

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»
Кафедра строительства подземных сооружений и шахт

Составитель
А. В. Дементьев

ГЕОМЕХАНИКА

Методические указания к практическим занятиям

Рекомендовано учебно-методической комиссией
специальности 21.05.04 Горное дело
в качестве электронного издания
для использования в образовательном процессе

Кемерово 2021

Рецензент:

Будников П. М. – доцент кафедры строительства подземных сооружений и шахт.

Дементьев Андрей Валерьевич

Геомеханика : методические указания к практическим занятиям для обучающихся специальности 21.05.04 Горное дело, специализация / направленность (профиль) Шахтное и подземное строительство, и специальности 21.05.05 Физические процессы горного или нефтегазового производства, специализация / направленность (профиль) Физические процессы горного производства / сост. А. В. Дементьев ; Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, Каф. стр-ва подзем. сооружений и шахт. – Кемерово, 2021. – 40 с. – Текст : электронный.

Включает цели и задачи, теоретические основы и рабочие формулы, приведены примеры решения задач с подробными пояснениями, приведен перечень типовых задач для самостоятельной работы.

© Кузбасский государственный
технический университет
имени Т. Ф. Горбачева, 2021

© Дементьев А. В.,
составление, 2021

Предисловие

Настоящий практикум предназначен для использования на практических занятиях по курсу «Геомеханика». Структура практикума и последовательность изложения соответствуют программе курса для высших учебных заведений и в полной мере отражает требования новых нормативных документов горного дела.

Практикум предназначен для студентов горных специальностей. Он содержит расчеты параметров геомеханических процессов, протекающих в земной коре в естественных условиях залегания и под воздействием подземных и открытых горных работ. Практические занятия охватывают все разделы дисциплины и расположены в такой же последовательности, в какой изучается программный материал. В практикуме приведены примеры решения задач, что позволит студентам приобрести навыки принятия инженерных решений, максимально приближенных к практике, а также практикум дополняет лекционный материал, способствует его прочному закреплению и развитию творческой активности студентов. Для обеспечения решения практических задач методические указания содержат примеры расчета.

Цели и задачи

В дисциплине «Геомеханика» изучаются механические свойства массива горных пород и обусловленные ими явления и процессы, происходящие в породах при ведении горных работ, добыче и переработке полезных ископаемых.

Основной целью изучения дисциплины является усвоение студентами сущности механических свойств горных пород, их количественной и качественной оценки, зависимости от состава и строения, влияния на них внешних физических полей, а также способов учета и использования свойств горных пород или проектировании, планировании горнотехнических операций и ведения горных работ.

После изучения дисциплины «Геомеханика» студенты должны овладеть следующими знаниями и умениями.

Студенты должны знать:

– определения, размерности, наиболее вероятные численные значения всех важнейших физико-технических параметров горных пород;

– физическую сущность процессов, происходящих в горных породах и массивах при воздействии на них горными механизмами или физическими полями;

– тенденции и перспективные пути развития горнодобывающей промышленности с учетом максимального использования достижений физически в горном деле;

– роль и приоритет Российских ученых и Российской науки в области исследования физики горных пород и физических процессов горного производства.

Студенты должны уметь:

– определять основные физико-технические параметры пород в лабораторных и натуральных условиях (плотностные, прочностные, акустические, горно-технологические);

– применять данные о свойствах пород для обоснования технологии разработки полезных ископаемых для выбора соответствующего горного оборудования, режимов его работы и оптимальных параметров;

– ориентироваться в научно-технической литературе по геомеханике.

Основная задача практических занятий состоит в закреплении студентами теоретических знаний, полученных при слушании лекций и самостоятельном изучении курса, и приобрести некоторые навыки исследований механических свойств горных пород и закономерности геомеханических процессов в массивах вокруг сооружений, выработок под влиянием горно-строительных и эксплуатационных работ.

Тема 1. Плотностные свойства горных пород

Теоретические основы и рабочие формулы

Основными плотностными свойствами горных пород являются плотность, объемная масса, удельный вес, объемный вес и пористость. Они характеризуют вес, массу и пустоты пород.

Удельной массой ρ_0 горной породы называется масса m единицы объема V_T твердой фазы породы, т. е.

$$\rho_0 = \frac{m}{V_T}. \quad (1.1)$$

Плотностью ρ горной породы называется масса m единицы объема V породы в ее естественном состоянии, т. е.

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (1.2)$$

Удельным весом γ_0 горной породы называется вес G единицы объема V_T твердой массы породы

$$\gamma_0 = \frac{G}{V_T}. \quad (1.3)$$

Связь между удельным весом γ_0 и плотностью ρ_0 горной породы выражается формулой

$$\gamma_0 = g\rho_0, \quad (1.4)$$

где g – ускорение силы тяжести, м/с^2 .

Для решения горнотехнических задач можно принять $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. Объемным весом γ горной породы называется вес G единицы объема породы в естественном состоянии

$$\gamma = \frac{G}{V}. \quad (1.5)$$

Объемный вес γ и плотность ρ породы связаны зависимостью

$$\gamma = g\rho. \quad (1.6)$$

Под пористостью горной породы понимают объем всех пор (пустот) в породе. Величина пористости породы оценивается относительным объемным содержанием пор P , выражаемым обычно в процентах

$$P = \frac{V_{\text{п}}}{V} \cdot 100, \quad (1.7)$$

где $V_{\text{п}}$ – объем пор в породе, м^3 ; V – объем породы, м^3 .

Величина пористости P горных пород чаще всего определяется по формуле

$$P = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0}, \quad (1.8)$$

где ρ_0 и ρ – соответственно удельная масса и плотность породы, кг/м³.

Для решения многих горнотехнических задач необходимо знать насыпную объемную массу породы и коэффициент разрыхления породы. Насыпной плотностью горной породы называется масса единицы объема разрыхленной породы

$$\rho_n = \frac{m}{V_p}, \quad (1.9)$$

где ρ_n – насыпная плотность породы, кг/м³; m – масса породы, кг; V_p – объем разрыхленной породы, м³.

Коэффициент разрыхления характеризует увеличение объема породы в результате ее разрушения (разрыхления) и определяется из выражения

$$K_p = \frac{V_p}{V}, \quad (1.10)$$

где V_p – объем разрыхленной породы, м³; V – объем той же породы в плотном (не разрыхленном) состоянии, м³.

Следовательно,

$$\rho_n = \frac{m}{V_p} = \frac{m}{K_p V} = \frac{\rho}{K_p}. \quad (1.11)$$

Коэффициент разрыхления угля находится в основном в пределах 1,2–1,5, осадочных пород типа песчаников, алевролитов и аргиллитов 1,4–2,2, метаморфических и магматических пород 1,8–2,5.

Примеры решения задач

Задача 1.1

Забой лавы длиной 127 м, высотой 1,8 м за сутки подвигается на 4,8 м. Плотность и пористость вынимаемого угля, определенные в

лабораторных условиях, составили соответственно 1200 кг/м^3 и $5,1 \%$.
 Определить: удельную массу, объемный и удельный вес, насыпную плотность вынимаемого угля; количество вагонеток объемом $3,3 \text{ м}^3$, необходимых для вывоза суточной добычи угля из лавы.

Решение

1. Определяем удельную массу угля по формуле

$$\rho_0 = \rho + (\rho \cdot 0,051),$$

где $0,051$ – содержание пор в 1 м^3 угля в долях

$$\rho = 1200 + 1200 \cdot 0,051 = 1261,2 \text{ г/м}^3.$$

2. По формуле (1.6) определяем объемный вес угля

$$\gamma = \rho g;$$

$$\gamma = 9,8 \cdot 1200 = 11760 \text{ Н/м}^3.$$

3. По формуле (1.4) определяем удельный вес угля

$$\gamma_0 = 9,8 \cdot 1261,2 = 12359,76 \text{ Н/м}^3.$$

4. По формуле (1.11) определяем насыпную плотность угля

$$\rho_n = 1200 \cdot 1,5 = 800 \text{ кг/м}^3,$$

где $1,5$ – коэффициент разрыхления угля.

5. Определяем количество вагонеток, необходимых для вывоза угля из лавы. Для этого сначала определяем объем вынимаемого угля за сутки в массиве

$$V = 127 \cdot 1,8 \cdot 4,8 = 1097,28 \text{ м}^3.$$

6. Далее определяем объем вынимаемого угля за сутки в разрыхленном состоянии

$$V_p = 1097,28 \cdot 1,5 = 1645,92 \text{ м}^3.$$

И наконец, определяем количество вагонеток, необходимых для вывоза угля из лавы

$$N_{\text{ваг}} = \frac{1645,92}{3,3} = 498,76 \approx 499 \text{ шт.}$$

Задача 1.2

Произвести подсчет объемов вскрышных работ при устройстве карьера. План площадки представлен на рисунке 1.1. Размеры дна котлована 40×120 м, проектная абсолютная отметка дна котлована 136,0 м. Удельная масса выемочных вскрышных пород 2020 кг/м³, пористость 3 %. Определить: плотность, удельный и объемный вес, насыпную плотность выемочных пород; количество рейсов самосвалов объемом кузова 139 м³, грузоподъемностью 360 т.

