нормальной и касательной нагрузок (косом вдавливании) (см.

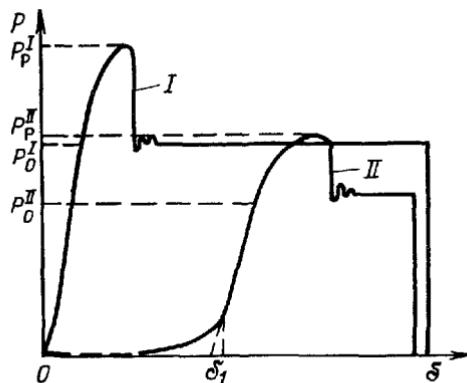


Рис. 55. Зависимость нагрузки на штамп от глубины вдавливания:

I — в подготовленную поверхность мрамора; II — через слой крошки

рис. 47 и рис. 48) показал, что предельное состояние в горных породах будет достигнуто при значительно меньших величинах нормального давления (см. табл. 18), чем при прямом вдавливании. Однако глубина зон предельного состояния в этом случае будет значительно меньше, что может обусловить и меньший объем зоны разрушения.

Экспериментальное исследование косого вдавливания штампа [13] показало, что хрупкое разрушение происходит при величинах нормальной нагрузки на 10—40% ниже, чем при прямом вдавливании. Глубина зон разрушения уменьшается на 15—40%, что в конечном счете приводит к уменьшению их объема от двух до четырех раз.

§ 10. Анализ показателей механических свойств, определяемых при статическом вдавливании штампа, и их использование при построении предельных кривых горных пород

В последние годы ведутся значительные исследования в области изучения механизма разрушения пород при вдавливании, уточнения показателей свойств пород и разработки методов использования полученных показателей в практике бурения скважин.

Решение этих вопросов невозможно без выяснения физического смысла показателей свойств пород, определяемых в процессе вдавливания. Ранее при введении понятия твердости отмечалось, что показатель твердости соответствует нормальному удельному давлению индентора на поверхность испытываемого тела в момент достижения в нем предельного состояния. По мнению Н. М. Филимонова и К. И. Вдовина, понятию твердости в большей степени соответствует предел текучести породы при вдавливании r_0 , а не твердость по штампу. Поэтому названными авторами предлагается показатель r_0 считать твердостью породы, а показатель $r_{ш}$ — сопротивлением породы хрупкому разрушению при вдавливании. Такой подход позволил бы иметь единый показатель твердости пород всех классов.

По изложенной выше методике Л. А. Шрейнера в случае определения удельной объемной работы разрушения учитывается только работа внедрения штампа до момента хрупкого разрушения (см. рис. 54). Однако если в точке D или B прекратить нагружение и снять нагрузку, то никакого разрушения не произойдет. По данным [23], для того, чтобы произошел скол, необходимо совершить работу на участке вдавливания δ_1 — δ_2 . Причем эта работа по величине несколько больше, чем работа до хрупкого разрушения. Сумма двух этих работ равна полной работе разрушения породы под штампом. В работе [23] рекомен-

дуется определять эту работу как величину, пропорциональную площади $OABFL (S)$ т. е.

$$A_0 = Sm \quad (VI.43)$$

(m — масштаб).

Тогда формула для расчета удельной объемной работы разрушения принимает вид

$$A_V = A_0/V. \quad (VI.44)$$

Этот показатель наиболее объективно характеризует энергоемкость разрушения горных пород при вдавливании.

Использование прочностных показателей механических свойств горных пород при практических расчетах дает надежные результаты только в том случае, если их сущность соответствует основным принципам применяемой теории прочности. Наиболее общепризнанной теорией прочности является обобщенное условие прочности Мора.

Рассмотрим сущность явления в процессе вдавливания штампа с точки зрения обобщенного условия прочности Мора (II.32).

Анализ распределения упругих напряжений при вдавливании показал, что наиболее опасными с точки зрения достижения предельного состояния являются две зоны — под контуром штампа и на оси симметрии на глубине $z=z_m$.

Линия под контуром

штампа является геометрическим местом особых точек, так как при переходе через эту линию в направлении r (см. рис. 40) давление на породу изменяется скачком от p до нуля. Поэтому компоненты напряжений в окрестностях этих точек будут зависеть от направления подхода к контуру. Для определения относительной интенсивности касательных напряжений и среднего напряжения воспользуемся формулами Лява (VI.13). После подстановки в выражения (VI.25) и (II.3) получим

$$\frac{\sigma_t}{p} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{(1 - 2\mu^2)(3\pi^2 - 6\varphi + 4\varphi^2) - (1 - 2\mu) 3\pi \sin 2\varphi +} \\ + 3 \sin^2 2\varphi + 12 \sin^4 \varphi, \quad (VI.45)$$

$$\frac{\sigma_0}{p} = -\frac{2(1 + \mu)\varphi}{3\pi}, \quad (VI.46)$$

где φ — направление подхода к контуру (см. рис. 40).

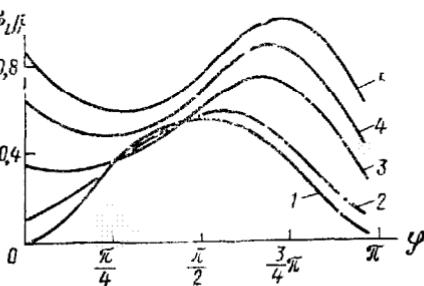


Рис. 56. Графики зависимости σ_t/p от φ при различных значениях коэффициента Пуассона μ :

1 — 0,5, 2 — 0,44; 3 — 0,30, 4 — 0,12; 5 — 0

Из выражений (VI.45) и (VI.46) видно, что компоненты напряжений в первой зоне зависят от коэффициента Пуассона и от направления подхода к контуру. На рис. 5б выражение (VI.45) представлено графически. При значениях коэффициента Пуассона $\mu < 0,32$ на графиках зависимости $\sigma_i = f(\varphi)$ наблюдаются два экстремума: минимум в области $0 < \varphi < \pi/2$ и максимум в области $\pi/2 < \varphi < 3/4\pi$. При $\mu > 0,32$ на графике зависимости наблюдается только один максимум в области $\pi/2 < \varphi < 5/8\pi$. Соответственно, воспользовавшись формулами С. П. Тимошенко (VI.10) при $z = z_m$, получим выражения для расчета компонент $\sigma_{i\max}$ и σ_0 во второй экстремальной зоне

$$\frac{\sigma_{i\max}}{p} = \frac{1 - 2\mu}{2} + \frac{[2(1 + \mu)]^{3/2}}{9}; \quad (VI.47)$$

$$\frac{\sigma_0}{p} = -\frac{2}{9}(1 + \mu) \left[3 - \sqrt{2(1 + \mu)} \right]. \quad (VI.48)$$

Из выражений (VI.47) и (VI.48) видно, что относительные величины компонент напряжений во второй зоне зависят только от коэффициента Пуассона. Значения максимальной интенсивности касательных напряжений в обеих зонах приведены в табл. 23.

Из табл. 23 видно, что практически для всех пород максимальная интенсивность касательных напряжений в зоне контура выше, чем на оси симметрии.

Таблица 23

Коэффициент Пуассона	0	0,25	0,50
$\sigma_{i\max}/p$ при $z = 0$	1,06	0,80	0,55
σ_0/p при $z = 0$, $\sigma_i = \sigma_{i\max}$	0,51	0,53	0,50
$\sigma_{i\max}/p$ при $z = z_m$	0,81	0,69	0,58
σ_0/p при $z = z_m$, $\sigma_i = \sigma_{i\max}$	0,35	0,39	0,42

Из графиков на рис. 5б видно, что если σ_{is} породы не существенно зависит от σ_0 , то предельное состояние в зоне контура возникает и развивается в направлении $\pi/2 < \varphi < 3/4\pi$, т. е. в направлении изолиний максимальной интенсивности касательных напряжений или в направлении изолиний наибольших максимальных касательных напряжений (см. рис. 43). Однако если σ_i , с увеличением среднего напряжения быстро возрастает, то возможны первоначальное достижение предельного состояния и развитие области предельного состояния в направлении $\varphi < \pi/2$, т. е. в направлении изолиний $\sigma_i/p < \sigma_{i\max}/p$, так как среднее напряжение в зоне контура прямо пропорционально углу φ .

Таблица 24

Горная порода	Прочность на сжатие $\sigma_{сж}$, кгс/мм ²	Предел текучести по штампу p_0' , кгс/мм ²	Коэффициент Пуассона μ	Отношение $p_0/\sigma_{сж}$
Каменная соль	2,60	5,5	0,44	2,1
Мрамор	6,35	52,0	0,30	8,2
Кварцит*	28,4	545,0	0,12	19,2

* Для кварцита $p_0 = p_{ш}$

Дальнейшее рассмотрение деформирования пород с точки зрения обобщенного условия прочности Мора будем вести на примере каменной соли, мрамора и кварцита, существенно отличающихся друг от друга как по величине коэффициента Пуассона, так и по механизму разрушения. Данные для построения предельных кривых и характеристика рассматриваемых пород взяты из работы [55]. Основные показатели свойств рассматриваемых пород приведены в табл. 24.

Предельные кривые рассматриваемых пород в относительных координатах приведены на рис. 57.

Из формул (VI.45), (VI.46), (VI.47) и (VI.48) видно, что выражения для определения σ_i и σ_0 могут быть приведены к виду

$$\sigma_i = \kappa_1 p \text{ и } \sigma_0 = \kappa_2 p,$$

откуда

$$\sigma_i = \kappa \sigma_0 \quad (VI.49)$$

(κ — для первой зоны зависит от μ и ϕ , а для второй зоны — только от μ).

Тогда достижение предельного состояния в рассматриваемых зонах будет соответствовать пересечению прямых, описываемых

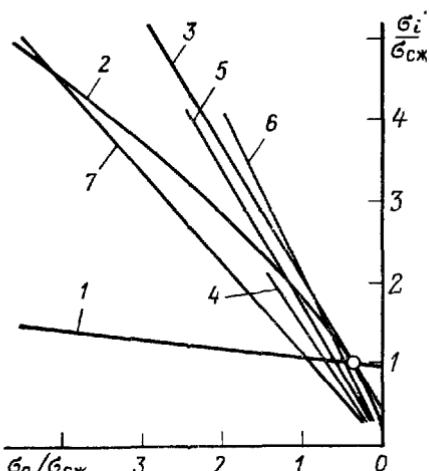


Рис. 57. Предельные кривые каменной соли 1, мрамора 2 и кварцита 3 и вспомогательные графики зависимости $\sigma_i \max/\sigma_{сж}$ от $\sigma_0/\sigma_{сж}$ при μ : 4 — 0,44; 5 — 0,30; 6 — 0,12 (для второй зоны); 7 — 0,50 (для первой зоны)

уравнением (VI.49) с соответствующими предельными кривыми. На рис. 57 нанесены прямые для второй зоны: 4 — для каменной соли, 5 — для мрамора и 6 — для кварцита. По величине σ_{1s} нетрудно определить величину давления штампа, обеспечивающего достижение предельного состояния в данной зоне, которое будет соответственно равно:

Для каменной соли	1,7 $\sigma_{\text{сж}}$
Для мрамора	3,3 $\sigma_{\text{сж}}$
Для кварцита	3,0 $\sigma_{\text{сж}}$

Аналогично при фиксированных значениях угла ϕ находим значения p , соответствующие достижению предельного состояния в первой зоне. Результаты определений в виде графиков зависимости от угла ϕ приведены на рис. 58.

Из рис. 58 видно, что при деформировании каменной соли предельное состояние как в I, так и во II зонах достигается примерно при одном значении $p = (1,70 \div 1,75) \sigma_{\text{сж}}$ и ожидаемое направление развития области предельного состояния соответствует изолиниям максимальной интенсивности касательных напряжений, т. е. область предельного состояния имеет в сечении серповидную форму.

При деформировании мрамора первоначальное предельное состояние достигается за контуром штампа в направлении $0 < \phi < \pi/4$. Однако сколько-нибудь существенное распространение области предельного состояния в этом направлении невозможно, так как при увеличении r величина σ_i быстро уменьшается. С увеличением ϕ требуемое давление для достижения

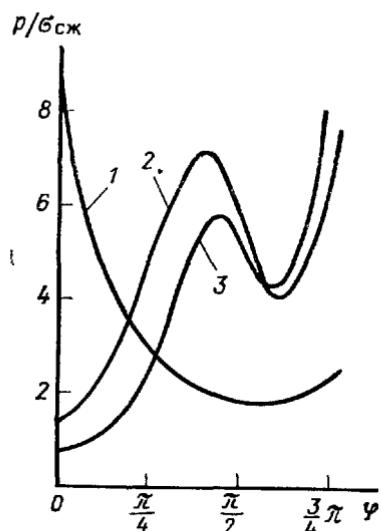


Рис. 58. Графики зависимости от относительного давления штампа, соответствующего условию $\sigma_i = \sigma_{1s}$, от направления подхода к контуру
1 — каменная соль; 2 — мрамор, 3 — кварцит.

предельного состояния быстро возрастает, что обусловлено наличием минимума функции $\sigma_i = f(\phi)$ при $\phi < \pi/4$, и существенного развития области предельного состояния в зоне контура ожидать не следует, что согласуется с данными работы [114]. При $p \approx 3,3 \sigma_{\text{сж}}$ предельное состояние возникает на оси симметрии и при $p \approx 4,1 \sigma_{\text{сж}}$ достигает зоны контура в направлении изолиний наибольшей интенсивности касательных напряжений, т. е. при этом следует ожидать образования серповидной области пре-

дельного состояния. Наличие максимума на кривой $p/\sigma_{cж}=f(\varphi)$ (см. рис. 58) в интервале $\frac{3}{8}\pi < \varphi < \frac{\pi}{2}$ обуславливает разделение областей предельного состояния, которое наблюдается при экспериментальном изучении механизма разрушения мрамора [110].

При деформировании кварцита предельное состояние, возникающее на контуре в направлениях $0 < \varphi < \pi/4$, с увеличением p может развиваться значительно интенсивней. Наблюдения показывают, что в этой области возникает область предельного состояния, ограниченная кольцевой трещиной под углом $\varphi=20-25^\circ$. Однако при дальнейшем увеличении давления p и при достижении предельного состояния на оси симметрии при $p=3,0\sigma_{cж}$ в результате более быстрого роста радиального давления распространение трещины должно затухать. При $p=4,3\sigma_{cж}$ предельное состояние распространяется до контура штампа в направлении изолиний максимальной интенсивности касательных напряжений. Однако, как и при деформировании мрамора, наличие максимума на кривой $p/\sigma_{cж}=f(\varphi)$ (см. рис. 58) обуславливает образование двух областей предельного состояния.

Полученные наибольшие значения давления штампа во всех трех случаях значительно ниже, чем значение предела текучести, фиксируемое при вдавливании (см. табл. 24). Это явление связано с тем, что основная область предельного состояния находится в замкнутом пространстве и у плотных пород продолжает деформироваться прямо пропорционально давлению штампа.

Нарушение прямой пропорциональности возможно лишь при пластическом (вязком) вытеснении породы из области предельного состояния или при разрушении окружающей ее породы (матрицы).

Известно [72], что у материалов, находящихся в состоянии пластического течения, $\mu \rightarrow 0,5$. Воспользуемся для оценки давления штампа при достижении текучести решением упругой задачи при $\mu=0,5$. Из графиков на рис. 56 следует, что при $\mu=0,5$

$$\chi = \frac{\sigma_t \text{ max}}{\sigma_0} = \frac{0,55}{0,50} = 1,10$$

и соответствует углу $\varphi=\pi/2$. Соответствующая прямая на рис. 57 обозначена цифрой 7.

Найдем значения σ_{ls} по точкам пересечения прямой 7 с соответствующими предельными кривыми и далее необходимое давление штампа p :

Для каменной соли	$2,0 \sigma_{cж}$
Для мрамора	$8,2 \sigma_{cж}$

Эти величины давления штампа практически совпадают с пределом текучести породы, фиксируемым при вдавливании. Пластическое вытеснение породы у контура штампа в случае

превышения давления штампа p_0 наблюдается экспериментально и у каменной соли и у мрамора и описано в работах [101, 114]. Дальнейший рост давления зависит от упрочнения и вязкости предельно деформированной породы.

Прямая 7 (см. рис. 57) с предельной кривой 3 для кварцита не пересекается, и, следовательно, пластическое вытеснение породы невозможно. Испытания кварцита при вдавливании показывают, что практически до хрупкого разрушения перемещение штампа прямо пропорционально нагрузке.

Рассмотрим напряженное состояние породы, прилегающей к поверхности штампа к моменту хрупкого разрушения

$$p = p_0 = p_{\text{ш}}.$$

На контакте породы со штампом поперечная деформация породы весьма мала, так как жесткость штампа много больше жесткости породы. Принимаем, что $\epsilon_r = \epsilon_\theta = 0$. Тогда компоненты напряжений можно определить по формуле (V.2). Учитывая, что $\sigma_z = p$, получим

$$\begin{aligned} \sigma_t &= (1 - \lambda) p; \\ \sigma_0 &= \frac{1 + 2\lambda}{3} p \end{aligned} \quad (\text{VI.50})$$

или при $p = p_{\text{ш}}$ для кварца (см. табл. 24)

$$\sigma_t = 16,8\sigma_{\text{сж}};$$

$$\sigma_0 = 8,25\sigma_{\text{сж}}.$$

Полученному значению σ_0 по предельной кривой для кварцита соответствует $\sigma_{ts} = 13,6\sigma_{\text{сж}}$, т. е. при $p = p_{\text{ш}}$ $\sigma_t > \sigma_{ts}$ и возможны потеря устойчивости и разрушение породы непосредственно под штампом. При этом начинает резко возрастать давление на верхний край матрицы, что в конечном счете приводит к ее сколу, т. е. к хрупкому разрушению под штампом.

Проведенный анализ позволяет сделать следующее заключение. При вдавливании штампа до момента фиксирования предела текучести имеет место упругое и упруго-пластическое деформирование, а при превышении предела текучести — упруго-вязкое деформирование породы. Показатель — предел текучести по штампу отражает начало вязкого вытеснения породы. Поскольку в процессе вдавливания при $p < p_0$ имеет место упруго-пластическое деформирование, то модуль Юнга, определяемый по области $p < p_0$, объективно должен быть меньше, чем при сжатии.

Для расчета значений σ_{ts} и σ_0 при построении предельных кривых с использованием результатов испытаний при здавлива-

ний можно рекомендовать для пластичных и упруго-пластических пород формулы

$$\begin{aligned}\sigma_{ls} &= 0,55p_0; \\ \sigma_0 &= 0,50p_0,\end{aligned}\tag{VI.51}$$

а для хрупких пород — формулы (VI.50).

В работах [55, 113] показана принципиальная возможность и изложена методика построения предельных кривых в координатах τ_n — $\sigma_{ср}$ и τ_n окт — σ_0 при допущении, что решающую роль играет достижение предельного состояния на оси симметрии штампа на глубине $z = z_m$.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВДАВЛИВАНИИ. ЭНЕРГЕТИКА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

§ 1. Основные принципы и схемы изучения динамического деформирования и разрушения горных пород

При бурении скважин имеют место исключительно динамические процессы. Если для описания статических процессов достаточна система уравнений равновесия сил и моментов, то для динамических процессов необходимо дополнительно иметь уравнения баланса энергий. Следовательно, динамические процессы являются более сложными и не могут быть изучены в статических условиях.

С точки зрения бурения скважин представляет интерес динамическое приложение нагрузки со стороны элементов породоразрушающего инструмента к горной породе. Параметры такого взаимодействия приведены в § 1, гл. VI.

При экспериментальном изучении динамического деформирования и разрушения пород используются принципы приближенного моделирования, которые реализуются на специальных установках. Подробный обзор и классификация установок имеются в работе [14]. Экспериментальные установки, получившие широкое распространение, можно разделить на две группы: копровые и кулачковые. На копровых установках используется удар или свободно падающим ударником с породоразрушающим элементом, или ударником, разгоняемым приложенной силой, например давлением воздуха. На кулачковых машинах задается закон движения породоразрушающего элемента относительно горной породы, что позволяет более полно моделировать процесс взаимодействия породоразрушающего элемента с горной породой.

В 1971 г. при участии авторов была создана установка по схеме бурения одним элементом вооружения породоразрушающего инструмента. Это установка позволяет моделировать как единичные взаимодействия, так и процесс бурения на кольцевом забое различными элементами породоразрушающего инструмента [87].

Строгое математическое описание процесса взаимодействия породоразрушающих элементов с горной породой можно дать лишь для простейших случаев.

Первый случай. По поверхности горной породы, представляющей собой упругое полупространство, наносится удар сво-

бодно падающим недеформируемым телом (ударником) массой m (рис. 59). В момент контакта скорость движения $v=v_0$, а сила P , приложенная к телу, равна нулю и остается равной нулю в процессе всего деформирования. Кинетическая энергия падающего груза к началу контактирования

$$T_k = \frac{mv_0^2}{2}. \quad (\text{VII.1})$$

Сопротивление поверхности горной породы деформированию вызывает торможение падающего тела. Сила взаимодействия при упругом деформировании прямо пропорциональна смещению поверхности δ

$$F = A\delta, \quad (\text{VII.2})$$

где A — коэффициент пропорциональности, зависящий от упругих свойств горной породы и формы рабочей поверхности ударника.

Максимальная сила взаимодействия будет иметь место при наибольшем смещении поверхности (δ_0), т. е. в тот момент, когда скорость движения ударника снизится до нуля.

При этом потенциальная энергия деформирования составит

$$U = \frac{1}{2} F_{\max} \delta_0 \quad (\text{VII.3})$$

или с учетом выражения (VII.2)

$$U = \frac{1}{2} A\delta_0^2. \quad (\text{VII.4})$$

Из условия $U=T_k$ нетрудно определить наибольшее смещение поверхности

$$\delta_0 = v_0 \sqrt{\frac{m}{A}} \quad (\text{VII.5})$$

и далее наибольшую силу взаимодействия

$$F_{\max} = v_0 \sqrt{Am}. \quad (\text{VII.6})$$

Второй случай. Рассмотрим ту же задачу при $P=\text{const}$ в процессе деформирования. Тогда баланс энергии при $\delta=\delta_0$ запишется в виде

$$A\delta_0^2 = mv_0^2 + 2P\delta_0. \quad (\text{VII.7})$$

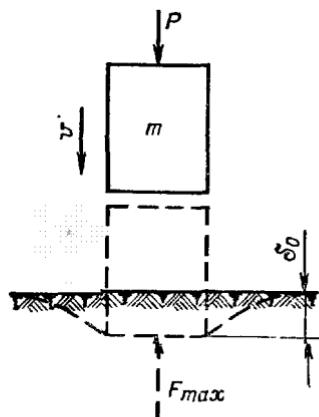


Рис. 59.

Решение уравнения (VII.7) имеет вид

$$\delta_0 = \frac{P}{A} \pm \sqrt{\frac{P^2}{A^2} + \frac{m}{A} v_0} . \quad (\text{VII.8})$$

Исходя из физического смысла формулы (VII.8), принимаем знак плюс. Подставляя значение δ_0 в выражение (VII.2), получим максимальную силу взаимодействия

$$F_{\max} = P + \sqrt{P^2 + Amv_0^2} . \quad (\text{VII.9})$$

Если $v_0=0$, то $F_{\max}=2P$, т. е. имеет место так называемый случай внезапного действия (мгновенного приложения нагрузки).

