

А. Н. Попов

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

2-е издание

«Инфра-Инженерия»

УДК 622.24(075.8)
ББК 33.36я7
П58

Утверждено редакционно-издательским
советом Уфимского государственного
нефтяного технического университета

Рецензенты:
генеральный директор ООО «Азимут» (г. Уфа) канд. техн. наук *Х. И. Акчурин*;
директор НИОКР ООО «Перфобур» (г. Уфа) д-р техн. наук *А. В. Лягов*

Попов, А. Н.

П58 Разрушение горных пород : учебное пособие / А. Н. Попов. – 2-е изд. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 180 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-2213-0

Рассмотрены горные породы нефтяных и газовых месторождений, их геологические и механические свойства с точки зрения бурения нефтяных и газовых скважин. Большое внимание уделено устройству и механике породоразрушающих инструментов, их взаимодействию с забоем и изнашиванию в процессе бурения. Описаны принципы выбора породоразрушающих инструментов для конкретных условий бурения и их рациональной отработки.

Для студентов нефтегазовых направлений подготовки. Может быть полезно студентам, изучающим горное дело.

УДК 622.24(075.8)
ББК 33.36я7

ISBN 978-5-9729-2213-0

© Попов А. Н., 2025
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2025
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение. Предмет и задачи курса «Разрушение горных пород»…….. 3

Тема 1. ОСАДОЧНЫЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ …… 4
1.1. Осадочные горные породы ……. 4
1.2. Структурные модели осадочных горных пород ……... 6
1.3. Геостатическая температура горных пород. Многолетнемерзлые породы …….. 9

Тема 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД…… 11
2.1. Испытание горных пород при одноосном сжатии……..... 11
2.2. Метод статического вдавливания штампа с плоским основанием…….. 14
2.3. Классификации горных пород по твердости по штампу. Определение твердости горных пород в категориях…… 17
2.4. Особенности разрушения горных пород при динамическом вдавливании…….. 18
2.5. Абразивность горных пород…… 20
2.6. Определение показателей абразивности горных пород. Классификация по абразивности……. 23
2.7. Особенности изнашивания твердого сплава…….. 25
2.8. Влияние состава и строения горных пород на сопротивление разрушению……... 25
2.9. Взаимосвязь основных показателей свойств горных пород …… 27

Тема 3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИХ ИНСТРУМЕНТАХ……. 30
3.1. Назначение породоразрушающих инструментов и требования к ним…… 30
3.2. Функциональные системы породоразрушающих инструментов. Классификации инструментов…… 30
3.3. Материалы вооружения породоразрушающих инструментов……. 33
3.4. Параметры режима работы долот……... 35
3.5. Показатели работы долота……... 37
3.6. Критерии оптимизации выбора и режима работы долот……. 37

Тема 4. РЕЖУЩЕ-СКАЛЫВАЮЩИЕ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИЕ ИНСТРУМЕНТЫ …….. 39
4.1. Долота режуще-скалывающего действия с твердосплавным вооружением…… 39
4.2. Особенности взаимодействия лопастного долота с забоем…….. 40
4.3. Изнашивание лопастных долот……... 43
4.4. Одношарошечные долота……. 43

Тема 5. ДОЛОТА С ФИКСИРОВАННЫМИ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИМИ РЕЗЦАМИ…… 46
5.1. Элементы вооружения алмазно-твердосплавных долот…….. 46
5.2. Устройство долота PDC……... 48
5.3. Долота с гребнеобразными резцами и коническими вставками…….. 52
5.4. Шифры и коды долот PDC…….. 53
5.5. Кодирование износа долот PDC…… 57
5.6. Коды видов износа долот PDC…… 60
5.7. Выбор долота PDC в соответствии с механическими свойствами горных пород …… 66
5.8. Истирающе-режущие долота, оснащенные натуральными и синтетическими алмазами…… 68

Тема 6. ШАРОШЕЧНЫЕ ДОЛОТА ДРОБЯЩЕ-СКАЛЫВАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ…… 72
6.1. Устройство шарошечного долота …….. 72
6.2. Принцип работы долота. Дробящая способность шарошек…… 74
6.3. Долото как источник вынужденных колебаний инструментов……... 76
6.4. Скалывающая способность шарошек …….. 77
6.5. Кинематика шарошечного долота …… 79
6.6. Стендовое определение передаточных чисел шарошек …….. 81
6.7. Вооружение шарошек долот первого класса ……..……... 83
6.8. Особенности периферийного вооружения шарошек……... 87
6.9. Вооружение шарошек долот второго класса……. 88
6.10. Периферийное вооружение шарошек долот 2-го класса…… 91
6.11. Системы промывки шарошечных долот …… 92
6.12. Опоры шарошек и система их смазки ……..…… 96
6.13. Армирование лап шарошечных долот…… 104
6.14. Размеры и шифр долот по ГОСТ 20692-2003. Кодирование долот по системе Международной ассоциации буровых подрядчиков…….. 106
6.15. Шифры шарошечных долот ОАО «Волгабурмаш» ……... 108

