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

Горный институт

Кафедра строительства подземных сооружений и шахт

А. В. Дементьев

ГЕОМЕХАНИКА

Методические указания к практическим работам для студентов очной формы обучения

Рекомендовано учебно-методической комиссией
специальности 21.05.04 «Горное дело»,
специализации 21.05.04.05 «Шахтное и подземное строительство»
в качестве электронного издания
для использования в учебном процессе

Кемерово 2017

Рецензенты:

Копытов А. И. – профессор кафедры строительства подземных сооружений и шахт.

Дементьев Андрей Валерьевич

Геомеханика [Электронной ресурс] : методические указания к практическим работам для студентов специальности 21.05.04 «Горное дело», специализация 21.05.04.05 «Шахтное и подземное строительство», и специальности 21.05.05 «Физические процессы горного или нефтегазового производства», специализация 21.05.05.01 «Физические процессы горного производства», очной формы обучения / А. В. Дементьев; КузГТУ. – Кемерово, 2017. – Систем. требования: Pentium IV; ОЗУ 256 Мб; Windows XP; мышь. – Загл. с экрана.

Приведены примеры выполнения заданий по практическим занятиям, даны теоретические основы и рабочие формулы. Представленный материал позволяет, во время аудиторных занятий, при поддержке преподавателя, изучить методику расчета, а затем самостоятельно выполнить необходимые расчеты по индивидуальному заданию.

© КузГТУ, 2017
© Дементьев А. В.,2017

Предисловие

Данные методические указания предназначены для использования на практических занятиях по дисциплине «Геомеханика» для студентов специальности 21.05.04 «Горное дело», специализация 21.05.04.05 «Шахтное и подземное строительство», и специальности 21.05.05 «Физические процессы горного или нефтегазового производства», специализация 21.05.05.01 «Физические процессы горного производства». Структура практикума и последовательность изложения соответствуют программе курса для высших учебных заведений и в полной мере отражает требования представленных в ФГОС.

Данные методические указания выполнены в виде индивидуальных занятий, 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 даны в такой же последовательности, в какой изучается программный материал.

Приведены примеры, которые позволяют студентам приобрести навыки принятия инженерных решений, максимально приближенных к практике, что способствует прочному закреплению материала и развитию творческой активности обучающихся.

Для лучшего освоения практических задач, предшествовали лабораторные работы, которые выполнялись в такой же последовательности что и теоретический материал. Полученные данные лабораторных работ применяются на практических занятиях.

Изложенный материал позволяет во время аудиторных занятий, при поддержке преподавателя, изучить ту или иную методику, а затем самостоятельно выполнить необходимые расчеты по индивидуальному заданию.

Представлены исходные данные вариантов для решения заданий. Студент выбирает свой вариант самостоятельно по сумме двух последних цифр шифра зачетной книжки.

Цели и задачи

Цель данного методического указания – помочь формированию у студентов навыков выполнения инженерно-технических расчетов по механике пород управления свойствами горных пород и состояния массива при строительстве и эксплуатации сооружений.

Основной целью изучения дисциплины «Геомеханика» 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 при проектировании, планировании горно-технических операций и ведения горных работ.

По результатам выполнения заданий обучающиеся должны овладеть следующими знаниями и умениями.

Обучающийся должен 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 гонными механизмами или физическими полями.

Обучающийся должен уметь:

– определять основные физико-технические параметры пород в лабораторных и натурных 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.

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 1

Методика расчета плотностных и прочностных свойств горных пород

Тема 1.1 Плотностные свойства горных пород

Теоретические основы и рабочие формулы

Основными плотностными свойствами горных пород являются плотность, удельная 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 $V_Т$ твердой фазы породы, т.е.

$$\rho_0 = \frac{m}{V_Т}. \qquad (1.1.1)$$

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

$$\rho = \frac{m}{V}. \qquad (1.1.2)$$

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

$$\gamma_0 = \frac{G}{V_Т}. \qquad (1.1.3)$$

Связь между удельным весом γ_0 и удельной массой ρ_0 горной породы выражается формулой

$$\gamma_0 = g\rho_0, \qquad (1.1.4)$$

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

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

$$\gamma = \frac{G}{V}. \qquad (1.1.5)$$

Объемный вес γ и плотность ρ породы связаны зависимостью

$$\gamma = g\rho. \qquad (1.1.6)$$

Под пористостью горной породы понимают объем всех пор (пустот) в породе. Величина пористости породы оценивается отно-

сительным объемным содержанием пор P, выражаемым обычно в процентах

$$P = \frac{V_n}{V} \cdot 100, \qquad (1.1.7)$$

где V_n – объем пор в породе, м^3; V – объем породы, м^3.

Величина пористости P горных пород чаще всего определяется по формуле

$$P = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0}, \qquad (1.1.8)$$

где ρ_0 и ρ – соответственно удельная масса и плотность породы, кг/м^3.

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

$$\rho_н = \frac{m}{V_p}, \qquad (1.1.9)$$

где $\rho_н$ – насыпная плотность породы, кг/м^3; m – масса породы, кг; V_p – объем разрыхленной породы, м^3.

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

$$K_р = \frac{V_р}{V}, \qquad (1.1.10)$$

где V_p – объем разрыхленной породы, м^3; V – объем той же породы в плотном (неразрыхленном) состоянии, м^3.

Следовательно,

$$\rho_н = \frac{m}{V_р} = \frac{m}{K_р V} = \frac{\rho}{K_р}. \qquad (1.1.11)$$

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.

Пример решения задач

Задача 1.1.1

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 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

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

2. По формуле (1.1.6) определяем объемный вес угля

$$\gamma = g\rho;$$

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

3. По формуле (1.1.4) определяем удельный вес угля

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

4. По формуле (1.1.11) определяем насыпную плотность угля

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

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

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

Далее определяем объем вынимаемого угля за сутки в разрыхленном состоянии

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

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

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

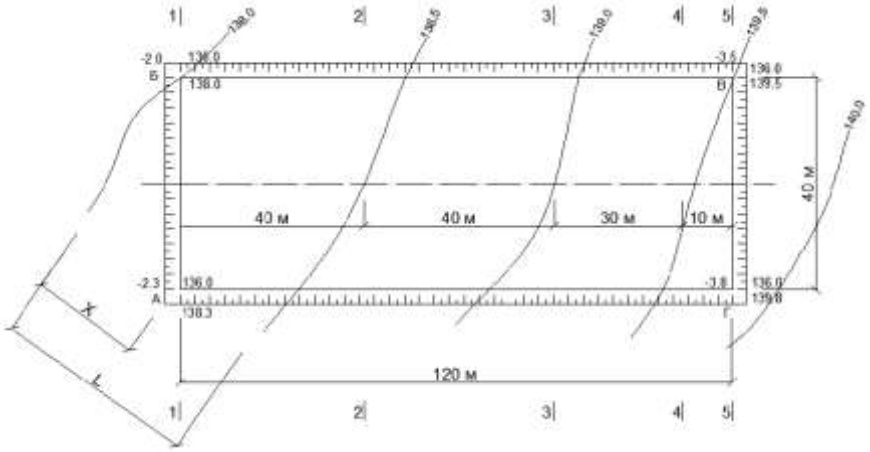
Исходные данные вариантов к задаче 1.1.1

№ варианта	Объем вагонетки V, м^3	Линейные размеры лавы			Плотностные параметры угля	
		Длина L, м	Высота h, м	Подвигание забоя за цикл	Плотность ρ, кг/м^3	Пористость P, %
1	3,5	100	1,9	5,0	1300	7,0
2	1,5	110	2,0	4,0	1310	9,1
3	2,5	101	2,2	4,2	1550	7,5
4	3,5	90	1,7	5,5	1400	7,1
5	1,5	120	2,5	5,3	1280	7,4
6	2,5	97	2,1	4,0	1420	6,9
7	3,5	113	2,0	5,7	1350	7,2
8	1,5	100	1,8	3,1	1370	7,3
9	2,5	105	1,7	2,2	1250	8,0
10	3,5	115	1,9	2,8	1360	8,1
11	1,5	125	2,3	2,9	1410	7,9
12	2,5	130	2,5	3,0	1480	7,0
13	3,5	100	2,0	4,4	1390	8,0
14	1,5	125	2,1	3,5	1370	9,0
15	2,5	120	1,9	5,5	1410	8,8
16	3,5	100	1,7	4,8	1480	8,2
17	1,5	105	2,1	3,9	1390	8,5
18	2,5	110	2,0	4,7	1290	7,0
19	3,5	135	2,2	5,3	1430	8,0
20	1,5	140	1,9	3,5	1440	7,5

Задача 1.1.2

Произвести подсчет объемов вскрышных работ при устройстве карьера. План площадки представлен на рис. 1.1.1. Размеры дна котлована 40×120 м, проектная абсолютная отметка дна котлована 136,0 м. Удельная масса выемочных вскрышных пород 2020 кг/м^3, пористость 3 %. Определить: плотность, удельный и объемный вес, насыпную плотность выемочных пород; количество рейсов самосвалов объемом кузова 139 м^3 ,грузоподъемностью 360 т.

а.



б. 2-2

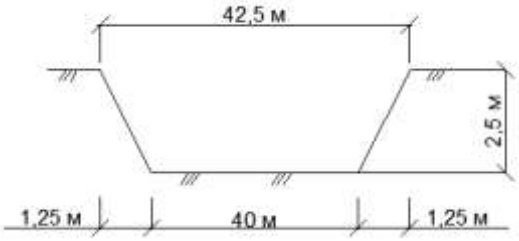


Рис. 1.1.1. План площадки: а – план котлована; б – сечение 2 – 2.

Решение.

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

$$H_u = \Gamma_1 + \frac{(\Gamma_2 - \Gamma_1)X}{L},$$

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. 1.1.1.