Более сложные случаи динамического взаимодействия твердых тел в области упругого деформирования можно найти в литературе по теории упругости. Авторы не останавливаются на этих вопросах, так как с точки зрения бурения интересны процессы пластического деформирования и хрупкого разрушения пород. Эти процессы не поддаются единому математическому описанию. Основную роль при их изучении играют экспериментальные исследования. В настоящее время большие работы в этой области ведутся во ВНИИБТ, в ИГиРГИ, Грозненском нефтяном институте, в ИГД им. А. А. Скочинского, в Уфимском нефтяном институте при участии авторов и в других научных организациях.

§ 2. Особенности деформирования пород свободно падающим ударником

Широкое изучение процессов деформирования горных пород свободнопадающим ударником ведется в отраслевой лаборатории бурения УНИ под руководством М. Р. Мавлютова. Испытания пород проводились на копре типа Педжа с записью на осциллографе сил P , возникающих в ударной штанге при ударе штампа о горную породу, и перемещений штампа δ относительно горной породы.

Характерные графики зависимости силы в штанге — перемещение штампа при ударе о мрамор приведены на рис. 60. Графики получены при постоянной массе ударника и переменной начальной скорости удара v_0 . Величина кинетической энергии удара для свободно падающего ударника равна его потенциальной энергии в крайнем верхнем положении

$$U = mgh, \quad (\text{VII.10})$$

где U — потенциальная энергия ударника;
 m — масса ударника;

h — расстояние от верхнего крайнего положения рабочей поверхности штампа до поверхности образца горной породы.

Приравняв значение T_k к U и подставив его в выражение (VII.1), можно определить начальную скорость удара v_0 штампа о горную породу

$$v_0 = \sqrt{\frac{2U}{m}}. \quad (\text{VII.11})$$

Графики на рис. 60, а соответствуют «легкому» ударнику ($m=1,58$ кг), а графики на рис. 60, б — «тяжелому» ударнику ($m=6,36$ кг).

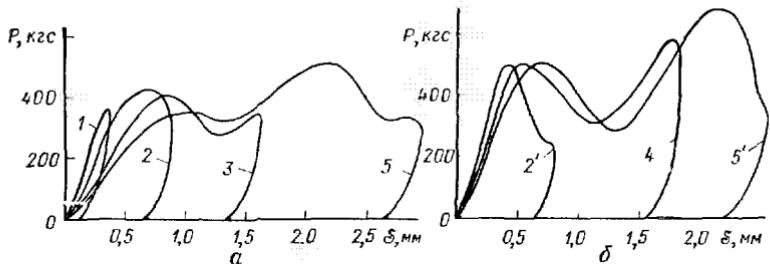


Рис. 60. Графики зависимости динамической нагрузки от глубины погружения штампа ($d=1,95$ мм) в мрамор при ударе «легким» а и «тяжелым» б ударником (по данным К. И. Вдовина).

Энергия удара в кгс · м соответственно равна: 1 — 0,079; 2 — 0,237; 2' — 0,230; 3 — 0,473; 4' — 0,636; 5 — 1,073; 5' — 1,081

Из рис. 60 видно, что по мере увеличения энергии удара (а следовательно, и начальной скорости v_0) имеет место изменение характера зависимостей P от δ . При малых значениях энергии удара зависимость P от δ представляет собой узкую петлю, напоминающую петлю упругого гистерезиса. По мере увеличения энергии удара наблюдается более существенное расширение петли, чем рост ее в высоту. При этом уменьшается угол наклона кривой нагружения к оси абсцисс. После того как нагрузка достигнет наибольшего значения, при дальнейшем увеличении энергии удара наблюдается образование выступа на участке разгрузки (кривая 2'), который при дальнейшем увеличении энергии удара увеличивается и преобразуется во вторую ветвь нагружения (кривые 3 и 4'). В этом случае наблюдается стабилизация или некоторое снижение максимальной нагрузки на первой ветви нагружения. Далее, по мере роста энергии удара сила в штанге вновь достигает наибольшего значения (второго максимума) и на участке разгрузки вновь формируется третья ветвь нагружения (кривые 5 и 5'). Второй максимум нагрузки выше первого на 30—40%. Следовательно, график нагрузка — перемещение при динамическом вдавливании представляет собой сложную кривую с

чередующимися максимумами и минимумами, причем каждый последующий максимум выше предыдущего.

Сопоставление графиков, полученных при «легком» и «тяжелом» ударниках, показывает, что при «легком» ударнике сопротивление внедрению штампа несколько ниже, чем при ударе «тяжелым» ударником. Последнее обуславливает несколько большее внедрение штампа при одинаковой энергии удара.

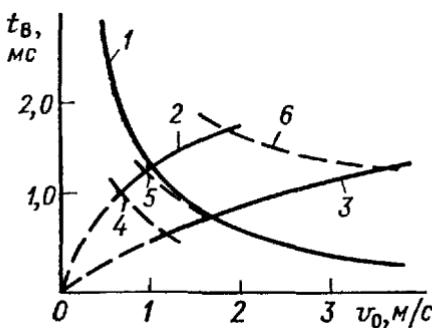


Рис. 61. Графики зависимости времени воздействия зуба долота 1В-190Т на горную породу 1 и времени деформирования мрамора штампом с «тяжелым» 2 и «легким» 3 ударниками (по данным К. И. Вдовина) от начальной скорости удара:

4, 5, 6 — линии энергии удара, соответственно равные 0,13, 0,24 и 1,07 кгс · м

ния интенсивности разрушения породы (увеличения проходки за один оборот долота). Однако экспериментальное бурение [67, 84] показывает, что в действительности наблюдается уменьшение интенсивности разрушения породы с увеличением скорости вращения.

Для выяснения причин такого противоречия рассмотрим зависимость времени деформирования от начальной скорости удара. На рис. 61 приведены графики зависимости времени достижения наибольшей глубины погружения штампа от скорости удара v_0 . Из рис. 61 видно, что чем больше начальная скорость взаимодействия, тем больше нужно времени для реализации кинетической энергии удара при постоянной массе ударника. Для постоянной кинетической энергии удара время реализации тем больше, чем больше масса ударника.

Изучение кинематики долота 1В-190Т показало, что среднее время взаимодействия элемента вооружения с горной породой составляет [94]

$$t_B = 0,012t_0,$$

где t_0 — время одного оборота долота в с.

Так как и скорость удара v_0 и время оборота долота зависят только от скорости вращения, то нетрудно представить время взаимодействия t_v как функцию скорости удара v_0 . Из рис. 61 видно, что с увеличением скорости удара время взаимодействия элемента вооружения долота с горной породой быстро уменьшается. При этом время, необходимое для получения второй формы разрушения и далее в рассматриваемом случае, больше, чем время, конструктивно обеспечиваемое долотом при высоких скоростях вращения.

Следовательно, в процессе разрушения горных пород современными шарошечными долотами объективно существует возможность уменьшения интенсивности разрушения пород с увеличением скорости их вращения в результате уменьшения времени взаимодействия отдельных элементов вооружения с горной породой. Для сохранения одной и той же интенсивности разрушения необходимо одновременно с увеличением скорости вращения увеличивать и нагрузку на долото, т. е. увеличивать энергию каждого отдельного взаимодействия элемента вооружения долота с горной породой. При этом, очевидно, возрастает энергоемкость разрушения пород.

Более подробный анализ реализации подводимой к долоту энергии при бурении дан в работах [67, 84, 98, 100].

§ 3. Разрушение горных пород при динамическом вдавливании

Результаты изучения механизма разрушения горных пород при динамическом вдавливании, приводимые в работах [33, 54, 55], показывают, что отличие его от механизма разрушения при статическом вдавливании носит не принципиальный характер. Поэтому рассмотрим лишь кинетику развития разрушения породы по мере увеличения энергии удара по результатам исследований [24, 99].

При малых значениях энергии удара на поверхности горной породы виден лишь след штампа в виде зоны трещин, окружающих контур штампа (рис. 62, а). При этом график зависимости P от δ имеет вид узкой петли (см. рис. 60, кривая 1). При дальнейшем увеличении энергии удара появляется круговой скол породы за контуром штампа (рис. 62, б). Эта форма разрушения авторами работы [24] названа *первой формой хрупкого разрушения*. Вид зависимости P от δ существенных изменений не претерпевает.

Далее, с увеличением энергии удара, имеет место лишь некоторый рост объема скола. Основной прирост объема разрушения идет в результате постепенного погружения штампа. В этом случае величина нагрузки возрастает несущественно.

При достижении определенной величины энергии удара наблюдается хрупкое разрушение породы под штампом (рис. 62, в), аналогичное разрушению при статическом вдав-

ливании. Эта форма разрушения авторами работы [24] названа *второй формой* разрушения породы. Этой форме соответствует кривая 2 на рис. 60. Обломки породы, полученные при образовании второй формы разрушения, несут на себе следы первой [24], т. е. первая и вторая формы разрушения в процессе деформирования образуются последовательно (рис. 62, *в*).

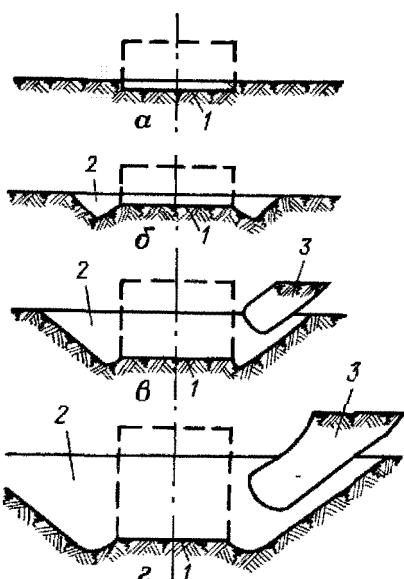


Рис. 62. Схема развития разрушения породы при динамическом вдавливании штампа:

а — появление остаточной деформации;
б — первая форма хрупкого разрушения;
в — вторая форма хрупкого разрушения;
г — третья форма хрупкого разрушения;
 1 — поверхность контакта породы со штампом; 2 — лунка разрушения; 3 — сечение обломка породы

Дальнейшее увеличение энергии удара до определенной величины не приводит к существенному качественному изменению формы разрушения. Появление выступа, а затем и второй ветви нагружения на графиках зависимости P от δ свидетельствует об избытке энергии удара над величиной энергии, необходимой для образования второй формы. Этот избыток приводит к некоторому увеличению глубины погружения штампа и появлению сколов породы вокруг поверхности контакта в пределах второй формы разрушения, а при более высоких значениях энергии удара и к появлению переходных неустойчивых форм разрушения.

При достижении энергии удара определенной величины вновь наблюдается появление новой, устойчивой *третьей формы* разрушения.

нения (рис. 62, *г*), которой соответствует кривая 5' на рис. 60. Обломки породы, полученные при образовании этой формы, также несут на себе следы предыдущей формы разрушения и свидетельствуют о последовательном образовании форм разрушения [24]. Изучение развития процесса разрушения пород при динамическом вдавливании показывает, что наличие максимумов на кривой $P=f(\delta)$ отражает последовательность образования форм разрушения, т. е. отражает скачкообразность процесса разрушения горных пород. Данные работы [99] показывают, что при дальнейшем увеличении энергии удара могут быть получены четвертая и, возможно, последующие формы разрушения. Число полученных форм разрушения ограничивается прочностью инденторов.

§ 4. Энергоемкость разрушения горных пород при динамическом вдавливании

Наиболее систематизированные результаты исследований в области энергоемкости разрушения пород при динамическом вдавливании приведены в работах [24, 25, 99].

Скачкообразность развития форм разрушения горных пород обуславливает немонотонное увеличение объема зоны разрушения по мере увеличения энергии удара. Из рис. 63 и, видно, что при переходе от A_V первой формы разрушения ко второй (область T_1-T_2) наблюдается существенный рост объема разрушения. Дальнейшее увеличение энергии от T_2 до T_2' не приводит к существенному изменению объема, и лишь при $T > T_2'$ вновь наблюдается рост объема разрушения, связанный с появлением промежуточных форм разрушения в области $T_2'-T_3$. Формирование третьей формы разрушения вновь обуславливает стабилизацию объема разрушения (область T_3-T_3') и т. д.

Энергоемкость разрушения породы прямо пропорциональна энергии удара и обратно пропорциональна объему разрушения V , т. е.

$$A_V = T_k/V. \quad (\text{VII.12})$$

Зависимость A_V от T_k также приведена на рис. 63, из которого видно, что немонотонное изменение объема разрушения обуславливает наличие минимумов и максимумов на кривой энергоемкости. По мере увеличения энергии удара каждый последующий минимум и максимум ниже предыдущих, т. е. в целом по мере увеличения энергии удара наблюдается тенденция к уменьшению энергоемкости динамического разрушения пород.

Первый минимум на кривой энергоемкости соответствует образованию второй формы разрушения. Второй минимум соответствует образованию третьей формы разрушения. Стабилизация объема разрушения после образования второй и третьей форм разрушения обуславливает появление максимумов на кривой энергоемкости разрушения пород.

Характерное изменение энергоемкости разрушения пород

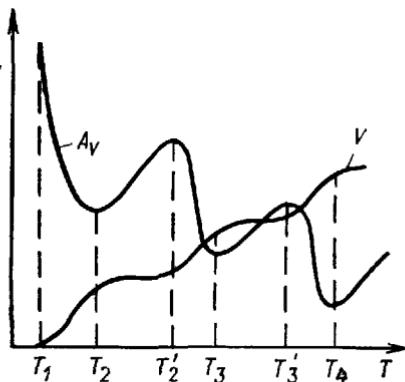


Рис. 63. Графики зависимости удельной объемной работы разрушения и объема лунки от энергии удара

может быть объяснено с точки зрения энергетических законов Риттингера и Кирпичева. Наблюдения показали, что по мере развития той или иной формы разрушения (области T_1-T_2 ; T'_2-T_3 ; T'_3-T_4) увеличивается размер обломков и уменьшается отношение объемов мелко раздробленной породы и крупных обломков, т. е. имеет место уменьшение дисперсности разрушенной породы, что и приводит к уменьшению энергоемкости ее разрушения. В областях стабилизации объема (области $T_2-T'_2$; $T_3-T'_3$) по мере увеличения энергии удара дополнительная энергия расходуется на повышение дисперсности разрушающейся породы без существенного увеличения общего объема разрушения. В этих областях имеет место увеличение энергоемкости разрушения горной породы. В целом же по мере увеличения энергии удара имеет место общая тенденция к уменьшению дисперсности разрушенной породы, которая обуславливает и общую тенденцию снижения энергоемкости ее разрушения.

Изучение энергоемкости разрушения горных пород показывает, что при бурении следует стремиться к увеличению энергии каждого единичного взаимодействия элемента вооружения долота с горной породой. Это направление оптимизации процесса бурения реализуется путем повышения подводимой к забою мощности и путем усовершенствования породоразрушающих инструментов.

§ 5. О взаимосвязи характеристик пород, определяемых при статическом и динамическом вдавливании штампа

Большое практическое значение имеет установление связи характеристик динамического разрушения пород с показателями механических свойств, определяемых при статическом вдавливании. Однако специфика динамических испытаний пород не позволяет проводить сопоставление непосредственно. При динамических испытаниях в зависимости от энергии удара может быть получен последовательно ряд форм разрушения, причем сопоставление можно вести только по последней форме разрушения. В случае статического вдавливания испытание ведется до появления лишь одной формы разрушения. Анализ форм разрушения при статическом вдавливании показал, что в процессе стандартных испытаний получается, главным образом, форма разрушения, аналогичная второй форме динамического разрушения [23]. Однако возможно появление форм разрушения, аналогичных и первой форме динамического разрушения. На рис. 64 приведен вид зависимости нагрузка — внедрение при вдавливании штампа в песчаник, когда имела место то первая, то вторая формы разрушения. Из рис. 64 видно, что одновременное появление двух форм

разрушения на одном образце может обусловить большой разброс значений таких показателей, как твердость по штампу и коэффициент пластиичности.

Статические испытания могут рассматриваться только как частный случай динамических. Аналогия механизма и форм разрушения при динамическом и статическом вдавливании позволяет искать методы оценки динамического разрушения по результатам статических испытаний.

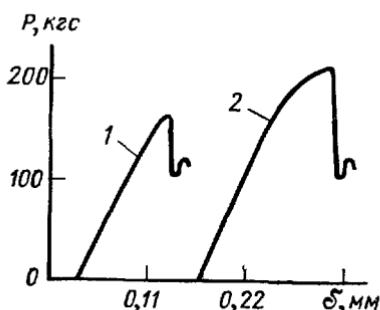


Рис. 64. Графики зависимости P от δ при вдавливании штампа в песчаник:

1 — первая форма разрушения, 2 — вторая форма разрушения

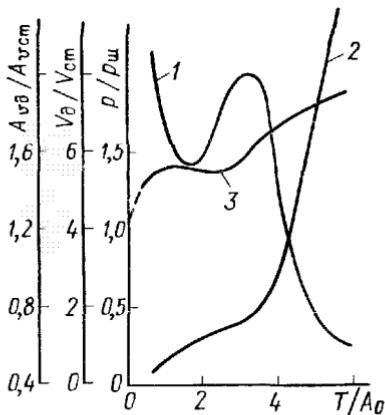


Рис. 65. Графики зависимости относительных величин энергоемкости:

1 — объема разрушения, 2 — сопротивления разрушению, 3 — от относительной энергии удара

Поскольку испытания при статическом вдавливании являются стандартными, то целесообразно результаты динамических испытаний представлять в относительных величинах, таких, как отношение измеряемой величины к соответствующему показателю, получаемому при статическом вдавливании. Это дает большую наглядность результатам исследований и позволяет проводить более широкие обобщения.

На рис. 65 приведены графики зависимости относительных величин объема разрушенной породы, удельной работы разрушения и наибольшего сопротивления внедрению штампа при динамическом разрушении мрамора, построенные по данным работ [24, 25]. Величины $p_{ш}$ и V определены по методике стандартных испытаний при статическом вдавливании штампа. Работа A_0 определена по формуле (VI.43).

Из рис. 65 видно, что в области существования второй формы разрушения относительный объем разрушения близок к единице, а при формировании третьей формы разрушения он быстро возрастает.

Для формирования второй формы разрушения требуется несколько больше энергии ($T_2 \approx 1,6 A_0$), чем при статическом вдавливании. Последнее обуславливает и более высокую энергоемкость разрушения в процессе динамического вдавливания. Рост энергоемкости разрушения в свою очередь связан с более высоким сопротивлением внедрению штампа при динамическом вдавливании, чем при статическом. По мере увеличения энергии удара наблюдается постепенное увеличение наиболь-

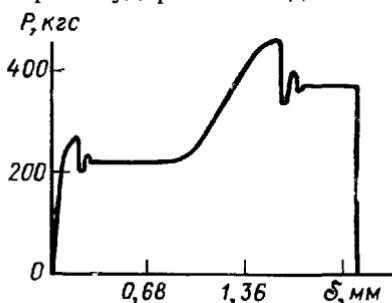


Рис. 66. Графики зависимости P от δ при получении последовательно второй и третьей форм разрушения мрамора

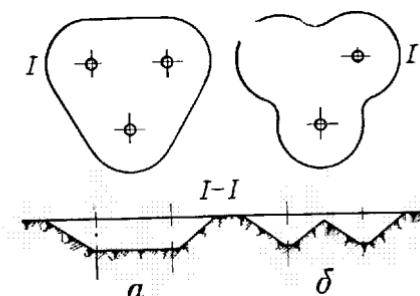


Рис. 67. Схема воздействия и контуры зон разрушения при вдавливании трех штампов

шего сопротивления внедрению. Наибольшее сопротивление внедрению при достижении третьей формы разрушения примерно на 30% больше, чем при достижении второй формы разрушения.

В результате статического вдавливания штампа можно получить формы разрушения и более высоких порядков путем дальнейшего непрерывного нагружения. Вид зависимости нагрузка — внедрение штампа с последовательным получением второй и третьей форм разрушения на мраморе приведен на рис. 66. Из рис. 66 и 64 видно, что сопротивление внедрению штампа растет от одной формы разрушения к другой (от скачка к скачку), как и при динамическом вдавливании.

Аналогичность форм разрушения вследствие статического и динамического вдавливания позволила сопоставить энергоемкость разрушения пород при получении ряда одинаковых форм разрушения. В табл. 25 приведены значения удельной объемной работы разрушения в процессе вдавливания в мрамор. Удельная объемная работа разрушения определялась по формулам (VI.44) и (VII.12).

Из табл. 25 видно, что энергоемкость разрушения пород как при динамическом, так и при статическом вдавливании уменьшается от скачка к скачку, причем при динамическом разрушении энергоемкость несколько выше, чем при статическом.

В случае одновременного вдавливания нескольких инден-

Таблица 25

Форма разрушения	Удельная объемная работа разрушения A_V , кгс·м/см ³	
	статическое вдавливание	динамическое вдавливание
Первая	—	19,9
Вторая	11,1	14,8
Третья	4,0	5,1

торов имеет место сложение напряжений, в результате чего повышается эффективность разрушения породы [45]. На рис. 67 приведены формы зон разрушения, полученные при одновременном и последовательном вдавливании штампов в мрамор. При одновременном вдавливании получена общая зона разрушения с плоским дном (рис. 67, а), а при последовательном форма разрушения образована пересечением единичных форм (рис. 67, б). В первом случае объем разрушения вследствие одновременного вдавливания был в 1,4 раза больше, чем во втором, что обусловило соответствующее снижение энергоемкости. При одновременном вдавливании инденторов большое значение имеет выбор оптимального расстояния между инденторами опытным путем.

§ 6. Определение динамических упругих характеристик горных пород

Решение ряда динамических задач механики горных пород основано на допущении о соответствии горных пород модели упругого твердого тела. При этом предполагается, что упругие характеристики определены в динамических условиях.

Существует целый ряд методов определения динамических упругих характеристик пород [35]. Наибольшее распространение получил метод, основанный на измерении скорости распространения продольных и поперечных волн в горных породах.

При измерениях на образцах пород в виде стержня

$$E_d = c^2 \rho, \quad (\text{VII.13})$$

где E_d — динамический модуль упругости;
 c — скорость распространения продольной упругой волны в стержне;
 ρ — плотность горной породы.

При измерениях на достаточно больших образцах пород, имитирующих полупространство, определяются скорости рас-

пространения продольных и поперечных упругих волн. Это позволяет вычислить и коэффициент Пуассона и модуль упругости:

$$\mu_d = \frac{0,5 - i^2}{1 - i^2}; \quad (VII.14)$$

$$E_d = c_p^2 \rho \frac{(1 + \mu_d)(1 - 2\mu_d)}{1 - \mu_d}, \quad (VII.15)$$

где μ_d — динамический коэффициент Пуассона;

i — отношение скорости распространения поперечной волны к скорости распространения продольной волны.

По величине скорости поперечной волны c_p непосредственно можно определить модуль деформации при сдвиге

$$G_d = c_p^2 \rho. \quad (VII.16)$$

Значения E_d и μ_d позволяют вычислить модуль объемной деформации по формуле (II.11).

Методы определения скоростей распространения упругих волн в горных породах описаны в [35].

В табл. 26 приведены величины модуля Юнга E , определенные на образцах горных пород методом вдавливания штампа и рассчитанные по скорости прохождения продольных и поперечных волн (по данным Н. М. Филимонова).