Тема 7. РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИМИ ИНСТРУМЕНТАМИ…… 111
7.1. Виды и области разрушения горных пород при бурении скважин……. 111
7.2. Области объемного разрушения горных пород……. 112
7.3. Влияние глубины залегания горных пород и дифференциального давления на сопротивление разрушению……. 114
7.4. Приведение предела текучести горных пород к забойным условиям…… 117
7.5. Безразмерные характеристики разрушения горных пород…….. 122
7.6. Формулы подобия …… 123
7.7. Мощность и момент, обеспечивающие работу долота …… 124
7.8. Выбор шарошечных долот по данным о механических свойствах горных пород…… 126
7.9. Контроль параметров режима работы долота …….. 138

7.10. Отработка долота. Признаки отказа долота……. 140
7.11. Рейкообразование на забое скважины и его профилактика……... 142
7.12. Описание износа шарошечных долот…….. 144
7.13. Коды основных видов износа шарошечных долот……. 149
7.14. Описание прочности горных пород и выбора долот в кодах МАБП ….. 152

Тема 8. ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ БУРЕНИЯ С ОТБОРОМ КЕРНА …… 156
8.1. Керн и основные виды керноприемных устройств …….. 156
8.2. Бурильные головки …….. 160
8.3. Кернорватели……. 164
8.4. Причины разрушения керна при бурении и методы обеспечения необходимого выноса керна ……... 166

Тема 9. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ) ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН……. 169
9.1. Инструменты для подготовки ствола и забоя скважины к последующим операциям ……. 169
9.2. Инструменты для увеличения диаметра скважины …….. 172

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ……..... 176

Тема 1

ОСАДОЧНЫЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

1.1. Осадочные горные породы

По происхождению горные породы делятся на три группы: магматические, осадочные и метаморфические.

Магматические породы образовались из магмы в результате ее застывания на глубине или лавы, излившейся на поверхность.

Осадочные породы образовались в результате химико-физического преобразования ранее существующих пород с последующим их переносом и отложением в виде пластов (слоев). Они покрывают практически всю поверхность Земли. В эту группу также входят породы, образованные в результате жизнедеятельности организмов (органогенные осадочные породы).

Метаморфические породы образовались в результате преобразования магматических и осадочных пород под действием высоких давления и температуры.

Нефть и газ залегают преимущественно в осадочных породах, поэтому ниже рассматриваются только осадочные горные породы.

Осадочные горные породы делятся на две большие группы: обломочные и хемогенные кристаллические. Описанием пород по составу занимается наука литология. В свою очередь обломочные горные породы делят на три подгруппы. Некоторые характеристики пород приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Осадочные горные породы

Подгруппы	*Вид связей*	*Примеры*
Обломочные глинистые (54 %)	Связные Сцементированные	Глины Аргиллиты, глинистые сланцы
Обломочные мелкоземистые и песчаные (21 %)	Рыхлые Сцементированные	Алевриты, пески Алевролиты, песчаники
Кристаллические хемогенного и органогенного происхождения (24 %)	Кристаллизационные	Карбонаты (известняки, доломиты) Сульфаты (ангидриты, гипсы) Галоиды (каменная соль, калийная соль, бишофит)

В скобках показано осредненное содержание рассматриваемых горных пород в разрезах нефтяных и газовых месторождений.

С точки зрения бурения скважин являются следующие геологические характеристики пород: минералогический состав, строение и неоднородность.

Строение горных пород описывается двумя основными признаками – структурой и текстурой.

Структура породы обусловлена размером, формой и характером поверхностей слагающих породу обломков и кристаллитов.

Текстура породы характеризует особенности сложения породы (слоистость, сланцеватость, пористость, трещиноватость).

Важнейшими характеристиками строения горных пород являются их пористость и проницаемость. Пористость обусловлена наличием пустот в горной породе и выражается в долях единицы или в процентах от общего объема горной породы:

$$m = V_{пор} / V_{г.п.}, \tag{1.1}$$

где m – пористость; $V_{пор}$ – объем пор; $V_{г.п.}$– объем горной породы. Величина пористости в долях единицы изменяется от нуля до 0,45.

Проницаемость характеризует сообщаемость пор, которая обеспечивает перемещение флюидов в пласте при наличии перепада давления. Перемещение жидкости в пласте описывается формулой Дарси:

$$v = \frac{k}{\eta} \cdot \frac{dP}{dL}, \text{ м/с}, \tag{1.2}$$

где v – скорость движения флюидов по пласту; k – коэффициент проницаемости; η – вязкость флюида; dP/dL – градиент давления в пласте.