Черные отметки в точках Б и В равны абсолютным отметкам горизонталей

$$H_u^{Б} = 138{,}0\,\text{м};$$

$$H_u^{В} = 139{,}5\,\text{м}.$$

Черные отметки в точках А и Г рассчитываются по формулам

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

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

2.Определяем относительные или проектные отметки дна котлована по формуле

$$h = H_{дн} - H_{и},$$

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

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

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

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

$$a = mh \ ,$$

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

$$a_{А} = 0{,}5 \cdot 2{,}3 = 1{,}35 \text{ м}; \qquad a_{Б} = 0{,}5 \cdot 2 = 1{,}0 \text{ м};$$

$$a_{В} = 0{,}75 \cdot 3{,}5 = 2{,}6 \text{ м}; \qquad a_{Г} = 0{,}75 \cdot 3{,}8 = 2{,}85 \text{ м}.$$

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 (рис 1.1.1). Объем грунта между сечениями определяется по формуле

$$V = F_{ср}\, l,$$

где l – расстояние между сечениями, м; $F_{ср}$ – средняя площадь между сечениями, м^2.

Площадь сечения определяется по формуле

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

где B – ширина котлована по дну, м.

Подсчет ведется в табличной форме (табл. 1.1.2).

$$V_{В} = \frac{0{,}75^2 \cdot 3{,}5^3}{3} = 8{,}0 \text{ м}^3; \ V_{Г} = \frac{0{,}75^2 \cdot 3{,}8^3}{3} = 10{,}2 \text{ м}^3$$

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.

$$V_{АБ} = \frac{0,5 \cdot 40}{6} \cdot (2,0^2 + 2,0 \cdot 2,3 + 2,3^2) = 46,3\,м^3;$$

$$V_{ВГ} = \frac{0,63 \cdot 40}{6} \cdot (3,5^2 + 3,5 \cdot 3,8 + 3,8^2) = 178,6\,м^3.$$

Итого с учетом откосов, объем вскрышных работ составит

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

5. Плотность вынимаемых вскрышных пород определяем по формуле

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

6. По формуле (1.1.4) определяем удельный вес вынимаемых вскрышных пород

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

7. По формуле (1.1.6) определяем объемный вес вынимаемых вскрышных пород

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

8. По формуле (1.1.11) определяем насыпную плотность вынимаемых вскрышных пород

$$\rho_н = 1959,4 \cdot 1,8 = 1088,56\ кг/м^3,$$

где 1,8 – коэффициент разрыхления вынимаемых пород.

9. Определяем количество рейсов самосвалов, необходимых для вывоза вскрышных пород.

Для этого сначала определяем количество рейсов самосвалов по объему их кузова

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

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

$$m = \rho_н V_{куз},$$

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

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

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

Исходные данные вариантов к задаче 1.1.2

№ варианта	Линейные размеры карьера			Плотностные параметры пород		Характеристики самосвалов	
	Длина L, м	Ширина h, м	Абсолютная отметка дна карьера, м	Удельная масса ρ, кг/м^3	Пористость P, %	Объем кузова V, м^3	Грузоподъемность, т
1	200	100	134,0	2400	4,0	10	15
2	250	150	139,0	2900	3,2	15	20
3	240	120	126,0	2500	5,1	15,4	12
4	190	100	240,0	1900	7,6	6	7,7
5	180	90	151,0	1800	6,3	8,2	14
6	260	160	125,0	2000	2,8	10	15
7	280	150	120,0	2800	3,5	15	20
8	290	180	129,0	2700	4,1	15,4	12
9	220	110	135,0	2710	4,7	6	7,7
10	300	170	140,0	2820	5,0	8,2	14
11	185	120	141,0	2310	3,1	10	15
12	180	100	127,0	2460	4,2	15	20
13	200	160	133,0	2670	5,3	15,4	12
14	210	190	141,0	2820	3,1	6	7,7
15	270	200	145,0	2720	2,9	10	15
16	230	210	180,0	2730	3,0	15	20
17	290	100	175,0	2840	6,1	15,4	12
18	200	90	165,0	2680	4,3	6	7,7
19	210	110	150,0	2780	4,4	10	15
20	240	198	155,0	2760	2,3	15	20

Тема 1.2 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.

Таблица 1.1.1

Ведомость подсчета объема котлована
(к задаче 1.1.2)

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

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 $\sigma_р$, сдвиге $\tau_{сд}$, изгибе $\sigma_{изг}$ и т.д. Единица измерения прочности в системе СИ – Па (паскаль), кПа (килопаскаль), МПа (мегапаскаль).

Прочность сцементированных 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 $\sigma_{сж} > \sigma_{изг} > \sigma_р$.

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

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{S}, \qquad (1.2.1)$$

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

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

$$\sigma_р = \frac{P_0}{S}, \qquad (1.2.2)$$

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

Предел прочности горных пород на одноосное растяжение вычисляют по формуле

$$\sigma_р = \frac{2P_0}{\pi dh} = 0{,}64\frac{P_0}{dh}, \qquad (1.2.3)$$

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 (рис. 1.2.1). Согласно этой теории $\tau = f(\sigma)$ в любой точке тела в объемном напряженном состоянии.

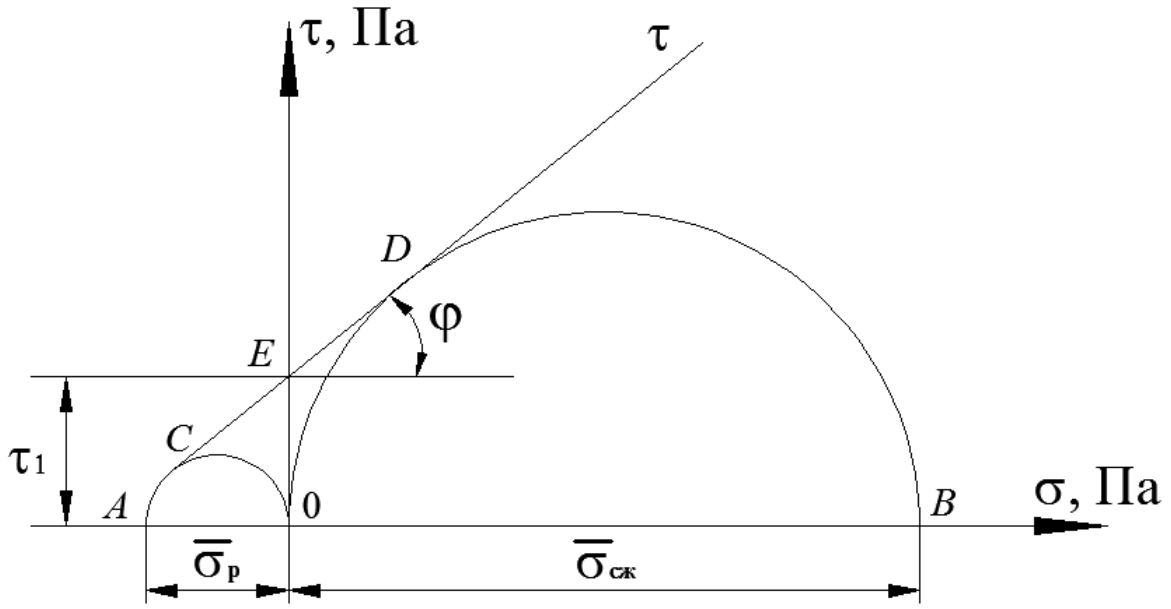


Рис. 1.2.1. Паспорт прочности исследуемой горной породы

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 рис. 1.2.1 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 $\sigma_р$.

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

$$\tau = \tau_1 + \sigma \operatorname{tg} \varphi, \qquad (1.2.4)$$

где τ – максимальные касательные напряжения, вызывающие сдвиг (разрушение) породы; τ_1 – предел прочности породы при срезе (чистом сдвиге) в условиях отсутствия нормальных напряжений, называемый сцеплением породы; σ – нормальные напряжения, действующие на площадках сдвига (поверхностях разрушения) породы; φ – угол внутреннего трения ($\mathrm{tg}\varphi = f$ – коэффициент внутреннего трения) породы.

Выражение (1.2.4) называют уравнением прочности связанной горной породы. Оно характеризует предельное состояние породы при разрушении.

Математическая обработка результатов эксперимента и оценка точности измерения (прочностных свойств горных пород)

Теоретические основы и рабочие формулы.

Любое измерение производится с некоторой погрешностью (ошибкой), которая искажает результат измерения и позволяет определить лишь приблизительное значение измеряемой величины.

По способу числового выражения различают абсолютные погрешности ΔA, выраженные в единицах измеряемой величины, и относительные ε – в процентах или долях от действительного значения. Эти погрешности вычисляют по формулам:

Абсолютная погрешность

Абсолютная погрешность i-го измерения величины

$$\Delta A_i = A_i - A, \qquad (1.2.5)$$

где A_i – измеренное i-е значение величины; A – действительное или истинное значение величины.

Относительная погрешность

Относительная погрешность i-го измерения

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta A_i}{A} 100\%. \qquad (1.2.6)$$

При выполнении измерения надо стремиться получить значение измеряемой величины, как можно близкое к истинному. Для этого необходимо исключить те погрешности, которые можно, и оценить те из них, исключить которые невозможно.

По характеру проявления погрешности делятся на три основных вида: систематические, случайные и промахи.

1. Систематические – возникают в результате конструктивных недостатков приборов, неправильного их градуирования, применение неточных эмпирических формул. Такие погрешности выявляют и исключают из результатов измерения заранее.
2. Случайные – это погрешности неопределенные по величине и закону, возникают в результате совокупности действия различных случайностей. Эти погрешности обнаруживаются при многократном измерении одной и той же величины в одинаковых условиях.
3. Промахи – это погрешности резко искажающие результаты измерений, в основном возникают при нарушении технологии испытаний.

Полученные в результате *n* измерений значения в итоге должны содержать только случайные погрешности.