Таблица 26

Горная порода	Показатели при вдавливании				E_d/E	
	статическом		динамическом			
	p_0 , кгс/мм ²	E , кгс/мм ²	μ_d	E_d , кгс/мм ²		
Ангидрит	79	1650	0,27	6050	3,66	
Известняк	107	1360	0,34	4810	3,53	
Известняк	186	2430	0,36	7020	2,88	
Доломит	53	690	0,26	3420	4,95	
Доломит	262	2680	0,31	8150	3,04	

Из табл. 26 видно, что динамический модуль Юнга превышает статический в несколько раз. Причем различие тем больше, чем меньше предел текучести пород. Это еще раз подтверждает, что в общем случае математическая модель горной породы значительно сложней упругой модели. В случае использования упругой модели для решения практических задач необходимо, чтобы упругие характеристики пород определялись в тех условиях, для которых решается та или иная задача.

§ 7. Усталостное разрушение горных пород при вдавливании

В процессах разрушения горных пород долотами доля усталостного разрушения очень велика. С увеличением глубины бурения доля усталостного разрушения пород возрастает. Наиболее полные и систематизированные сведения об усталостном разрушении пород содержатся в работах [33, 77].

Б. А. Жлобинский экспериментально установил, что механизм усталостного разрушения пород при вдавливании аналогичен механизму динамического разрушения пород.

На первом этапе от нагружения к нагружению формируются зоны предельного состояния в горной породе. На втором этапе вокруг ядра разрушения образуется кольцевая трещина. Третий этап разрушения характеризуется появлением хрупкого выкола вокруг индентора, аналогичного первой форме динамического разрушения. Далее деформирование породы от нагружения к нагружению приводит к образованию переходных форм разрушения от первой до второй и т. д.

Очевидно, для того, чтобы процесс развивался по изложенной схеме, необходимо, чтобы удельная нагрузка на породу была не менее ее предела усталости. Рассмотрим усталостные характеристики горных пород.

На рис. 68 приведен график зависимости разрушающих напряжений σ_y от числа циклов нагружения N (усталостная кривая). Этот график зависимости описывается уравнением

$$\sigma_y^m N = C_y, \quad (VII.17)$$

где m — показатель степени усталостной кривой;

C_y — постоянная усталостной кривой.

Из выражения (VII.17) видно, что усталостная характеристика породы должна быть задана не менее, чем двумя показателями. В работе [77] рекомендуется в качестве показателя усталостной прочности породы использовать величину нормального давления штампа на горную породу, соответствующего разрушению при базовом числе циклов. Причем для горных пород базовое число циклов рекомендуется брать не больше, чем 15—20.

Однако в названных выше работах не оговаривается, какой форме разрушения должны соответствовать определяемые

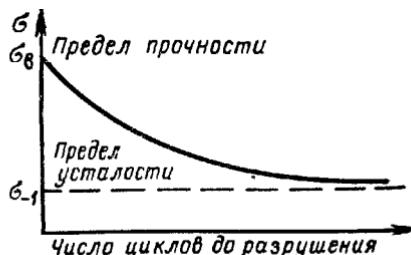


Рис. 68. Усталостная кривая

показатели. По мнению авторов учебника, показатели, характеризующие усталостное разрушение пород, целесообразно определять по второй форме разрушения.

Уравнение усталостной кривой может быть получено при проведении не менее, чем двух серий динамических испытаний по вдавливанию штампа. В процессе испытания величина p определяется путем осциллографирования или оценивается по приближенной формуле

$$p = \frac{P \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_c}} \right)}{S}, \quad (\text{VII.18})$$

где P — вес ударника со штампом;
 H — высота сбрасывания груза;
 δ_c — величина прогиба поверхности породы под действием силы P (оценивается по результатам испытаний при статическом вдавливании).

Испытание ведется до получения заданной формы разрушения. Подставив результаты испытания в формулу (VII.17), получим систему уравнений

$$\begin{aligned} p_1^m N_1 &= C_y; \\ p_2^m N_2 &= C_y, \end{aligned} \quad (\text{VII.19})$$

решая которую, получаем значения m и C_y .

Подставив принятые базовое значение N_6 , определим усталостную характеристику породы

$$p_y = \left(\frac{C_y}{N_6} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (\text{VII.20})$$

Для получения надежных данных следует провести не менее трех пар испытаний. Тогда величина p_y определится как среднее арифметическое значение всех определений.

В заключение следует отметить, что динамическое и особенно усталостное разрушение пород остается недостаточно изученной областью механики горных пород и требует к себе пристального внимания.

АБРАЗИВНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

§ 1. Основные понятия об изнашивании металлов и абразивности горных пород

Детали буровых машин и механизмов, бурильный и породоразрушающий инструменты в процессе работы интенсивно изнашиваются, в результате чего меняются их форма и размеры. При достижении предельной величины износа эти детали и инструменты становятся непригодными для дальнейшей эксплуатации и требуют восстановления или замены.

В 1971 г. введен общесоюзный стандарт на основные термины и определения в области трения и изнашивания в машинах — ГОСТ 16429—70.

Под *изнашиванием* понимается постепенное изменение формы и размеров детали или инструмента в процессе работы. Не следует путать изнашивание с поломками и разрушением, которые происходят в короткий промежуток времени.

В. Д. Кузнецов, проанализировав понятия, определения и термины в области изнашивания, дал следующее определение: *изнашивание — это такое явление, когда при затрате энергии, равной работе сил трения, с поверхности твердого тела отделяются частицы и масса тела уменьшается*.

Результат изнашивания, проявляющегося в виде отделения частиц или остаточной деформации материала, называется *износом*.

Величина износа на единицу работы сил трения называется *интенсивностью изнашивания* и обозначается ω :

$$\omega = W/A_T, \quad (\text{VIII.1})$$

где W — износ;

A_T — работа трения.

В свою очередь

$$A_T = fPL,$$

где f — коэффициент трения;

P — нормальная нагрузка;

L — путь трения.

В этом случае

$$\omega = W/fPL.$$

Очень часто в результате трудности измерения работы трения интенсивность изнашивания подсчитывают по формуле

$$\omega' = \omega f = W/PL. \quad (\text{VIII.2})$$

Такой прием значительно упрощает испытания, однако показатель износа лишается строгого физического смысла, а также объективности, поскольку коэффициент трения не является постоянной величиной, а зависит от условий и режима испытаний [36, 62].

Величина износа в единицу времени называется *скоростью изнашивания*:

$$a = W/t, \quad (\text{VIII.3})$$

где a — скорость изнашивания;

t — время опыта.

Характер интенсивности или скорость изнашивания зависит от большого числа одновременно действующих факторов, к основным из которых относятся:

- 1) вид и свойства трущихся поверхностей;
- 2) режим трения (режим работы деталей или инструмента);
- 3) вид и свойства среды, в которой работают детали или инструменты.

Вид и свойства поверхностей могут быть охарактеризованы шероховатостью, кривизной, твердостью материалов и др.

Режим трения характеризуется удельным давлением, скоростью относительного перемещения, характером приложения нагрузки, частотой взаимодействия и т. п. Исследования [60, 87] показали, что удельное давление и скорость скольжения при изучении абразивности пород могут быть заданы обобщенным показателем — удельной мощностью трения $N'_{\text{уд}}$, равной

$$N'_{\text{уд}} = fpv_c, \quad (\text{VIII.4})$$

где p — удельное давление на поверхностях трения;

v_c — скорость относительного перемещения.

Среда характеризуется, главным образом, смазывающей и охлаждающей способностью. Детали горного оборудования и инструмента чаще всего работают в воздушной среде, в среде углеводородных жидкостей (масла, промывочные жидкости на нефтяной основе), в воде и водных растворах, а также в разного рода эмульсиях.

Наиболее полные исследования процессов изнашивания металлов выполнены в области машиностроения.

Б. И. Костецкий [39] на основании экспериментального изучения изменений вида поверхностей и свойств металла поверхностных слоев выделяет следующие виды изнашивания.

1. *Изнашивание схватыванием первого рода.* Этот вид изнашивания характерен для малых скоростей относительного перемещения, а также высоких удельных давлений при трении однородных поверхностей и происходит с образованием отдельных задиров на поверхностях трения.

2. *Окислительное изнашивание* имеет место при небольших удельных давлениях и скоростях скольжения. Обусловлено сдвигом и усталостным отслаиванием окисных пленок с трущихся поверхностей. Окисные пленки непрерывно восстанавливаются.

3. *Тепловое изнашивание* (изнашивание схватыванием второго рода) характерно для высоких удельных давлений и скоростей скольжения. Поверхность металла изнашивается в условиях термического разупрочнения, которое способствует интенсивному развитию схватывания. Наблюдаются явления отпуска, рекристаллизации и вторичной закалки поверхностных слоев металла.

4. *Абразивное изнашивание* обусловлено наличием абразивной среды в зоне трения. Характеризуется пластическим деформированием, царапанием и микрорезанием поверхности металла абразивной средой.

5. *Осповидное изнашивание* обусловлено усталостными процессами при трении качения.

Пластическое деформирование, резание или царапание металла абразивной средой возможно только в том случае, если частицы среды более твердые и образуют весьма шероховатую поверхность. Если исходить из этих представлений о сущности абразивного изнашивания применительно к горному делу, то при трении закаленных сталей об осадочные горные породы абразивными будут только кварцевые песчаники и алевролиты. По отношению же к твердым сплавам ни одна из осадочных пород не будет абразивной.

В горнодобывающей и нефтегазовой промышленности изнашивание деталей и инструмента при трении о любые горные породы называют абразивным, т. е. в понятие абразивного изнашивания вкладывается более широкий смысл, чем в машиностроении и металлообработке.

Исследования [2, 3, 63, 87] показали, что при работе породоразрушающего инструмента абразивный износ вооружения долот осложнен термохимическими процессами под влиянием тепла трения и окружающей среды.

Способность горных пород изнашивать металлы при трении принято называть *абразивностью* пород.

Абразивность пород проявляется в процессе абразивного (преимущественно механического) изнашивания и является его характеристикой. Поэтому показатели абразивности можно рассматривать как показатели механических свойств горных пород.

Абразивность горной породы, как и любой другой показатель механических свойств, отражает ее поведение в конкретных условиях испытания или работы. Изменение этих условий может привести к столь существенному изменению процесса изнашивания материала детали или инструмента, что полученные в других условиях показатели не будут ни качественно, ни количественно характеризовать этот процесс. Отсюда следует, что при изучении абразивного изнашивания целесообразно также пользоваться моделями процессов и определять показатели абразивности как характеристики этих моделей. Однако современное состояние изученности этого вопроса не позволяет выделить простые модели и представить более сложные процессы как комбинации простых моделей. Поэтому рекомендуется определять показатели абразивности пород для групп однородных процессов при их моделировании. Существующие методы определения абразивности горных пород в разной степени удовлетворяют последнему требованию.

§ 2. Особенности режима работы различных деталей машин и инструмента

Абразивному изнашиванию подвергаются различные детали горного оборудования, бурильный и породоразрушающий инструмент, работающие в контакте с горными породами. Режим изнашивания их определяется удельными нагрузками на поверхностях трения с горными породами, скоростью относительного перемещения, условиями смазки и охлаждения.

Кроме общих признаков работы деталей горных пород, бурильного и породоразрушающего инструмента имеются и существенные различия. Детали машин и бурильный инструмент должны работать в заданном режиме при минимальных затратах энергии на трение о горные породы, тогда как породоразрушающий инструмент предназначен для концентрированной реализации энергии, подведенной к забою скважины для разрушения горной породы. Энергия реализуется рабочими поверхностями элементов вооружения долот в случае их взаимодействия с горной породой. Высокая энергоемкость разрушения горных пород обусловливает очень тяжелый режим работы породоразрушающих инструментов, высокую скорость их изнашивания и низкую долговечность.

При создании экспериментальных установок для изучения абразивности пород применительно к условиям бурения скважин необходимо воспроизвести или смоделировать условия изнашивания в широком диапазоне изменения режима работы. Верхние границы диапазона обусловлены режимом изнашивания породоразрушающего инструмента. Основные принципы моделирования изнашивания породоразрушающих инструмен-

тов при изучении абразивности горных пород описаны в работе [87].

Для условий циклического взаимодействия элементов вооружения шарошечных долот режим работы может быть охарактеризован средней удельной мощностью $N_{уд}$, определяемой по формуле

$$N_{уд} = A_b v / S, \quad (\text{VIII.5})$$

где A_b — работа, совершаемая элементом вооружения долота за одно взаимодействие с породой;

v — частота взаимодействия;

S — рабочая поверхность элемента вооружения долота.

Основные сведения о режиме работы породоразрушающих инструментов на примере долот В-190Т:

Частота взаимодействия v , с^{-1}	1,5—30
Удельная мощность $N_{уд}$, $\text{Вт}/\text{мм}^2$	0,4—8,0
Охлаждение q , $\text{м}/\text{с}$	до 12
Скорость удара v_y , $\text{м}/\text{с}$	0,12—2,4
Скорость скольжения v_c , $\text{м}/\text{с}$	до 1,6
Время контакта t_b , мс	0,2—50

Величины $N_{уд}$, q , v , t_b определяют тепловой режим в области контакта металл — горная порода. Поэтому для физического подобия процессов изнашивания в реальных условиях и на экспериментальных установках необходимо, чтобы эти величины изменялись в одинаковых пределах. Последнее связано с возможными структурными и фазовыми превращениями в поверхностных слоях металла под влиянием тепла трения. Таким образом, необходимо воспроизвести изнашивание на моделях деталей или инструментов в лабораторных условиях в широком диапазоне изменения условий и режима работы при трении о горные породы и в процессе их разрушения.

§ 3. Методы и схемы изучения абразивности горных пород

Абразивность горных пород применительно к процессам изнашивания бурильного и породоразрушающего инструмента может быть изучена как промысловыми, так и лабораторными методами. Существующие промысловые методы (работы В. С. Федорова, А. Ф. Суханова, А. П. Духнина, В. И. Карпова и др.) связаны с более общей проблемой буримости горных пород, которая в свою очередь зависит как от природных, так и от технико-технологических факторов. Поэтому данные, полученные этими методами, не поддаются обобщениям.

Основные усилия исследователей были направлены на создание простых и надежных методов лабораторного изучения абразивности горных пород. В настоящее время при лабора-

торном изучении абразивности пород применительно к условиям работы породоразрушающих инструментов применяются следующие основные схемы изнашивания.

1. Схема бурения — резания (рис. 69, а). Эта схема применялась при изучении абразивности пород Е. Ф. Эпштейном,

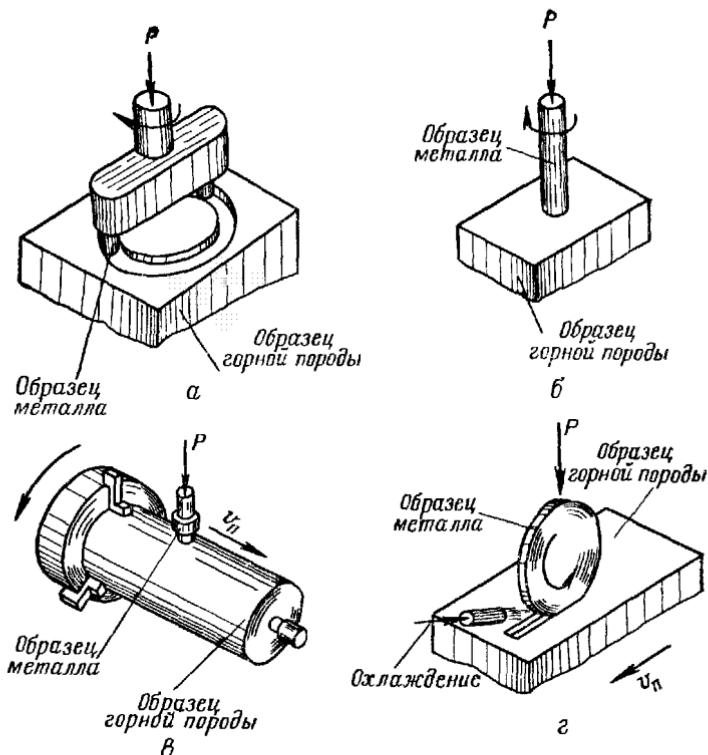


Рис. 69. Основные схемы изнашивания металлов при изучении абразивности горных пород:

а — схема бурения — резания, б — схема сверления; в — схема изнашивания на цилиндрической поверхности керна, г — схема изнашивания диска, Р — нагрузка на образец, v_p — скорость подачи

Н. В. Пичахчи, Х. Сиверсон, Н. И. Любимовым и др. Е. Ф. Эпштейном [116] изучался износ твердосплавных резцов при различных режимах работы с охлаждением струей дистиллированной воды. За меру абразивности принимали отношение объемного износа резца к единице работы сил трения (в $\text{см}^3/\text{кгс}\cdot\text{см}$). Позже абразивность горной породы Е. Ф. Эпштейн предложил оценивать произведением коэффициентов объемного износа ω (в $\text{см}^3/\text{кгс}\cdot\text{см}$) и внешнего трения f . Показатель абразивности $f\omega$ определялся по формуле (VIII.2).

Абразивность горных пород Х. Сиверсом определялась по отношению к обычной малоуглеродистой стали, термически не обработанной.

Н. И. Любимовым [41] для оценки абразивности горных пород предложен «способ буровой коронки», сущность которого заключается в износе при бурении самозатачивающейся коронки диаметром 46 мм. Коронка армирована тонколезвийными пластинками твердого сплава марки ВК-За размером $20 \times 8,5 \times 0,7$ мм.

Показатель абразивности породы определяется по формуле

$$\omega_l = \frac{W_1 - W_2}{l},$$

где W_1 и W_2 — масса коронки до и после бурения в г;

l — проходка в м.

2. Схема сверления или истирания эталонных стержней (рис. 69, б). Эта схема применялась при изучении абразивности горных пород М. И. Койфманом, Р. Шефердом, Л. И. Бароном, А. В. Кузнецовым, В. И. Карповым, М. М. Протодьяконовым, О. Н. Голубинцевым и др.

Л. И. Бароном и А. В. Кузнецовым [15] предложен метод определения абразивности горных пород, сущность которого заключается в истирании торцов цилиндрических стальных стержней (из стали-серебрянки) при вращательном движении о необработанную поверхность образца испытуемой горной породы. Истирание стальных стержней диаметром 8 мм производится на образцах пород в виде кернов и штупфов.

Установка для определения абразивных свойств пород монтируется на базе настольного сверлильного станка. Испытания проводятся при нагрузке 15 кгс и скорости вращения шпинделя станка 400 об/мин. Длительность истирания 10 мин. В качестве показателя абразивности горных пород принят массовый износ стержня в мг/мин, т. е. используется показатель скорости изнашивания в стандартных условиях. Этот метод получил широкое распространение. Его преимущество — быстрота и малая трудоемкость. К недостаткам этого метода относится отсутствие моделирования процесса разрушения горной породы как по режиму работы, так и по материалу эталонного стержня.

В. И. Карпов и М. М. Протодьяконов предлагают определить абразивность горных пород по скорости увеличения нагрузки на сверло из стали Р-18 при постоянной подаче сверла 0,2 мм/об. Метод заслуживает внимания применительно к условиям разрушения горных пород долотами режуще-истирающего типа. Однако обоснования выбора материала и режима изнашивания нет. Отсутствует и охлаждение инструмента.

О. Н. Голубинцев [28] для оценки абразивности горных пород предложил комбинированный метод, позволяющий оценивать показатель абразивности одновременно с оценкой твердости этих же пород. Изготовлен специальный прибор, объединяющий два метода: метод вдавливания штампа и метод сверления. Прототипом прибора О. Н. Голубинцева является прибор типа ПТА для определения твердости и абразивности горных пород в массиве методом сверления, предложенный В. И. Карповым и М. М. Протодьяконовым.

3. Схема изнашивания на цилиндрической поверхности керна (рис. 69, в). Во всех рассмотренных случаях, за исключением опытов Е. Ф. Эпштейна, не предусматривается очистка зоны контакта металла и горной породы. Опыты, выполненные Б. Фишем и другими, показали, что засорение продуктами износа поверхностей трения сильно искажает результаты измерений. В связи с этим была предложена схема с непрерывным обновлением поверхности трения.

4. Схема изнашивания диска (кольца) (рис. 69, г). По этой схеме проводилось изучение абразивности пород Л. А. Шрейнером и П. С. Баландиным. Дальнейшее развитие этот метод получил в работе [87]. Сущность метода заключается в том, что образец металла в виде кольца изнашивается в процессе трения о горную породу при заданных нагрузке и скорости скольжения. Контактная поверхность кольца с горной породой непрерывно меняется, что позволяет воспроизвести циклическую взаимодействия рабочих элементов с горной породой, характерную для работы шарошечных долот.

Изнашивание ведется на специальных экспериментальных установках, подробное описание которых можно найти в работах [87, 109]. В схемах установок предусмотрены непрерывное струйное охлаждение образца (кольца), равномерная подача горной породы и непрерывная запись момента трения.

Возможности широкого варьирования удельной мощностью трения в результате изменения нагрузки и скорости вращения, частотой взаимодействия, свойствами циркулирующей среды, а также изготовление колец из соответствующих материалов позволяют осуществлять широкое моделирование изнашивания бурильного и породоразрушающего инструмента, работающего при циклическом взаимодействии с горной породой.

Исследования абразивного изнашивания и абразивности горных пород, выполненные на установках по схеме изнашивания диска, наиболее представительны и общи.

§ 4. Методика изучения абразивного изнашивания металлов и абразивности горных пород

Изучение абразивности горных пород проводится на образцах или кернах пород, размеры которых позволяют вырезать образец размером не менее $40 \times 40 \times 60$ мм. Допускается ис-

пользование кернов диаметром 40 мм. Изнашивание образцов металла производится на одной из двух плоско-параллельных поверхностей образца породы, приготовляемых срезкой и шлифовкой боковых поверхностей керна. Требования к качеству шлифовки и параллельности плоскостей те же, что и при подготовке к испытаниям на вдавливание по ГОСТ 12288—66.

Образцы металла готовятся из стали или твердого сплава в виде колец диаметром от 15 до 50 мм с цилиндрической рабочей поверхностью (рис. 70). Длина образующей рабочей поверхности диска (ширина кольца) при испытаниях на хемогенных породах должна быть не менее 2 мм, на обломочных породах — не менее 3,5 мм. Поверхность кольца шлифуется. Материал кольца и его химико-термическая обработка должны соответствовать моделируемым деталям или инструментам.

Перед испытанием кольцо промывается в спирте, высушивается и взвешивается на аналитических весах. Затем устанавливается на шпиндель установки и изнашивается при заданных параметрах режима испытания. Нагрузка на кольцо подбирается по величине требуемой интенсивности нагрузки

$$P = p_b b_0 \quad (\text{VIII.6})$$

где P — нагрузка на кольцо;

p_b — нагрузка на единицу длины образующей кольца;

b — длина образующей кольца (ширина кольца).

Частота взаимодействия и скорость скольжения должны соответствовать частоте взаимодействия и скорости скольжения изучаемого процесса и подбираются путем выбора соответствующего диаметра кольца, так как

$$v_c = \pi D v, \quad (\text{VIII.7})$$

где v_c — скорость скольжения;

D — диаметр кольца;

v — частота взаимодействия.

Интенсивность охлаждения и вид охлаждающего агента также должны соответствовать изучаемому процессу. При изучении относительной абразивности пород испытания проводились с охлаждением технической водой, расход которой определялся по формуле

$$Q = q S, \quad (\text{VIII.8})$$

где q — удельный расход воды на единицу рабочей поверхности изучаемого объекта;

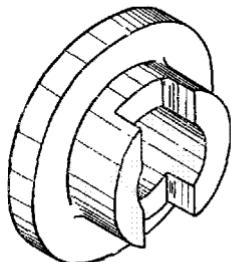


Рис. 70. Образец металла (кольцо)

S — рабочая поверхность кольца,

$$S = \pi D b.$$

(VIII.9)

Скорость протяжки образца горной породы подбиралась из условия, чтобы глубина канавки разрушения на образце породы составляла $0,5 \div 2$ мм. Это позволяет обеспечить время контактирования точки рабочей поверхности с горной породой в пределах, характерных для вооружения долота.