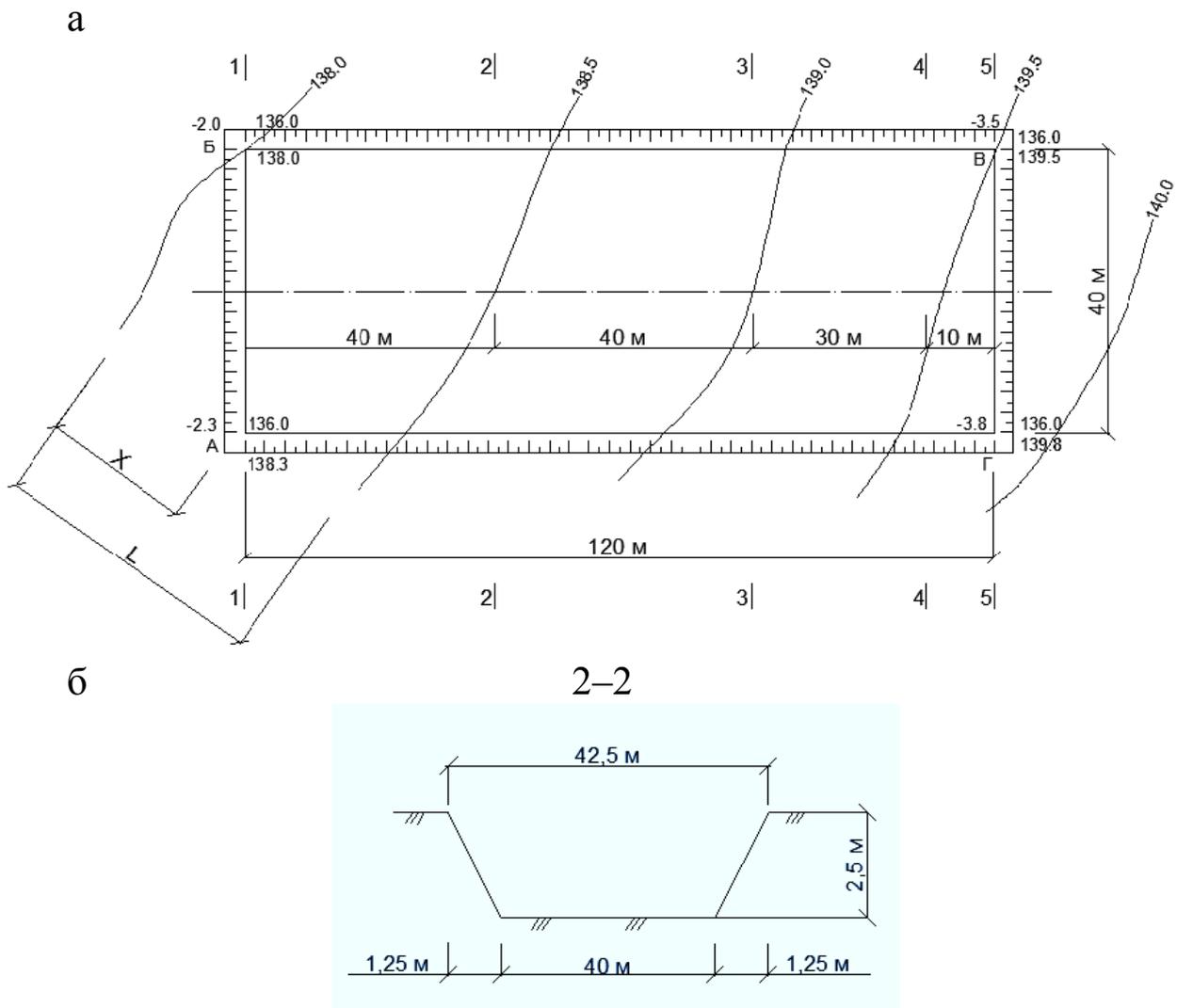


Рисунок 1.1 – План площадки: а – план котлована; б – сечение 2–2

Решение

1. Определяем черные отметки в углах котлована методом интерполяции между двумя горизонталями по формуле

$$H_{\text{ч}} = \Gamma_1 + \frac{(\Gamma_2 - \Gamma_1)X}{L},$$

где Γ_1, Γ_2 – отметки горизонталей, м; L – расстояние между горизонталями по прямой, проходящей через искомую точку, м; X – расстояние от горизонтали с меньшей отметкой до искомой точки, м.

Измерения выполняют по рис. 1.1.

Черные отметки в точках Б и В равны абсолютным отметкам горизонталей:

$$H_{\text{ч}}^{\text{Б}} = 138,0 \text{ м};$$

$$H_{\text{ч}}^{\text{В}} = 139,5 \text{ м}.$$

Черные отметки в точках А и Г рассчитываются по формулам

$$H_{\text{ч}}^{\text{А}} = 138 + \frac{(138,5 - 138) \cdot 50}{90} = 138,3 \text{ м};$$

$$H_{\text{ч}}^{\text{Г}} = 139,5 + \frac{(140 - 139,5) \cdot 1,5}{25} = 139,8 \text{ м}.$$

2. Определяем относительные или проектные отметки дна котлована по формуле

$$h = H_{\text{дн}} - H_{\text{ч}},$$

где $H_{\text{дн}}$ – абсолютная отметка дна котлована;

$$h_{\text{А}} = 136,0 - 138,3 = 2,3 \text{ м}; \quad h_{\text{Б}} = 136,0 - 138,0 = 2,0 \text{ м};$$

$$h_{\text{В}} = 136,0 - 139,5 = 3,5 \text{ м}; \quad h_{\text{Г}} = 136,0 - 139,8 = 3,8 \text{ м}.$$

3. Определяем угол естественного откоса котлована.

Откос закладывается с учетом требований нормативных документов. Коэффициент откоса для суглинка при высоте выемки до 3 м принимаем равным 0,5, а при высоте до 5 м 0,75.

Заложение откосов определяется по формуле

$$a = m h,$$

где m – коэффициент откоса; h – высота выемки, м;

$$\begin{aligned} a_A &= 0,5 \cdot 2,3 = 1,15 \text{ м}; & a_B &= 0,5 \cdot 2 = 1,00 \text{ м}; \\ a_B &= 0,75 \cdot 3,5 = 2,62 \text{ м}; & a_\Gamma &= 0,75 \cdot 3,8 = 2,85 \text{ м}. \end{aligned}$$

4. Определяем объемы вскрышных работ.

Данная операция производится по методу поперечных сечений. Поперечные сечения выполняются по нижним основаниям откосов в местах пересечения центральной оси котлована с горизонталями (рисунок 1.1). Объем грунта между сечениями определяется по формуле

$$V = F_{\text{ср}} l,$$

где l – расстояние между сечениями, м; $F_{\text{ср}}$ – средняя площадь между сечениями, м².

Площадь сечения определяется по формуле

$$F = (B + mh) h',$$

где B – ширина котлована по дну, м.

Подсчет ведется в табличной форме (таблица 1.1).

$$V_B = \frac{0,75^2 \cdot 3,5^3}{3} = 8,0 \text{ м}^3; \quad V_\Gamma = \frac{0,75^2 \cdot 3,8^3}{3} = 10,2 \text{ м}^3.$$

Объем боковых откосов определяется по формуле

$$V = \frac{m l}{6} (h_1^2 + h_1 h_2 + h_2^2),$$

где l – длина откоса, м; h_1, h_2 – рабочие отметки в углах котлована, м.

$$\begin{aligned} V_{AB} &= \frac{0,5 \cdot 40}{6} \cdot (2,0^2 + 2,0 \cdot 2,3 + 2,3^2) = 46,3 \text{ м}^3; \\ V_{B\Gamma} &= \frac{0,63 \cdot 40}{6} \cdot (3,5^2 + 3,5 \cdot 3,8 + 3,8^2) = 178,6 \text{ м}^3. \end{aligned}$$

Таблица 1.1 – Ведомость подсчета объема котлована

Сечение	Высота сечения h , м	Площадь сечения, m^2 , $F = (B + mh)h'$	Средняя площадь, m^2 , $F_{cp} = \frac{F_1 + F_2}{2}$	Расстояние между сечениями l , м	Объем грунта, m^3 , $V = F_{cp}l$
1–1	2,15	$(40 + 0,5 \cdot 2,15)2,15 = 88,3$	–	–	–
2–2	2,5	$(40 + 0,5 \cdot 2,15)2,5 = 103,1$	$\frac{88,3 + 103,1}{2} = 95,7$	40	$95,7 \cdot 40 = 3828$
3–3	3,0	$(40 + 0,5 \cdot 3,0)3,0 = 88,3$	$\frac{103,1 + 124,5}{2} = 113,8$	40	$113,8 \cdot 40 = 4552$
4–4	3,5	$(40 + 0,5 \cdot 3,5)3,0 = 149,2$	$\frac{124,5 + 149,2}{2} = 136,9$	30	$136,9 \cdot 30 = 4107$
5–5	3,65	$(40 + 0,5 \cdot 3,65)3,0 = 156,0$	$\frac{149,2 + 156,0}{2} = 152,6$	10	$152,6 \cdot 10 = 1526$
Итого					14013

Итого с учетом откосов, объем вскрышных работ составит

$$V_{\text{вскр}} = 14013 + 1,0 + 0,7 + 8,0 + 10,2 + 46,3 + 178,6 = 14257,8 \text{ м}^3.$$

Плотность вынимаемых вскрышных пород определяем по формуле

$$\rho = \rho_0 - \rho_0 \cdot 0,03 = 2020 - 2020 \cdot 0,03 = 1959,4 \text{ кг/м}^3.$$

По формуле (1.4) определяем удельный вес вынимаемых вскрышных пород

$$\gamma_0 = 9,8 \cdot 2020 = 19796,0 \text{ Н/м}^3.$$

По формуле (1.6) определяем объемный вес вынимаемых вскрышных пород

$$\gamma = 9,8 \cdot 1959,4 = 19202,12 \text{ Н/м}^3.$$

По формуле (1.11) определяем насыпную плотность вынимаемых вскрышных пород

$$\rho_{\text{н}} = 1959,4 \cdot 1,8 = 1088,56 \text{ кг/м}^3,$$

где 1,8 – коэффициент разрыхления вынимаемых пород.