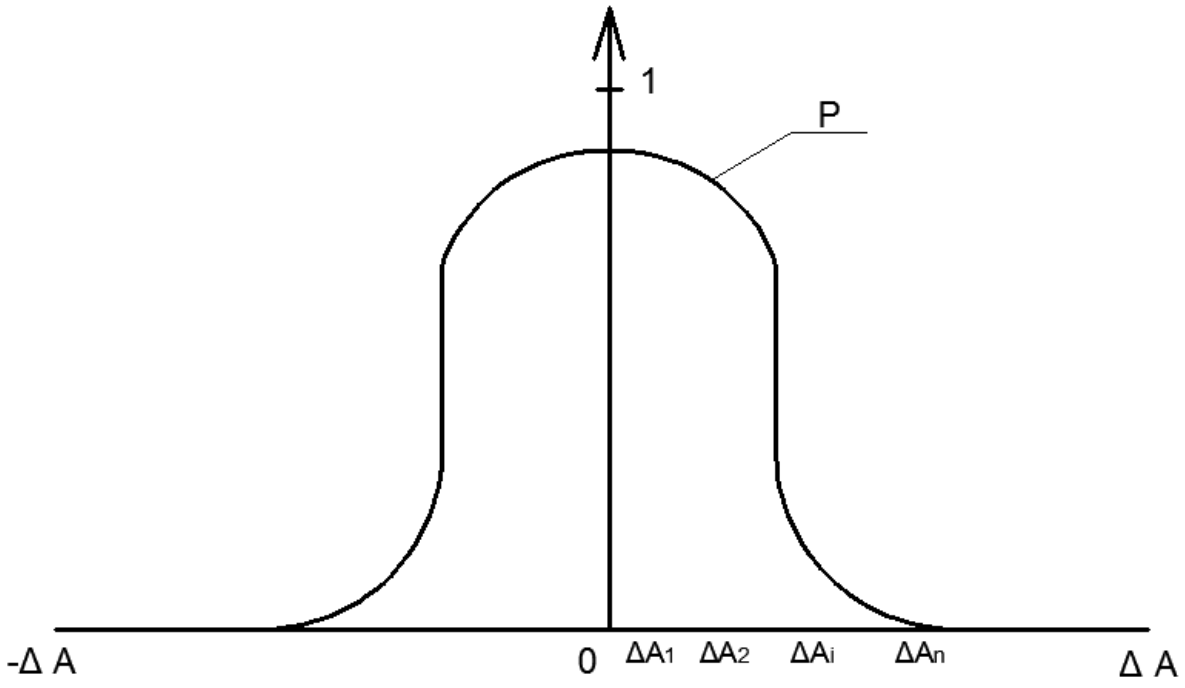


Рис. 1.2.2. Кривая нормального распределения нормальных величин

Полученные в результате *n* измерений значения A_1, A_2, A_3,..A_i,..A_n – содержат только случайные погрешности, которые определяются по формуле (1.2.5).

Согласно нормального закона распределения случайных событий Гаусса, частота (условная вероятность) появления погрешности данной величины определяется по формуле:

$$P = \frac{\Delta n_i}{n}, \qquad (1.2.7)$$

где Δn_i – число погрешностей измерения, равное значению A; n – общее число измерений.

Закон нормального распределения определяет вероятность появления в ряду измерений погрешности той или иной величины.

Аналитическое выражение кривой нормального распределения случайных величин показывают формулой Гаусса:

$$\varphi(\Delta A_i) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta A_i}{\delta}\right)^2\right]^2, \qquad (1.2.8)$$

где δ – средняя квадратическая погрешность (отклонение) ряда измерений

$$\delta = \pm\sqrt{\frac{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \ldots + \Delta A_i^2 + \Delta A_n}{n}} = \pm\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{\Delta A_i^2}{n}}. \qquad (1.2.9)$$

Средняя арифметическая погрешность

Наиболее достоверным значением измеряемой величины A является средняя арифметическая погрешность.

$$\overline{A} = \frac{A_1 + A_2 + A_i + A_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i}{n}. \qquad (1.2.10)$$

Отклонение i-го результата измерения от среднего арифметического значения определяется по формуле

$$\rho_i = A_i - \overline{A}. \qquad (1.2.11)$$

Величина абсолютной ошибки, которая появляется при замене истинного значения A средним арифметическим значением $\overline{A}$ определяется по формуле

$$\lambda = \Delta A_i - \rho_i. \qquad (1.2.12)$$

Средняя квадратическая погрешность определяется по формуле

$$\delta = S = \pm\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} p_i^2}{n-1}}. \qquad (1.2.13)$$

Среднее квадратическое отклонение $\delta_{\overline{A}}$ среднего арифметического $\overline{A}$ от истинного значения определяется по формуле

$$\delta_{\overline{A}} = S_{\overline{A}} = \pm\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\rho_i^2}{n(n-1)}}, \qquad (1.2.14)$$

где $S_{\overline{A}}$ – приближенное значение квадратического отклонения ряда измерений.

Степень приближения δ к S и $\delta_{\overline{A}}$ к $S_{\overline{A}}$ определяется числом измерений n. В пределе они равны друг другу

$$\delta = \lim_{n\to\infty} S; \qquad (1.2.15)$$

$$\delta_{\overline{A}} = \lim_{n\to\infty} S_{\overline{A}}; \qquad (1.2.16)$$

Коэффициент вариации погрешностей измерений определяется по формуле

$$K_{в} = \frac{\delta}{\overline{A}} 100\%. \qquad (1.2.17)$$

Ошибку среднеквадратической величины определяют по формуле

$$S_x = \frac{\delta}{\sqrt{n}}. \qquad (1.2.18)$$

Доверительные вероятности и интервалы

Вероятность того, что результат измерений $\overline{A}$ отличается от истинного значения A на величину ΔA записывают в виде

$$\alpha = P(\overline{A} - \Delta A < A_i < \overline{A} + \Delta A), \qquad (1.2.19)$$

где α – коэффициент надежности или доверительная вероятность, а интервал от $\overline{A} - \Delta A$ до $\overline{A} + \Delta A$ – доверительный интервал который в итоге записывается в виде $A = \overline{A} \pm \Delta A$.

Искомая величина A лежит в доверительном интервале $\overline{A} \pm \lambda$, т.е.

$$A = \overline{A} \pm \lambda, \qquad (1.2.20)$$

где λ – величина абсолютной погрешности, которая определяется по формуле

$$\lambda = \frac{t_L\, S}{\sqrt{n}} = t_\alpha\, S_{\overline{A}}, \qquad (1.2.21)$$

где t_α – коэффициент Стьюдента (табличное).

При наличии в ряду измерений A_n значений $A_к$, существенно отличающихся от $\overline{A}$, вычисляют значения U_i – относительное отклонение от среднего арифметического значения $\overline{A}_i$ по формуле

$$U_i = \frac{A_i - \overline{A}}{S\,n}, \qquad (1.2.22)$$

где U_i сравнивают с $U_{\max}$ по таблице (1.2.1). Если $U_i > U_{\max}$, значение A_i является промахом с вероятностью ε, и исключается из дальнейшей обработке в вычислениях.

Таблица 1.2.1

Значение $U_{\max}$ при различных числах измерений и коэффициента надежности α

Кол-во испытаний n	β=0,10; α=0,90	β=0,05; α=0,95	β=0,25; α=0,975	β=0,01; α=0,99
3	1,41	1,41	1,41	1,41
4	1,65	1,69	1,71	1,72
5	1,79	1,87	1,93	1,96
6	1,89	2,00	2,07	2,13
7	1,97	2,09	2,18	2,27
8	2,04	2,17	2,27	2,37
9	2,10	2,24	2,35	2,46
10	2,15	2,29	2,41	2,34
11	2,19	2,34	2,47	2,61
12	2,23	2,39	2,52	2,66
13	2,26	2,43	2,56	2,71
14	2,30	2,46	2,60	2,76
15	2,33	2,49	2,64	2,82
16	2,35	2,52	2,67	2,84
17	2,38	2,55	2,70	2,87
18	2,40	2,58	2,73	2,90

Таблица 1.2.2

Значение коэффициента Стьюдента t_α

Количество испытаний n	0,70	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
2	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619
3	1,336	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,596
4	1,300	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,941
5	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
6	1,156	1,476	2,015	2,571	3,366	4,032	6,859
7	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
8	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,449	5,406
9	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
10	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
11	1,093	1,372	1,812	2,280	2,764	3,169	4,587
12	1,088	1,363	1,796	2,202	2,718	3,106	4,487
13	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
14	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
15	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
20	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
25	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,700	3,745

Пример решения задач

Задача 1.2.1

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 $F_р$ = 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

$$\sigma_{сж} = \frac{F_{сж}}{S},$$

где $F_{сж}$ – разрушающая сила образцов при сжатии, Н; S – площадь образца, на которую действует данная сила, м^2.

В конкретном случае сжимающая сила действует на окружность образца.

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

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

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

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

$$\sigma_{сж3} = \frac{164000}{0{,}002} = 82 \text{ МПа}$$

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

2. Определяем пределы прочности пород на растяжение по формуле

$$\sigma_р = 0{,}64 \frac{F_р}{dh},$$

где $F_р$ – разрушающая сила образцов при растяжении

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

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

$$\sigma_{р3} = 0{,}64 \frac{16500}{0{,}051^2} = 5{,}3 \text{ МПа}$$

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

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

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

$$\overline{\sigma}_{р}=\frac{4{,}48+3{,}84+5{,}3+5{,}4}{4}=4{,}7\ \text{МПа}$$

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

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

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

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

$$S_{\overline{\sigma}сж}=\frac{2{,}66}{\sqrt{4}}=1{,}33;$$

$$S_{\overline{\sigma}р}=\frac{0{,}73}{\sqrt{4}}=0{,}36.$$

6. Определяем коэффициент вариации по формуле

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

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

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

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

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

где t_{α} – коэффициент Стьюдента, выбираемый из таблицы 1.2.2.