Месторождения нефти и газа приурочены к пористым проницаемым горным породам, которые называют *коллекторами*.

В нормативных документах по технологии бурения находит применение обобщенная характеристика строения породы, названная категориями *сплошности*, которая характеризуется способностью пропускать через стенки скважины промывочную жидкость:

первая категория – горная порода пропускает через себя промывочную жидкость вместе со шламом (выбуренными обломками), т. е. поры и трещины в породе стенки скважины имеют достаточно большие размеры;

вторая категория – в горную породу может проникать вся промывочная жидкость, т. е. как дисперсионная среда, так и дисперсная фаза;

третья категория – в породу может проникать только маловязкая дисперсионная среда, например, вода;

четвертая категория – горная порода не пропускает жидкость и не передает гидравлическое давление.

Горные породы в условиях их залегания находятся в сложном напряженном состоянии, обусловленном весом вышележащих пород и тектоническими

процессами в данной геологической области (рисунок 1.1). Совокупность этих напряжений называется *горным давлением*, которое характеризуется вертикальной составляющей – *геостатическим давлением* – и горизонтальной составляющей – *боковым давлением:*

$$p_г = \rho g z; \tag{1.3}$$

$$p_б = \lambda\, p_г, \tag{1.4}$$

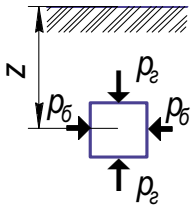


Рисунок 1.1 – Компоненты горного давления

где ρ – плотность горных пород (ρ = 1900…3000 кг/м^3); g – ускорение силы тяжести; λ – коэффициент бокового распора, зависящий от упругих свойств горной породы и ее вязкости; z – глубина залегания горной породы.

Поры, каверны и трещины горных пород заполнены жидкостями или газами, для которых используется общее понятие – флюиды.

Флюиды в горных породах также находятся под давлением, называемым пластовым. Для описания давлений широко используется понятие *относительного давления*, равного отношению действующего давления к давлению столба воды на той же глубине. Например, относительное пластовое давление $p_п'$ равно:

$$p_п' = p_п / p_в, \tag{1.5}$$

где $p_п$ и $p_в$ – пластовое давление и давление столба воды на глубине залегания пласта. Величину $p_п'$ нередко называют индексом давления, а также коэффициентом аномальности, что одно и то же.

Аномалии давления. В среднем пластовое давление изменяется по гидростатическому закону. Но если величина $p_п' < 0{,}8$, то говорят, что в пласте имеет место аномально низкое пластовое давление (АНПД), а если $p_п' > 1{,}2$ – аномально высокое пластовое давление (АВПД). Соответственно, если относительное давление лежит в пределах от 0,8 до 1,2, то такое давление считают нормальным.

Наличие этих давлений оказывает существенное влияние на сопротивление горных пород разрушению породоразрушающими инструментами и на всю технологию бурения скважин.

1.2. Структурные модели осадочных горных пород

Осадочные горные породы двухкомпонентные системы – скелет горной породы (твердая часть) и пластовый флюид в порах породы. В механике грунтов горные породы рассматриваются как зернистые системы, погруженные в жидкость (рисунок 1.2, а).

Зернистая модель характерна для обломочных несцементированных горных пород с точечным контактом обломков друг с другом. Обломки горной

породы *1* находятся во флюиде *2* и теряют часть своего веса в соответствии с законом Архимеда.

Действие закона Архимеда возможно, если имеет место как горизонтальная, так и вертикальная проницаемость горных пород на всю глубину. При бурении такие условия выполняются только для поверхностных отложений.

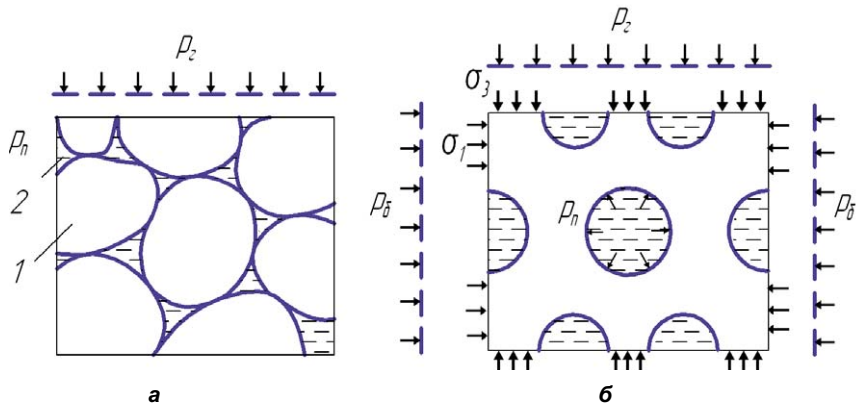


Рисунок 1.2 – Схемы зернистой (а) и дырчатой (б) моделей горной породы

Горные породы представлены как проницаемыми, так и непроницаемыми отложениями. С увеличением глубины уменьшается пористость горных пород, обломочные, особенно глинистые горные породы уплотняются, растет степень их сцементированности. Поэтому допущение о точечном контакте обломков пород с увеличением глубины становится неприемлемым.