Первоначально [109] для количественной оценки износа был принят показатель — интенсивность изнашивания, определяемый по формуле (VIII.2). Путь трения равен

$$L = \pi D n_0$$

(n_0 — общее число оборотов образца за опыт).

Однако дальнейшие исследования, выполненные авторами, показали, что показатель — интенсивность изнашивания не удобен при изучении абразивности пород, так как он существенно зависит от соотношения величин нагрузки и скорости скольжения. Поэтому было предложено использовать при изучении абразивности пород как показатель скорость изнашивания и определять его по формуле

$$a = \frac{W}{\gamma_m S t_0}, \quad (\text{VIII.10})$$

где W — массовый износ образца металла;

γ_m — плотность металла;

t_0 — время опыта.

Физический смысл показателя a — толщина слоя металла, снимаемого при изнашивании с рабочей поверхности образца в единицу времени.

Выражение (VIII.5) для случая изнашивания кольца принимает вид (в Вт/мм²):

$$N_{yd} = 1,02 \frac{Mn}{S}, \quad (\text{VIII.11})$$

где M — средний момент трения за опыт в кгс · м;

n — скорость вращения кольца в об/мин;

S — рабочая поверхность кольца в мм².

Скорость разрушения горной породы подсчитывается по глубине канавки разрушения δ на поверхности образца

$$\delta_0 = \frac{\delta v_p}{\pi D}, \quad (\text{VIII.12})$$

где δ_0 — скорость разрушения породы;

v_p — скорость подачи образца горной породы.

Физический смысл величины δ_0 — отношение расчетного объема выработки шириной b и глубиной δ в горной породе к площади рабочей поверхности кольца в единицу времени.

Для оценки процессов взаимного изнашивания металла и горной породы определяется относительный износ пары металл — горная порода по формуле

$$\omega = a/\delta_0. \quad (\text{VIII.13})$$

Коэффициент трения пары металл — горная порода подсчитывается следующим образом:

$$f = 2M/PD. \quad (\text{VIII.14})$$

Методическими исследованиями [87] установлено, что определение показателей абразивности пород применительно к низкооборотному способу бурения следует проводить при частоте взаимодействия 2 Гц, а применительно к высокооборотному — при частоте 14 Гц. Диаметр колец в этом случае принимается 30 мм. Такое соотношение частоты и диаметра обеспечивает необходимые средние скорости скольжения металла относительно горной породы.

§ 5. Понятие об областях изнашивания металлов и показателях абразивности пород

Рабочие поверхности деталей горного оборудования и инструмента выполняются чаще всего из углеродистых, инструментальных или цементируемых сталей, которые подвергаются соответствующей термической или химико-термической обработке. Нередко применяются методы упрочнения рабочих поверхностей твердым сплавом или выполнение рабочих элементов из твердого сплава. Поэтому при изучении основное внимание уделяется абразивному изнашиванию закаленных и цементированных поверхностей стали.

Рассмотрим основные закономерности изнашивания закаленных и цементируемых сталей на примере сталей У8А и 20ХНЗА. При изучении абразивности горных пород авторами выполнен широкий круг исследований, который позволяет сделать следующие обобщения.

В изученном диапазоне изменения удельной мощности ($N_{уд} < 8,0 \text{ Вт}/\text{мм}^2$) выделены три области изнашивания. В основу выделения областей изнашивания положено существенное изменение зависимости скорости изнашивания от удельной мощности, связанное с качественным изменением вида изнашивания.

В **первой области изнашивания** (для рассматриваемой схемы $N_{уд} \leq 0,4 \text{ Вт}/\text{мм}^2$) зависимость a от $N_{уд}$ линейная (рис. 71, участок I). Скорость изнашивания не зависит от параметров реализуемой мощности, т. е. от соотношения нагрузки и скорости скольжения. Эта область изнашивания характерна для нормальных (не аварийных) условий работы деталей горных машин и бурильного инструмента, а также для

породоразрушающего инструмента, работающего при малых скоростях вращения и низких удельных нагрузках.

В общем случае для первой области изнашивания можно записать, что

$$a = A_0 N_{уд} + B_0, \quad (\text{VIII.15})$$

где A_0 и B_0 — экспериментальные коэффициенты, зависящие от условий испытания и абразивности пород.

Для обобщенных моделей однородных процессов эти коэффициенты можно использовать как показатели абразивности.

Вторая область изнашивания. Переход от первой области изнашивания ко второй характеризуется при трении об обломочные породы «скакком» скорости изнашивания, а при трении о кристаллические породы нарушением линейной зависимости a от $N_{уд}$ (рис. 71, участок II). Это явление связано с качественным изменением состояния металла в зоне трения.

На рис. 72 приведены характерные зависимости a от $N_{уд}$ для подгрупп пород, наиболее часто встречающихся при бурении скважин. Из рис. 72 видно, что для обломочных пород зависимости скорости изнашивания от удельной мощности могут быть представлены в виде

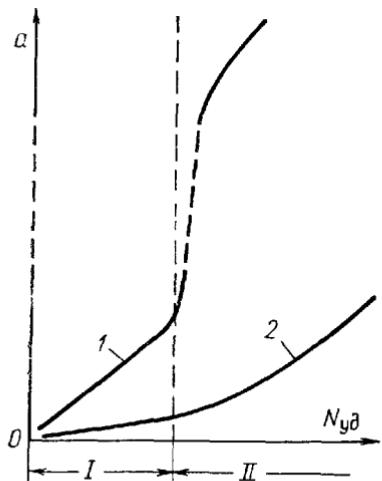


Рис. 71. Характерный вид зависимостей скорости изнашивания стали от удельной мощности при трении об обломочные 1 и о кристаллические 2 осадочные породы:
I — первая область изнашивания, II — вторая область изнашивания

$$a = AN_{уд} + B, \quad (\text{VIII.16})$$

где A и B — экспериментальные коэффициенты.

В работе [85] показано, что зависимость a от $N_{уд}$ для кристаллических пород можно представить в виде

$$a = AN_{уд}^k, \quad (\text{VIII.17})$$

где A и k — экспериментальные коэффициенты.

При трении о горные породы сравнительно небольшой твердости по штампу ($p_{ш}$ до 150—200 кгс/мм²) влияние соотношения скорости скольжения и нагрузки на скорость изнашивания стали оказывается несущественным только для кристаллических пород в начале второй области изнашивания, а при больших значениях $N_{уд}$ этим влиянием пренебречь нельзя.

Третья область изнашивания наблюдалась только при разрушении наиболее твердых разновидностей обломочных и кристаллических пород и обусловлена потерей устойчивости и сдвигом рабочей поверхности образцов металла и элементов вооружения. В этой области скорость изнашивания с увеличением

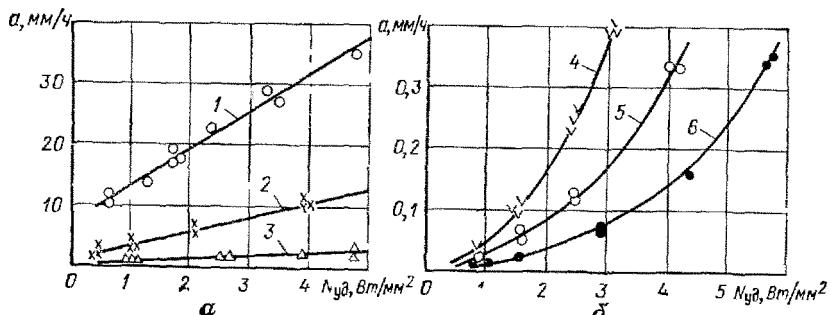


Рис. 72. Зависимости α от N_{yd} стали марки 20ХН3А во II области изнашивания при разрушении:

α — обломочных пород, b — кристаллических пород, 1 — песчаник, 2 — алевролит, 3 — аргиллит, 4 — доломит, 5 — известняк 6 — ангидрит

нием удельной мощности возрастают особенно резко (рис. 73).

Из выражения (VIII.4) следует, что при одинаковой удельной мощности с уменьшением скорости скольжения растет нормальная нагрузка, а следовательно растут и напряжения сдвига. Поэтому с уменьшением скорости скольжения следует ожидать уменьшение величины критической мощности, при которой наблюдается потеря устойчивости рабочей поверхности металла. Этот вывод хорошо подтверждается экспериментально. В то же время из рис. 73 видно, что при уменьшении скорости скольжения в 7 раз (от 1,4 до 0,2 м/с) величина критической мощности уменьшилась лишь в 2 раза. Следовательно в случае высокооборотных режимов изнашивания потеря устойчивости наблюдается при меньших нагрузках, чем в случае низкооборотных режимов.

Вторая область изнашивания характерна для работы элементов вооружения долот. В третьей области изнашивания

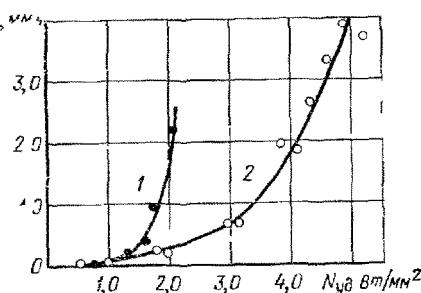


Рис. 73 Графики зависимости α от N_{yd} при разрушении доломита в условиях потери устойчивости рабочей поверхности образца стали при низкооборотном 1 и высокооборотном 2 режимах изнашивания (скорость скольжения соответственно 0,2 и 1,4 м/с)

часто работают долота при высокооборотных способах бурения и, сравнительно редко, при низкооборотных способах бурения. Работа долот в этой области изнашивания малоэффективна.

Разный вид зависимостей a от $N_{уд}$ и возможное изменение характера изнашивания при увеличении удельной мощности не позволяют использовать параметры уравнений (VIII.16) и (VIII.17) в качестве показателей абразивности. Для условий изнашивания вооружения шарошечных долот в работе [87] предлагаются и обосновываются в качестве показателей абразивности два значения скорости изнашивания:

- 1) a_1 при $N_{уд}=1,0 \text{ Вт}/\text{мм}^2$;
- 2) a_5 при $N_{уд}=5,0 \text{ Вт}/\text{мм}^2$.

В этом случае, приняв уравнения (VIII.16) и (VIII.17) для соответствующих горных пород в качестве интерполяционных, нетрудно найти скорость изнашивания закалённой стали при любом значении удельной мощности в диапазоне $0,5 < N_{уд} < 8,0 (\text{Вт}/\text{мм}^2)$.

Использование показателей абразивности при расчетах для других материалов или существенно отличных условий работы возможно только после проведения дополнительных испытаний и получения соответствующих уравнений.

§ 6. О взаимосвязи скорости абразивного изнашивания стали и характера разрушения горной породы

В процессе работы породоразрушающего инструмента по мере увеличения реализуемой удельной мощности, что соответствует увеличению нагрузки при постоянной скорости вращения (см. рис. 38), наблюдается не только количественное, но и качественное изменение процесса разрушения пород, которое имеет место после достижения предельного напряженного состояния, т. е. определенного удельного давления на контакте металл — горная порода. При испытаниях на износ одинаковая удельная мощность может быть получена для разных соотношений удельного давления и скорости скольжения и, следовательно, могут быть получены не только разные скорости разрушения породы, но и разный характер ее разрушения. Рассмотрим влияние характера разрушения породы на скорость абразивного изнашивания стали на примере доломита (рис. 74).

Из рис. 74 видно, что скорость разрушения горной породы δ_0 с увеличением скорости скольжения быстро уменьшается и наблюдается постепенный переход от объемного разрушения к поверхностному. При $N_{уд}=1 \text{ Вт}/\text{мм}^2$ происходит только поверхностное истирание доломита. Скорость изнашивания стали не зависит от скорости скольжения только при $N_{уд}=1 \text{ Вт}/\text{мм}^2$,

т. е. лишь в том случае, когда характер разрушения горной породы не изменяется. При более высоких значениях удельной мощности скорость изнашивания вначале увеличилась, а затем снизилась. Максимальные значения скорости изнашивания стали соответствуют переходной области от объемного разрушения к поверхностному, т. е. области усталостного разрушения породы. Это подтверждает существование определенной взаимосвязи между скоростью изнашивания стали и характером разрушения горных пород.

С началом развития разрушения горных пород резко увеличивается их шероховатость в области контакта с металлом, следовательно, увеличивается концентрация энергии в точках фактического контакта. В конечном счете это должно приводить к увеличению скорости изнашивания стали. С другой стороны, увеличение глубины области сдвигобразований в горной породе приводит к тому, что все большая энергия реализуется не на контакте с металлом, а внутри горной породы на поверхностях сдвигобразований. Этот процесс должен приводить к снижению темпа роста скорости изнашивания, а в некоторых случаях и к снижению скорости изнашивания. Отсюда вытекает, что с точки зрения долговечности породоразрушающего инструмента далеко не безразлично, в какой степени режим его работы соответствует условию наиболее эффективного разрушения пород.

§ 7. Механизм абразивного изнашивания закаленной стали при трении о горные породы и в процессе их разрушения. Ударно-абразивный износ

Механизм изнашивания металлов в различных условиях достаточно полно описан в работах [39, 93, 105]. Опираясь на данные этих исследований, методом аналогий можно проследить кинетику абразивного изнашивания закаленной стали по мере увеличения удельной мощности. С этой целью по областям изнашивания для наиболее распространенных подгрупп осадочных горных пород под микроскопом изучали изнашиваемые поверхности металла, изготовили и изучили микро-

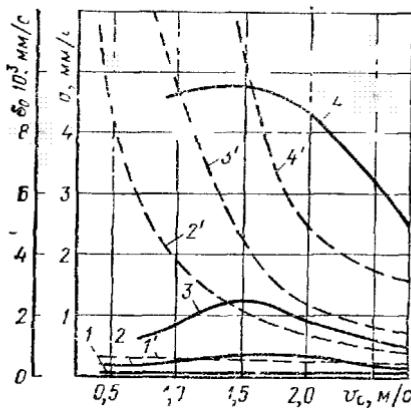


Рис. 74. Влияние скорости скольжения на скорость изнашивания стали 20ХНЗА и разрушения доломита:
 $1 - N_{\text{уд}} = 1,0 \text{ Вт/мм}^2$; $2 - N_{\text{уд}} = 2,0 \text{ Вт/мм}^2$;
 $3 - N_{\text{уд}} = 3,0 \text{ Вт/мм}^2$; $4 - N_{\text{уд}} = 5,0 \text{ Вт/мм}^2$;
 $1'-4' - a = f(v_c)$; $1'-4' - b_0 = f(v_c)$

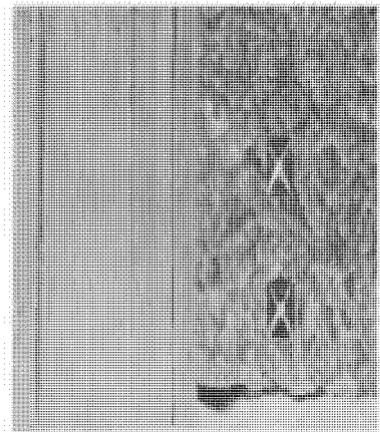
шлифы и распределение микротвердости в слоях металла, прилегающих к рабочей поверхности, и, наконец, сняли профилограммы рабочих поверхностей образцов металла. В качестве примеров на рис. 75 приведены виды рабочих поверхностей и микроструктура металла, прилегающего к рабочей поверхности после изнашивания на известняке и песчанике, на рис. 76 — профилограммы рабочих поверхностей и на рис. 77 — распределение микротвердости стали в направлении, перпендикулярном рабочей поверхности, после изнашивания на известняке и для долота, отработанного в промысловых условиях.

Изучение показало, что в первой области процесс изнашивания по глубине не выходит за пределы толщины окисных пленок, образующихся на поверхности стали. Многократное воздействие на них элементарных шероховатостей горной породы приводит к усталостному отслаиванию этих пленок. Изнашиваемая поверхность как бы полируется (см. рис. 75), в результате чего уменьшается шероховатость поверхности стали (см. рис. 76). Этот вид изнашивания в машиностроении классифицируется как окислительный. При трении об обломочные кварцесодержащие породы наблюдается царапание поверхности стали отдельными благоприятно расположенным зернами кварца (см. рис. 75 и 76), твердость которых выше, чем твердость поверхности закаленной стали. В результате этого скорость изнашивания стали обломочными породами значительно выше, чем карбонатными и сульфатными кристаллическими породами. Однако природа изнашивания остается преимущественно окислительной.

При удельной мощности трения, соответствующей переходу от первой области изнашивания ко второй (для схемы вращающегося диска при охлаждении водой эта величина составляет около $0,4 \text{ Вт}/\text{мм}^2$), со стороны поверхности появляется и развивается зона пониженной твердости (см. рис. 75 и 77), связанная с отпуском металла за счет тепла трения. Из рис. 77, а видно, что с увеличением удельной мощности растет степень и глубина термического разупрочнения стали.

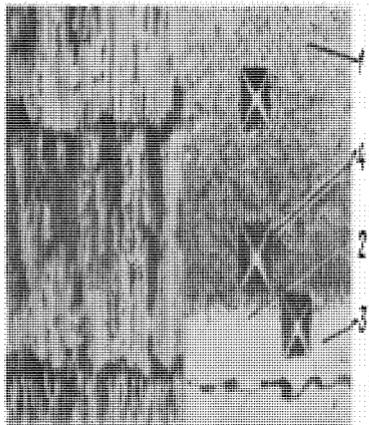
Разогрев и термическое разупрочнение поверхности стали увеличивают скорость изнашивания за счет увеличения скорости окислительных процессов и облегчения деформирования поверхности стали. На поверхности стали появляются темные пятна и надрывы. Особенно резко возрастает скорость изнашивания при трении о песчаники, так как термически разупрочненная поверхность легко деформируется и царапается обломками кварца (см. рис. 75 и 77).

В области $N_{уд} \geq 1,0 \text{ Вт}/\text{мм}^2$ на поверхности металла при трении о карбонатные и сульфатные породы надрывы поверхности стали развиваются в сетку трещин усталостного характера (см. рис. 75). При трении об обломочные горные породы

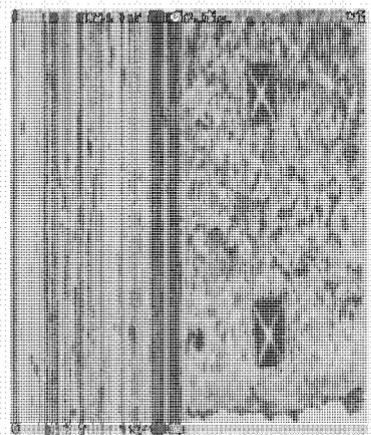


$$N_{y\delta} = 0,3 \text{ Bm/mm}^2$$

π

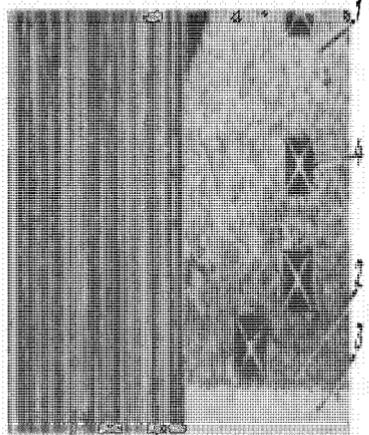


$$N_{y\delta} = 4,8 \text{ Bm/mm}^2$$



$$N_{y\delta} = 0,3 \text{ Bm/mm}^2$$

δ



$$N_{y\delta} = 1,4 \text{ Bm/mm}^2$$

Рис. 75. Виды рабочих поверхностей и микроструктура стали после изнашивания на известняке *a* и песчанике *b*:

1 — исходная микроструктура;
2 — отпущенный слой;
3 — «белая фаза»; 4 — отпечаток микротвердомера ПМТ-3

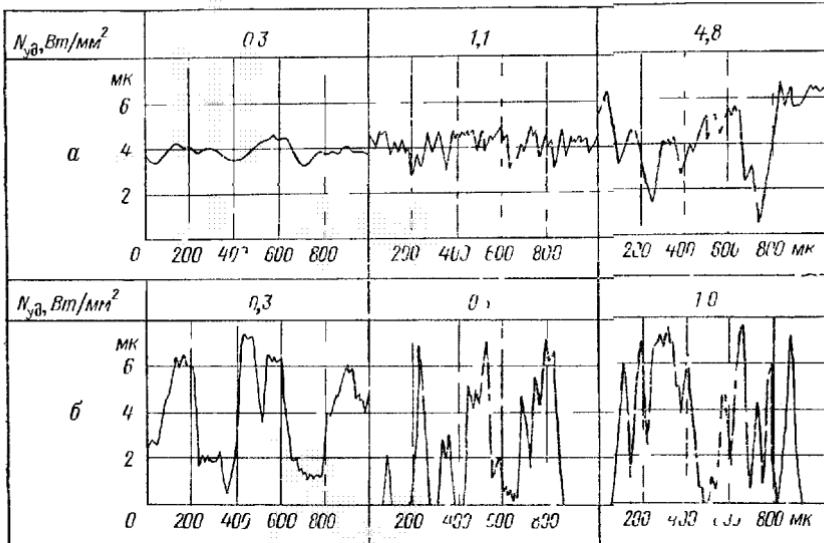


Рис. 76. Профилограммы рабочих поверхностей образцов стали после изнашивания на известняке *а* и песчанике *б*

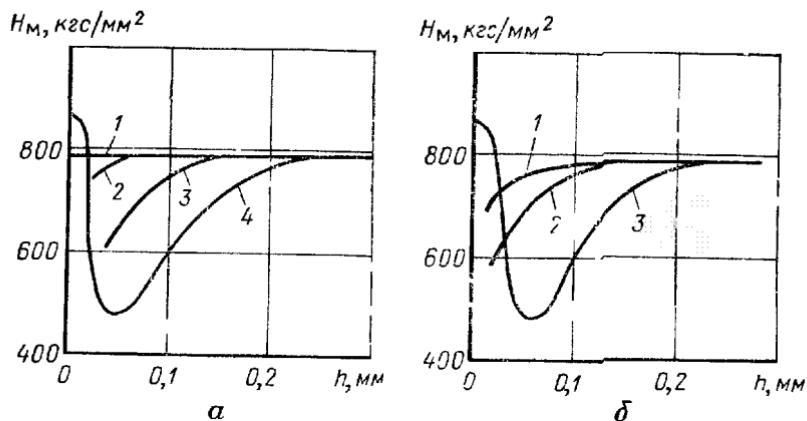


Рис. 77. Изменение микротвердости стали 20ХНЗА вглубь от рабочей поверхности после работы на известняке:

а — в образце после работы при удельной мощности в Bt/mm^2 , *б* — в зубьях долота OM21-190T третьей шарошки и соответствующих веществ, 1 — 0,3, 2 — 0,6, 3 — 2,1, 4 — 4,8

в результате высокой скорости изнашивания трещины не образуются.

Большая глубина и степень термического разупрочнения при высоких значениях удельной мощности делают возможным пластическое деформирование поверхности стали зернами карбонатных и сульфатных пород, имеющих сравнительно низкую твердость. Шероховатость поверхности стали возрастает (см. рис. 76). Переформирование поверхности стали приводит к усталостному разрушению не только хрупких поверхностных пленок, но и металла, который отделяется в виде тонких чешуек. При трении о песчаники наблюдается срезание металла в виде стружки.