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

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

Полученные результаты записываем в виде

$$A_{\sigma\,сж} = \overline{\sigma} \pm \Delta\sigma;$$

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

$$A_{\sigma\,р} = [4{,}5 - 4{,}9].$$

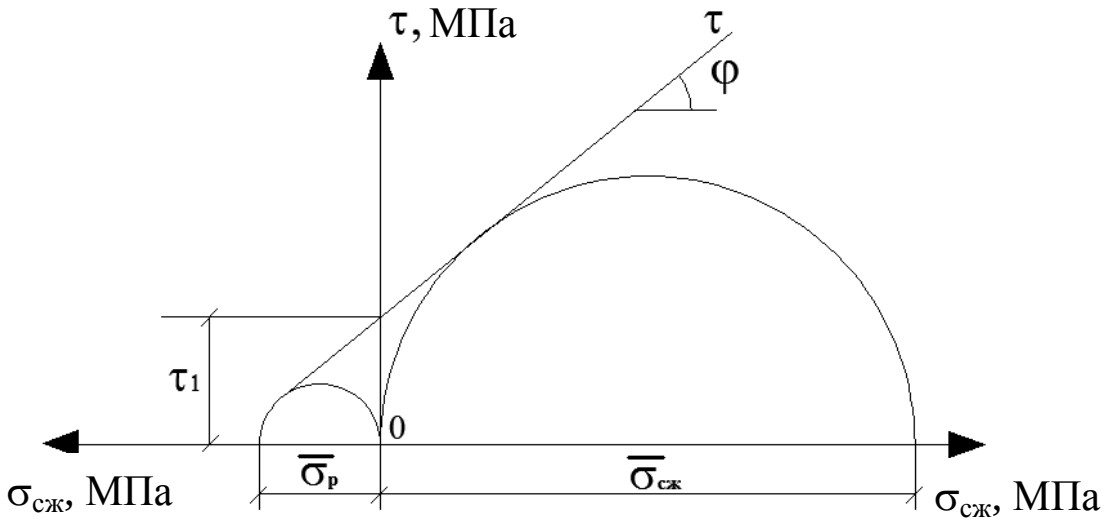
8. Сравниваем значения, полученные при определении пределов прочности на сжатие и растяжение с границами доверительных интервалов. Значения, не входящие в границы, удаляем из дальнейших операций. По оставшимся полученным значениям строим паспорт прочности исследуемого массива.

$$A_{\overline{\sigma}\,сж} = \frac{75 + 73}{2} = 74\ \text{МПа}$$

$$A_{\overline{\sigma}\,р} = 4{,}48\ \text{МПа}$$

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

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

$$\tau = 14 + 74\,\mathrm{tg}42 = 80{,}62.$$

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

$$f' = tg\varphi = 0{,}9$$

Задача 1.2.2

При испытании на прессе образцов горной породы правильной цилиндрической формы, были получены данные, приведенные в таблице 1.2.2. Первые 5 образцов испытывали на одноосное сжатие, вторые 5 – на одноосное растяжение путем раздавливания их по образующей.

Определить: 1) пределы прочности породы при сжатии и растяжении; 2) выполнить математический анализ полученных результатов (прил. 1); 3) построить паспорт прочности и определить из построенного паспорта угол внутреннего трения; 4) коэффициент внутреннего трения; 5) коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протодьяконова; 6) предел прочности при срезе; 7) максимальное касательное напряжение; 8) выполнить математический анализ полученных результатов.

Исходные данные вариантов к задаче 1.2.2

№ варианта	Диаметр образца *d*, см	Высота образца *h*, см	Результаты испытания образцов на прессе									
			Данные испытания при сжатии $\sigma_{сж}$, кН					Данные испытания при растяжении $\sigma_р$, кг/с				
			Номер образца					Номер образца				
			1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	5,1	5,0	140	141	150	139	144	1409	1417	1435	1373	1400
2	5,3	5,4	162	163	151	155	141	1615	1627	1514	1561	1421
3	5,0	5,1	160	159	144	157	158	1593	1631	1445	1533	1589
4	5,5	5,6	156	155	161	168	161	1571	1560	1614	1681	1614
5	6,0	6,2	161	153	160	159	149	1621	1540	1611	1581	1498
6	7,0	7,1	270	260	251	263	253	2699	2593	2524	2634	2543
7	7,1	7,0	288	271	240	271	261	2813	2754	2422	2714	2613
8	7,5	7,6	210	193	230	240	225	2111	1940	2355	2499	1261
9	5,0	5,0	200	195	175	191	190	2099	1963	1753	1914	1905
10	8,1	8,0	310	295	281	300	288	3100	2953	2814	3011	2788
11	8,5	8,6	350	260	270	320	291	3555	2611	2701	3299	2915
12	8,0	8,1	322	310	292	319	292	3225	3199	2930	3099	2900
13	7,0	7,2	305	300	289	271	278	3111	3095	2799	2819	2888
14	5,3	5,4	210	199	185	200	197	2105	1977	1859	1999	1888
15	5,5	5,4	181	160	163	175	165	1853	1699	1685	1759	1649
16	5,2	5,1	193	175	170	181	183	1938	1749	1719	1821	1849
17	5,3	5,4	166	170	151	171	165	1665	1799	1519	1715	1649
18	5,4	5,2	177	168	190	180	179	1780	1690	1911	1855	1756
19	5,8	5,0	200	193	188	185	190	2099	2193	1852	1875	1934
20	7,9	8,0	270	225	269	253	261	2711	2266	2254	2694	2815

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 2

Методика определения реологических свойств, структурно-текстурной неоднородности и структурно-текстурного ослабления горных пород

Тема 2.1. 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 породы). 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*.

$$R' = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} 100\%, \qquad (2.1.1)$$

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:

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

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

$\frac{\sigma_{\infty\,сж}}{\sigma_{0\,сж}} \approx 0{,}1 - 0{,}4$ – 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 рис. 2.1.1 представлена типичная кривая ползучести горных пород. Релаксацией называется постепенное снижение напряжений в породе во времени при постоянной ее деформации. На рис. 2.1.2 – 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_∞ (рис. 2.1.1).

Участок ОА (рис. 2.1.1) 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.

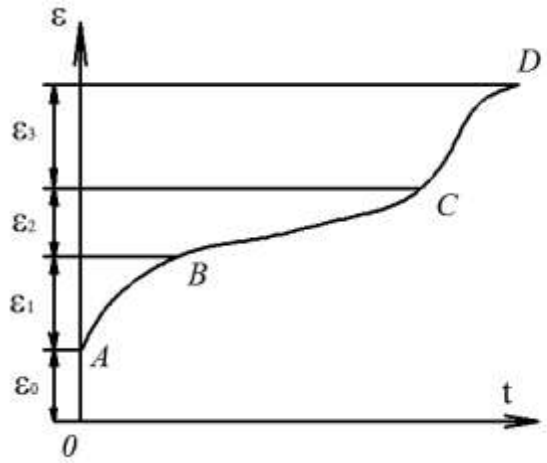


Рис. 2.1.1. Кривая ползучести горных пород

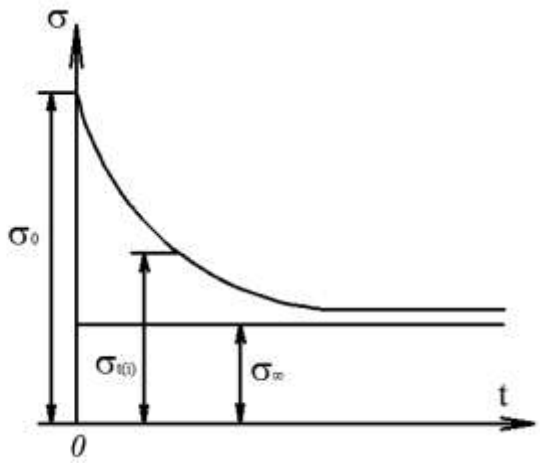


Рис. 2.1.2. Кривая релаксации напряжений в горных породах

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_n ползучести горной породы равна

$$\varepsilon_n = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3. \qquad (2.1.2)$$

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

$$R = \frac{\sigma_0 - \sigma_t}{\sigma_0} 100\%, \qquad (2.1.3)$$

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.

$$\Pi = \frac{n_{\text{сут}}(\sigma_0 - \frac{\sigma_0}{l})}{\sigma_0 - \sigma_t}, \qquad (2.1.4)$$

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.

Пример решения задачи

Задача 2.1

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 м^2 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

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

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

$$1\ \text{м}^2 - 238\ \text{т};$$

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

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

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

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

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

5. Определяем период релаксации исследуемого массива пород по формуле

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

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

Исходные данные вариантов к задаче 2.1

№ варианта	Размеры образца		Давление на выработку, т/м^2	Продолжительность испытания, дни	Снижение давления на образец во время его испытания, МПа
	Диаметр, см	Высота, см			
1	5,1	7,3	240	15	0,2
2	5,0	7,0	251	20	0,3
3	5,2	7,4	245	10	0,4
4	4,7	7,5	200	21	0,3
5	7,0	8,1	210	25	0,5
6	7,1	8,5	190	26	0,1
7	7,2	8,9	199	13	0,6
8	6,0	7,4	206	10	0,3
9	6,1	7,8	215	18	0,2
10	6,2	8,0	220	19	0,4
11	5,3	6,5	197	22	0,5
12	5,4	6,9	231	13	0,3
13	5,0	6,1	246	14	0,6
14	5,5	6,4	206	17	0,1
15	5,6	7,3	222	23	0,2
16	5,4	7,8	231	24	0,4
17	6,0	8,5	252	27	0,5
18	6,3	8,9	212	12	0,3
19	6,5	9,0	235	16	0,4
20	6,4	9,1	200	17	0,2

Тема 2.2 Структурно-текстурная неоднородность и структурно-текстурное ослабление горных пород

Теоретические основы и формулы

Скорость распространения упругих волн в горных породах в больше мере зависит от их структуры и текстуры. На скорость волн особенно сильное влияние оказывает слоистость, трещиноватость и другие макро дефекты строения. Скорость распространения упругих волн υ_{II} 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 $K_{\text{а}}$ анизотропии скоростей волн. Коэффициент анизотропии скорости продольных упругих волн в слоистых и трещиноватых породах определяется обычно из выражения

$$K_{\text{а}} = \frac{\nu_{p\text{II}}}{\nu_{p\perp}}. \qquad (2.2.1)$$

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 $K_{\text{а}} \leq 1{,}05$ породы практически однородны, при $K_{\text{а}} > 1{,}3–1{,}4$ весьма неоднородны. Информации об анизотропности скоростей упругих волн в породах, прежде всего за счет слоистости трещиноватости, имеет большое 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 коэффициентом структурно-текстурного (обычно пользуются термином структурного) ослабления пород $K_{\text{с}}$.