Дырчатая модель пористой горной (рисунок 1.2, *б*). Согласно этой модели не структурные элементы горной породы погружены во флюиды, а флюиды находятся внутри горной породы.

Напряжения в скелете дырчатой горной породы. На выделенный элемент горной породы действует геостатическое давление. Если бы все $p_г$ воспринималось скелетом породы, то напряжение σ_3 было бы максимальным:

$$\sigma_{3max} = p_г / c, \tag{1.6}$$

где c – доля единичной площади, занятая скелетом в рассматриваемом сечении. Однако флюид, находящийся в порах, воспринимает на себя часть давления, равного $p_п(1 - c)$. Следовательно, вертикальные напряжения σ_3 в скелете

$$\sigma_3 = \frac{p_г - p_п(1-c)}{c} = \sigma_{max} - \frac{p_п(1-c)}{c} = p_п + \frac{p_г - p_п}{c}. \tag{1.7}$$

Из формулы (4.37) следует, что по мере увеличения пластового давления наблюдается уменьшение вертикальных напряжений в скелете. Если $p_n = p_г$, то $\sigma_3 = p_г$.

Нетрудно показать, что для дырчатой модели горизонтальные напряжения σ_1 в скелете равны

$$\sigma_1 = \lambda p_г + p_n(1 - c)(1 - \lambda). \qquad (1.8)$$

Очевидно, что доля скелета должна существенно зависеть от пористости горной породы. Для установления вида зависимости доли скелета от пористости в расчетном сечении авторами были проанализированы результаты испытаний горных пород на гидроразрыв, на основании которых для песчано-глинистых пород предложена следующая формула

$$c = \exp(-19{,}2\, m^2), \qquad (1.9)$$

где m – пористость горной породы в долях единицы.

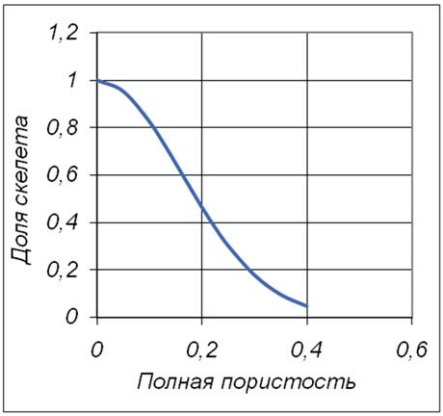
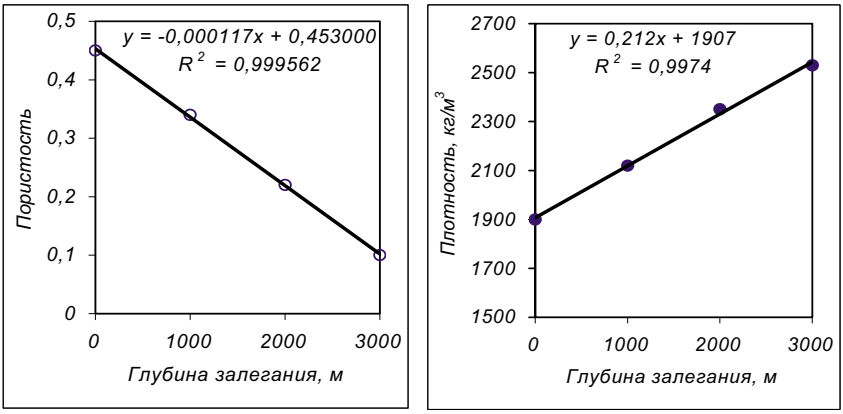


Рисунок 1.3 – Зависимость c от m в расчетном сечении горной породы

График зависимости (1.9) приведен на рисунке 1.3, из которого видно, что при нулевой пористости $c = 1$, а при увеличении пористости доля скелета быстро уменьшается и асимптотически приближается к нулю

Уплотнение пород по мере увеличения глубины их залегания характерно для всех подгрупп горных пород. Но особенно оно велико у глинистых горных пород. По мере уплотнения снижается пористость пород и растет их плотность (рисунок 1.4).