5. Определяем количество рейсов самосвалов, необходимых для вывоза вскрышных пород. Для этого сначала определяем количество рейсов самосвалов по объему их кузова

$$N_{\text{рейсов}} = \frac{1425,7,8 \cdot 1,8}{139} \approx 185 \text{ рейсов.}$$

После этого проверяем, соответствует ли масса груза полного груженого самосвала его грузоподъемности

$$m = \rho_{\text{н}} V_{\text{куз}},$$

где m – масса груза полностью груженого самосвала; $V_{\text{куз}}$ – объем его кузова;

$$m = 1088,56 \cdot 139 = 151309,84 \text{ кг},$$

то есть масса вскрышных пород в кузове полностью груженого самосвала 151,3 тонн при его грузоподъемности 360 т. Следовательно, количество рейсов самосвалов окончательно принимаем 185 рейсов.

Задача 1.3

Проводиться полевой штрек сечением в проходке 20 м^2 , длиной 900 м по песчаникам, насыпанная объемная масса (насыпная плотность) которых равна 1400 кг/м^3 , общая пористость 4,5 %.

Определить: 1) массу и вес породы, подлежащей выемке; 2) плотность, удельную массу, удельный и объемный вес породы; 3) количество вагонеток вместимостью кузовов 5 м^3 , необходимое для вывоза породы.

Задача 1.4

Удельный вес угля разрабатываемого пласта равен 15000 Н/м^3 , объемный вес 13800 Н/м^3 , коэффициент разрыхления угля 1,4.

Определить: 1) плотность, удельную массу, насыпную плотность угля; 2) общую пористость угля.

Задача 1.5

Бригада рабочих из 12 человек за 3 смены произвела выемку магнетитовой руды из камеры размером $4 \times 12 \times 20 \text{ м}$. Добываемая руда содержит 54 % магнетита плотностью 5300 кг/м^3 и 46 % кварца и прочих минералов плотностью 2720 кг/м^3 . Пористость магнетитовой руды 3,5 %.

Определить: 1) производительность одного рабочего на выход; 2) объемную массу и насыпную объемную массу; 3) количество магнетита, которое можно получить из добытой руды при 97 % извлечения металла; 4) количество вагонеток вместимостью 5 м^3 для транспортировки руды из камеры и грузоподъемность вагонетки.

Задача 1.6

Длина лавы 120 м, мощность пласта 1,8 м, суточное подвигание забоя 5 м, плотность угля 1400 кг/м^3 , общая пористость 6,5 %.

Определить: 1) удельную массу и насыпную объемную массу угля; 2) суточную добычу угля из лавы; 3) количество вагонеток вместимостью $3,3 \text{ м}^3$, необходимое для вывоза угля.

Задача 1.7

Объем вскрышных пород в массиве 10 тыс. м^3 , средняя плотность их 2350 кг/м^3 , общая пористость $2,1 \%$. После разрушения пород буровзрывным способом объем их увеличился на 6000 м^3 .

Определить: 1) коэффициент разрыхления пород; 2) плотность, насыпную объемную массу, удельный и объемный вес пород; 3) количество самосвалов грузоподъемностью 40 тонн , вместимостью кузова 30 м^3 .

Задача 1.8

Определить общую пористость, коэффициент разрыхления, удельный и объемный вес породы (каменного угля) плотностью 1450 кг/м^3 , объемной массой 1300 кг/м^3 и насыпной объемной массой 920 кг/м^3 .

Задача 1.9

За сутки разработано открытым способом 10 тыс. м^3 каменного угля в массиве. Плотность угля 1400 кг/м^3 , пористость $8,5 \%$.

Определить: 1) объемную массу угля; 2) объемную насыпную массу угля; 3) удельный и объемный вес угля; 4) количество рейсов самосвалов для вывоза угля вместимостью 180 м^3 , грузоподъемностью 200 тонн .

Задача 1.10

В результате выполнения буровзрывных работ забой квершлага продвинулся на $1,4 \text{ м}$, площадь поперечного сечения его в проходке 12 м^2 , плотность пересекаемых пород 2650 кг/м^3 , пористость 7% .

Определить: 1) количество вагонеток вместимостью кузовов $3,3 \text{ м}^3$, необходимым для вывоза породы, 2) удельную массу, насыпную плотность, удельный и объемный вес угля.

Задача 1.11

Графиком организации работ предусмотрено за смену выполнить 3 цикла с использованием проходческого комбайна. Площадь

поперечного сечения выработки 18 м^2 , продвижение забоя за цикл $0,7 \text{ м}$, плотность вынимаемых пород $\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$. Определить массу вынутой горной породы и количество вагонеток вместимостью кузовов $3,3 \text{ м}^3$, необходимых для вывоза ее из забоя.

Задача 1.12

При производстве вскрышных работ по устройству устьев наклонных стволов необходимо выкопать котлован с размерами дна $60 \times 145 \text{ м}$. План котлована представлен на рисунке 1.2. Абсолютная проектная отметка дна котлована $124,0 \text{ м}$. Удельная масса вынимаемых пород 1950 кг/м^3 , пористость $7,5 \%$.

Определить: плотность, удельный и объемный вес, насыпную плотность, количество рейсов самосвалов, объем кузова 124 м^3 и грузоподъемностью 295 тонн, необходимых для транспортирования вынимаемого грунта.

Тема 2. Прочностные свойства горных пород

Теоретические основы и рабочие формулы

Прочность – это способность горной породы сопротивляться действию сил, стремящихся вызвать ее разрушение. Порода перестает быть прочной, если в ней нарушаются внутренние связи и происходит разрушение.

Прочность породы определяется величиной критических напряжений, при которых происходит разрушение породы. Эти напряжения называются пределами прочности. Различают пределы прочности пород при сжатии $\sigma_{сж}$, растяжении σ_p , сдвиге $\tau_{сд}$, изгибе $\sigma_{изг}$ и т. д. Единица измерения прочности в системе СИ – Па (паскаль), кПа (килопаскаль), МПа (мегапаскаль).

Прочность цементированных пород в первую очередь определяется прочностью цемента (матрицы), а не заполнителя.

Горные породы хорошо выдерживают напряжения сжатия и очень плохо растяжения. Пределы прочности при растяжении для большинства пород в 8–30 раз меньше, чем при сжатии. Для горных пород характерна зависимость $\sigma_{сж} > \sigma_{изг} > \sigma_p$.

Прочность твердых горных пород в условиях одноосного напряженного состояния определяется обычно на специально изготовленных образцах цилиндрической или кубической формы.

Предел прочности горных пород при одноосном сжатии рассчитывают по формуле

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{S}, \quad (2.1)$$

где P – разрушающая сила, Н; S – площадь поперечного сечения образца, m^2 .

Предел прочности горных пород при одноосном растяжении может быть определен по формуле

$$\sigma_p = \frac{P_0}{S}, \quad (2.2)$$

где P_0 – сила разрыва образца, Н; S – площадь поперечного сечения образца, m^2 .

Предел прочности горных пород на одноосное растяжение вычисляют по формуле

$$\sigma_p = \frac{2P_0}{\pi dh} = 0,64 \frac{P_0}{dh}, \quad (2.3)$$

где P_0 – сила разрушения (раскола) образца, Н; d – ширина плоскости раскола по диаметру образца, м; h – высота плоскости раскола (высота образца), м.

Применительно к горным породам средней крепости наибольшее распространение получила теория прочности Мора, основанная на зависимости между касательными и нормальными напряжениями в каждой точке тела, находящегося в объемном напряженном состоянии (рисунок 2.1). Согласно этой теории $\tau = f(\sigma)$ в любой точке тела в объемном напряженном состоянии.