Тепловое воздействие на металл приводит не только к образованию отпущенных структур металла (как правило, трооститных), но и особой «белой фазы», которая и обуславливает высокую микротвердость поверхностных слоев металла в области $N_{уд} > 3,0 \text{ Вт}/\text{мм}^2$. О природе и причинах возникновения «белой фазы» нет единого мнения. Для условий испытания на абразивное изнашивание наиболее вероятной причиной образования «белой фазы» является вторичная закалка интенсивно передеформированного металла, прилагающегося к рабочей поверхности образца металла или элемента вооружения долота.

По мере развития «белой фазы» все большую роль начинает играть выкрашивание и отслаивание отдельных участков передеформированной поверхности стали. Этот процесс усугубляется наличием сетки поверхностных трещин. Термически разупрочненный металл как бы раскатывается па более твердой основе, сползая и выкрашиваясь на края поверхностных трещин.

Внедряющиеся зерна горной породы блокируют поверхность металла и при определенном термическом разупрочнении могут вызвать сдвиг поверхности в целом (третья область изнашивания). Это явление называется потерей устойчивости рабочей поверхности металла. При этом наблюдается катастрофический рост скорости изнашивания стали. Вид изнашивания, на характер которого основное влияние оказывает разогрев поверхностей трения, в машиностроении называют термомеханическим или тепловым.

Из изложенного выше видно, что характер абразивного изнашивания при трении о горные породы и в процессе их разрушения зависит главным образом от режима и условий работы.

Изменения микроструктуры и твердости металла в поверхностных слоях под влиянием реализуемой энергии в процессе изнашивания позволили проверить, насколько полно лабораторные методы воспроизводят реальный процесс изнашивания, например, вооружения долот. На рис. 77, б приведено распре-

деление микротвердости в элементах вооружения шарошечного долота, отработанного при высокогооборотном режиме бурения. Сопоставление распределений микротвердости на рис. 77 показывает, что они полностью аналогичны. В работе авторов и Л. А. Алексеева [63] предлагается использовать явление термического разупрочнения для определения удельной мощности, которую реализовало вооружение долота на забое скважины.

Выше рассмотрен механизм изнашивания закаленной стали при циклическом взаимодействии ее рабочей поверхности с горной породой. При постоянном контакте с горной породой механизм изнашивания аналогичен, однако образование усталостных трещин на поверхности стали практически не наблюдается.

Ударно-абразивный износ. Выше рассмотрен механизм изнашивания стали, когда при взаимодействии металла с породой наблюдается их относительное перемещение в направлении, параллельном рабочим поверхностям, при одновременном деформировании в направлении, нормальном рабочим поверхностям. В ряде случаев скорость относительного перемещения может оказаться равной или близкой нулю. Исследования этого предельного случая изнашивания проводились на машинах для испытания металлов на ударно-абразивное изнашивание.

В. Н. Виноградовым, Г. М. Сорокиным и Г. К. Шрейбером ударно-абразивное изнашивание классифицируется на несколько видов, развитие которых связано с определенными условиями. Механизм ударно-абразивного изнашивания представляется следующим образом. В момент удара (без проскальзывания) изнашиваемой поверхности по поверхности абразива в местах контакта металла с его зернами развиваются высокие напряжения, вызывающие пластическое деформирование металла. В результате чего часть абразивных зерен внедряется в изнашиваемую поверхность, образуя лунки различной формы и глубины. При многократном пластическом деформировании, кроме образования лунок, происходит отрыв частиц, а при испытании очень твердых и хрупких материалов наблюдается хрупкое выкрашивание. Если в зоне удара об разца металла по абразивной поверхности имеется слой жидкости, то при ударах возбуждается пульсирующий гидроабразивный поток, вызывающий ударно-гидроабразивное изнашивание. Поскольку ударно-абразивному изнашиванию свойственна цикличность, то при высоких энергиях удара ведущим процессом может оказаться усталостное разрушение (ударно-усталостное изнашивание). При высокой удельной энергии удара независимо от твердости изнашиваемой поверхности возможны структурные превращения, вызванные разогревом металла, что облегчает внедрение зерен абразива и после-

Удельная мощность, Вт/мм ²	Скорость изнашивания a стали марки 20ХНЗА в мм/ч при		
	$v_y = 0;$ $v_c = 1,3 \text{ м/с}$	$v_y = 1,3 \text{ м/с};$ $v_c = 0$	$v_y = 1,3 \text{ м/с}$ $v_c = 1,3 \text{ м/с}$
Алевролит			
1,1	1,6	0,5	—
2,9	2,6	—	2,6
4,8	3,8	1,5	—
7,3	5,4	—	6,0
Доломит			
2,1	0,12	0,03	—
3,0	0,32	0,17	0,42
4,1	0,77	—	0,84

дующий отрыв и срез микрообъемов металла. Такой вид изнашивания назван ударно-тепловым.

В табл. 27 приведены результаты изучения абразивного изнашивания закаленной стали при разрушении алевролита и доломита по схеме врачающегося диска и по схеме бурения одним элементом вооружения долота, полученные авторами. Из табл. 27 видно, что при отсутствии проскальзывания скорость изнашивания как в случае разрушения алевролита, так и в случае разрушения доломита ниже в несколько раз, чем при условии $v_y=0$, если $N_{уд}=\text{const}$. При работе в условиях удара со скольжением скорость изнашивания несколько выше, чем при работе без удара.

§ 8. Классификация осадочных горных пород по абразивности

В настоящее время разработаны и применяются несколько классификаций по абразивности горных пород, предложенные Л. И. Бароном, А. В. Кузнецовым, О. Н. Голубинцевым, Н. И. Любимовым, Л. А. Шрейнером, П. С. Баландиным и др. [15, 28, 41, 109]. В основе этих классификаций лежат показатели абразивности, определяемые в конкретных условиях, которые были описаны в § 3 данной главы. Отсутствие математического описания абразивного изнашивания через предложенные показатели не позволяет проводить даже оценочные расчеты. Существующие показатели и классификации позволяют лишь составить представление об относительной абразивности пород. Для использования их в практике бурения

скважин необходим большой объем исследований по установлению эмпирических связей между определяемыми показателями и износом инструмента.

Авторы предлагают составить классификации пород по абразивности применительно к группам однородных процессов изнашивания в показателях, пригодных для прямых оценочных расчетов.

Рассмотрим принципы составления таких классификаций с учетом результатов изучения абразивности пород по схеме изнашивания диска с предложенными выше показателями, полученными при охлаждении водой.

В первой области изнашивания классификацию осадочных пород по абразивности целесообразно провести по коэффициентам A_0 и B_0 уравнения (VIII.15). По известным показателям A_0 и B_0 нетрудно определить скорость изнашивания металла, если известна удельная мощность, реализуемая в контакте металла — горная порода.

Показатели абразивности мономинеральных пород и породообразующих минералов по отношению к закаленной стали У8 приведены в табл. 28.

Таблица 28

Минералы и горные породы	Микротвердость, кгс/мм ²	Структура	Значения показателей абразивности	
			$A_0 \cdot 10^8$, мм ² /Бт·ч	$B_0 \cdot 10^8$, мм/ч
Мрамор (кальцит)	110	Среднезернистый	1,93	-0,07
Ангидрит	200	Среднезернистый	1,01	-0,02
Доломит	325	Крупнозернистый	1,78	-0,02
Нефелин	600	Среднезернистый	4,28	-0,06
Оливинит	800	Среднезернистый	3,88	-0,16
Кремень	1000	Скрытокристаллический	4,52	-0,37
Микроклин	695	Монокристалл	2,86	-0,07
Кварц дымчатый	1080	Монокристалл	5,40	-0,44
Корунд (рубин)	2300	Монокристалл синтетический	20,80	-0,43

Из табл. 28 видно, что существует общая тенденция увеличения абразивности пород с увеличением микротвердости породообразующих минералов.

Влияние структуры кристаллических пород на скорость изнашивания стали У8 в первой области рассмотрим на примере доломита (табл. 29).

Из табл. 29 видно, что структура кристаллической горной породы в первой области изнашивания не оказывает существенного влияния на ее абразивность.

Таблица 29

Горная порода	Структура	$N_{уд'}$, Вт/мм ²	a , мм/ч
Доломит I	Крупнозернистый	0,123	0,0020
Доломит II	Средизернистый	0,121	0,0023
Доломит III	Мелкозернистый	0,123	0,0021
Доломит IV	Мелкозернистый	0,123	0,0020

Влияние структуры и твердости по штампу обломочных пород на скорость изнашивания стали У8 рассмотрим на примере песчаников (табл. 30).

Из табл. 30 видно, что с увеличением твердости песчаников по штампу наблюдается уменьшение их абразивности. Причем, абразивность наиболее твердых песчаников с регенерационным цементом практически совпадает с абразивностью кварца. Наблюдения показывают, что существенное влияние твердости по штампу песчаников обусловлено характером разрушения породы под кольцом, т. е. характером обновления абразивной поверхности. При испытаниях на песчаниках с твердостью по штампу до 230 кгс/мм² наблюдалось объемное и усталостное разрушение породы под кольцом, а при испытаниях на кварце и песчаниках с твердостью по штампу 460 и 520 кгс/мм² — только поверхностное истирание.

Влияние структуры (размера обломков) песчаников существенно для пород средней и малой твердости. С увеличением размера обломков кварца абразивность пород увеличивается.

Специальные опыты показали, что показатели абразивности пород по отношению к закаленным инструментальным и цемен-

Таблица 30

Горная порода и ее описание	$P_{ш'}$, кгс/мм ²	$N_{уд'}$, Вт/мм ²	$a \cdot 10^2$, мм/ч
Песчаник пористый, цемент контактный, зерна угловатые и полуокатаны, размер около 0,1 мм	55	0,20	3,5
Песчаник слабопористый, цемент регенерационный, зерна угловатые и полуокатаны, размер 0,1—0,2 мм	225	0,20	0,9
Песчаник плотный, цемент регенерационный, зерна окатанные, размер 0,10—0,25 мм	520	0,20	0,6
Кварц (моноокристалл)	—	0,20	0,6
Песчаник слабопористый, зерна полуокатанные и угловатые, размером до 1,2 мм	230	0,20	16,1
Песчаник плотный, цемент регенерационный, зерна полуокатаны, размер 0,2—0,5 мм	460	0,20	0,6

тумым сталим (У8, Р-18, 20ХНЗА, 17НМА) практически совпадают [87].

В заключение следует отметить, что в первой области изнашивания абразивность кристаллических пород сравнительно невелика и может быть определена по отдельным подгруппам пород на характерных образцах. Абразивность обломочных пород существенно зависит от их структуры и твердости по штампу.

Детализация абразивности этой подгруппы пород требует дальнейшего накопления результатов их испытаний с последующей статистической обработкой.

Во второй области изнашивания, характерной для работы вооружения долот, определяющими абразивность пород являются также их минералогический состав и строение. Исследования показали, что количественной характеристикой минералогического состава пород, отражающей ее абразивность, является микротвердость пордообразующих минералов. Следовательно, как и в первой области изнашивания, горные породы в классификации по абразивности во второй области должны располагаться в порядке возрастания микротвердости их пордообразующих минералов. Классификация горных пород по абразивности применительно к условиям изнашивания стального вооружения шарошечных долот приведена в табл. 31.

Из табл. 31 видно, что абразивность сульфатных и карбонатных пород меняется в узких пределах, незначительна по величине и не может служить причиной выхода долота из строя. Однако при разрушении наиболее твердых разновидностей карбонатных пород (для доломитов $r_{sh} > 200$ кгс/мм²) при высокой удельной мощности наблюдается потеря устойчивости рабочей поверхности стали и скорость изнашивания катастрофически возрастает. Это явление связано с существенным уменьшением сопротивления стали сдвигу под влиянием тепла трения, тогда как сопротивление горных пород сдвигу изменяется незначительно. Применение вооружения шарошечных долот из теплостойких сталей типа Р-18 или твердого сплава позволяет устранить это явление [4].

Абразивность горных пород IV и V групп значительно выше, чем абразивность сульфатных и карбонатных пород. Причем, видно, что чем больше размер обломков пород и чем выше содержание кварца, тем выше их абразивность.

Учитывая некоторую сложность определения абразивности горных пород на специальных установках и значительный объем исследований, большой интерес представляет изыскание метода оценки абразивности горных пород по показателям, характеризующим строение и свойства пород.

Предварительный анализ показал, что на скорость изнашивания стали существенно влияют следующие параметры, характеризующие строение и свойства обломочных пород:

Таблица 31

Классификация по абразивности горных пород, слагающих нефтяные и газовые месторождения

№ группы	Горные породы	Вид зависимости a от $N_{уд}$	Значения показателей абразивности	
			a_1 , мм/ч	a_5 , мм/ч
1	Известняки без примесей твердых минералов		0,02—0,08	0,07—0,26
2	Ангидриты без примесей твердых минералов	$a = AN_{уд}^k$	0,04—0,07	0,10—0,47
3	Доломиты без примесей твердых минералов		0,02—0,14	0,24—0,99*
4	Аргиллиты Известняки алевролитовые Алевролиты	$a = AN_{уд} + B$	0,36—3,68	1,48—13,34
5	Известняки песчаные Песчаники полимиктовые Песчаники кварцевые	$a = AN_{уд} + B$	3,44—22,12	8,32—73,11**

* В таблицу не вошли значения a_1 , полученные на доломитах, на которых наблюдалась потеря устойчивости поверхности стали.

** Верхний предел значения a_5 соответствует кварцевому песчанику со средним размером зерен 0,40 мм.

- 1) средний размер обломков, слагающих породу, d , мм;
- 2) содержание обломков и зерен твердых минералов (кварца, кремня и др.) c , %;
- 3) абсолютная пористость горных пород m , %;
- 4) предел текучести горных пород по Л. А. Шрейнеру p_0 , кгс/мм².

Путем статистической обработки большого экспериментального материала получены следующие приближенные эмпирические формулы, связывающие показатели абразивности a_1 и a_5 с косвенными характеристиками обломочных пород:

для горных пород IV группы $d < 0,1$ мм (в мм/ч)

$$a_1 = 27,8d - 0,0080p_0 + 0,0002c - 0,106m + 1,89; \quad (\text{VIII.18})$$

$$a_5 = 62,6d + 0,0029p_0 + 0,0263c + 0,068m - 0,85;$$

для горных пород V группы $d > 0,1$ мм (мм/ч)

$$a_1 = 51,0d + 0,0075p_0 + 0,030c - 0,086m - 3,40;$$

$$a_5 = 178,9d + 0,029p_0 + 0,165c + 0,353m - 18,4. \quad (\text{VIII.19})$$

Из уравнений (VIII.18) и (VIII.19) видно, что во второй области изнашивания наиболее существенно на абразивность обломочных пород влияют размер обломков и содержание в породе наиболее твердых компонент (обломков кварца, кремния). Существенно и неоднозначно влияние пористости. Для показателей a_1 влияние отрицательно, для показателей a_5 — положительно. Влияние предела текучести на абразивность пород неоднозначно и весьма мало. С помощью уравнений (VIII.18) и (VIII.19) можно приближенно определять показатели абразивности пород по отношению к цементуемым стальям, а также провести детализацию классификации пород по абразивности, приведенную в табл. 31.

Возможности изучения абразивности горных пород разреза скважин в целом весьма ограничены малой представительностью образцов пород. В то же время долота, проработав в определенных интервалах пород, несут на себе информацию об абразивности этих пород. Расшифровка этой информации возможна только при комплексном лабораторно-промышленном изучении абразивного изнашивания вооружения долот и абразивности горных пород. Принципиальная возможность разработки такого метода показана в работе [66].

§ 9. Влияние среды на абразивное изнашивание стали

Показатели абразивности пород определяются при промывке водой. Однако бурильный и породоразрушающий инструменты в реальных условиях могут работать не только в воде, но и в водных растворах, растворах на нефтяной основе (РНО), эмульсиях и, наконец, в воздушной среде.

Среда вызывает различные химические, адсорбционные и диффузионные эффекты на поверхностях трения и в поверхностных слоях изнашиваемых тел. Все эти эффекты приводят к образованию между поверхностями двух тел тонкой прослойки («третьего тела» по терминологии И. В. Крагельского), имеющей свойства, существенно отличающиеся от свойств исходных тел. Свойства «третьего тела» определяют смазочную способность сред.

В настоящее время нет общепринятого определения смазочной способности среды. С точки зрения работы бурильного и породоразрушающего инструментов под *смазочной способностью* следует понимать способность среды создавать «третье тело» с низким сопротивлением сдвигу и высоким сопротивлением

сжатию под действием, соответственно, касательных и нормальных нагрузок. Свойства граничных слоев жидкостей и поверхностных пленок металлов, оказывающих влияние друг на друга и определяют смазочную способность сред в конкретных условиях.

Авторами совместно с Г. В. Конесевым и М. Р. Мавлютовым [36, 37, 38, 57, 58] было проведено изучение влияния различных сред на абразивное изнашивание металлов и разрушение горной породы по схеме изнашивания диска. В качестве показателя относительной смазочной способности сред был принят коэффициент трения пары металл—горная порода, определяемый по формуле (VIII.14).

В табл. 32 приведены средние значения коэффициентов трения стали марки 20ХНЗА о различные горные породы при промывке водой.

Таблица 32

Удельная мощность, Вт/мм ²	Коэффициент трения					
	известняка	ангидрита	доломита	песчаника	алевролита	аргиллита
0,2	0,28	0,15	0,26	—	—	—
0,5	0,39	0,24	0,37	—	—	—
1,0	0,53	0,26	0,42	0,52	0,64	0,70
2,0	0,42	0,24	0,31	0,38	0,47	0,68
4,0	0,28	0,21	0,26	0,36	0,43	0,61
8,0	0,21	—	0,19	—	—	—

Из табл. 32 видно, что по мере увеличения удельной мощности коэффициенты трения вначале возрастают, достигая максимального значения, а затем монотонно уменьшаются. Исследования показали, что рост коэффициента трения наблюдается лишь при поверхностном и усталостном разрушении пород. С развитием объемного разрушения пород наблюдалось монотонное уменьшение коэффициента трения. Этой области изнашивания соответствует и значительное термическое разупрочнение поверхности стали.

На рис. 78 приведены графики зависимости коэффициента трения сталь—доломит от удельной мощности для условий высокооборотного режима работы в различных средах.

Наблюдаемое расположение величин коэффициентов трения в различных средах связано со свойствами «третьего тела». При разрушении горной породы с промывкой жидкостями условия образования поверхностной окисной пленки металла (условия доступа кислорода к поверхности) сопоставимы, и основное влияние на коэффициент трения оказывают свойства граничного слоя жидкости. Естественно, что данное положение справедливо

при отсутствии химического взаимодействия между жидкостью и металлом.

При реализации малой и средней удельной мощностей смазочная способность, в зависимости от вида среды, изменяется в довольно широких пределах. С ростом удельной мощности под влиянием усиливающего теплового воздействия и шероховатости разрушающейся породы

происходит более интенсивное разрушение «третьего тела», что ведет к сближению коэффициентов трения (см. рис. 78). Следовательно, изменение коэффициентов трения отражает процессы изнашивания и разрушения поверхностей трения и поверхностных пленок. При малой удельной мощности трения решающее влияние на коэффициент трения оказывает прочность поверхностных пленок, затем по мере увеличения $N_{уд}$ все большее влияние оказывают процессы разрушения горной породы и изнашивания металла

Среда с лучшей смазочной способностью, особенно с более высоким сопротивлением «третьего тела» сжатию, оказывает большее защитное действие по отношению к поверх

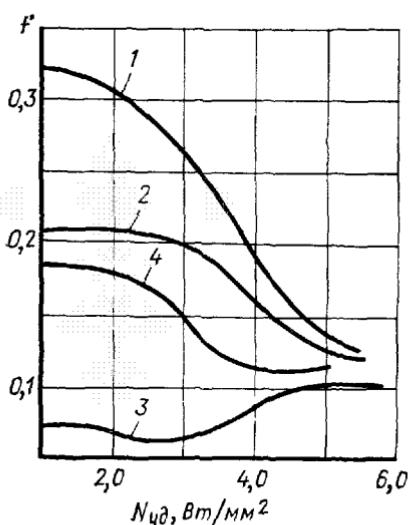


Рис. 78. Влияние различных сред на зависимость коэффициента трения пары сталь — доломит от $N_{уд}$:

1 — вода, 2 — глинистый раствор, 3 — РНО, 4 — воздух

ности металла. Это означает, что при реализации одинаковой удельной мощности скорость изнашивания породоразрушающего инструмента будет меньше при более низких величинах коэффициентов трения в условиях более высокой прочности «третьего тела». В известном выражении мощности величина нагрузки возрастает во столько же раз, во сколько уменьшается коэффициент трения. Увеличение же нагрузки, передаваемой через породоразрушающий инструмент и граничный слой жидкости, на горную породу в свою очередь вызывает рост скорости разрушения горной породы. В промысловом бурении снижение коэффициента трения позволит при сохранении забойной мощности двигателя увеличить нагрузку на долото и тем самым повысить скорость разрушения горной породы.

При работе бурильного и породоразрушающего инструмента основная доля тепла трения рассеивается в окружающую среду. Очевидно, охлаждающая способность сред будет играть существенную роль во второй области изнашивания.

Относительная охлаждающая способность исследуемых промывочных жидкостей и воздуха (по отношению к охлаждающей способности воды) была оценена по формуле, рекомендуемой Л. А. Брахманом для расчета теплосъема жидкостями при резании металлов [19].

Полученные величины относительной охлаждающей способности промывочных жидкостей и воздуха для двух случаев приведены в табл. 33 (где θ — температура охлаждаемой поверхности; θ_k — температура кипения жидкости).

Первый случай характеризует отвод средой тепла, аккумулированного породоразрушающим инструментом, т. е. снижение его объемной температуры.

Второй случай характеризует отвод тепла непосредственно от рабочей поверхности инструмента.

Из табл. 33 видно, что промывочные жидкости и воздух в порядке снижения охлаждающей способности располагаются в ряд: вода, глинистый раствор, РНО, воздух. При низких температурах охлаждаемой поверхности вода и глинистый раствор имеют гораздо лучшую охлаждающую способность, чем РНО.

Таблица 33

Температура охлаждаемой поверхности	Относительная охлаждающая способность сред			
	вода	глинистый раствор	РНО	воздух*
$\theta < \theta_k$	1,0	0,95	0,32	0,015
$\theta > \theta_k$	1,0	0,78	0,72	0,14

* Для воздуха расчет проведен при $\theta = 800^\circ\text{C}$.

и тем более воздух. Следовательно, при прочих равных условиях, в данных средах объемная температура инструмента будет минимальной, а скорость теплоотвода от рабочей поверхности элементов вооружения в глубь металла — максимальной. Также выше в среде воды и глинистых растворов будет скорость теплоотвода от рабочей поверхности непосредственно в среду, хотя и в меньшей степени, чем в первом случае. Величины охлаждающей способности агентов при температуре выше θ_k сближаются.

Изучение характера распределения микротвердости в поверхностных слоях металла (рис. 79) позволило сделать следующее заключение.