Из рисунка 1.4 видно, что по мере увеличения глубины залегания пористость глин монотонно уменьшается (в рассматриваем случае в 4,5 раза), а плотность глины растет. Уравнения регрессии глубины залегания на названные показатели приведены на самих графиках. Такое уплотнение является нормальным и характерно для случаев, когда пластовое давление изменяется монотонно. При наличии в отдельных пластах аномального пластового давления приводит к нарушению этих закономерностей. Например, при АВПД степень уплотнения горной породы будет существенно ниже, чем при нормальном давлении. Это явление используется на практике для прогнозирования АВПД в ниже лежащих пористых проницаемых горных породах, вскрытие которых скважиной без обеспечения соответствующего противодавления со стороны скважины может привести к притоку в скважину пластового флюида и даже к ее открытому фонтанированию.



а *б*

Рисунок 1.4 – Зависимости пористости (*а*) и плотности (*б*) глин от глубины их залегания в Притеречном прогибе (по данным Ю. А. Мельникова)

1.3. Геостатическая температура горных пород. Многолетнемерзлые породы

На территории России широко распространены мерзлые горные породы. В зависимости от того, как долго они находятся в мерзлом состоянии, различают сезонно-мерзлые (месяцы) и многолетнемерзлые горные породы (годы, сотни и тысячи лет). В северных и северо-восточных районах России многолетнемерзлые породы имеют сплошное распространение, и их толщина измеряется сотнями метров, а температура достигает –7…–12 °С.

Температура горных пород определяется двумя источниками: теплом, получаемым от Солнца, и тепловым потоком, идущим из недр Земли.

Солнечное тепло проникает на глубину 8…30 м. Ниже этой границы температура горных пород в рассматриваемой точке практически постоянна, что позволяет говорить о геостатической температуре. С увеличением глубины температура горных пород возрастает со средним градиентом 0,03 °С/м. Геотермический градиент зависит от геологического строения региона и теплофизических свойств горных пород и для разных районов Земли меняется в широких пределах. На больших глубинах температура горных пород может достигать значительных величин. Например, температура на западном склоне среднего Урала на глубине 15 км составляет около 200 °С, в Прикаспийской впадине на глубине 12…14 км – до 300 °С, а на Курильских островах на глубине 15 км – до 600 °С. Многолетнемерзлые горные породы могут быть как кристаллические, так и обломочные. Кристаллические породы при отрицательных температурах мало изменяют свои свойства. Наоборот, обломочные водонасыщенные рыхлые и

слабосцементированные породы при замерзании и оттаивании резко изменяют свои свойства. При замерзании такие породы цементируются льдом и отличаются существенной прочностью ($\sigma_{сж}$ до 2,5 МПа) и непроницаемостью, а при оттаивании они переходят в разжиженное состояние.

Мерзлые горные породы имеют особую текстуру (рисунок 1.5): массивную (рисунок 1.5, *а*), когда вся вода в порах находится в виде льда-цемента; слоистую (1.5, *б*), когда ледяные включения входят в состав породы в виде параллельных льдообразных слоев; сетчатую (рисунок 1.5, *в*), когда ледяные включения образуют пространственную сетку.

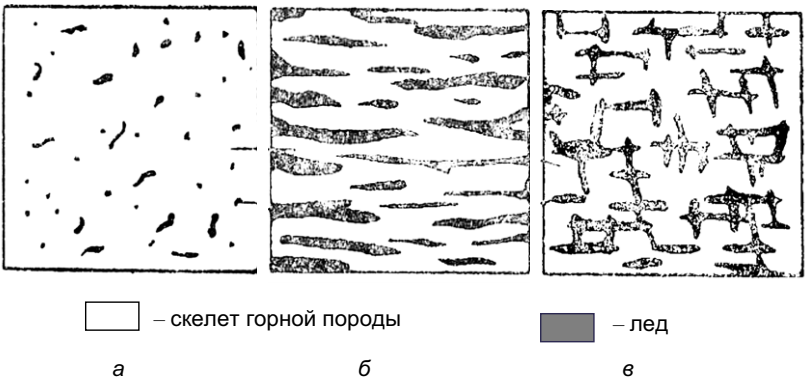


Рисунок 1.5 – Текстуры мерзлых горных пород (по В. Е. Копылову):
а – массивная; *б* – слоистая; *в* – сетчатая

В мерзлых горных породах не вся вода замерзает даже при значительных отрицательных температурах. Соотношение льда и воды существенно влияет на физико-механические свойства мерзлых пород. Если свободная вода кристаллизуется в порах при температуре около 0 °С, то капиллярная вода – при температуре –6…–18 °С, а физически связанная вода – при температуре –75…–80 °С. Поэтому прочность мерзлых песчаных пород значительно выше, чем прочность мерзлых глинистых пород.