Основное положение теории прочности Мора заключается в том, что разрушение тела обусловлено не отдельно касательными или нормальными напряжениями, а совместным их действием. Довольно часто пользуются графической интерпретацией теории прочности Мора, которая очень наглядна и дает возможность оценить критическое напряженное состояние материала.

На графике σ , τ можно изобразить предельные круги, соответствующие напряженному состоянию одноосного сжатия и растяжения, чистого сдвига, а также условиям более сложных напряженных состояний материала.

На рисунке 2.1 приведены наиболее характерные предельные круги напряжений Мора и их огибающая. Из него видно, что разрушение породы происходит под действием касательных напряжений τ , которые являются функцией нормальных напряжений σ , или растягивающих напряжений σ_p .

Для решения практических задач огибающая Мора может быть представлена в виде прямой линии (на некотором участке вблизи оси ординат), описываемой уравнением

$$\tau = \tau_1 + \sigma \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.4)$$

где τ – максимальные касательные напряжения, вызывающие сдвиг (разрушение) породы; τ_1 – предел прочности породы при срезе (чистом сдвиге) в условиях отсутствия нормальных напряжений, назы-

ваемый сцеплением породы; σ – нормальные напряжения, действующие на площадках сдвига (поверхностях разрушения) породы; φ – угол внутреннего трения ($\operatorname{tg}\varphi = f$ – коэффициент внутреннего трения) породы.

Выражение (2.4) называют уравнением прочности связанной горной породы. Оно характеризует предельное состояние породы при разрушении.

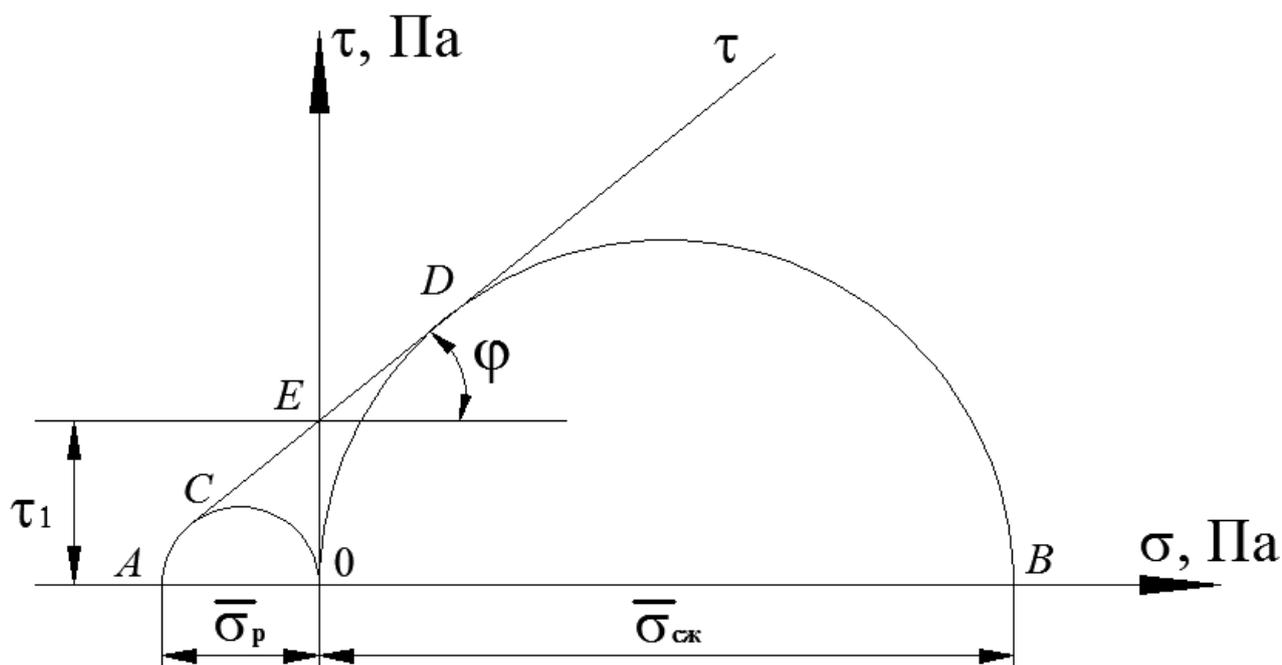


Рисунок 2.1 – Паспорт прочности исследуемой горной породы

Пример решения задач

Задача 2.1

Для проектирования строительства полевого штрека из массива на заданной глубине, путем выбуривания кернов, взято и изготовлено 8 образцов правильной формы с размерами $d = h = 5,1$ см.

Для определения прочности пород в бортах выработки 4 образца испытали на сжатие. Получили следующие результаты $F_{сж} = 150$ кН; 161 кН; 164 кН; 146 кН. Для определения прочности пород в почве и кровле выработки 4 образца испытали на растяжение. Получили следующие результаты $F_p = 14$ кН; 12кН; 16,5 кН; 17 кН. Построить паспорт прочности исследуемой породы. Выполнить математический анализ полученных результатов.

Решение

1. Определяем пределы прочности пород на сжатие образцов породы по формуле

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{F_{\text{сж}}}{S},$$

где $F_{\text{сж}}$ – разрушающая сила образцов при сжатии, Н; S – площадь образца, на которую действует данная сила, м².

В конкретном случае сжимающая сила действует на окружность образца.

Площадь образца определяем по формуле

$$S = \frac{\pi d^2}{4},$$

$$S = \frac{(3,14 \cdot 0,051^2)}{4} = 0,002 \text{ м}^2;$$

$$\sigma_{\text{сж}1} = \frac{150000}{0,002} = 75 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{сж}2} = \frac{161000}{0,002} = 80,5 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{сж}3} = \frac{164000}{0,002} = 82 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{сж}4} = \frac{146000}{0,002} = 73 \text{ МПа}.$$

2. Определяем пределы прочности пород на растяжение по формуле

$$\sigma_{\text{р}} = 0,64 \frac{F_{\text{р}}}{dh},$$

где $F_{\text{р}}$ – разрушающая сила образцов при растяжении;

$$\sigma_{\text{р}1} = 0,64 \frac{14000}{0,051^2} = 4,48 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{p2} = 0,64 \frac{12000}{0,051^2} = 3,84 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{p3} = 0,64 \frac{16500}{0,051^2} = 5,3 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{p4} = 0,64 \frac{17000}{0,051^2} = 5,4 \text{ МПа}.$$

3. Определяем средние арифметические значения пределов прочности на сжатие и растяжение:

$$\bar{\sigma}_{сж} = \frac{75 + 80,5 + 82 + 73}{4} = 77,6 \text{ МПа};$$

$$\bar{\sigma}_p = \frac{4,48 + 3,84 + 5,3 + 5,4}{4} = 4,7 \text{ МПа}.$$

4. Определяем значения среднеквадратического отклонения на сжатие и растяжение по формуле

$$\sigma' = \sqrt{\frac{\sum \sigma_i^2}{n-1}},$$

где σ_i – отклонение i -го результата измерений от среднего арифметического значения; n – число измерений;

$$\sigma' = \sqrt{7,05} = 2,66 \text{ МПа};$$

$$\sigma' = \sqrt{0,54} = 0,73 \text{ МПа}.$$

5. Определяем ошибку средней квадратической величины по формуле

$$S_{\bar{\sigma}} = \frac{\sigma'}{\sqrt{n}};$$

$$S_{\bar{\sigma}_{\text{сж}}} = \frac{2,66}{\sqrt{4}} = 1,33 \text{ МПа};$$

$$S_{\bar{\sigma}_{\text{р}}} = \frac{0,73}{\sqrt{4}} = 0,36 \text{ МПа}.$$

6. Определяем коэффициент вариации по формуле

$$K_{\text{в}} = \frac{S_{\bar{\sigma}}}{\sigma'} 100 \%;$$

$$K_{\text{в сж}} = \frac{S_{\bar{\sigma}_{\text{сж}}}}{\sigma'_{\text{сж}}} 100 \% = 50 \%;$$

$$K_{\text{в р}} = \frac{S_{\bar{\sigma}_{\text{р}}}}{\sigma'_{\text{р}}} 100 \% = 49,3 \%.$$