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

$$K_{\text{с}} = \frac{\sigma_{\text{р.ос}}}{\sigma_{\text{р.м}}}, \qquad (2.2.2)$$

где $\sigma_{\text{р.ос}}$ и $\sigma_{\text{р.м}}$ – 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

$$\sigma_{\text{р.ос(мм)}} = \frac{P}{S}, \qquad (2.2.3)$$

где F – раскалывающая сила, Н; S – площадь раскола образца, м^2.

В соответствии с [1] расчетное сопротивление пород массива сжатию $R_{\text{с}}$ для определения смещения пород и устойчивости выработок, нагрузок на крепи и для других практических расчетов следует определять по формуле

$$R_{\text{с}} = K_{\text{с}}\sigma_{\text{сж}}, \qquad (2.2.4)$$

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

Пример решения задач

Задача 2.2.1

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, м^2.

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

где d – диаметр образца

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

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

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

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

где $F_{р.ос.}$ – сила раскола образцов по ослабленной части (вдоль слоистости), Н; $S_{р.ос}$ – площадь раскола образцов по ослабленной части, м^2.

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

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

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

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

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

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

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

4. Определяем коэффициент структурного ослабления по формуле

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

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

$$R_с = K_с\,\sigma_{сж} = 0{,}1 \cdot 175 = 17{,}5\,\text{МПа}$$

Задача 2.2.2

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

$$v_{pII} = \frac{L}{t}\ ,$$

где L – длина прозвучивания образца, м; t – время прохождения продольной волны, $с^{-6}$

$$\nu_{pII} = \frac{0{,}02}{0{,}0000275} = 7272{,}7\ \text{м/с}\ .$$

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

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

3. Определяем коэффициент анизотропности исследуемого массива по формуле

$$K_а = \frac{\nu_{pII}}{\nu_{p\perp}} = \frac{7272{,}7}{6000} = 1{,}21.$$

Исходные данные вариантов к задаче 2.2.1

№ варианта	Диаметр испытуемого образца, см	Средняя разрушающая сила *P*, кН	Результаты испытания образца			
			По ослабленной части (вдоль слоистости)		По массивной части (поперек слоистости)	
			Сила раскола, кН	Форма раскола, м	Сила раскола, кН	Форма раскола, (*a*×*b*), см
1	5,1	350	4,0	0,051	10	2,2×3,5
2	5,0	360	3,0	0,05	15	2,6×4,1
3	5,5	310	6,0	0,055	20	3,1×2,3
4	6,2	300	5,5	0,062	17,6	4,0×3,0
5	7,0	229	4,5	0,070	19	3,6×4,5
6	7,1	250	5,5	0,071	9,5	6,0×5,6
7	5,3	299	5,0	0,053	16,3	5,9×5,1
8	5,4	260	6,1	0,054	21,0	3,6×2,9
9	5,2	400	4,5	0,052	18,3	3,7×3,0
10	6,7	505	5,0	0,067	10,1	2,8×5,0
11	7,9	500	2,2	0,079	20	6,3×4,6
12	8,5	550	3,0	0,085	17,2	7,2×6,8
13	8,1	400	5,3	0,081	11	7,1×7,5
14	5,0	300	5,1	0,050	17	7,9×7,0
15	5,7	310	4,2	0,057	18	4,5×5,0
16	8,8	490	4,5	0,088	20	5,6×3,4
17	7,0	410	6,3	0,070	20,8	8,2×7,3
18	7,5	390	5,0	0,075	22	7,0×6,9
19	7,9	385	5,5	0,079	15	7,0×7,4
20	5,3	260	6,2	0,053	13	5,3×4,2

Исходные данные вариантов к задаче 2.2.2

№ варианта	Длина пути прозвучивания образца вдоль слоистости *L*, см	Время прозвучивания образца вдоль слоистости *t*, мкс	Длина прозвучивания образца поперек слоистости *L*, см	Время прозвучивания образца поперек слоистости *t*, мкс
1	2	3	4	5
1	2,0	22	5,0	10
2	2,5	20	5,7	15
3	6,5	30	6,3	17
4	4,5	32	5,8	16
5	4,2	25	5,3	14

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5
6	3,7	24	6,0	17
7	7,0	32	6,4	13
8	6,6	30	8,0	17
9	3,8	28	5,0	13
10	2,9	21	7,1	15
11	3,0	27	6,2	14
12	4,9	30	5,4	13
13	4,8	22	7,1	17
14	6,3	32	7,9	16
15	5,1	28	6,2	10
16	3,2	22	6,5	12
17	3,9	21	6,9	13
18	5,1	27	6,7	15
19	6,2	29	7,5	11
20	6,9	30	7,3	16

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 3

Методика анализа акустических и упругих свойств 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 ν_p, поперечных ν_s и

поверхностных ν_l упругих волн, коэффициент поглощения θ и удельное волновое сопротивление Z. Породы характеризуются также коэффициентами отражения и преломления упругих волн.

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

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

$$\nu_p = \sqrt{\frac{E(1-\upsilon)}{\rho(1+\upsilon)(1-2\upsilon)}}, \tag{3.1}$$

где E – модуль упругости, Па; υ – коэффициент Пуассона; ρ – плотность породы, кг/м^3.

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

$$\nu_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\upsilon)}}, \tag{3.2}$$

где G – модуль сдвига, Па.

Скорость распространения поверхностной волны

$$\nu_L = \frac{0{,}87+1{,}12\upsilon}{1+\upsilon}\sqrt{\frac{G}{\rho}}. \tag{3.3}$$

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

$$Z = \nu_p\,\rho. \tag{3.4}$$

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 при-

близительно 1500 м/с. Скорости распространения продольной и поперечной волн могут быть получены из выражений

$$\nu_p = \frac{\nu_ж}{\sin i_1}; \qquad \nu_S = \frac{\nu_ж}{\sin i_2}, \tag{3.5}$$

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

Значения ν_p и ν_s позволяют определить коэффициент Пуассона исследуемой породы

$$\upsilon = \frac{2 - \left(\frac{\nu_p}{\nu_S}\right)^2}{2\left[1 - \left(\frac{\nu_p}{\nu_S}\right)^2\right]}. \tag{3.6}$$

Модуль упругости и модуль сдвига определяются по формулам

$$G = \rho v_S^2; \qquad E = 2G(1 + v). \tag{3.7}$$

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 θ поглощения волн.

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

$$\theta = \left(\frac{1}{x_2 - x_1}\right) \ln \frac{A_1}{A_2}, \tag{3.8}$$

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

$$\theta = \left(\frac{1}{l_2 - l_1}\right) \ln \frac{A_1}{A_2}, \qquad (3.9)$$

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.

Пример решения задач

Задача 3.1

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

Исходные данные вариантов к задаче 3.1

№ варианта	Насыпная плотность $\rho_н$, кг/м^3	Коэффициент разрыхления $K_р$	Скорость распространения продольной упругой волны, $\upsilon_р$, м/с	Второй критический угол i_2
1	2	3	4	5
1	1600	1,8	900	40
2	1500	1,9	960	45
3	1350	1,6	1090	39
4	1620	1,9	2000	35
5	2000	1,8	2600	41
6	1830	2,0	2100	38
7	1920	2,1	2400	37
8	3000	2,2	4900	42
9	3100	2,2	4400	44
10	2800	1,9	4500	46
11	2750	9,0	3600	30

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5
12	2600	2,1	2400	37
13	2100	1,9	1500	39
14	1700	1,8	1000	45
15	1430	1,8	1100	41
16	1510	1,8	900	45
17	2450	2,0	1900	40
18	2600	1,9	3500	31
19	2890	2,1	3000	32
20	2550	2,2	4000	45

Решение

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

$$\rho_н = \frac{\rho}{K_p};$$

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

где K_p – коэффициент разрыхления руды, принимаемый равным 2.

2. Определяем удельное волновое сопротивление руды по формуле

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

3. Определяем скорость поперечной упругой волны руды по формуле

$$\nu_S = \frac{\nu_ж}{\sin i_2} = \frac{1500}{\sin 45°} = 2143 \text{ м/с}.$$

4. Определяем коэффициент Пуассона руды по формуле

$$\upsilon = \frac{2 - \left(\frac{\nu_p}{\nu_S}\right)^2}{2\left[1 - \left(\frac{\nu_p}{\nu_S}\right)^2\right]} = \frac{2 - \left(\frac{5300}{2143}\right)^2}{2\left[1 - \left(\frac{5300}{2143}\right)^2\right]} = 0{,}59.$$

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

$$\nu_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\upsilon)}};$$

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

Задача 3.2

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.