Интенсивному термическому воздействию при охлаждении жидкими агентами подвержена сравнительно небольшая по глубине (до 0,40 мм) часть поверхностного слоя металла. В момент взаимодействия металлического образца с горной породой основной тепловой поток направлен в глубь металла благодаря

высокому градиенту температур. При выходе зуба долота из контакта с горной породой рабочая поверхность его резко охлаждается и тепловой поток раздваивается. Часть тепла идет в глубь образца металла и рассеивается его боковыми гранями в жидкость, а большая часть тепла отводится в жидкость непосредственно через рабочую поверхность.

При продувке воздухом наблюдается более интенсивный разогрев металла образца и отпуск его на значительную глубину.

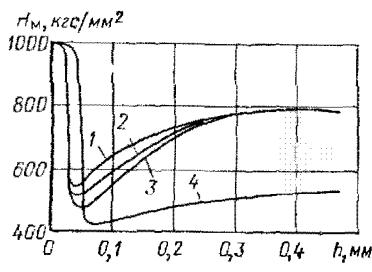


Рис. 79. Влияние сред на распределение микротвердости в образце стали:

1 — вода, 2 — глинистый раствор,
3 — РНО, 4 — воздух

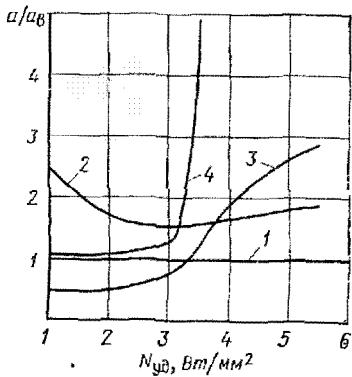


Рис. 80. Зависимость относительной скорости изнашивания от $N_{уд}$ при разрушении доломита в различных средах:

1 — вода, 2 — глинистый раствор;
3 — РНО, 4 — воздух

бину Очевидно, вследствие худшей охлаждающей способности воздуха тепло с каждым актом взаимодействия аккумулируется образцом стали. Объемная температура образца достигает значительной величины, что обусловливает меньший градиент температур, меньшую скорость теплоотвода в глубь металла, чем при охлаждении жидкими агентами, и повышенную скорость изнашивания. В то же время при продувке воздухом значительно большая часть тепла, чем при промывке жидкостями, отводится в глубь горной породы, создавая дополнительные термические напряжения и способствуя более интенсивному разрушению горной породы. Очевидно, это и является одной из причин более высокой эффективности бурения с продувкой воздухом, чем с промывкой жидкостями.

Влияние смазочной и охлаждающей способностей сред в процессе изнашивания проявляется одновременно. Рассмотрим графики зависимости скорости изнашивания стали от удельной мощности при разрушении доломита ($p_{ш}=200$ кгс/мм²) в различных средах (рис. 80) при высокооборотном режиме изнашивания. Из рис. 80 видно, что РНО, имеющий высокую смазоч-

ную способность, обуславливает более низкую скорость изнашивания по сравнению с промывкой водой. Однако по мере увеличения удельной мощности различие постепенно уменьшается и при $N_{уд} > 3,3 \text{ Вт}/\text{мм}^2$ скорость изнашивания при промывке РНО становится выше, чем при промывке водой, т. е. скорость изнашивания располагается в соответствии с охлаждающей способностью жидкостей. Низкая охлаждающая способность воздуха обуславливает несколько большую скорость изнашивания стали во всей второй области изнашивания. Следует отметить, что чем меньше охлаждающая способность среды, тем меньше значение удельной мощности, при которой начинается потеря устойчивости рабочей поверхности стали. По мере увеличения твердости пород катастрофические формы изнашивания возникают вначале в средах с низкой охлаждающей способностью, затем с более высокой и только на более твердых разновидностях пород при промывке водой.

Исследования показали [37, 87], что водные растворы ПАВ имеют пониженную охлаждающую способность и при высокой удельной мощности повышают склонность металла к потере устойчивости. Наряду с охлаждающей способностью в этом случае, по-видимому, проявляется и эффект пластифицирования поверхности металла под влиянием ПАВ [42].

Смазочные пленки не только уменьшают скорость изнашивания металла, но и снижают скорость разрушения пород, если имеет место преимущественно поверхностное или усталостное их разрушение. В то же время в процессе объемного разрушения породы повышение смазочной способности среды может повысить скорость разрушения породы. Поэтому судить о среде только по ее влиянию на скорость изнашивания металла нельзя. В этом случае необходимо определить показатель — относительный износ металла и горной породы по формуле (VIII.13). Очевидно, чем меньше относительный износ металла, тем более производительно будет работать инструмент.

Таким образом, при малой и средней удельной мощности, реализуемой при трении о горные породы и в процессе их разрушения, основное влияние на изнашивание стали оказывает смазочная способность сред, а в области высокой удельной мощности — их охлаждающая способность. Снижение охлаждающей способности сред при разрушении наиболее твердых пород повышает опасность возникновения катастрофических форм изнашивания, связанных с потерей устойчивости рабочей поверхности стали.

10. Особенности абразивного изнашивания твердого сплава

Твердость карбидов твердого сплава значительно выше, чем твердость породообразующих минералов разбуриваемых горных пород, поэтому при малой удельной мощности, как правило,

имеет место окислительный износ (усталостное отслаивание окисных пленок с поверхности твердого сплава). В процессе повышения удельной мощности растет температура поверхности твердого сплава. Разогрев твердого сплава приводит к уменьшению твердости и прочности как зерен карбида вольфрама, так и связки. Твердость кобальтовой связки меньше, чем твердость зерен карбидов, поэтому наблюдается опережающий износ связки и выкрашивание зерен карбидов, которые пластически деформируют и царапают поверхность твердого сплава. Изнашиваемая поверхность приобретает характерную полосчатость. При разрушении малоабразивной горной породы на поверхности твердого сплава развивается сетка трещин не только при циклическом взаимодействии с горной породой, но и при непрерывном контакте.

Скорость изнашивания твердого сплава при разрушении горных пород в 60—100 раз меньше, чем долотной стали, и прямо пропорциональна удельной мощности. Однако при $N_{уд} > 4 \text{ Вт}/\text{мм}^2$ наблюдается резкое увеличение скорости изнашивания твердого сплава, связанное с выкрашиванием, а далее и с хрупким его разрушением. Следовательно, твердый сплав, как и долотные стали, не может успешно работать при большой удельной мощности.

Изменение свойств среды оказывает существенное влияние на скорость изнашивания твердого сплава. Наиболее благоприятные условия для работы твердосплавного вооружения долот создаются при промывке водой и водными растворами. Добавки нефти и раствора на нефтяной основе отрицательно влияют на работу твердосплавного вооружения долот.

§ 11. Износ металлов раздробленными горными породами

Раздробленные горные породы, взаимодействуя с деталями машин, вызывают их абразивный износ. Возможно несколько схем взаимодействия (рис. 81).

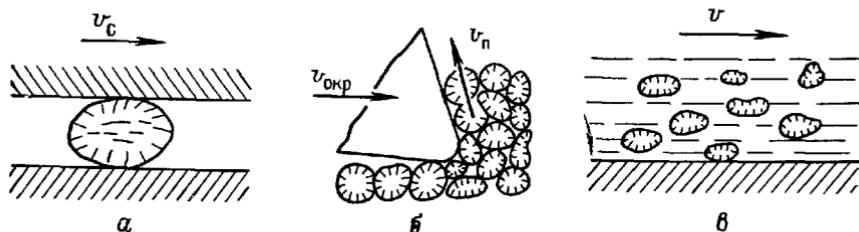


Рис. 81. Схемы изнашивания металла раздробленными породами:

v_c — скорость относительного перемещения деталей; $v_{окр}$ — окружная скорость элемента вооружения долота; v_p — скорость относительного движения обломков породы; v — скорость потока жидкости

1. Обломки горных пород (рис. 81, а) попадают между двумя трущимися поверхностями, при этом могут развиваться большие удельные давления и интенсивное царапание поверхности металла. Обломок, внедряясь в более мягкую поверхность, может перейти от свободного состояния в закрепленное.

2. Масса обломков горных пород (рис. 81, б) перемещается относительно поверхности металла и вызывает износ этой поверхности (например, при работе долота в песках), износ деталей транспортных и землеройных машин.

3. Абразивные частицы (рис. 81, в) движутся вместе с потоком жидкости или газа и при ударе о поверхность металла вызывают его износ. Эта схема характерна для износа инструмента и оборудования струей жидкости, несущей абразивные частицы.

Опыт показывает [82, 83, 93], что при износе большую роль играет микротвердость абразивных частиц, их форма и размеры. Чем больше микротвердость абразивных частиц и острогульнее их форма, тем большее интенсивность изнашивания.

В заключение следует отметить, что вышеизложенные результаты исследований не исчерпывают весьма сложную и многостороннюю проблему абразивности горных пород в области бурения скважин. Развитие техники и технологии бурения, а также рост глубин скважин ставят перед исследователями новые задачи, которые требуют постановки дальнейших, более глубоких исследований.

БУРИМОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

§ 1. Понятие о буримости горных пород. Показатели буримости

Одним из основных факторов, определяющих производительность труда в процессе бурения скважин, является буримость горных пород. Под буримостью понимают степень трудности разрушения тех или иных горных пород на данном уровне развития техники и технологии бурения. Исходя из этого, различают породы трудно или легко буримые. В некоторых случаях буримость определяют как способность породы разрушаться на забое при воздействии породоразрушающего инструмента. В этом случае остается неучтенней долговечность породоразрушающего инструмента, обусловленная абразивностью пород.

Буримость горных пород является функцией многих переменных зависящей от природных, технологических и технических факторов. В связи с этим проблема буримости горных пород применительно к условиям бурения нефтяных и газовых скважин до сих пор является нерешенной. Между тем правильная оценка буримости необходима для выбора типа долот, режима их работы и нормирования буровых работ.

В качестве показателя буримости принимают либо величину проходки, либо скорость бурения, полученные при бурении в тех или иных породах при определенных условиях. Например, В. С. Федоров [97] предлагает оценивать буримость величиной углубления скважины за один час чистого бурения, т. е. величиной механической скорости проходки v_m в м/ч. Эта скорость с течением времени работы долота на забое уменьшается вследствие его износа. Аналитически изменение скорости во времени может быть представлено различно [97]. Чаще всего буримость оценивают по начальной механической скорости $v_{n\!o}$, получаемой в начальный момент разбуривания той или иной породы. Этот показатель позволяет исключить изменение формы вооружения долота в процессе бурения за счет износа, учесть которое в настоящее время не представляется возможным. В этом случае при оценке буримости учитываются только условия в скважине и сопротивление пород разрушению новым долотом. Показатель — начальная скорость бурения широко применяется при экспериментальном решении большинства вопросов технологии бурения как связанных, так и не связанных с оценкой буримости пород.

В работах [67, 97] в качестве показателя буримости пород используется проходка за один оборот долота. Этот показатель характеризует интенсивность разрушения пород. Начальная скорость бурения и проходка за оборот новым долотом связаны между собой соотношением

$$\delta_0 = v_n / 60n, \quad (\text{IX.1})$$

где δ_0 — проходка за один оборот долота в мм/об;

v_n — начальная скорость бурения в мм/ч;

n — скорость вращения долота в об/мин.

Показатель проходки за один оборот долота дает большую наглядность при оценке характера разрушения пород путем сопоставления с результатами исследований в лабораторных условиях.

Приведенные выше показатели буримости широко применяются при проведении исследований и очень ограниченно в практике бурения, так как не учитывают абразивности пород. Показателей буримости, которые бы комплексно учитывали разрушаемость пород и их абразивность, пока нет.

Буримость пород обусловлена не только их механическими свойствами, но и конструктивными особенностями породоразрушающих инструментов, режимом их работы, свойствами промывочных жидкостей и другими факторами. Отсутствие комплексных показателей буримости, различие техники и технологии бурения в разных районах, а также их постоянное совершенствование обусловливают то, что классификации пород по буримости носят местный и временный характер.

В настоящее время в практике бурения существует деление пород на мягкие, средние, твердые, крепкие и очень крепкие. Такое деление пород является условным и отражает лишь относительную буримость горных пород, т. е. горные породы с одинаковыми механическими свойствами в различных районах могут быть отнесены к разным категориям буримости.

§ 2. О связи буримости пород и показателей их механических свойств

Существование связи между прочностными и энергетическими показателями горных пород и их буримостью очевидно, так как они отражают проявление механических свойств пород при их разрушении. Однако очень тесной связи ожидать не следует, потому что условия разрушения пород в лабораторных условиях и в скважине существенно различны.

Экспериментальная проверка зависимости буримости пород от твердости по штампу, выполненная А. Ф. Афанасьевым [49], показала, что начальная механическая скорость бурения при постоянном режиме обратно пропорциональна твердости пород по штампу (рис. 82). Из рис. 82 видно, что для пород разного

литологического состава показатели буримости, соответствующие одной и той же твердости по штампу, различны.

В работах [5, 113] предлагается использовать прочностные показатели, определяемые в процессе вдавливания, для расчета требуемой на долото осевой нагрузки, обеспечивающей объемное разрушение пород

$$P_1 = \alpha p_{sh} S_k, \quad (IX.2)$$

где P_1 — нагрузка на долото;

α — коэффициент, учитывающий кинематику долота и за- бойные условия, определяется по промысловым дан- ным (α изменяется от 0,33 до 1,59 [5]):

p_{sh} — твердость горной породы по штампу;

S_k — площадь одновременного контакта долота с горной породой.

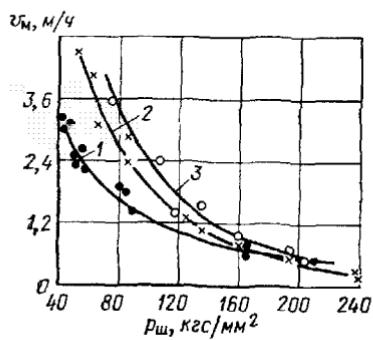


Рис. 82. Зависимость механической скорости бурения от твердости пород по штампу (по данным А. Ф. Афанасьева):

1 — образцы пород из пестроцветной толщи; 2 — образцы пород из верхнего карбона; 3 — образцы пород из карбонатной толщи

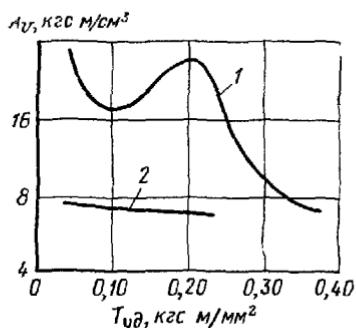


Рис. 83. Графики зависимости A_v от T_{ud} при одиночных уда-рах по подготовленной поверх-ности 1 и при создании выра-ботки ударами 2

Определение показателей механических свойств пород проводится на образцах с подготовленной поверхностью. В процессе бурения породоразрушающий инструмент воздействует на поверхность породы, которая претерпела определенные изменения при предыдущем воздействии инструмента. В работах [43, 44] приведены результаты изучения энергоемкости разрушения мрамора одиночными ударами штампа по подготовленной поверхности и при создании выработки (рис. 83). Из рис. 83 видно, что энергоемкость разрушения породы в процессе создания выработки ударами ниже, чем при одиночных ударах, уменьшается с увеличением энергии удара. Эти исследования,

а также анализ результатов стендового бурения позволили сделать вывод, что скачкообразное изменение энергоемкости разрушения не являются препятствием для увеличения энергии единичных взаимодействий в процессе бурения вследствие увеличения нагрузки на долото. Таким образом нагрузка, определяемая по формуле (IX.2), не является оптимальной.

Нагрузка на долото может ограничиваться сверху или величиной момента привода долота, или прочностью долота, или очень высокой скоростью абразивного изнашивания (например, при потере устойчивости рабочей поверхности вооружения долота), когда изменение долговечности долота приводит к снижению показателей бурения.

В случаях, когда имеет место условие $P_d < P_1$ на забое, обеспечивается только усталостное и усталостно-поверхностное разрушение пород. Такие условия разрушения горных пород часто имеют место при бурении на больших глубинах и связаны с высоким сопротивлением пород разрушению и с трудностями подведения большой мощности к забою скважины.

Обобщенным параметром режима работы долота является реализуемая на забое мощность N_d , которая связана с механической скоростью бурения v_m и энергоемкостью разрушения пород соотношением:

$$N_d = v_m S_3 A'_V, \quad (\text{IX.3})$$

где S_3 — площадь забоя скважины;

A'_V — удельная работа разрушения породы при бурении.

Результаты экспериментального изучения зависимости v_m от N_d , изложенные в работе [67], приведены на рис. 84. Из рис. 84 видно, что с увеличением реализуемой мощности скорость бурения растет. Причем рост тем интенсивней, чем больше нагрузка на долото и меньше скорость его вращения, что следует из соотношения

$$N_d = k_d P_d n, \quad (\text{IX.4})$$

(k_d — коэффициент пропорциональности).

Уменьшение энергоемкости разрушения породы с ростом реализуемой мощности обусловливает нелинейный вид зависимости v_m от N_d . Изучение изменения энергоемкости разрушения пород при динамическом вдавливании [100] позволило предложить формулу расчета необходимой мощности на долоте для обеспечения заданного характера разрушения

$$N_d = k_1 \frac{T_{уд} S_k n}{60}, \quad (\text{IX.5})$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий конструктивные особенности долота;

$T_{уд}$ — удельная энергия, обеспечивающая получение заданной формы разрушения при динамическом вдавливании

При рассмотрении динамического разрушения пород было показано, что величина реализуемой энергии не является единственным фактором, определяющим интенсивность разрушения породы. Большое значение имеет время взаимодействия элемента вооружения долота с породой, которое обратно пропор-

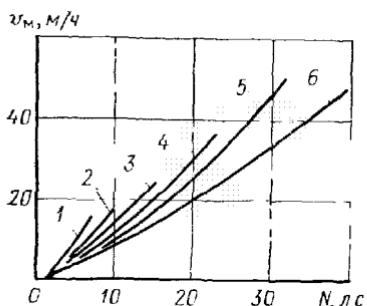


Рис. 84 Зависимость механической скорости проходки от мощности, подводимой к долоту 1B4aT при скорости вращения:

1 — 69 об/мин 2 — 132 3 — 245,
4 — 358 5 — 640 6 — 940

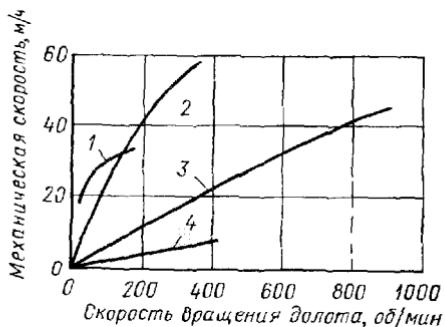


Рис. 85 Зависимость механической скорости бурения от скорости вращения долота для различных пород:
1 — мел 2 — известняк, 3 — мрамор, 4 — гранит

ционально скорости вращения. Многочисленные экспериментальные и промысловые наблюдения показывают, что с увеличением скорости вращения долота при $P_d = \text{const}$ наблюдается уменьшение темпа роста скорости бурения, что связано с уменьшением проходки за один оборот долота. Для иллюстрации на рис. 85 приведены зависимости механической скорости бурения от скорости вращения долота, полученные в лабораторных условиях различными исследователями. Из рис. 85 видно, что влияние скорости вращения на уменьшение темпа роста скорости бурения наиболее существенно для пористых и высокопластичных пород (известняк и мел).

§ 3. Влияние глубины залегания пород, вида и свойств циркулирующего агента на буримость горных пород

С увеличением глубины залегания пород возрастает их сопротивление разрушению как в результате роста горного давления, так и в результате уплотнения. Поэтому с увеличением

глубины скважины логично ожидать и ухудшения буримости горных пород.

Исследование влияния полного горного давления и давления жидкости в скважине на буримость пород проводилось на стендах во ВНИИБТ и БашНИПИнефти. Некоторые результаты исследований, заимствованные из работы [91], приведены в табл. 34. Из табл. 34 видно, что повышение горного давления при отсутствии давления в скважине практически не оказывает влияния на буримость породы, тогда как совместное влияние горного давления и давления в скважине весьма существенно.

Таблица 34

Горная порода	Давление, кгс/см ²		v_n , м/ч
	горное	гидростатическое	
Мрамор	0	0	1,08
	500	0	0,98
	1000	0	1,10
	0	0	0,84
	500	500	0,60
	1000	1000	0,60
Песчаник	0	0	3,50
	500	0	3,50
	500	500	2,50

В. И. Курепин [40] провел анализ влияния глубины залегания пород на энергоемкость их разрушения. Анализ показал, что чем выше гидростатическое давление на забой (чем больше удельный вес промывочной жидкости), тем быстрей с глубиной растет энергоемкость разрушения пород. При бурении с пропускной способностью энергоемкость разрушения пород с глубиной практически не изменяется.

Анализируя результаты стендового бурения, Е. Т. Струговец [91] делает вывод, что давление в скважине оказывает существенное влияние на скорость бурения только в том случае, если режим бурения обеспечивает усталостное или объемное разрушение пород.

О количественном влиянии глубины залегания пород на интенсивность их разрушения можно судить по результатам промысловых наблюдений, проведенных авторами при бурении скважин с промывкой водой до 2000 м на одной из площадей Пермской области (рис. 86). Интенсивность разрушения пород соответствует постоянному режиму бурения. Из рис. 86 видно, что по мере увеличения глубины буримость пород быстро уменьшается. Изучение механических свойств разбуриваемых пород методом вдавливания штампа [58] показало, что изменение твер-

дости и пластичности с глубиной невелико и не может обусловить столь существенного снижения буримости пород.

Увеличение гидростатического давления вследствие роста глубины залегания составляет около $1,0 \text{ кгс}/\text{мм}^2$ на каждые 1000 м. При твердости по штампу $250 \text{ кгс}/\text{мм}^2$ эта величина

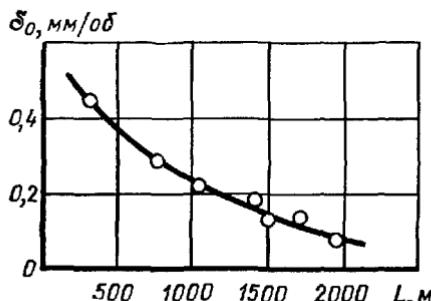


Рис. 86. График зависимости интенсивности разрушения пород от глубины скважины

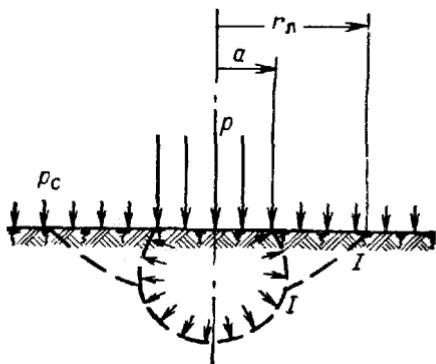


Рис. 87. К механизму влияния давления в скважине на разрушение пород при вдавливании

также не может обусловить многократного изменения буримости пород.

В работах [119, 120] на основании обобщения промысловых исследований установлено, что решающее влияние на снижение буримости оказывает разность давлений в скважине и в разбуриваемом пласте, называемая *дифференциальным давлением* p_d :

$$p_d = p_c - p_p,$$

где p_c — давление в скважине;

p_p — давление жидкости в пласте.

В табл. 35 приведены данные из работы [120], иллюстрирующие влияние рассмотренных факторов на буримость пород.

Из табл. 35 видно, что для рассматриваемых интервалов бурения влияние горного давления (глубины залегания) и давления в скважине на буримость было несущественно, а влияние дифференциального давления было решающим. В рассматриваемых работах отмечается также существенное ухудшение буримости пород с увеличением вязкости пресмывочной жидкости и содержания в ней твердой фазы.