7. Определяем доверительный интервал, т. е. предельную погрешность среднего значения пределов прочности при сжатии и растяжении по формуле

$$\Delta\sigma_{\text{сж}} = \frac{t_{\alpha} S_{\bar{\sigma}}}{\sqrt{n}},$$

где t_{α} – коэффициент Стьюдента, выбираемый из таблицы [3];

$$\Delta\sigma_{\text{сж}} = \frac{1,3 \cdot 1,33}{\sqrt{4}} = 0,86 \text{ МПа};$$

$$\Delta\sigma_{\text{р}} = \frac{1,3 \cdot 0,36}{\sqrt{4}} = 0,2 \text{ МПа}.$$

Полученные результаты записываем в виде

$$A_{\sigma_{\text{сж}}} = \bar{\sigma} \pm \Delta\sigma;$$

$$A_{\sigma_{\text{сж}}} = [72,74 - 78,46];$$

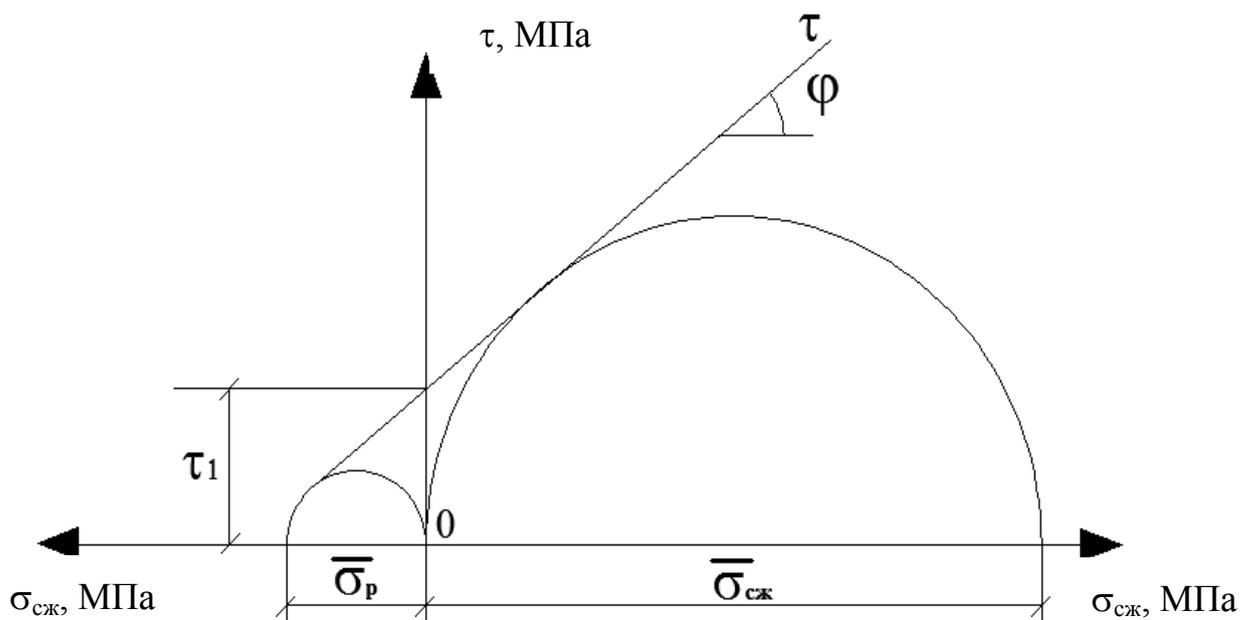
$$A_{\sigma_{\text{р}}} = [4,5 - 4,9].$$

8. Сравниваем значения, полученные при определении пределов прочности на сжатие и растяжение с границами доверительных интервалов. Значения, не входящие в границы, удаляем из дальнейших операций. По оставшимся полученным значениям строим паспорт прочности исследуемого массива:

$$A_{\bar{\sigma}_{сж}} = \frac{75 + 73}{2} = 74 \text{ МПа};$$

$$A_{\bar{\sigma}_p} = 4,48 \text{ МПа}.$$

9. Для построения паспорта прочности выбираем масштаб
1 см ÷ 10 МПа



Из построенного в масштабе графического выражения паспорта прочности находим: τ_1 – предел прочности при чистом сдвиге; φ – угол внутреннего трения; τ – максимальное касательное напряжение.

Максимальное касательное напряжение, значение которого и является паспортом прочности, определяем по формуле

$$\tau = \tau_1 + \sigma_{сж} \operatorname{tg} \varphi,$$

$$\tau = 14 + 74 \operatorname{tg} 42 = 80,62 \text{ МПа}.$$

10. Определяем коэффициент крепости по шкале проф. М. М. Протодьяконова по формуле

$$f = \frac{\sigma_{сж} \text{ (МПа)}}{10} = \frac{\sigma_{сж} \text{ (кПа)}}{100} = \frac{\sigma_{сж} \text{ (Па)}}{1000}.$$

11. Определяем коэффициент внутреннего трения по формуле

$$f = \operatorname{tg} \varphi = 0,9.$$

Задача 2.2

При испытании на прессе образцов горной породы правильной цилиндрической формы, были получены данные, приведенные в таблице 2.1. Первые 6 образцов испытывали на одноосное сжатие, вторые 6 – на одноосное растяжение путем раздавливания их по образующей.

Таблица 2.1.

Данные испытания при сжатии						Данные испытания при растяжении							
Номер образца	Диаметр образца $d \cdot 10^3$, м	Варианты разрушающей силы, кН					Диаметр образца $d \cdot 10^3$, м	Высота h , м	Варианты разрушающей силы, кг·с				
		1	2	3	4	5			1	2	3	4	5
1	45	147	151	150	153	149	45	51	1479	1475	1480	1483	1485
2	42	140	139	142	144	146	42	52	1089	1085	1090	1093	1095
3	46	156	158	159	163	163	46	53	1429	1425	1430	1433	1435
4	48	160	158	161	165	157	48	50	1649	1645	1650	1653	1655
5	50	162	160	164	168	166	50	49	1379	1375	1380	1383	1385
6	52	140	146	144	142	148	52	48	1269	1265	1270	1273	1275

Определить: 1) пределы прочности породы при сжатии и растяжении; 2) выполнить математический анализ полученных результатов; 3) построить паспорт прочности и определить из построенного паспорта угол внутреннего трения; коэффициент внутреннего трения; коэффициент крепости по шкале проф. М. М. Протодьяконова; предел прочности при срезе; максимальное касательное напряжение.

Результаты подсчетов прочности образцов рекомендуется свести в таблицу 2.1 в отдельности при сжатии и при растяжении.

Тема 3. Реологические свойства горных пород

Теоретические основы и рабочие формулы

Наука, изучающая изменение механических свойств твердых тел при длительном воздействии нагрузок, называется реологией.

Основными реологическими явлениями являются ползучесть и релаксация напряжений в материале (горной породе). В результате этих явлений может существенно снижаться прочность горных пород (материалов).

Явление, обратное ползучести, называется релаксацией напряжений. Оно характеризуется постепенным снижением напряжений в породе (материале) при постоянной ее деформации.

Период релаксации большинства горных пород очень велик (100–1000 лет). Поэтому на практике для характеристики реологических свойств пород при меньшей длительности нагружения часто используют относительный показатель падения напряжений в породе R' , %, за определенный период t :

$$R' = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \cdot 100 \%, \quad (3.1)$$

где $\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma_i$; σ_0 – исходная прочность (первоначальная или мгновенная); σ_i – длительная прочность. Длительная прочность стабилизируется при заданной нагрузке и асимптотически приближается к некоторой постоянной величине, называемой пределом длительной прочности и обозначается σ_∞ .

По данным экспериментов:

$\frac{\sigma_{\infty \text{ сж}}}{\sigma_{0 \text{ сж}}} \approx 0,9 - 0,95$ – для очень прочных, преимущественно магматических пород;

$\frac{\sigma_{\infty \text{ сж}}}{\sigma_{0 \text{ сж}}} \approx 0,6 - 0,8$ – для пород средней прочности;

$\frac{\sigma_{\infty \text{ сж}}}{\sigma_{0 \text{ сж}}} \approx 0,1 - 0,4$ – для пород слабых и очень слабых.

Методы определения пластических и реологических свойств горных пород заключаются в нагружении их под прессом с различной нагрузкой и измерении деформаций с помощью индикаторов часового типа, датчиков различных конструкций, фиксации изменения напряжений в них с течением времени. Реже данные свойства горных пород определяют непосредственно в натуральных условиях.

Под ползучестью понимают постепенный рост деформации породы во времени при постоянном напряжении. На рисунке 3.1 представлена типичная кривая ползучести горных пород. Релаксацией называется постепенное снижение напряжений в породе во времени при постоянной ее деформации. На рисунке 3.2 – кривая релаксации напряжений в породах. Длительная прочность – это прочность, которую сохраняет порода через тот или иной промежуток времени действия на нее нагрузки, т. е. это прочность, которая соответствует той или иной длительности воздействия нагрузки.

Длительная прочность породы с увеличением времени действия нагрузки снижается по определенной кривой, асимптотически приближаясь к некоторому предельному значению, называемому пределом длительной прочности σ_{∞} (рисунок 3.1).

Участок ОА (рисунок 3.1) соответствует начальной условно-мгновенной деформации. В зависимости от величины приложенного напряжения она может быть как упругой, так и частично пластической, т. е. необратимой, обусловленной сдвижением частиц, и переориентацией, частичным нарушением жестких связей.