Исходные данные вариантов к задаче 3.2

№ варианта	Угол падения упругой волны α_1, град	Угол преломления α_2, град	Скорость продольной упругой волны, $\upsilon_р$, м/с	Насыпная плотность $\rho_н$, кг/м^3	Удельная масса второго слоя ρ_0, кг/м^3	Пористость второго слоя Р %
1	32	16	4800	1720	2500	9,1
2	36	15	4200	1500	2900	10,0
3	34	17	6000	1800	3100	7,2
4	31	14	5500	1840	2400	5,0
5	30	16	5300	1610	2500	5,1
6	40	17	4900	1540	2650	8,3
7	45	18	5000	2600	2350	9,1
8	44	20	5200	2800	2100	7,3
9	35	21	6300	2400	3500	6,1
10	33	13	5900	2700	2800	6,2
11	41	10	5800	1700	3100	8,1
12	34	11	6100	1690	2400	9,5
13	42	15	620	1500	2200	7,0
14	35	20	4800	1400	2000	8,5
15	43	15	5800	1550	3100	6,3
16	36	10	6000	2400	2900	6,0
17	44	13	5300	2300	2750	6,4
18	37	19	4200	2800	2550	5,6
19	38	20	4100	2500	2900	6,5
20	39	21	6000	1400	2350	7,3

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 4

Методы исследования напряженного состояния горных пород вокруг проводимых выработок

Тема 4.1 Объемно-напряженное состояние горных пород

Теоретические основы и рабочие формулы

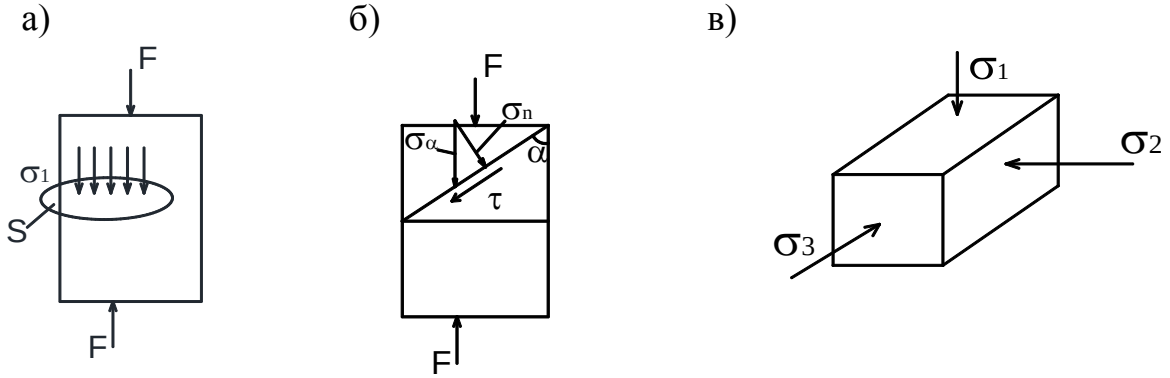


Рис. 4.1.1. Схемы действия напряжений в горных породах:
а – при одноосном сжатии на горизонтальной площадке; б – при одноосном сжатии на наклонной площадке; в – при трехосном сжатии

$$\sigma_1 = \frac{F}{S}, \qquad (4.1.1)$$

$$\sigma_\alpha = \frac{F}{S_\alpha} = \frac{F}{S}\sin\alpha = \sigma_1 \sin\alpha. \qquad (4.1.2)$$

1. Напряженные состояния на наклонной площадке

$$\sigma_n = \sigma_\alpha \sin\alpha = \sigma_1 \sin^2\alpha. \qquad (4.1.3)$$

2. Касательное напряжение

$$\tau = \sigma_\alpha \cos\alpha = \sigma_1 \sin\alpha \cos\alpha. \qquad (4.1.4)$$

3. Главные напряжения

σ_1 – наибольшее напряжение;

σ_2 – среднее по величине;

σ_3 – наименьшее напряжение на главных взаимных площадях при $\tau = 0$ (касательные напряжения во всех плоскостях).

Если $\sigma_1 = 0$ или $\sigma_2 = 0$ или $\sigma_3 = 0$ – плоское напряженное состояние.

При $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ – линейное напряженное состояние

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \frac{\nu}{I - \nu}\sigma_1, \qquad (4.1.5)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

Анализ объемного напряженного состояния
с помощью кругов Мора

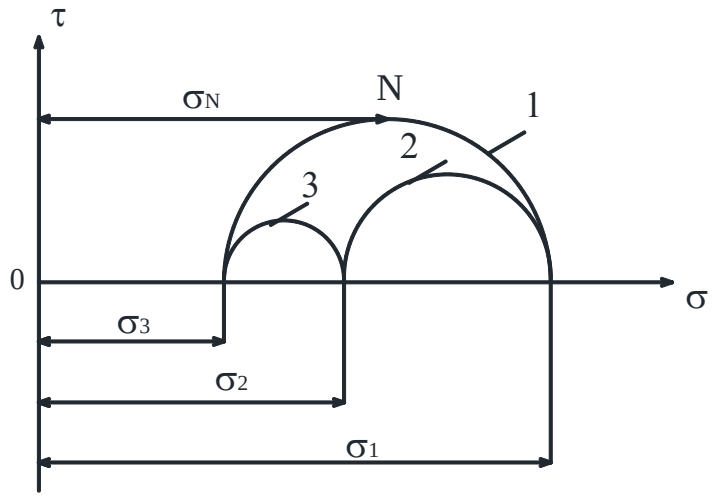


Рис.4.1.2. График напряжений на площадках элементарного блока породы, параллельных направлению σ_2 – (1), σ_3 – (2) и σ_4 – (3) главных напряжений.

Если ни одно из главных напряжений в рассматриваемой точке *N* не равно 0, то $\sigma_{n\ \max}=\sigma_1$;

$$\sigma_{n\ \min}=\sigma_3; \tag{4.1.6}$$

$$\tau_{\max}=\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}; \tag{4.1.7}$$

На графике 4.1.2 касательные напряжения τ максимальные, на кривой (1) на площадях параллельны σ_2, таким образом, σ_2 не оказывают влияния на наибольшие касательные напряжения $\tau_{\max}$. Поэтому при расчетах устойчивости бортов горных выработок значительной длины можно решать плоскую задачу объемного напряженного состояния.

Задача 4.1.1

Определить параллельные и касательные τ напряжения в кровле пласта угля, залегающие на глубине 400 м от поверхности земли и с углом падения α = 15°. Средняя плотность вышележащих пород ρ = 2300 кг/м^3. Изобразить схему действия найденных напряжений.

Задача 4.1.2

Определить главные нормальные и max касательное напряжения в массиве горных пород на глубине 660 м, построить график напряжений с помощью кругов Мора. Средняя плотность пород ρ = 2270 кг/м^3. Коэффициент Пуассона пород ν = 0,38.

Задача 4.1.3

С помощью кругов Мора определить графически и аналитически: 1). Максимальные касательные напряжения τ_{max} в слое песчаника на глубине 570 м. Средняя плотность вышележащих горных пород ρ = 2300 кг/м^3, коэффициент Пуассона песчаника ν = 0,33. Существующие горизонтальные тектонические напряжения имеют соотношения $\sigma_2 = 1{,}5\ \sigma_3$.

Исходные данные вариантов к задаче 4.1.1

№ варианта	Глубина залегания пласта угля *H*, м	Угол падения пласта α, град.	Средняя плотность вышележащих пород $\rho_{ср}$, кг/м^3
1	150	10	2100
2	160	15	2400
3	350	12	2900
4	340	30	2800
5	170	29	3000
6	180	25	2200
7	190	17	2600
8	200	19	2800
9	210	20	2500
10	220	21	2600
11	230	27	2400
12	290	28	2900
13	330	26	2800
14	310	14	2700
15	300	18	2900
16	280	22	2400
17	270	13	2550
18	260	23	2450
19	310	20	2750
20	320	22	2850

Исходные данные вариантов к задаче 4.1.2

№ варианта	Глубина залегания пласта горной породы *H*, м	Средняя плотность вышезалегающих пород $\rho_{ср}$, кг/м^3	Коэффициент Пуассона вышезалегающих пород ν
1	200	2100	0,3
2	250	2400	0,31
3	240	2500	0,4
4	400	310	0,39
5	390	3000	0,38
6	300	2950	0,32
7	350	2850	0,33
8	260	2700	0,35
9	280	2650	0,34
10	370	2800	0,4
11	360	2900	0,36
12	290	2600	0,37
13	340	2850	0,39
14	340	2900	0,4
15	310	2800	0,31
16	320	2600	0,3
17	250	2500	0,33
18	220	2450	0,36
19	270	2550	0,4
20	330	2600	0,38

Исходные данные вариантов к задаче 4.1.3

№ варианта	Глубина залегания пласта песчаника *H*, м	Средняя плотность вышезалегающих пород $\rho_{ср}$, кг/м^3	Коэффициент Пуассона вышезалегающих пород ν	Соотношение существующих горизонтальных тектонических напряжений σ_2/σ_3
1	2	3	4	5
1	200	2300	0,3	1,2/2
2	250	2400	0,39	1,3/1,9
3	450	3000	0,4	1,4/1,8
4	400	3300	0,31	1,5/1,7
5	350	3400	0,38	1,2/1,9
6	300	3100	0,32	1,7/2
7	500	3500	0,33	1,8/15
8	210	2400	0,38	1,7/1,3
9	230	2600	0,34	1,4/1,7

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5
10	340	2800	0,37	1,5/1,9
11	380	2900	0,35	1,2/2
12	310	2700	0,36	1,3/1,7
13	280	2600	0,4	1,4/1,5
14	260	2400	0,3	1,6/2
15	290	2300	0,35	1,8/1,1
16	360	2700	0,31	1,9/2
17	380	2800	0,4	1,5/2
18	420	2900	0,38	1,3/1,4
19	450	3000	0,37	1,1/1,6
20	490	3200	0,34	1,7/2

Тема 4.2 Напряженное состояние пород вокруг незакрепленных выработок

Теоретические основы и рабочие формулы

Рассмотрим протяженную выработку круглого сечения (рис. 4.2.1), расположенную на достаточно большой глубине (H>10R).

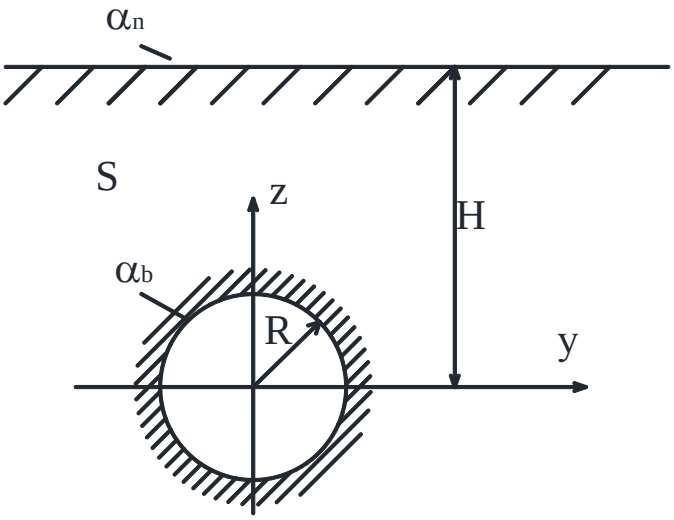


Рис. 4.2.1. Схема к определению напряжения в упругом массиве вокруг выработки круглого сечения

Для определения напряжений вокруг выработки используется решение плоской задачи теории упругости о полубесконечном весомом массиве (область S), ограниченном земной поверхностью α_n и ослабленном выработкой (контур поперечного сечения α_b).