В соответствии с данными, приведенными в работах [91, 114], механизм влияния жидкости в скважине на буримость пород может быть представлен следующим образом. Рассмотрим простейший случай вдавливания штампа (рис. 87). Под действием давления штампа p в горной породе формируется ядро разрушения, которое создает давление на окружающую его породу.

Таблица 35

Скважина	Глубина залегания пород, м	p_d , кгс/см ²	p_c , кгс/см ²	v_M , м/ч
I	3621	26	685	43,5
	3660	26	697	45,9
	4224	48	909	18,3
	4275	46	930	18,9
	4440	44	970	23,7
II	3285	14	431	17,4
	3320	13	444	17,4
	3330	13	449	16,2
	3363	15	496	16,8
	3388	15	542	15,6

По данным Р. М. Эйгелеса, составляющая давления, направленная вверх на отрыв окружающей штамп породы, составляет 2—5% от величины давления штампа. При образовании трещины отрыва (например, в направлении I—I) в плотной горной породе образуется полость, давление в которой равно нулю. Раскрытию трещины препятствует давление p_c , которое создает противодействующую нагрузку на отламываемую часть горной породы

$$P_n = \pi p_c (r_n^2 - a^2). \quad (\text{IX.6})$$

Из выражения (IX.6) следует, что чем больше величина давления в скважине, тем больше его влияние на заключительную стадию разрушения породы при вдавливании.

В случае, если пласт пористый и давление поровой жидкости равно p_n , можно принять, что давление в трещине также равно p_n . В этом случае выражение (IX.6) примет вид

$$P_n = \pi (p_c - p_n) (r_n^2 - a^2), \quad (\text{IX.7})$$

т. е. на заключительную стадию разрушения будет оказывать влияние перепад давления между скважиной и пластом (дифференциальное давление).

Пористые пластины, как правило, проницаемы. Фильтрация жидкости из области высокого давления в область низкого давления приводит к образованию переходной зоны, в которой давление постепенно меняется от p_c до p_n (рис. 88). Очевидно, в плотных породах мощность переходной зоны равна нулю и действующий на глубине разрушения δr перепад давления будет равен давлению в скважине (рис. 88).

Если пласт пористый, а мощность переходной зоны меньше δ_p , то действующий перепад равен дифференциальному давлению (рис. 88, б). И лишь в случае, когда мощность переходной зоны больше δ_p , действующий перепад меньше дифференциального давления (рис. 88, в).

Уменьшение действующего перепада давления тем значительней, чем больше проницаемость пород, чем больше время фильтрации и чем выше способность жидкости фильтроваться. Время фильтрации тем больше, чем меньше скорость вращения

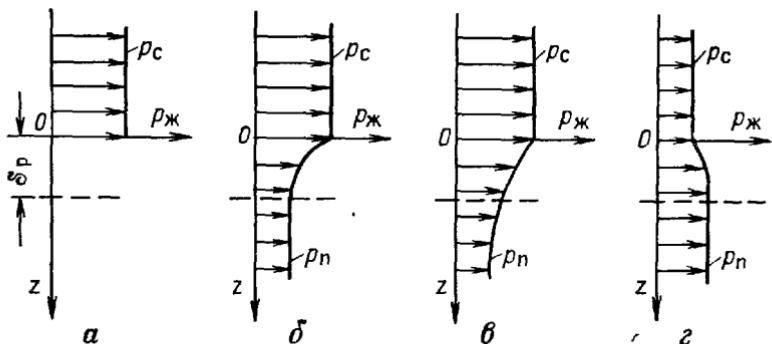


Рис. 88. К определению действующего дифференциального давления при разрушении горной породы на глубину δ_p :

a — плотная порода, *б* — малопроницаемая порода; *в* — высокопроницаемая порода;
z — $p_n > p_c$

долота. Способность жидкости фильтроваться обусловлена ее вязкостью и содержанием в ней твердой фазы.

Если давление в пласте больше, чем давление в скважине, то будет иметь место перепад давления обратного знака (рис. 88, *г*), способствующий отрыву частиц от забоя. В работе [119] отмечается, что при изменении дифференциального давления от +35 до -35 кгс/см² скорость бурения возрастает в 4 раза. Отрицательный перепад давления характерен для бурения с продувкой воздухом. Следует отметить, что дальнейшее увеличение дифференциального давления по модулю влияет на буримость пород несущественно.

Из изложенного выше становится ясным, почему на буримость пород решающее влияние оказывает дифференциальное давление, почему с увеличением удельного веса, вязкости промывочной жидкости и содержания в ней твердой фазы наблюдается ухудшение буримости пород и почему влияние дифференциального давления при высокооборотном способе бурения больше, чем при низкооборотном.

В работе [80] показано, что причиной, обуславливающей наличие действующего перепада давления, может быть не только дифференциальное давление, но и явление осмоса.

Метод оценки совершенства техники и технологии бурения предложен М. Г. Бингхэмом. На основании обработки экспериментальных и промысловых данных строятся графики в координатах нагрузка на единицу диаметра долота (P_d/D_d) — интенсивность разрушения пород (δ_0):

$$\delta_0 = f\left(\frac{P_d}{D_d}\right).$$

Графики (рис. 89) имеют ряд характерных особенностей.

При полной (идеальной) очистке забоя от выбуруемых частиц пород скорость бурения будет зависеть только от способности долота разрушать породу. Линия OE характеризует эти условия не достижимые в практике бурения.

Если давление отсутствует, а условия по очистке близки к идеальным, то точки, соответствующие проходке за один оборот долота, будут располагаться в заштрихованной области между кривыми OA и OE .

В практических условиях бурения по кривой OA определяется максимальная достижимая проходка за один оборот при данной нагрузке на долото. Этот результат можно получить в том случае, если для очистки забоя применять газообразные агенты или промывочные жидкости, обеспечивающие минимальное гидростатическое давление столба этой жидкости в скважине. Прямая CA приближенно заменяет кривую OA и названа М. Г. Бингхэмом рабочей кривой. Эта кривая характеризует потенциальные возможности роторного бурения и определяет минимальный расход энергии на единицу выбуруенной породы.

Наклон рабочей кривой зависит от механических свойств пород и конструкции долота. Наиболее тесная связь с показателем прочности на сдвиг установлена для отрезка OC .

Прямая CB называется линией минимального углубления. Угол наклона этой линии составляет около $1/3$ от угла наклона рабочей прямой.

Поскольку на практике в большинстве случаев процесс бурения не идеален, то кривые, построенные по результатам бу-

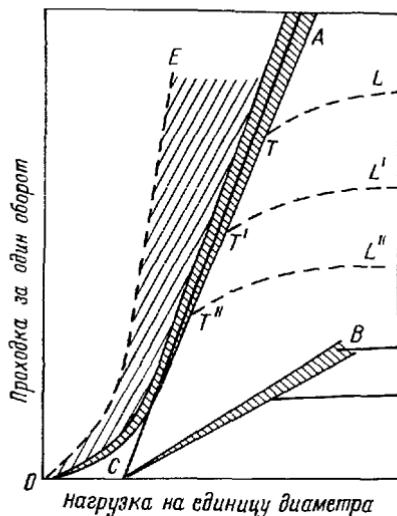


Рис. 89. Графики зависимости интенсивности разрушения пород от нагрузки на единицу диаметра долота

рения, располагаются правой рабочей кривой (линии T_1L , T'_1L' , T''_1L''). Относительное положение этих кривых характеризует степень совершенства применяемой технологии бурения.

Методика М. Г. Бингхэма может быть использована и при оценке совершенства высокооборотных способов бурения. Однако в этом случае необходимо иметь информацию о действительной скорости вращения долота.

§ 4. О влиянии конструктивного исполнения вооружения породоразрушающего инструмента на буримость горных пород

Элементы вооружения долот по конфигурации рабочей поверхности можно разделить на три группы:

- 1) с плоской рабочей поверхностью — притупленный клин, усеченный конус и др.;
- 2) с цилиндрической рабочей поверхностью — твердосплавные клиновидные зубки, фрезерованные зубья с скругленными в результате износа вершинами;
- 3) со сферической рабочей поверхностью — твердосплавные штыри со сферической головкой.

Изучение износа элементов вооружения долот с фрезерованным стальным вооружением показывает, что рабочая поверхность плоской сохраняется только в начальный период работы вооружения долота на забое и определяет, главным образом, начальную скорость бурения. Тем не менее, большинство исследований по процессам разрушения горных пород и режиму бурения выполнены применительно к этому случаю и далее распространяются на все случаи без существенных ограничений.

Рассмотрим влияние формы элементов вооружения долот на процессы деформирования и разрушения горных пород на забое скважины. Для этого проанализируем особенности упругого напряженного состояния в изотропном послубесконечном твердом теле в процессе вдавливания в его поверхность инденторов с различной конфигурацией рабочей поверхности. В качестве однозначной характеристики напряженного состояния в горной породе принимаем величину интенсивности касательных напряжений, определяемую по формулам (VI.31) и (VI.32).

Наряду с различием видов напряженного состояния при вдавливании инденторов различной формы имеет место и различный вид зависимости изменения площади контакта индентора с горной породой от нагрузки. В пределах упругого деформирования приращением площади при вдавливании инденторов с плоской рабочей поверхностью пренебрегаем.

Подставив в формулы (VI.31) и (VI.32) величины давлений инденторов, записанные через нагрузку на индентор P , модуль деформации при вдавливании C , радиус кривизны, и линейные

размеры рабочей поверхности индентора и значения коэффициентов μ из табл. 18 при $\omega=0$, получим:

для зуба долота с плоским основанием

$$\sigma_{t \max} = 0,61P/b_0 l; \quad (\text{IX.8})$$

для зуба долота с цилиндрической рабочей поверхностью

$$\sigma_{t \ max} = 0,33 \sqrt{\frac{PC}{lR}}; \quad (\text{IX.9})$$

для зуба долота со сферической рабочей поверхностью

$$\sigma_{t \ max} = 0,37 \sqrt[3]{P \left(\frac{C}{R_c} \right)^2}, \quad (\text{IX.10})$$

где b_0 — притупление зуба долота;

l — длина рабочей поверхности зуба долота;

R — радиус цилиндрической поверхности зуба;

R_c — радиус сферы.

Для большинства горных пород значения коэффициента Пуассона лежат в пределах $0,1 < \mu < 0,3$. Тогда согласно выражению (VI.40) можно записать, что

$$1,01E < C < 1,10E. \quad (\text{IX.11})$$

Из неравенства (IX.11) видно, что для приближенных расчетов можно принять

$$C \approx E.$$

В соответствии с данными, приведенными в работе [109], пластичные и сильно пористые породы имеют низкие значения модуля упругости. Принимаем для этой группы пород $E = 250$ кгс/мм². Малопористые и плотные породы имеют более высокий модуль упругости. Для характеристики этой группы пород $E = 1000$ кгс/мм². Наиболее плотные и твердые разновидности осадочных пород могут иметь E до 10 000 кгс/см² и более. Принимаем для характеристики этой группы пород $E = 10 000$ кгс/мм².

Результаты расчетов в диапазоне изменения нагрузки на элемент вооружения шарошечного долота до 7000 кгс приведены на рис. 90. Для плоской поверхности рассмотрены два случая: новое вооружение ($b_0 = 1,5$ мм, $l = 8$ мм) и для вооружения изношенного на $1/2$ высоты зуба.

Для цилиндрической поверхности рассмотрены три случая:

1) $R = 1$ мм — скругление вершины твердосплавных зубков;

2) $R = 2$ мм;

3) $R = 5$ мм — скругление вершины стальных зубьев долот в процессе работы.

Во всех случаях принято, что $l = 8$ мм.

Для сферической поверхности рассмотрены два случая:

- 1) $R_c = 4,5$ мм — диаметр зубка 8 мм;
- 2) $R_c = 6,5$ мм — диаметр зубка 12 мм.

Из рис. 90 видно, что с точки зрения упругого напряженного состояния элементы вооружения шарошечных долот с разной конфигурацией рабочей поверхности далеко не равнозначны. Для горных пород с низким модулем упругости наивысший уровень напряженного состояния имеет место при плоской рабочей поверхности (прямая 1). Однако по мере износа как по плоскости, так и со скруглением вершины (кривые 4, 5) уровень напряженного состояния существенно понижается. Про-

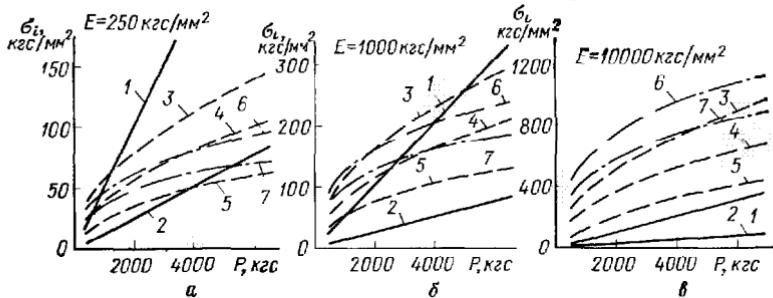


Рис. 90. Графики зависимости интенсивности касательных напряжений от нагрузки на элемент вооружения шарошечного долота для пород с разным модулем упругости при рабочей поверхности:

1, 2 — плоской, 3, 4, 5 — цилиндрической, 6, 7 — сферической

Межуточное положение занимает вооружение долот с клиновидными зубками (кривая 3), и самый низкий уровень напряженного состояния обеспечивает вооружение со сферической рабочей поверхностью (кривые 6 и 7). Лишь в случае весьма низких нагрузок на элемент вооружения долота более высокое напряженное состояние будет создано вооружением с криволинейной рабочей поверхностью.

Для горных пород, имеющих средние значения модуля упругости при низких значениях нагрузки на элемент вооружения (низкая нагрузка на долото), преимущество имеют штыревое вооружение со сферической рабочей поверхностью (кривые 6, 7) и в виде клиновидных твердосплавных зубков (кривая 3). Существенно уступает им вооружение долот с плоской рабочей поверхностью (прямая 1). При средних нагрузках на элемент вооружения имеет место сближение уровня напряженного состояния, создаваемого вооружением различного вида. При высоких нагрузках наибольший уровень напряженного состояния обеспечивается элементами с плоской рабочей поверхностью и клиновидными зубками (кривые 1, 3). Однако в случае плоского износа вооружения напряженное состояние в горной породе быстро уменьшается (прямая 2). Износ со скруглением вершин приведет к меньшему темпу снижения напряженного со-

стояния в породе (кривые 4, 5). При малых нагрузках износ вооружения со скруглением вершин может первоначально увеличить уровень напряженного состояния в породе (кривая 4).

Для горных пород, имеющих высокие значения модуля упругости, преимущество имеет вооружение долот с сферической рабочей поверхностью (кривые 6, 7) и несколько уступает ему вооружение в виде твердосплавных зубков (кривая 3). Вооружение долот с плоской рабочей поверхностью обеспечивает наименьший уровень напряжений (кривые 1, 2). Однако износ со скруглением вершин может повысить уровень создаваемого напряженного состояния таким вооружением (кривые 4, 5).

Анализ напряженного состояния, создаваемого вооружением долот различных типов, показывает, что при выборе типа долота необходимо учитывать упругие характеристики горных пород. Современные методы акустического каротажа позволяют получить подробную информацию об упругих свойствах пород. Окончательно этот вопрос можно решить после проведения экспериментального изучения деформирования и разрушения пород за пределами упругости и анализа промыслового материала. Кроме того, как видно из рис. 90, существенное влияние на окончательное решение этого вопроса будет оказывать изменение размеров и конфигурации рабочей поверхности стального вооружения долота в результате износа. При твердосплавном вооружении долот это влияние менее значительно.

Сравнение выражений (IX.8), (IX.9) и (IX.10) показывает, что влияние нагрузки на интенсивность касательных напряжений зависит от конфигурации рабочей поверхности инденторов. Это, в свою очередь, предопределяет различие в зависимостях скорости разрушения пород от нагрузки на долото. Причем, наиболее чувствительным к изменению нагрузки является долото с плоской рабочей поверхностью, менее чувствительно — с цилиндрической рабочей поверхностью и еще менее чувствительно — со сферической рабочей поверхностью. Последнее позволяет поставить вопрос о нецелесообразности применения повышенных нагрузок при бурении долотами со сферическим вооружением, так как перегрузка снижает долговечность опоры и в конечном счете может снизить производительность долота. Количественно этот вопрос может быть решен в конкретных случаях по данным анализа работы долот.

Поскольку в процессе работы на забое плоская рабочая поверхность долот с фрезерованным вооружением переходит в криволинейную, то может иметь место как изменение характера зависимости скорости разрушения породы от нагрузки, так и изменение характера зависимости скорости разрушения пород от времени бурения.

При дискретном разрушении забоя скважины, которое имеет место в процессе разрушения пород долотами, большую роль

играет размещение зон поражения по забою и последовательность поражений его элементами вооружения долота. Размещение зон поражения забоя и их последовательность обусловлены конструкцией исполнительных органов долот (шарошек, лопастей и т. д.), размещением на них элементов вооружения и кинематикой взаимодействия вооружения с горной породой.

Большое число одновременно действующих факторов затрудняют решение этого вопроса даже для конкретных пород. Основные принципы оптимизации вооружения долот изложены в работе [115].

Правильный выбор типа вооружения и его оптимальное размещение на исполнительных органах долота являются большим резервом повышения производительности породсразрушающего инструмента при бурении.

§ 5. Принципы расчленения разреза скважин по буримости горных пород

В настоящее время в практике бурения широко применяется расчленение разреза скважин на нормативные пачки, представляющие собой непрерывные интервалы пород, близких по буримости. Это необходимо при проектировании режимов бурения с использованием статистических методов, а также для нормирования буровых работ.

Влияние большого числа одновременно действующих факторов и отсутствие единых комплексных показателей буримости затрудняют выделение в разрезе скважины интервалов одинаковой буримости. Чаще всего в практике бурения скважин пачки соответствуют стратиграфическим подразделениям разреза. Дополнительные границы пачек могут быть обусловлены изменением диаметра долота или вида промывочной жидкости.

Такое деление на пачки по буримости имеет ряд недостатков:

1) в районах Урало-Поволжья деление на пачки получается очень мелким, границы пачек часто не соответствуют границам буримости;

2) в районах Западной Сибири и других выделяемые пачки очень мощны и неудобны для анализа режима бурения и нормирования;

3) невозможна детализация разреза по буримости.

Более строгое расчленение разреза на пачки по буримости может быть осуществлено на основании изучения механических свойств пород или на основании анализа результатов работы долот.

В горной промышленности широко распространена классификация пород М. М. Протодьяконова (старшего) по крепости. Коэффициент крепости пород соответствует прочности пород на

сжатие в кгс/мм². В шкале крепости 10 категорий с коэффициентами от 0,3—0,5 у песков и глин до 20 у плотных кварцитов. Со шкалой крепости и методами ее построения можно познакомиться в работе [35]. Кроме того, разработан еще ряд аналогичных шкал крепости, учитывающих нелинейность зависимости буримости от сопротивления породы сжатию [92]. При расчленении разреза в пачки включаются породы одинаковой категории буримости.

Нетрудно видеть, что прочность пород на сжатие характеризует лишь одну точку предельной кривой, т. е. один единственный вид напряженного состояния, весьма далекий от напряженного состояния пород при бурении. Другие же факторы, оказывающие решающее влияние на сопротивление пород разбуриванию при глубоком бурении, вообще не учитываются. Поэтому шкала М. М. Протодьяконова не нашла использования в бурении на нефть и газ.

Л. А. Шрейнер в основу классификации горных пород применительно к процессам разрушения при бурении положил следующие основные принципиальные предпосылки.

В процессе бурения, как и при всяком другом технологическом процессе, на разрушение единицы объема горной породы затрачивается определенное количество энергии. В свою очередь энергия, затрачиваемая на разрушение, определяется не одной какой-либо механической характеристикой, а всей совокупностью механических свойств горных пород.

Удельная объемная работа разрушения будет наиболее объективным показателем для классификации горных пород по буримости. При этом следует учитывать, что механические характеристики горных пород, определяющие общую работу разрушения, должны быть получены в условиях, моделирующих забойные, т. е. с учетом влияния горного и гидростатического давлений.

Такие исследования весьма трудоемки и требуют большого количества образцов пород, которыми исследователи не располагают. Поэтому целесообразно использовать стандартные методы испытаний пород на сжатие и на вдавливание, а влияние условий в скважине учитывать на основании статистического анализа промысловых данных с количественной оценкой влияния различных факторов. Результаты таких исследований могут быть распространены на другие аналогичные по геологическому строению районы в целом или на отдельные аналогичные пачки в тех случаях, если определяющие буримость факторы изменяются в тех же пределах, что и на изученных ранее площадях.

Если данные о механических свойствах разбуриваемых пород отсутствуют, единственными возможными показателями для классификации пород являются фактические данные по проходке на долото и механической скорости бурения в различных породах. Такая классификация будет иметь временный и местный

характер, так как значения показателей буримости отражают состояние технологии бурения в данный период.

Расчленение разреза месторождения на пачки одинаковой буримости по промысловым данным не самоцель, а вспомогательная операция, обеспечивающая правильную группировку статистических данных при решении тех или иных задач. Отсюда вытекает, что в качестве критерия буримости должны использоваться не первичные показатели работы долот, какими являются проходка на долото, время работы долота и механическая скорость бурения, а тот показатель, относительно которого ведется решение задачи. Например, если при выборе типов долот принята в качестве критерия наибольшая проходка на долото, то и выделение интервалов бурения в пачки и оценка их однородности должна быть приведена по проходке на долото. Если в качестве критерия принята наибольшая рейсовая скорость, то и выделение пачек должно быть проведено по рейсовой скорости и т. д.

Современные математические методы позволяют по группе пробуренных скважин получить достаточно обоснованные данные о буримости пород в данном районе при существующей технике и технологии ведения буровых работ. Анализ производственных данных позволяет не только расчленить разрез по буримости, но и провести детализацию буримости пород в отдельных пачках [65].

Таким образом, в настоящее время нет единых принципов оценки буримости пород. Наиболее перспективным является метод, базирующийся на стандартных определениях показателей свойств пород и статистическом обобщении промысловых данных, позволяющий значительно расширить возможности широко применяемого в геологии метода аналогий. Однако этот метод пока недостаточно разработан и используется весьма ограниченно.