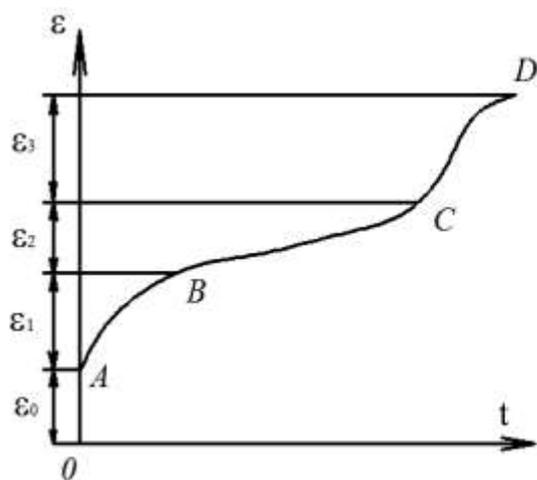


Рисунок 3.1 – Кривая ползучести горных пород

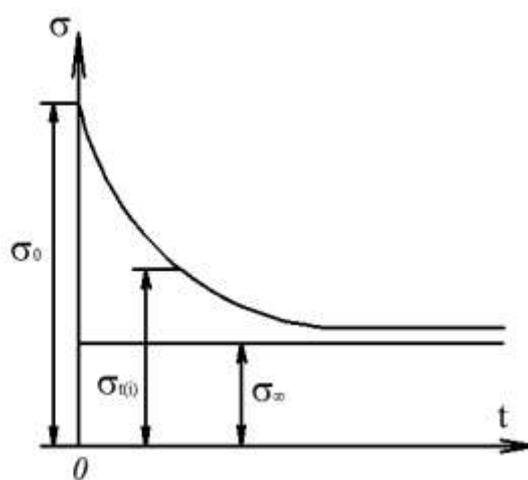


Рисунок 3.2 – Кривая релаксации напряжений в горных породах

Участок АВ соответствует стадии неустановившейся или затухающей ползучести. Скорость ползучести на данном участке переменная, она постепенно уменьшается до некоторого постоянного значения. Для ползучести породы в этой стадии также характерны как упругая, так и необратимая деформации.

Участок ВС соответствует стадии установившейся ползучести или ползучести с постоянной скоростью. Эта стадия характеризуется разрушением структурных связей, и поэтому деформации при разгрузке не восстанавливаются.

Участок СД характеризуется увеличением скорости деформирования, что связано с интенсификацией процесса разрушения, появлением трещин и, наконец, полным разрушением. Этот участок соответствует стадии прогрессирующего течения. Полная деформация ε_{Π} ползучести горной породы равна

$$\varepsilon_{\Pi} = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3. \quad (3.2)$$

Процесс снижения напряжений в горных породах, в особенности в прочных и очень прочных, весьма длителен. Время, в течение которого напряжения в теле убывают в e раз ($e = 2,72$ – основание натурального логарифма), называется периодом релаксации. Период релаксации большинства пород очень велик. Поэтому на практике для характеристики релаксации часто используют относительный показатель падения напряжения в породе R за определенный период времени

$$R = \frac{\sigma_0 - \sigma_t}{\sigma_0} 100 \%, \quad (3.3)$$

где σ_0 – напряжение в испытуемом образце в момент приложения нагрузки; σ_t – напряжение в образце по истечении определенного промежутка времени действия нагрузки, т. е. длительная прочность.

$$\Pi = \frac{n_{\text{сут}}(\sigma_0 - \frac{\sigma_0}{l})}{\sigma_0 - \sigma_t}, \quad (3.4)$$

где $n_{\text{сут}}$ – продолжительность испытания образца под нагрузкой, сут; σ_0 – нагрузка, действующая на образец в начале испытания, Па; σ_t – нагрузка, действующая на образец в конце испытания, Па.

Примеры решения задач

Задача 3.1

Для определения реологических свойств пород, в которых собираются проводить полевой штрек, из массива произвели отбор керна цилиндрической формы. Из керна сделали образец диаметром 5,2 см, высотой 7,4 см. По исходным данным объемного веса пород, лежащих над штреком и глубины залегания штрека давление на 1 м² площади выработки составило 238 тонн. Известно, что за время испытания образца (15 дней) напряжение в образце снизилось на 0,4 МПа.

Определить период релаксации и относительный показатель падения напряжения образца.

Решение

1. Определяем нагрузку на образец в начале испытания:

$$S_{\text{образца}} = \frac{\pi d^2}{4},$$

$$S_{\text{образца}} = \frac{3,14 \cdot 0,052^2}{4} = 0,021 \text{ м}^2;$$

$$1 \text{ м}^2 - 238 \text{ тонн};$$

$$0,021 \text{ м}^2 - F_0 \text{ тонн};$$

$$F_0 = 0,021 \cdot 238 = 4,9 \text{ тонн}.$$

2. Определяем напряжение в образце в начале испытания по формуле

$$\sigma_0 = \frac{F_0}{S},$$

где F_0 – нагрузка, заданная на образец в начале испытания образца, Н;

$$\sigma_0 = \frac{49000}{0,021} = 2,3 \text{ МПа}.$$

3. Определяем напряжение в образце в конце испытания образца

$$\sigma_t = \sigma_0 - \Delta\sigma,$$

где $\Delta\sigma$ – падение напряжения за период испытания образца, Па;

$$\sigma_t = 2,3 - 0,4 = 1,9 \text{ МПа.}$$

4. Определяем относительный показатель падения напряжения в образце за время его испытания по формуле

$$R = \frac{\sigma_0 - \sigma_t}{\sigma_0} \cdot 100\%;$$

$$R = \frac{2,3 - 1,9}{2,3} \cdot 100\% = 0,2\%.$$

5. Определяем период релаксации исследуемого массива пород по формуле

$$П = \frac{n_{\text{сут}}(\sigma_0 - \frac{\sigma_0}{l})}{\sigma_0};$$

$$П = \frac{15 \cdot (2,3 - \frac{2,3}{2,72})}{2,3 - 1,9} = 54,4 \text{ сут.}$$

Задача 3.2

Диаметр образца 4,7 см, нагрузка, прикладываемая к образцу в начале опыта составила 4720 кгс, относительный показатель падения составил 6,3 %, период релаксации 1370 дней.

Найти продолжительность испытания образца и напряжение оставшееся в образце в конце опыта.

Задача 3.3

В момент приложения нагрузки к образцу горной породы диаметром 57 мм в нем возникли напряжения, равные $5,5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$. Повторный замер напряжений через 42 дня показал уменьшение по сравнению с первоначальным на 4 МПа.

Определить период релаксации данной породы и относительный показатель падения напряжения в породе.

Задача 3.4

В момент приложения нагрузки к образцу породы диаметром 54 мм в нем возникли напряжения 95 МПа. Произведя замер напряжения в образце через 30 дней, в условиях постоянной деформации, установили их уменьшение на 8 МПа.

Определить относительный показатель падения напряжений в породе за этот период времени и период релаксации.

Задача 3.5

В момент нагружения образца горной породы в нем возникли напряжения, равные 85 МПа. Через 50 суток выдерживания образца в условиях постоянной деформации напряжение в нем уменьшилось на 9 МПа.

Определить: 1) период релаксации напряжения в породе; 2) относительный показатель падения напряжения в породе.

Задача 3.6

В момент нагружения образца алевролита в нем возникли напряжения, равные 76 МПа. Через 60 суток выдерживания образца в условиях постоянной деформации напряжение в нем уменьшилось на 12 МПа.

Определить: 1) период релаксации напряжения в алевролите; 2) относительный показатель падения напряжения в алевролите.

Задача 3.7

В момент нагружения образца горной породы в нем возникли напряжения, равные 86 МПа. Через 50 суток выдерживания образца в условиях постоянной деформации напряжение в нем уменьшилось на 7 МПа.

Определить: 1) период релаксации в породе напряжений; 2) относительный показатель падения напряжения в породе.

Тема 4. Акустические и упругие свойства горных пород

Теоретические основы и рабочие формулы

Воздействие на горные породы знакопеременных нагрузок вызовет в них знакопеременные деформации, в результате чего возникнет волновой процесс распространения упругих деформаций, другими словами упругие колебания. Так как упругие волны представляют собой распространение в веществе деформаций, то в зависимости от их вида выделяют волны различных типов: продольные, поперечные, поверхностные, изгибные, крутильные и др.

Деформации попеременного объемного сжатия и растяжения обуславливают распространение в веществе продольных упругих колебаний. Продольные волны распространяются в любой среде в газах, жидкостях и твердых телах. Распространение поперечных деформаций сдвига в среде вызывает поперечные упругие волны. Последние присущи только твердым телам, ибо в жидкостях и газах сопротивление сдвигу отсутствует.

Основными акустическими параметрами горных пород являются: скорости распространения продольных v_p , поперечных v_s и поверхностных v_l упругих волн, коэффициент поглощения θ и удельное волновое сопротивление Z . Породы характеризуются также коэффициентами отражения K_o и преломления $K_{пр}$ упругих волн.

Каждый тип волн распространяется в телах с определенной скоростью, зависящей от свойств среды.

Скорость распространения продольной упругой волны v_p в неограниченном массиве определяется величиной упругости пород, их плотностью и коэффициентом Пуассона:

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (4.1)$$

где E – модуль упругости, Па; ν – коэффициент Пуассона; ρ – плотность породы, кг/м³.

Скорость распространения поперечной (сдвиговой) упругой волны в породах определяется из выражения

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}, \quad (4.2)$$

где G – модуль сдвига, Па.