1. Растягивающие напряжения – положительные (+); сжимающие – отрицательные (–) в теории упругости; Радиальные напряжения – нормальные на площадке, перпендикулярные к радиусу

$$\sigma_\xi = -\gamma H\left[\frac{I+\lambda}{2}\left(I-\frac{R^2}{\xi^2}\right)+\frac{I-\lambda}{2}\left(I+3\frac{R^4}{\xi^4}-4\frac{R^2}{\xi^2}\right)\cos 2\theta\right]. \quad (4.2.1)$$

2. Тангенсальные напряжения (нормальные на площадке параллельные радиусу, совпадающей с ним)

$$\sigma_\theta = -\gamma H\left[\frac{I+\lambda}{2}\left(I-\frac{R^2}{\xi^2}\right)+\frac{I-\lambda}{2}\left(I+3\frac{R^4}{\xi^4}\right)\cos 2\theta\right]. \quad (4.2.2)$$

3. Касательные напряжения

$$\tau_\theta = \gamma H\frac{I+\lambda}{2}\left(I-3\frac{R^4}{\xi^4}+2\frac{R^2}{\xi^2}\right)\sin 2\,\theta, \quad (4.2.3)$$

где γ – объемный вес столба вышележащих пород, Н/м^3;
H – глубина залегания выработки от земной поверхности, м;
λ – коэффициент бокового давления в массиве;
R – радиус выработки, м;
ξ – расстояние в полярных координатах, м;
θ – угол в полярных координатах П/180°.

4. На контуре выработки

При $\xi = R$; $\sigma_\xi = 0$; $\tau_{\xi\theta} = 0$;

$$\sigma_0 = -\gamma H\frac{I+\lambda}{2}\left(I-3\frac{R^4}{\xi^4}+2\frac{R^2}{\xi^2}\right)\sin 2\,\theta. \quad (4.2.4)$$

При $\theta = 0$, П (точка А на рис. 4.2.2)

$$\sigma_\theta = -\gamma H(3\lambda-1). \quad (4.2.5)$$

При $\theta = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$ (точка В на рис. 4.2.2)

$$\sigma_\theta = -\gamma H(3-\lambda). \quad (4.2.6)$$

При λ=1 в гидростатическом поле напряжений, распределение вокруг выработки будет следующим

$$\sigma_\xi = -\gamma H\left(1-\frac{R^2}{\xi^2}\right); \quad (4.2.7)$$

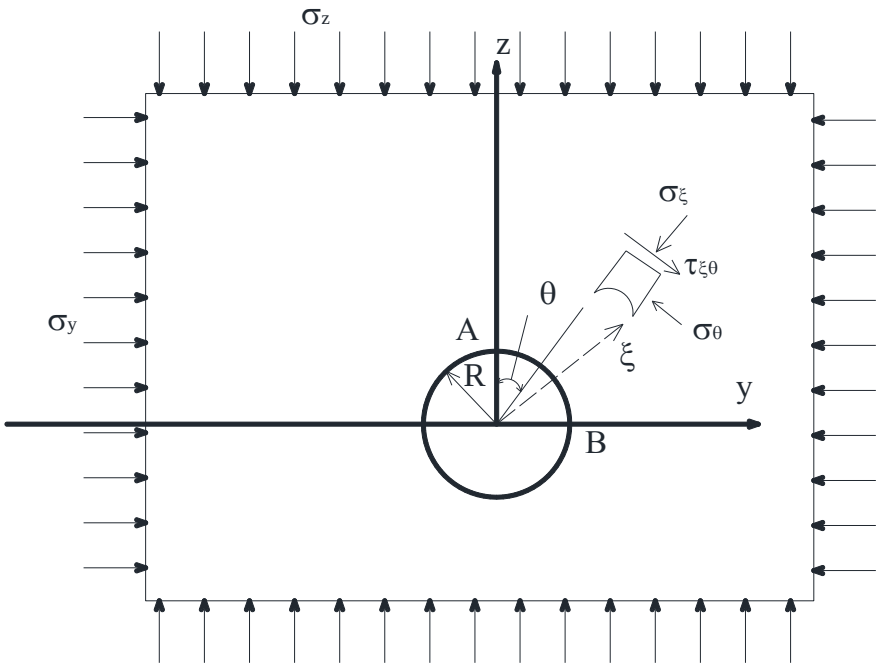


Рис. 4.2.2. Расчетная схема к определению напряжений в упругих однородных породах

$$\sigma_\theta = -\gamma H\left(1+\frac{R^2}{\xi^2}\right); \qquad (4.2.8)$$

$$\tau_{\xi\theta} = 0. \qquad (4.2.9)$$

5. Распределение напряжений для вертикальной выработки

$$\sigma_\xi = \sigma_1\left(1-\frac{R^2}{\xi^2}\right); \qquad (4.2.10)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_1\left(1+\frac{R^2}{\xi^2}\right); \qquad (4.2.11)$$

$$\tau_{\xi\theta} = 0. \qquad (4.2.12)$$

где σ_1 – максимальное горизонтальное напряжение.

Задача 4.2.1

Определить радиальные σ_ξ, тангенсальные σ_θ и касательные $\tau_{\xi\theta}$ напряжения вокруг вертикальной горной выработки с поперечным сечением круглой формы. R = 3 м; H = 350 м; ρ = 2700 кг/м^3; ν = 0,2. Точки определения: 1) на контуре выработки одинаковы; 2) в массиве при ξ = 6 м.

Задача 4.2.2.

Определить радиальные σ_ξ, тангенсальные σ_θ и касательные $\tau_{\xi\theta}$ напряжения вокруг горизонтальной горной выработки с поперечным сечением круглой формы. R = 2,5 м; H = 430 м; ρ = 2600 кг/м^3; ν = 0,5. Точки определения: 1). При $\theta = 0$; $\theta = \frac{\pi}{4}$; $\theta = \frac{\pi}{2}$; построить эпюры напряжений σ_ξ; σ_θ $\tau_{\xi\theta}$ на трех графиках.

Исходные данные вариантов к задаче 4.2.1

№ варианта	Радиус вертикальной выработки в чернее круглой формы сечения R, м	Глубина залегания пород рассматриваемого участка выработки H, м	Плотность пород окружающих контур выработки на рассматриваемом участке ρ кг/м^3	Коэффициент Пуассона ν
1	2,5	250	2300	0,3
2	4,0	500	2800	0,2
3	3,5	265	2900	0,1
4	3,9	455	3500	0,1
5	3,7	450	3000	0,2
6	2,6	260	2400	0,3
7	2,8	300	2900	0,4
8	2,9	350	2800	0,1
9	3,0	340	3000	0,2
10	3,6	290	2700	0,3
11	3,7	300	3400	0,4
12	3,9	400	3500	0,1
13	4,0	390	3400	0,2
14	2,5	380	3500	0,3
15	2,6	360	290	0,4
16	3,9	470	280	0,1
17	3,5	430	270	0,2
18	3,8	410	300	0,3
19	2,8	460	260	0,4
20	2,9	490	270	0,1

Исходные данные вариантов к задаче 4.2.2

№ варианта	Радиус горизонтальной выработки в чернее круглой формы сечения R, м	Глубина расположения выработки H, м	Плотность пород окружающих контур выработки ρ, кг/м^3	Коэффициент Пуассона ν
1	2,5	250	2300	0,31
2	2,7	260	2400	0,39
3	2,9	500	3500	0,35
4	4,0	450	3000	0,40
5	3,9	350	2900	0,32
6	3,0	400	3400	0,34
7	3,1	300	2800	0,36
8	2,6	350	2900	0,33
9	2,8	490	3600	0,37
10	3,2	380	2850	0,38
11	3,4	370	2650	0,30
12	3,5	280	2350	0,36
13	4,0	290	2750	0,31
14	2,6	310	2800	0,32
15	2,8	340	2900	0,39
16	2,9	320	2850	0,4
17	3,9	410	3000	0,35
18	3,5	480	3500	0,34
19	3,6	450	3100	0,3
20	3,8	500	3200	0,4

Тема 4.3 Коэффициенты устойчивости горных пород

Теоретические основы и рабочие формулы

1. Оценка устойчивости пород осуществляется по величине безразмерного коэффициента $K_к$.

$$K_к = \frac{\gamma H_0}{R_c} = 0, \qquad (4.3.1)$$

где γ – объемный вес пород, Н/м^3; $H_р$ – расчетная глубина заложения выработки, м; R_c – расчетное сопротивление пород сжатию, Па

$$H_р = HK, \qquad (4.3.2)$$

где H – проектная глубина заложения выработки, м; K – коэффициент, учитывающий отличие напряженного состояния массива пород по сравнению с весом толщи вышележащих пород: K = 1 – для

обычных геологических условий; K = 1,5 – при тектонических напряжениях (экспериментальные) в зоне тектонических нарушений.

Для нарушенных пород

$$R_с = \sigma_{сж} K_с, \qquad (4.3.3)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности пород на сжатие, Па (эксперимент в лаборатории); $K_с$ – коэффициент, учитывающий дополнительную нарушенность массива пород (зеркала скольжения, трещины, глинистые прослойки и т.п.), принимаемый по таблице 4.3.1.