Тема 2

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Свойства горных пород, которые проявляются в механических процессах (при деформировании, разрушении и изнашивании) называются механическими. Стандартными методами изучения механических свойств горных пород являются одноосное сжатие и статическое вдавливание цилиндрического штампа с плоским основанием.

2.1. Испытания горных пород при одноосном сжатии

Испытания горных пород при одноосном сжатии является одним из основных методов. Этот метод регламентирован международным стандартом, принятым Международным бюро по механике горных пород.

Схема испытания горной породы при одноосном сжатии на прессе приведена на рисунке 2.1, *а.*

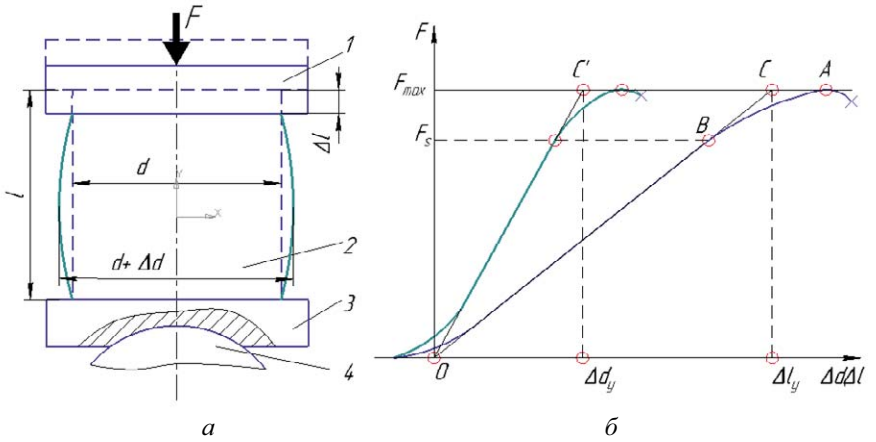


Рисунок 2.1 – Схема испытания горной породы при одноосном сжатии (*а*) и графики зависимостей *F* от Δ*d* и Δ*l* (*б*)

Испытание горной породы при одноосном сжатии проводят на цилиндрических образцах *2* диаметром 40–50 мм, с отношением длины образца *l* к его диаметру *d*, близким к единице. Торцы образца должен быть плоскопараллельными и шлифованными. Образец установлен между верхней *1* и нижней *3* плитой пресса. Одна из плит должна быть на шаровой опоре *4*.

При одноосном сжатии имеет место простое напряженное состояние:

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

где σ_1, σ_2 и σ_3 – компоненты главных нормальных напряжений. Перед началом испытания при $F = 0$ на графике проводится горизонтальная прямая, которая в последующем станет осью абсцисс. Нагружение образца проводится со скоростью 0,5÷1,0 МПа/с до момента его разрушения (раздавливания). В процессе испытания проводится запись величин нагрузки F, а также продольного Δl и поперечного Δd изменения размеров образца. Типичный вид графиков приведен на рисунке 2.1, *б*.

При обработке графиков вначале определяется начало координат. Для этого по наиболее крутому линейному участку графика проводится вспомогательная прямая *OC* или *OC'*, пересечение которых с осью абсцисс соответствует началу координат (точка 0).

Показатели свойств. По величине максимальной нагрузки F_{max} (точка A) и площади S начального поперечного сечения образца горной породы определяют предел прочности $\sigma_{сж}$ на одноосное сжатие:

$$\sigma_{сж} = F_{max}/S, \tag{2.1}$$

где $S = \dfrac{\pi}{4} d^2 = 0{,}785 d^2$.

Измерения упругого изменения длины Δl_y и диаметра Δd_y образца горной породы, как показано на рисунке 2.1, б, позволяют определить основные показатели упругих свойств горной породы: модуль упругости горной породы при одноосном сжатии (модуль Юнга) $E_{сж}$ и модуль поперечной деформации $\mu_{сж}$ (коэффициент Пуассона):

$$E_{сж} = \frac{F_{max} \cdot l}{S \cdot \Delta l_y}; \tag{2.2}$$

$$\mu_{сж} = \frac{\Delta d_y \cdot l}{d \cdot \Delta l_y}, \tag{2.3}$$

где l и d – начальные длина и диаметр образца горной породы.

Для некоторых горных пород, например для глин и каменной соли, может быть определен предел текучести σ_s на одноосное сжатие:

$$\sigma_s = F_s/S, \tag{2.4}$$

где F_s – нагрузка на образец породы, соответствующая началу потери прямой пропорциональности между нагрузкой и деформацией (точка B). Для большин-

ства горных пород различие между величинами F_{max} и F_s не выходит за пределы разброса измеряемых величин. В этих случаях принимают $\sigma_s \approx \sigma_{сж}$.