Скорость распространения поверхностной волны

$$v_l = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \sqrt{\frac{G}{\rho}}. \quad (4.3)$$

Породы обладают сопротивлением распространению в них упругих волн, которое оценивается удельным волновым сопротивлением. Удельное волновое сопротивление пород Z рассчитывается по формуле

$$Z = v_p \rho. \quad (4.4)$$

Волновое сопротивление пород определяет их способность отражать и преломлять упругие волны.

Самым надежным способом получения поперечных волн до настоящего времени является иммерсионный метод, заключающийся в помещении системы «исследуемый образец – преобразователи» в жидкую среду. При исследовании пород иммерсионным методом возможно с одной установки образца определить скорости распространения как продольных, так и поперечных волн, пользуясь пьезопреобразователями, излучающими продольную волну.

В качестве иммерсионной жидкости используется дистиллированная вода, скорость ультразвуковых волн в которой равна приблизительно 1500 м/с. Скорости распространения продольной и поперечной волн могут быть получены из выражений:

$$v_p = \frac{v_{ж}}{\sin i_1}; \quad v_s = \frac{v_{ж}}{\sin i_2}, \quad (4.5)$$

где $v_{ж}$ – скорость распространения ультразвуковой волны в дистиллированной воде ($v_{ж} = 1500$ м/с); i_1 и i_2 – первый и второй критический углы.

Значения v_p и v_s позволяют определить коэффициент Пуассона исследуемой породы

$$\nu = \frac{2 - \left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2}{2 \left[1 - \left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2\right]}. \quad (4.6)$$

Модуль упругости и модуль сдвига определяются по формулам:

$$G = \rho v_s^2; \quad E = 2G(1 + \nu). \quad (4.7)$$

С удалением волны от источников колебаний наблюдается уменьшение энергии волны. Потери энергии волной связаны с преодолением вязких сил сцепления между частицами, с механизмами теплового рассеяния и с механическим рассеянием при отражении волн от поверхностей трещин, зерен и др. Ослабление первоначальной энергии волн учитывается коэффициентом поглощения волн θ .

Чаще всего потери энергии волн в породах оценивают по величине амплитуды излученного и принятого сигналов, а коэффициент поглощения θ (зачастую его называют амплитудным коэффициентом затухания) определяют по формуле

$$\theta = \left(\frac{1}{x_2 - x_1} \right) \ln \frac{A_1}{A_2}, \quad (4.8)$$

где x_1 и x_2 – точки отсчета амплитуд в среде; A_1 и A_2 – значения амплитуд в точках x_1 и x_2 .

Для горных пород коэффициент поглощения определяют на двух образцах разной толщины, изготовленных из одного куска горной породы, по первым вступлениям упругих волн на экране осциллографа:

$$\theta = \left(\frac{1}{l_2 - l_1} \right) \ln \frac{A_1}{A_2}, \quad (4.9)$$

где l_1 и l_2 – толщина первого и второго испытываемых образцов, соответственно, м; A_1 и A_2 – амплитуды первого вступления волны соответственно в первом и втором образцах, м.

Примеры решения задач

Задача 4.1

Для определения структурно-текстурных особенностей массива на образцах, взятых из него, провели испытания на определение плотностных и акустических свойств. Получились следующие ре-

зультаты испытаний: насыпная плотность руды 1980 кг/м^3 ; скорость распространения продольной упругой волны 5300 м/с . Скорость распространения продольной упругой волны определяли иммерсионным методом. Следовательно, второй критический угол отражения упругой волны от образца породы, находящегося в дистиллированной воде, составляет 45° .

Определить коэффициент Пуассона, модуль Юнга, удельное волновое сопротивление исследуемой руды.

Решение

1. Определяем плотность исследуемой руды, выразив ее через формулу определения насыпной плотности по формуле

$$\rho_n = \frac{\rho}{K_p};$$

$$\rho = \rho_n K_p = 1980 \cdot 2 = 3960 \text{ кг/м}^3,$$

где K_p – коэффициент разрыхления руды, принимаемый равным 2.

2. Определяем удельное волновое сопротивление руды по формуле

$$Z = v_p \rho = 5300 \cdot 3960 = 21 \cdot 10^6 \text{ кг/с} \cdot \text{м}^2.$$

3. Определяем скорость поперечной упругой волны руды по формуле

$$v_s = \frac{v_{ж}}{\sin i_2} = \frac{1500}{\sin 45^\circ} = 2143 \text{ м/с}.$$

4. Определяем коэффициент Пуассона руды по формуле

$$\nu = \frac{2 - \left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2}{2 \left[1 - \left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2\right]} = \frac{2 - \left(\frac{5300}{2143}\right)^2}{2 \left[1 - \left(\frac{5300}{2143}\right)^2\right]} = 0,59.$$

5. Определяем модуль Юнга руды по формуле, выраженной через формулу определения скорости поперечной упругой волны:

$$v_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}};$$

$$E = v_S^2 2\rho(1+\nu) = 2143^2 \cdot 2 \cdot 3960 \cdot (1+0,7) = 3 \cdot 10^{10} \text{ Па.}$$

Задача 4.2

Углы полного внутреннего отражения упругих продольных волн в образце горной породы соответственно равны $i_1 = 22^\circ$, $i_2 = 46^\circ$.

Определить: 1) модуль Юнга, сдвига; 2) коэффициент Пуассона данной породы, плотность которой равна 2420 кг/м^3 .

Задача 4.3

Скорость распространения упругой продольной волны в породе плотностью 3000 кг/м^3 составляет 4800 м/с . Угол полного внутреннего отражения поперечной волны равен 48° .

Определить: 1) модуль Юнга, модуль сдвига и коэффициент Пуассона; 2) скорость распространения поверхностной волны.

Задача 4.4

Скорость распространения продольной упругой волны в магнетитовой дуге составляет 4800 м/с , плотность руды 4200 кг/м^3 , угол полного внутреннего отражения поперечной волны 46° .

Определить: модуль Юнга, модуль сдвига и коэффициент Пуассона породы, скорость распространения поперечной и поверхностной волн.

Задача 4.5

Определить углы полного внутреннего отражения продольной и поперечной упругих волн, падающих из дистиллированной воды на породу, имеющую насыпную плотность 2800 кг/м^3 , коэффициент Пуассона $0,27$, а модуль Юнга E связан с пористостью P соотношением $E = 6,3 \cdot (1 - 1,5P)^2 \cdot 10^4 \text{ МПа}$.

Задача 4.6

Определить модуль Юнга, коэффициент Пуассона, удельное волновое сопротивление железной руды, насыпная плотность которой равна 1950 кг/м^3 . Скорость распространения продольной волны была определена иммерсионным методом и составила 5300 м/с , второй критический угол отраженной упругой волны от образца составил 45° .

Задача 4.7

Угол падения упругой волны на контакте двух слоев породы равен 34° , угол преломления 16° . Скорость распространения продольной упругой волны в первом слое 4600 м/с . Насыпная плотность первого слоя 1960 кг/м^3 . Удельная масса второго слоя 2920 кг/м^3 , пористость второго слоя 4% .

Определить: скорость распространения продольной упругой волны во втором слое породы; акустическую жесткость первого и второго слоя породы; коэффициент отражения и преломления упругой волны, проходящей через слои породы.

Тема 5. Структурно-текстурная неоднородность и структурно-текстурное ослабление горных пород

Теоретические основы и формулы

Скорость распространения упругих волн в горных породах в большей мере зависит от их структуры и текстуры. На скорость волн особенно сильное влияние оказывает слоистость, трещиноватость и другие макродефекты строения. Скорость распространения упругих волн V_{\parallel} вдоль слоистости и трещиноватости обычно значительно больше, чем поперек слоистости и трещиноватости пород. Это объясняется тем, что поглощение и распространение упругих волн вдоль слоистости и трещиноватости всегда меньше, чем поперек.

Неодинаковость скоростей упругих волн по различным направлениям горной породы характеризуется коэффициентом K_a анизотропии скоростей волн. Коэффициент анизотропии скорости продольных упругих волн в слоистых и трещиноватых породах определяется обычно из выражения

$$K_a = \frac{V_{p\parallel}}{V_{p\perp}}. \quad (5.1)$$

По коэффициенту анизотропии скоростей распространения продольных упругих волн с довольно высокой надежностью может быть оценена структурно-текстурная неоднородность горных пород, в особенности осадочных. По результатам лабораторных исследований при $K_a \leq 1,05$ породы практически однородны, при $K_a > 1,3-1,4$ весьма неоднородны. Информации об анизотропии скоростей упругих волн в породах, прежде всего за счет слоистости трещиноватости, имеет важное значение для решения различных задач по геомеханике.

Слоистость, трещиноватость, зеркала скольжения и другие поверхности ослабления резко снижают прочность горных пород и устойчивость их в обнажении. Особенно большое структурное ослабление пород вызывают зеркальные поверхности и открытые (зияющие) трещины. За счет макродефектов строения прочность пород снижается в 2–10 и более раз. Снижение прочности горных пород массива за счет различных дефектов оценивается коэффици-

ентом структурно-текстурного (обычно пользуются термином структурного) ослабления пород K_c .