Детализация разреза по буримости имеет большое значение для дальнейшего роста производительности труда в бурении. Развитие технологии бурения ставит вопрос о необходимости учета специфики условий работы каждого отдельного долота, что позволит оперативно управлять процессом бурения скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Абдуллаев Р М и др Влияние реологических свойств горных пород на устойчивость стенок скважины — «Нефтяное хозяйство», 1972, № 7
- 2 Алексеев Л А Беркович М Я Некоторые вопросы температурного режима работы шарошечных долот — «Нефть и газ», 1963, № 12
- 3 Алексеев Л А, Беркович М Я, Мавлютов М Р Тепловой износ зубьев шарошечных долот — «Нефть и газ», 1965, № 12, с 13—15
- 4 Алексеев Л А и др К определению области применения различных инструментальных материалов для изготовления вооружения шарошечных долот Уфа, 1969, с 30—43 с ил (Уфимский нефтяной ин-т. Труды, вып 7)
- 5 Алексеев Ю Ф Использование данных по механическим и абразивным свойствам горных пород при бурении скважин М, «Недра», 1968
- 6 Алексеев Ю Ф и др Прогнозирование механических свойств горных пород по их плотности и пористости — «Бурение», 1972, № 12, с 15—17
- 7 Алиев М Г и др Оценка термоупругих напряжений пород стенок необсаженной скважины — «Нефтяное хозяйство», 1966, № 6, с 26—34
- 8 Андреев С Е О законах дробления — «Горный журнал» 1962 № 4
- 9 Байдюк Б В Механические свойства горных пород при высоких давлениях и температурах М, Гостоптехиздат, 1963 156 с с ил
- 10 Байдюк Б В, Яремийчук Р С Исследование влияния температуры на устойчивость стенок скважин при установившихся тепловых режимах — «Нефтяное хозяйство», 1969, № 8, с 48—51
- 11 Байдюк Б В, Шрейнер Л А Расчет устойчивости горных пород в скважинах — В кн Вопросы деформации и разрушения горных пород при бурении М, ГОСИНТИ, 1961, с 120—156 с ил
- 12 Байдюк Б В, Переяслов А Н О влиянии фактора времени на деформацию стенок нефтяных скважин — «Нефтяное хозяйство», 1971, № 10, с 37—51
- 13 Байдюк Б В., Бугаев В Н О кинематической характеристике воздействия зуба долота на породу — «Нефтяная и газовая промышленность», Киев, 1969, № 1, с 12—21 с ил
- 14 Барон Л И и др Экспериментальные исследования процессов разрушения горных пород ударом М, Изд во АН СССР, 1962, 163 с с ил
- 15 Барон Л И, Кузнецов А В Абразивность горных пород при добывании М, Изд во АН СССР, 1961, 213 с ил
- 16 Барон Л И, Глатман Л Б Контактная прочность горных пород М, «Недра», 1966, 184 с с ил
- 17 Безухов Н И Основы теории упругости, пластичности и ползучести М, «Высшая школа», 1968, 263 с с ил

18. Беликов Б. П. и др. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. М., «Наука», 1970, 125 с. с ил.
19. Брахман Л. А. Сравнение различных способов охлаждения резцов и расчет теплосъема. — В кн.: Смазочно-охлаждающие жидкости при резании металлов и техника их применения. М., Машгиз, 1961, с. 101—109.
20. Бревдо Г. Д., Симонов В. В., Соловьев Е. М. О влиянии режима бурения на скорость вращения шарошек долота. — «Нефть и газ». 1964, № 4, с. 26—34.
21. Булатов В. В. Механика разрушения горных пород при сверхглубоком бурении. Новосибирск, «Наука», 1966, 205 с. с ил.
22. Бушманов Б. Н., Хромов Ю. А. Физика твердого тела. М., «Высшая школа», 1971, 187 с. с ил.
23. Вдовин К. И. и др. Энергоемкость разрушения горных пород при статическом и динамическом вдавливании штампа. — «Нефть и газ», 1968, № 6, с. 31—43.
24. Вдовин К. И., Мавлютов М. Р., Филимонов Н. М. Формы зон разрушения горной породы при вдавливании штампа с плоским основанием. Уфа, 1969, с. 53—74. (Уфимский нефтяной ин-т. Труды, вып. 7).
25. Вдовин К. И., Мавлютов М. Р., Фидимонов Н. М. Методика и некоторые результаты исследования механических свойств горных пород при динамическом вдавливании плоского штампа. Уфа, 1969, с. 27—38. (Уфимский нефтяной ин-т. Труды, вып. 7).
26. Виноградов В. Н. и др. О природе ударного износа металлов. М., «Недра», 1968 (Моск. ин-т нефт. и газовой пром-сти. Труды вып. 81).
27. Владиславлев В. С. Разрушение горных пород при бурении скважин. М., Гостоптехиздат, 1958, 260 с. ил.
28. Голубинцев О. Н. Механические и абразивные свойства горных пород и их буримость. М., «Недра», 1968, 175 с. с ил.
29. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов. М., Стройиздат, 1971, 136 с. с ил.
30. Даныш Д. В. и др. Расчет скорости сужения ствола скважины в пластичных породах. — «Нефтяное хозяйство», 1972, № 6, с. 12—20.
31. Добрынин В. М. Деформации и изменения физических свойств коллекторов нефти и газа. М., «Недра», 1970, с. 241 с. с ил.
32. Желтов Ю. П. Деформация горных пород. М., «Недра», 1966.
33. Жлобинский Б. А. Динамическое разрушение горных пород при вдавливании. М., «Недра», 1970, 123 с. с ил.
34. Зубарев В. Г. О напряженном состоянии горных пород в стенках скважины. — «Нефтяное хозяйство», 1968, № 10, с. 27—36.
35. Ильницкая Е. И. и др. Свойства горных пород и методы их определения. М., «Недра», 1969, 147 с.
36. Конесев Г. В., Спивак А. И., Мавлютов М. Р. Коэффициенты трения при разрушении горных пород в различных средах. Уфа, 1969, с. 137—153 (Уфимский нефтяной ин-т. Труды, вып. 7).
37. Конесев Г. В., Спивак А. И., Мавлютов М. Р. Абразивный износ долотной стали и твердого сплава в различных средах. Уфа, 1969, с. 128—146 (Уфимский нефтяной ин-т. Труды, вып. 7).

38 Конесев Г В, Спивак А И, Мавлютов М Р и др О влиянии охлаждающей способности промывочных жидкостей и воздуха на абразивный износ долотной стали — «Нефть и газ», 1969, № 5, с 49—63

39 Костекций Б И Сопротивление изнашиванию деталей машин М, Машгиз, 1959, 238 с с ил

40 Курепин В И Об энергоемкости разрушения горных пород при вращательном бурении — «Нефтяное хозяйство», 1972, № 10, с 37—45

41 Любимов Н И Принципы классификации и эффективного разрушения горных пород при разведочном бурении М, Недра, 1967, 251 с сил

42 Лихтман В И, Щукин Е Д, Ребиндер П А Физико-химическая механика металлов М, Изд-во АН СССР, 1962, 356 с с ил

43 Мавлютов М Р Вдовин К И Об использовании показателей механических свойств горных пород для определения параметров режима бурения Уфа, 1972, с 51—69 (Уфимский нефтяной ин-т Труды, вып 11)

44 Мавлютов М Р и др Энергоемкость разрушения горных пород при наличии зоны предразрушения и снятии блокировки — В кн Разрушение горных пород при бурении скважин Уфа, 1973, 156 с с ил

45 Мавлютов М Р и др Исследование процесса разрушения горных пород при одновременном динамическом вдавливании нескольких штампов — В кн Разрушение горных пород при бурении скважин Уфа, 1973, 213 с с ил

46 Макклиток Ф, Аргон А Деформация и разрушение материалов М, «Мир», 1970, 154 с сил

47 Малахианов Т Б, Матаев Г А Определение удельного веса промывочной жидкости при бурении в неустойчивых породах — «Нефтяное хозяйство», 1969, № 9, с 46—51

48 Матюшин П Н и др Исследование влияния слоя разрушенного материала на процесс динамического и статического вдавливания штампов в горную породу Уфа, 1969, с 123—148 (Уфимский нефтяной ин-т Труды, вып 7).

49 Механические свойства горных пород при вдавливании и их практическое использование Под общ ред Л А Шрейнера М, ВНИИОЭНГ, 1966, 345 с сил

50 Мирзаджанзаде А Х и др Гидравлические особенности проходки скважин в сложных условиях М, ВНИИОЭНГ, 1971, 139 с с ил

51 Мясников В П, Ширин-Заде С А Расчет наружного давления на обсадные колонны вязкоупругой среде горных пород — «Нефтяное хозяйство», 1971, № 4, с 33—45

52 Надай А Пластичность и разрушение твердых тел Т 2 М, «Мир», 1969

53 Насонов Л Н Механика горных пород и крепление горных выработок. М, «Недра», 1969, 312 с с ил

54 Павлова Н Н Шрейнер Л А Механизм разрушения горных пород и некоторые вопросы проектирования долот для твердых, хрупких и пластично-хрупких пород М, Изд-во АН СССР, 1958, с 116—131 (Ин-т нефти АН СССР Труды, т XI)

55 Павлова Н Н, Шрейнер Л А Разрушение горных пород при динамическом нагружении М, «Недра», 1964, 213 с с ил

56 Павлова Н Н Деформационные и коллекторские свойства горных пород при различных объемных напряженных состояниях М, «Недра», 1974 329 с с ил

57 Палий П А, Корнеев К Е Буровые долота Справочник М, «Недра», 1971, 445 с

58 Попов А Н, Спивак А И, Мавлютов М Р Анализ режима турбинного бурения — «Бурение», 1965, № 5, с 27—34

59 Попов А Н, Спивак А И К вопросу о распределении скоростей скольжения и удельных нагрузок по венцам шарошек буровых долот — «Нефть и газ» 1965, № 9, с 13—19

60 Попов А Н, Спивак А И Абразивное изнашивание стали при трении о горные породы — «Горный журнал», 1967 № 2, с 26—42

61 Попов А Н, Спивак А И и др Влияние различных добавок к воде на износ долотной стали при разрушении горных пород — «Нефть и газ», 1967, № 8, с 31—48

62 Попов А Н, Спивак А И О коэффициентах трения сталь — горная порода — «Нефть и газ», 1967, № 3, с 16—25

63 Попов А Н, Спивак А И Алексеев Л А Исследование работы вооружения шарошечных долот по показателям микротвердости — «Машины и нефтяное оборудование», 1970, № 2, с 27—34

64 Попов А Н, Спивак А И Влияние режима реализации мощности на скорость абразивного износа стали при разрушении горных пород Уфа, 1969, с 141—169 (Уфимский нефтяной инт Труды, вып 7)

65 Попов А Н Статистический метод детального расчленения разреза нефтяного месторождения Уфа, 1972, с 121—145 (Уфимский нефтяной инт Труды, вып 11)

66 Попов А Н, Спивак А И, Огородников И Н Об использовании результатов изучения износа вооружения долот для опенки абразивности горных пород Уфа, 1969, с 93—108 (Уфимский нефтяной инт Труды, вып 7)

67 Потапов Ю Ф, Симонов В В Разрушение горных пород трехшарошечными долотами малою диаметра М, Гостоптехиздат, 1961, 193 с с ил

68 Ребиндер П А, Шрейнер Л А, Жигач К Ф Понизители твердости в бурении М, Издво АН СССР, 1944, 157 с с ил

69 Ржаницын А Р Теория ползучести М, Стройиздат, 1968, 141 с с ил

70 Ржевский В В, Новик Г Я Основы физики горных пород М, «Недра», 1973, 203 с с ил

71 Роджерс В Ф Промывочные жидкости для бурения нефтяных скважин М, Гостоптехиздат, 1960, 157 с.

72 Руппенейт К В Некоторые вопросы механики горных пород. М, Углехимиздат, 1954, 128 с с ил

73 Руппенейт К В Механические свойства горных пород М, Углехимиздат, 1956, 93 с с ил

74 Руппенейт К В, Либерман Ю М Введение в механику горных пород М, Госгортехиздат, 1960, 87 с с ил

75 Сеид Рза М К и др Вопросы длительной устойчивости стенок глубоких скважин Баку, Азернефт, 1969, 159 с

76 Сеид-Рза М К Устойчивость горных пород при бурении скважин на большие глубины М «Недра», 1972, 204 с с ил

77 Симонянц Л Е Разрушение горных пород и рациональная характеристика двигателей для бурения М, «Недра», 1966, 97 с с ил

78 Симонянц Л Е и др Исследование статической прочности приствильной части необсаженной скважины — «Нефть и газ», 1970, № 9

79 Симонов В В и др Исследование работы породоразрушающего инструмента М, «Недра», 1970, с 25—41 (Моск инт нефт и газовой промсти Труды, вып 96)

80 Симонов В В, Выскребцов В Г К вопросу влияния состава промывочной жидкости на процесс разрушения горной породы — В кн Разрушение горных пород при бурении скважин Уфа, 1973, с 27—31

81 Симонов В В, Выскребцов В Г Экспериментальное исследование процесса деформирования горных пород при вдавливании инденторов — В кн Разрушение горных пород при бурении скважин Уфа, 1973

82 Спивак А И, Шрейнер Л А Абразивность раздробленных минералов, горных пород и утяжелителей — «Азербайджанское нефтяное хозяйство», 1958, № 4, с 45—56

83 Спивак А И Абразивность утяжелителей, применяемых в бурении Уфа, 1960, с 120—136 (Уфимский нефтяной инт Труды, вып III)

84 Спивак А И Влияние скорости вращения на износ долот и на энергетические затраты при бурении — «Нефтяное хозяйство», 1962 № 9

85 Спивак А И, Попов А Н Об оценке абразивности горных пород — «Нефтяное хозяйство», 1968, № 1, с 49—53

86 Спивак А И, Попов А Н О распределении напряжений в горной породе при вдавливании элементов вооружения долот с цилиндрической поверхностью — «Нефтяное хозяйство», 1971, № 10, с 15—27

87 Спивак А И Абразивность горных пород М, «Недра», 1972

88 Стетюха Е И Возможные экспресс методы определения физико-механических свойств осадочных горных пород северо-востока Предкавказья и юга Дагестана — «Нефть и газ», 1969, № 6, с 36—48

89 Стетюха Е И Экспресс методы определения прочности осадочных горных пород — «Нефть и газ», 1967, № 9, с 29—36

90 Стрелец Г А и др Пластическое течение магниевых солей в скважинах — «Нефтяное хозяйство», № 12, 1968, с 16—31

91 Струговец Е Т Влияние гидростатического давления на эффективность разрушения горных пород при бурении — «Бурение» 1969, № 6

92 Справочник по бурению и оборудованию скважин на воду Под общ ред В В Дубровского М, «Недра», 1972, 452 с

93 Тенепбаум М М Износостойкость деталей и долговечность горных машин М, Госгортехиздат, 1960, 129 с

94 Трушкин Б Н, Спивак А И, Попов А Н и др О причинах вынужденных продольных колебаний и режиме динамического нагру

жения вооружения шарошечных долот Уфа, 1969, с 115—130 (Уфимский, нефтяной ин-т Труды, вып 7)

95 Уэрт Ч, Томсон Р Физика твердого тела М, «Мир», 1966

96 Фаиф У Введение в геохимию твердого тела М, «Мир», 1967

97 Федоров В С Проектирование режимов бурения М, Гостоптехиздат, 1958, 96 с сил

98 Филимонов Н И, Спивак А И, Попов А Н О динамическом взаимодействии зуба шарошечного долота с породой —«Нефть и газ», 1963, № 1, с 17—25

99 Филимонов Н И, Мавлютов М Р Механизм процесса разрушения горных пород при динамическом вдавливании штампов —«Нефть и газ» 1965, № 5, с 27—39

100 Филимонов Н И, Мавлютов М Р К вопросу определения потребностей мощности на долоте —«Нефтяное хозяйство», 1966, № 6, с 15—27

101 Филимонов Н И, Вдовин К И, Мавлютов М Р К вопросу о развитии трещиноватости в горной породе при статическом вдавливании штампа —«Горный журнал», 1968, № 12, с 35—41

102 Филимонов Н И, Вдовин К И, Мавлютов М Р Механизмы разрушения и псевдопластичные свойства горных пород при статическом вдавливании штампов «Горный журнал», 1969, № 1, с 19—37

103 Флорин В А Основы механики грунтов Т 1 М, Стройиздат, 1959, 259 с сил

104 Хрущов И И, Беркович Е С Приборы ПМТ-2 и ПМТ-3 для испытания на микротвердость М, Изд-во АН СССР, 1950, 119 с с ил.

105 Хрущов И И, Бабичев М А Абразивное изнашивание М, «Наука», 1970, 216 с сил

106 Шамсиев А А Обвалы пород при бурении нефтяных и газовых скважин Баку, Азнефтехиздат, 1955, 195 с сил

107. Шацов Н И и др Бурение нефтяных и газовых скважин М Гостоптехиздат, 1961, 136 с сил

108 Шрейнер Л А Физические основы механики горных пород М, Гостоптехиздат, 1950, 136 с сил

109 Шрейнер Л А и др Механические и абразивные свойства горных пород М, Гостоптехиздат, 1958, 237 с сил

110 Шрейнер Л А и др Деформационные свойства горных пород при высоких давлениях и температурах М, «Недра», 1968, 175 с сил

111 Шрейнер Л А, Петрова О П Зоны пластической деформации и механизм разрушения пластичных горных пород при вдавливании — В кн Вопросы деформации и разрушения горных пород при бурении М, ГОСИНТИ, 1961, с 116—131

112 Шрейнер Л А, Садиленко К. М Влияние жидких сред на износ закаленных сталей и твердых сплавов при трении о горные породы. В кн Вопросы деформации и разрушения горных пород при бурении М, ГОСИНТИ, 1961, с 39—56

113 Шрейнер Л А и др Методическое пособие по использованию результатов испытаний механических свойств горных пород вдавливанием штампа М, «Недра», 1967, 79 с

114. Эйгелес Р. М. Разрушение горных пород при бурении М., «Недра», 1963 с. с ил.
- 115 Эйгелес Р. М., Стрекалова Р. В., Мустафина Н. И. Оптимизация процесса разрушения забоя породоразрушающими элементами — «Нефтяное хозяйство», 1972, № 9, с. 27—35
116. Эпштейн Е. Ф Износ твердых сплавов при трении по горным породам при колонковом разведочном бурении М., Госгортехиздат, 1952
117. Юшкин Н. П. Механические свойства минералов. Л., «Наука», 1971, 129 с. с ил.
118. Ягодкин Г. И. и др Прочность и деформируемость горных пород в процессе их нагружения М., «Наука», 1971, 179 с. с ил.
119. Дон Мурфи. Факторы, влияющие на скорость бурения. — «Бурение», 1969, № 12, с. 18—35.
120. Видрин Д. И., Бенит Е. И. Промысловые исследования влияния дифференциального давления на механическую скорость проходки. — «Бурение», 1969, № 7, с. 41—52.

·ОГЛАВЛЕНИЕ

	С.
Предисловие	3
Введение	4
§ 1. Предмет механики горных пород	4
§ 2. Задачи курса и его значение	5
§ 3. Методы разрушения горных пород и способы бурения скважин	6
Глава I. Некоторые вопросы физики твердого тела	7
§ 1. Строение твердых тел	7
§ 2. Силы связи в пространственных решетках	9
§ 3. Теоретическая и реальная прочность твердых тел	14
§ 4. Дефекты кристаллической структуры	16
Глава II. Механические свойства твердых тел	19
§ 1. Общие понятия и определения	19
§ 2. Напряжения и деформации в упругой области деформирования твердого тела	21
§ 3. Напряжения и деформации в пластической области деформирования	25
§ 4. Теории прочности	27
§ 5. Некоторые особенности деформирования и разрушения реальных твердых тел	30
§ 6. Энергетические законы разрушения (диспергирования) хрупких тел	34
Глава III. Основные сведения о горных породах	37
§ 1. Состав и строение горных пород	37
§ 2. Кристаллические осадочные породы	39
§ 3. Обломочные осадочные породы	41
§ 4. Неоднородность горных пород	46
Глава IV. Показатели механических свойств минералов и горных пород и методы их определения	47
§ 1. Простые виды механических испытаний минералов и горных пород	47
§ 2. Особенности поведения минералов при деформировании	51
§ 3. Твердость минералов	54
§ 4. Показатели механических свойств горных пород при простых видах деформирования	58
Глава V. Особенности деформирования горных пород в условиях всестороннего сжатия	65
§ 1. Напряженное состояние горных пород в условиях залегания	65
§ 2. Всестороннее равномерное сжатие горных пород. Сжимаемость пород	68
§ 3. Особенности деформирования и разрушения горных пород в условиях неравномерного всестороннего сжатия	70
§ 4. Напряженное состояние горных пород вокруг бурящейся скважин	73
§ 5. Условия устойчивости ствола скважины	77
§ 6. Гидроразрыв пласта	78

§ 7. Влияние среды на деформирование и разрушение горных пород, слагающих стеки скважины	80
§ 8. Проявление вязкостных свойств горных пород	83
Г л а в а VI. Основные закономерности разрушения и показатели механических свойств горных пород при вдавливании	85
§ 1. Основные схемы взаимодействия элементов вооружения долота с горной породой	85
§ 2. Разрушение горных пород при бурении	87
§ 3. Напряженное состояние в горных породах при вдавливании	89
§ 4. Влияние касательной нагрузки на распределение напряжений в горной породе	98
§ 5. Механизм разрушения горных пород при вдавливании штампа	101
§ 6. Особенности деформирования пород при вдавливании заостренных наконечников (конуса, клина)	104
§ 7. Определение показателей механических свойств горных пород методом статического вдавливания штампа	105
§ 8. Классификация горных пород	111
§ 9. Влияние различных факторов на деформирование и разрушение горных пород при вдавливании	113
§ 10. Анализ показателей механических свойств, определяемых при статическом вдавливании штампа, и их использование при построении предельных кривых горных пород	118
Г л а в а VII. Деформирование и разрушение горных пород при динамическом вдавливании. Энергетика разрушения горных пород	126
§ 1. Основные принципы и схемы изучения динамического деформирования и разрушения горных пород	126
§ 2. Особенности деформирования пород свободно падающим ударником	128
§ 3. Разрушение горных пород при динамическом вдавливании	131
§ 4. Энергоемкость разрушения горных пород при динамическом вдавливании	133
§ 5. О взаимосвязи характеристик пород, определяемых при статическом и динамическом вдавливании штампа	134
§ 6. Определение динамических упругих характеристик горных пород	137
§ 7. Усталостное разрушение горных пород при вдавливании	139
Г л а в а VIII. Абразивность горных пород	141
§ 1. Основные понятия об изнашивании металлов и абразивности горных пород	141
§ 2. Особенности режима работы различных деталей машин и инструмента	144
§ 3. Методы и схемы изучения абразивности горных пород	145
§ 4. Методика изучения абразивного изнашивания металлов и абразивности горных пород	148
§ 5. Понятие об областях изнашивания металлов и показателях абразивности пород	151
§ 6. О взаимосвязи скорости абразивного изнашивания стали и характера разрушения горной породы	154
§ 7. Механизм абразивного изнашивания закаленной стали при трении о горные породы и в процессе их разрушения. Ударно-абразивный износ	155
§ 8. Классификация осадочных горных пород по абразивности	161
§ 9. Влияние среды на абразивное изнашивание стали	166
§ 10. Особенности абразивного изнашивания твердого сплава	171
§ 11. Износ металлов раздробленными горными породами	172
	199

	С.
Глава IX Буримость горных пород	174
§ 1. Понятие о буримости горных пород. Показатели буримости	174
§ 2 О связи буримости пород и показателей их механических свойств	175
§ 3. Влияние глубины залегания пород, вида и свойств циркулирующего агента на буримость горных пород	178
§ 4 О влиянии конструктивного исполнения вооружения породоразрушающего инструмента на буримость горных пород	184
§ 5. Принципы расчленения разреза скважин по буримости горных пород	188
Список литературы	191

АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ СПИВАК,
АНАТОЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ ПОПОВ
МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

Редактор издательства Е И Ковтун
Обложка художника В А Дlugий
Технический редактор О Ю Трепенок
Корректор Л В Сметанник

Сдано в набор 10/X 1974 г
Подписано в печать 21/I 1975 г Т-01431.
Формат 60×90¹/₁₆ Бумага № 2 Печ. л. 12,5.
Уч. изд. л. 12,01 Тираж 7000 экз.
Заказ № 1353/4910-5 Цена 42 коп.

Издательство «Недра», 103633.
Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета
Министров СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
109088, Москва, Ж 88, Южнопортовая ул., 24