Единая классификация горных пород по величине прочности на одноосное сжатие отсутствует. Применительно к породоразрушающим инструментам Международной ассоциацией буровых подрядчиков (МАБП) предложена классификация, приведенная в таблице 2.1. Из таблицы видно, что горные породы по прочности разделены на шесть групп. Для нефтяных месторождений характерны горные породы первых пяти групп. Американская размерность *kpsi* (килофунты, деленные на квадратный дюйм) переведена в Мегапаскали (МПа).

В соответствии с этой классификацией изготавливают и кодируют породоразрушающие инструменты зарубежные фирмы (code IADC). Подробно коды будут рассмотрены при описании породоразрушающих инструментов.

Таблица 2.1

Классификация МАБП горных пород по показателю прочности на одноосное сжатие

Название групп горных пород		$\sigma_{сж}$, *kpsi*	$\sigma_{сж}$, *МПа*	*Прочность в кодах МАБП*
Английское	*Перевод*			
Very soft	Очень слабые	до 10	до 70	до 4
Soft	Слабые	>10...24	>70...165	>4…9
Medium	Средние	>24...32	>165...220	>9…12
Hard	Прочные	>32...42	>220...290	>12…16
Very hard	Очень прочные	>42...50	>290...345	>16…19
Super hard	Супер прочные	>50	>345	>19

Неравномерное всестороннее сжатие характерно тем, что хотя бы одно главное напряжение не равно двум другим, а все главные напряжения σ_1, σ_2 и σ_3 не равны нулю. Выше было показано, что горные породы в естественных условиях находятся в условиях неравномерного всестороннего сжатия, обусловленного действием геостатического и бокового давлений, величины которых растут с увеличением глубины залегания пород (см. формулы (1.3) и (1.4)). Обобщенной характеристикой напряженного состояния в условиях залегания горных пород является среднее нормальное напряжение σ_0, равное

$$\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 = p_г(1 + 2\lambda)/3,$$

где σ_1, σ_2 и σ_3 – главные нормальные напряжения.

Испытания горных пород в условиях всестороннего сжатия показали:

1) хрупкие горные породы в условиях простого напряженного состояния могут становятся пластично-хрупкими в условиях всестороннего сжатия;

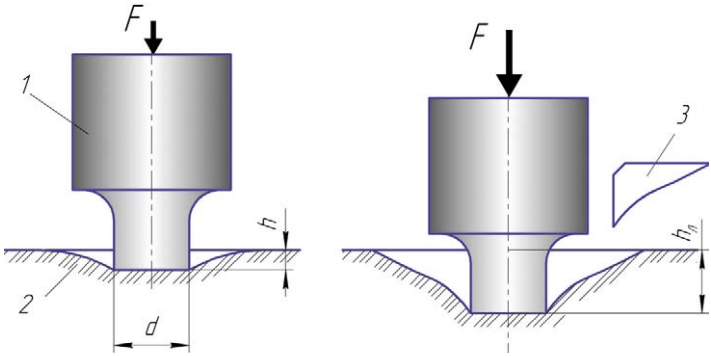
2) предел текучести и предел прочности горных пород растут по мере увеличения среднего нормального напряжения, характеризующего уровень всестороннего сжатия;
3) энергоемкость разрушения горной породы также растает по мере увеличения среднего нормального напряжения.

2.2. Метод статического вдавливания штампа с плоским основанием

Твердость – местное сопротивление поверхности твердого тела проникновению (вдавливанию) в него другого более твердого тела.

Твердость материалов измеряется при вдавливании в их поверхность острого конуса, сферы, пирамиды или штампа. Все вдавливаемые инструменты называют *индентором*. При вдавливании под индентором имеет место сложное напряженное состояние, при котором все компоненты главных напряжений не равны нулю.

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 упруго-пластичных тел задается нагрузка, а измеряется площадь или глубина полученного под индентором отпечатка, то для горных пород, как тел хрупких, следует задать площадь контакта и измерять нагрузку на индентор, под действием которой происходят деформирование и разрушение твердого тела.



а *б*

а – упругое вдавливание; *б* – хрупкое разрушение горной породы в конце вдавливания;
1 – штамп; 2 – горная порода; 3 – обломок горной породы

Рисунок 2.2 – Схема деформирования и разрушения горной породы при вдавливании штампа

Наиболее удобной геометрической формой индентора является цилиндрический штамп с плоским основанием (рисунок 2.2). В настоящее время используются штампы диаметром d от 1,5 до 5 мм. Метод вдавливания штампа позволяет не только определять твердость горных пород, но и оценивать их упругие и пластические характеристики на небольших образцах и на кернах, извлекаемых в процессе бурения скважин с различных глубин залегания без их разрушения.