Коэффициент структурного ослабления горных пород массива определяют в лабораторных условиях на образцах, отбираемых при геологоразведочном бурении и ведении горных работ. Так, методом раскалывания образцов цилиндрической формы и в виде пластин с двумя плоскопараллельными гранями любых очертаний при помощи встречно направленных клиньев определяют предел прочности породы при растяжении вдоль и поперек слоев, трещин и других поверхностей ослабления.

Коэффициент структурного ослабления образцов породы рассчитывают по формуле

$$K_c = \frac{\sigma_{p.ос}}{\sigma_{p.м}}, \quad (5.2)$$

где $\sigma_{p.ос}$ и $\sigma_{p.м}$ – предел прочности при раскалывании соответственно в ослабленной и неослабленной (массивной) частях образца.

Предел прочности породы при раскалывании в неослабленной и ослабленной частях образца определяют из выражения

$$\sigma_{p.ос(мм)} = \frac{P}{S}, \quad (5.3)$$

где F – раскалывающая сила, Н; S – площадь раскола образца, м².

В соответствии с [11] расчетное сопротивление пород массива сжатию R_c для определения смещения пород и устойчивости выработок, нагрузок на крепи и для других практических расчетов следует определять по формуле

$$R_c = K_c \sigma_{сж}, \quad (5.4)$$

где $\sigma_{сж}$ – среднее значение сопротивления пород в образце одноосному сжатию, устанавливаемое экспериментально по результатам лабораторных испытаний образцов пород, МПа.

Пример решения задач

Задача 5.1

При комплексном испытании массива пород на прочность из него взяты образцы кернов диаметром 5,1 см. При испытании этих

образцов на прочность на прессе средняя разрушающая сила их составляла 350 кН. Для определения коэффициента структурного ослабления при раскалывании образцов породы вдоль слоистости получили следующие результаты: сила раскола 5 кН, форма раскола – окружность диаметром 5,1 см. При раскалывании образцов поперек слоистости сила раскола 15 кН, форма раскола – прямоугольник со сторонами 3 см и 2 см.

Определить расчетное сопротивление пород на сжатие.

Решение

1. Определяем предел прочности породы при одноосном сжатии по формуле

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{S},$$

где P – сила раскола образца, Н; S – площадь раскола образца, м²;

$$S = \frac{\pi d^2}{4},$$

где d – диаметр образца;

$$S = \frac{3,14 \cdot 0,051^2}{4} = 0,002 \text{ м}^2;$$

$$\sigma_{сж} = \frac{350000}{0,002} = 175 \text{ МПа.}$$

2. Определяем предел прочности образцов при раскалывании по ослабленной части (вдоль слоистости)

$$\sigma_{р.ос} = \frac{P_{р.ос}}{S_{р.ос}},$$

где $P_{р.ос}$ – сила раскола образцов по ослабленной части (вдоль слоистости), Н; $S_{р.ос}$ – площадь раскола образцов по ослабленной части, м²;

$$S = \frac{3,14 \cdot 0,051^2}{4} = 0,002 \text{ м}^2;$$

$$\sigma_{\text{р.ос}} = \frac{5000}{0,002} = 2,5 \text{ МПа.}$$

3. Определяем предел прочности образцов при раскалывании по массивной части (поперек слоев)

$$\sigma_{\text{р.м}} = \frac{P_{\text{р.м}}}{S_{\text{р.м}}},$$

где $P_{\text{р.м}}$ – сила раскола образцов по массивной части (поперек слоев), Н; $S_{\text{р.м}}$ – площадь раскола образцов по массивной части, м^2 ;

$$S = 0,03 \cdot 0,02 = 0,0006 \text{ м}^2;$$

$$\sigma_{\text{р.м}} = \frac{15000}{0,0006} = 25 \text{ МПа.}$$

4. Определяем коэффициент структурного ослабления по формуле

$$K_c = \frac{\sigma_{\text{р.ос}}}{\sigma_{\text{р.м}}} = \frac{2,5}{25} = 0,1.$$

5. Определяем расчетное сопротивление пород исследуемого массива на сжатие по формуле

$$R_c = K_c \sigma_{\text{сж}} = 0,1 \cdot 175 = 17,5 \text{ МПа.}$$

Задача 5.2

На оставшихся образцах из партии, испытываемой на прочность, провели исследования ультразвуковым методом при помощи прямого прозвучивания. При прозвучивании образцов вдоль слоистости получили следующие результаты. Длина прозвучивания образца 2 см,

время прозвучивания 27,5 мкс. При прозвучивании образцов поперек слоистости: длина прозвучивания 6 см, время прозвучивания 10 мкс.

Определить коэффициент анизотропности исследуемого массива.

Решение

1. Определяем скорость продольной упругой волны вдоль слоистости образца по формуле

$$v_{p\Pi} = \frac{L}{t},$$

где L – длина прозвучивания образца, м; t – время прохождения продольной волны, с⁻⁶;

$$v_{p\Pi} = \frac{0,02}{0,0000275} = 7272,7 \text{ м/с}.$$

2. Определяем скорость продольной упругой волны поперек слоистости образца по формуле

$$v_{p\perp} = \frac{L}{t} = \frac{0,06}{0,00001} = 6000 \text{ м/с}.$$

3. Определяем коэффициент анизотропности исследуемого массива по формуле

$$K_a = \frac{v_{p\Pi}}{v_{p\perp}} = \frac{7272,7}{6000} = 1,21.$$

Задача 5.3

При комплексном исследовании прочностных и структурно текстурных особенностей массива были получены следующие результаты (см. таблицу 5.1).

Таблица 5.1 – Результаты исследований прочностных и структурно текстурных особенностей массива

Вариант	Разрушающая сила образца на сжатие $F_{сж}$, кН	Диаметр разрушенного образца на сжатие d , мм	Сила раскола образца вдоль слоев $F_{р.ос}$, кН	Диаметр раскола образца вдоль слоев d , мм	Сила раскола образца поперек слоев $F_{р.м}$, кН	Размеры раскола образца поперек слоев $a \times b$, мм	Длина прозвучивания образца вдоль слоев L , мм	Время прозвучивания образца вдоль слоев t , с ⁻⁶	Длина прозвучивания образца поперек слоев L , мм	Время прозвучивания образца поперек слоев t , с ⁻⁶
1	500	50	5	50	10	35×40	50	15	48	27
2	450	47	6,1	47	12	27×41	47	17	50	21
3	510	45	7,8	45	16	24×31	45	24	45	36
4	370	51	6,5	51	24	37×46	51	16	51	32
5	470	42	10	42	21	24×42	42	18	42	30
6	350	49	16	49	17	29×40	49	12	49	29

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дементьев, А. В. Геомеханика : практикум для студентов специальности 21.05.04 (130400.65) «Горное дело», образовательной программы «Шахтное и подземное строительство», и специальности 21.05.05 (131201.65) «Физические процессы горного или нефтегазового производства», образовательной программы «Физические процессы горного производства» / А. В. Дементьев ; ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева», Каф. стр-ва подзем, сооружений и шахт. – Кемерово : КузГТУ, 2015. – 67 с. – URL: <http://library.kn7.stu.ru/meto.php?п=91272&type=utchposob:common> (дата обращения: 17.06.2020). – Текст : электронный.

2. Геомеханика : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Горное дело» и «Физические процессы горного и нефтегазового производства» / П. В. Егоров [и др.] ; ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева», Каф. разраб. месторождений полез. ископаемых подзем. способом. – 3-е изд., перераб. и доп. – Кемерово : КузГТУ, 2015. – 309 с. – ISBN 9785906805072. – URL: <http://lihrary.kuzstu.ru/meto.php?n=91287&type=utchposob:common>. – Текст : непосредственный + электронный.

3. Дементьев, А. В. Геомеханика : лабораторный практикум для студентов, обучающихся по направлению подготовки (специальности) 21.05.04 «Горное дело», специализации 21.05.04.05 «Шахтное и подземное строительство» и направлению подготовки (специальности) 21.05.05 «Физические процессы горного или нефтегазового производства», специализации 21.05.05.01 «Физические процессы горного производства» / А. В. Дементьев ; ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева», Каф. стр-ва подзем, сооружений и шахт. – Кемерово : КузГТУ, 2015. – 105 с. – URL:

<http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=91292&t.ype=iitichposob:common> (дата обращения: 17.06.2020). – Текст : электронный.

4. Геомеханика : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров «Горное, дело» и по направлению подготовки дипломированных специалистов «Горное дело» / Э. В. Каспарьян [и др.]. – Москва : Высшая школа, 2006. – 503 с. – ISBN 5060054950. – Текст : непосредственный.

5. Певзнер, М. Е. Геомеханика : учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Маркшейдерское дело» направления подготовки дипломированных специалистов «Горное дело» [и аспирантов других горных специальностей] / М. Е. Певзнер, М. А. Иофис, В. Н. Попов. – 2-е изд., стер. – Москва : МГГУ, 2008. – 438 с. – (Высшее горное образование). – ISBN 9785741805282. – URL: <http://www.biblioclub.ru/book/79186/>. – Текст : непосредственный + электронный.