Для определения показателей механических свойств горных пород методом вдавливания штампа необходимы образцы пород высотой 30…50 мм и диаметром 40…60 мм. Эти образцы должны иметь две плоско-параллельные шлифованные поверхности.

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 нагрузке не произойдет хрупкое разрушение породы под штампом или не будет достигнута величина внедрения равная радиусу штампа.

Обработка результатов испытаний. Горные породы по характеру зависимости нагрузки F на штамп от глубины h его внедрения делятся на три класса: *I* – хрупкие (рисунок 2.3, *а*), *II* – пластично-хрупкие (рисунок 2.3, *б*) и *III* – высокопластичные и сильнопористые (рисунок 2.3, *в*).

По результатам испытания рассчитываются два прочностных показателя: твердость по штампу и предел текучести горной породы; один показатель упругих свойств – модуль упругости по штампу и один энергетический показатель – энергоемкость разрушения горной породы при вдавливании штампа.

При деформировании хрупких горных пород вплоть до момента хрупкого разрушения соблюдается закон Гука (рисунок 2.3, *а*). По наибольшей нагрузке F_{max} определяется *твердость породы* по штампу $p_ш$:

$$p_ш = \frac{F_{max}}{S}, \tag{2.5}$$

где S – площадь штампа ($S = 0{,}785d^2$); d – диаметр штампа (см. рисунок 2.2, *а*).

Для пластичных и пластично-хрупких пород (рисунки 2.3, *б, в*), помимо твердости, определяется *предел текучести* породы по штампу p_0:

$$p_0 = F_0/S. \tag{2.6}$$

До точки F_0 имеет место только упругая деформация, а при дальнейшем нагружении к упругой деформации прибавляется пластическая, что и обусловливает искривление графика зависимости F от h.

Для характеристики упругих свойств горных пород определяется модуль деформации (упругости) по штамму *C:*

$$C = \frac{F_0}{d \cdot h_0}, \tag{2.7}$$

где h_0 – величина упругого прогиба породы, соответствующая нагрузке F_0.

Важной характеристикой механических свойств горных пород является удельная объемная работа разрушения A_V, которая определяется делением общей работы A, затраченной на разрушение, на объем лунки V, образовавшейся при разрушении, т. е.

$$A_V = A/V. \tag{2.8}$$

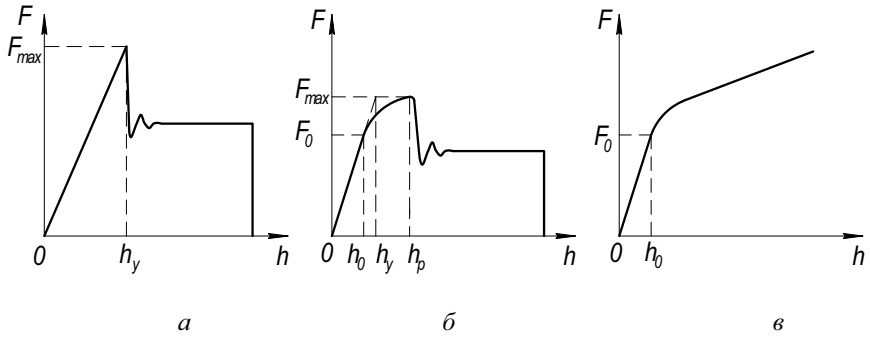


Рисунок 2.3 – Типовые зависимости F от h для хрупких (*а*), пластично-хрупких (*б*) и высоко-пластичных (*в*) горных пород

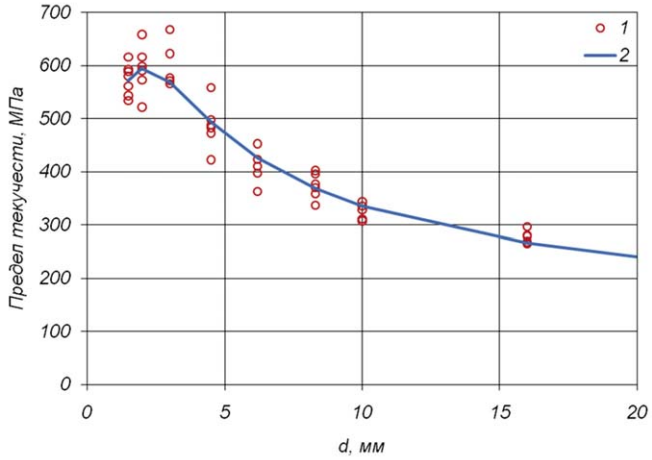


Рисунок 2.4 – Зависимость p_0 от d при испытании мрамора

Кроме названных показателей, по зависимостям F от h можно определить коэффициент пластичности породы при вдавливании. Определение всех показателей будет проведено при выполнении лабораторной работы. Недостатком метода определения твердости горных пород методом вдавливания штампа