Таблица 4.3.1

Среднее расстояние между поверхностями ослабления пород, м	Коэффициент $K_с$
Более 1,5	0,9
От 1,5 до 1	0,8
От 1 до 0,5	0,6
От 0,5 до 0,1	0,4
Менее 0,1	0,2

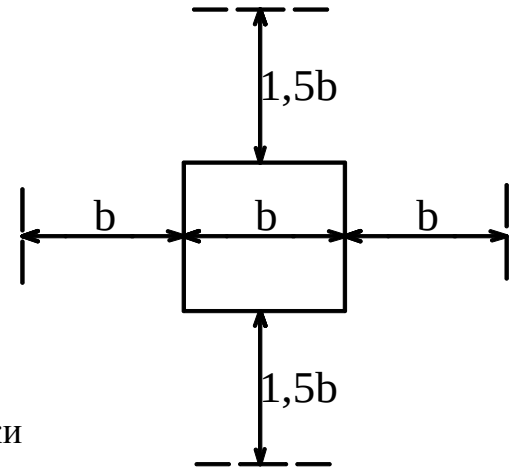
Для слабонарушенных, монолитных пород

Усредненное значение расчетного сопротивления пород сжатию

$$R_{су} = \frac{R_{с1}m_1 + R_{с2}m_2 + ... + R_{сn}m_n}{m_1 + m_2 + ... + m_n} \sigma_{сж} K_с \ , \qquad (4.3.4)$$

где $R_{c1}\ldots R_{cn}$ – расчетное сопротивление сжатию слоев пород с 1 по n; $m_1\ldots m_n$ – мощность слоев с изменчивостью R_c слоев до 30 %.

Расчетное сопротивление пород сжатию определяется с учетом всех слоев меньше 0,1 м.



b – ширина выработки

Рис. 4.3.1 Схема к определению зоны влияния проводимой выработки

При изменчивости R_c слоев > 30 %, следует считать K_n отдельно от кровли, бортов и почвы.

2. Булычевым Н. С. Предложена методика оценки устойчивости скальных трещиноватых пород по их склонности к вывалообразованию по величине показателя S

$$S = f\,\frac{K_M}{K_N}\,\frac{K_R K_W}{K_t K_A K_\alpha}, \qquad (4.3.5)$$

где f – коэффициент крепости пород по М. М. Протодьяконову; K_M – коэффициент, характеризующий влияние нарушенности пород; K_N – коэффициент, учитывающий влияние числа систем трещин; K_R – коэффициент, учитывающий шероховатость поверхности трещин; K_W – коэффициент, учитывающий увлажнение пород; K_t – коэффициент, учитывающий раскрытие не заполненных трещин; K_A – коэффициент, учитывающий заполнение трещин; K_α – коэффициент, учитывающий ориентировку от выработки относительно систем трещин.

Таблица 4.3.2

Категория устойчивости	Степень устойчивости	Значение показателя	Характеристика состояния пород
I	Вполне устойчивые	>70	Вывалы и отслоения отсутствуют
II	Устойчивые	5–70	Возможны отдельные отслоения
III	Средней устойчивости	1–5	Возможно образование вывалов от кровли
IV	Неустойчивые	0,05–1,00	Вывалы вскоре после обнажения, вывалы в боках
V	Весьма неустойчивые	<0,05	Обрушение вслед за обнажением

В качестве критерия определения категорий устойчивости осадочных пород принимают величину их смещений U на контуре выработки за весь срок ее службы без крепи по таблице 4.3.3.

Таблица 4.3.3

Категория устойчивости пород	Оценка состояния устойчивости пород	Смещения U, мм
I	Устойчивости	До 50
II	Среднеустойчивое	От 50 до 200
III	Неустойчивые	От 200 до 500
IV	Сильно неустойчивые	Свыше 500

Величину смещения U вне зоны влияния очистных работ определяют по формуле

$$U=K_a K_t K_\theta K_S K_B U_T, \qquad (4.3.6)$$

где U_T – смещение пород, мм, принятое за типовое, определяется по графикам в зависимости от расчетного сопротивления пород сжатию R_c и расчетной глубины заложения выработки $H_р$; K_a – коэффициент влияния угла залегания пород или основных плоскостей трещиноватости; K_θ – коэффициент направления смещения пород (вертикальное, горизонтальное); K_S – коэффициент влияния размера выработки; K_B – коэффициент воздействия других выработок; K_t – коэффициент влияния времени возведения крепи (по сроку службы выработки).

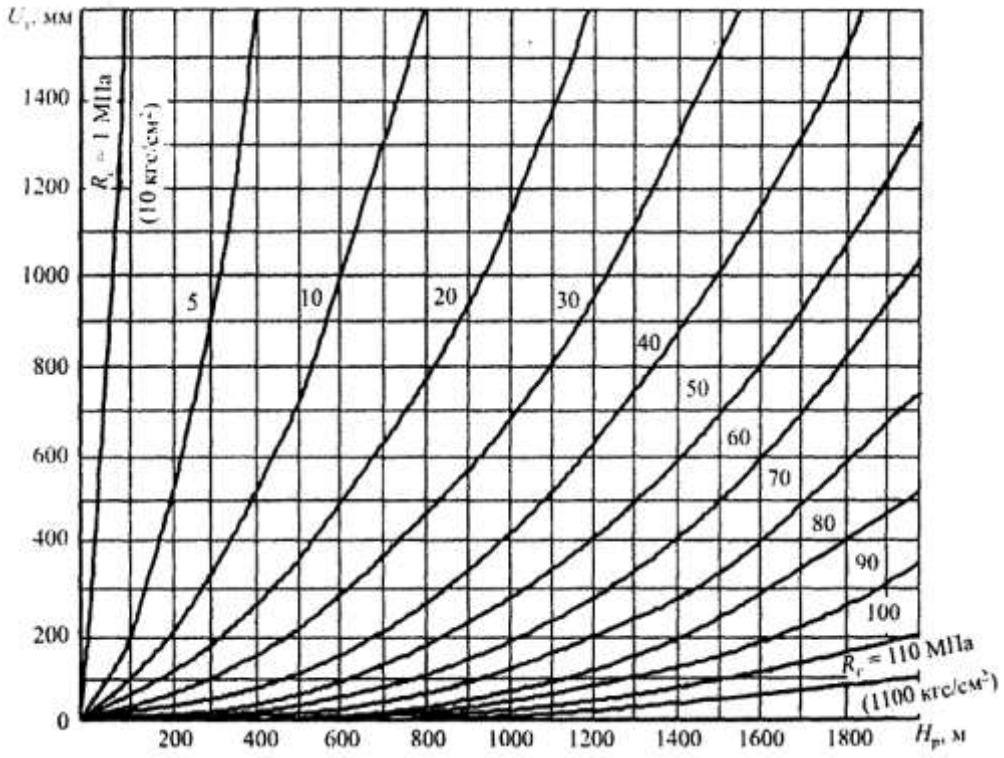


Рис. 4.3.2. График для определения типового смещения пород

Задача 4.3.1

Определить коэффициент устойчивости пород контура выработки, заложенной на глубине 500 м. Плотность вышележащих пород в среднем составляет ρ = 2400 кг/м^3. Коэффициент, учитывающий тектонические напряжения – 1,5. Определенный в лаборатории предел прочности песчаника на сжатие $\sigma_{сж}$ = 40 МПа. Массив пород

ослаблен системой трещин. Расстояние между трещинами в массиве равно 0,6 м.

Исходные данные вариантов к задаче 4.3.1

№ варианта	Глубина залегания пород рассматриваемого участка выработки *H*, м	Плотность пород окружающих контур выработки на рассматриваемом участке ρ, кг/м^3	Коэффициент учитывающий тектонические напряжения	Предел прочности породы при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа	Среднее растяжение между трещинами в породах кровли выработки, м
1	250	2300	1,3	35,0	0,2
2	350	3500	1,4	36,5	0,3
3	260	2350	1,7	50,0	0,6
4	340	2450	1,4	40,0	0,5
5	270	3400	1,5	45,5	0,4
6	330	3200	1,6	37,5	0,45
7	280	2480	1,7	38,9	0,55
8	320	2550	1,3	49,5	0,25
9	290	3100	1,5	48,5	0,55
10	310	2650	1,6	37,6	0,25
11	300	3250	1,7	45,5	0,3
12	345	2750	1,3	48,9	0,45
13	255	2850	1,4	19,5	0,6
14	265	2950	1,5	34,5	0,35
15	275	3000	1,6	41,5	0,2
16	325	3300	1,3	42,5	0,4
17	255	2600	1,7	43,5	0,3
18	335	2800	1,4	50,0	0,6
19	285	3500	1,5	37,5	0,45
20	295	2550	1,7	42,5	0,3

Задача 4.3.2

Определить коэффициент устойчивости пород контура выработки (штрека), заложенной на глубине 370 м. Ширина выработки вчерне 4 м, высота 3,0 м, форма – трапеция, ρ = 2550 кг/м^3 $\sigma_{сж}$ = 36 МПа.

Исходные данные вариантов к задаче 4.3.2

№ варианта	Глубина заложения штрека *H*, м	Ширина выработки в чернее *a*, м	Высота выработки в чернее *h*, м	Форма сечения выработки	Плотность пород окружающих выработку ρ, кг/м^3	Предел прочности породы при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа
1	250	4,0	3,0	трапеция	2300	35
2	350	4,5	3,1	арочная	3500	50
3	240	6,0	3,5	квадратная	2480	35,5
4	340	5,5	3,7	трапеция	2550	34,5
5	255	5,0	4,0	арочная	2750	49,5
6	245	4,9	3,2	квадратная	3000	45,5
7	340	5,7	3,4	трапеция	3400	40,7
8	345	5,6	3,6	арочная	3300	41,8
9	210	4,7	3,8	квадратная	3100	37,5
10	225	4,3	3,9	трапеция	2880	37,9
11	275	4,1	3,0	арочная	2990	42,5
12	325	5,4	3,5	квадратная	2900	44,5
13	290	5,7	4,0	трапеция	2800	48,0
14	280	5,9	3,7	арочная	2820	49,0
15	270	4,2	3,8	квадратная	2950	38,0
16	260	4,4	3,1	трапеция	2450	36,5
17	255	5,4	3,3	арочная	2650	37,0
18	315	5,0	3,0	квадратная	2700	40,0
19	320	6,0	4,0	трапеция	3000	41,5
20	335	5,8	3,7	арочная	2600	45,5

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 5

Методы исследования влияния горно-динамических проявлений при ведении горных работ

Тема 5.1 Напряженное состояние нарушенного массива горных пород

Теоретические основы и рабочие формулы

Массив пород и его механические модели

Массив горных пород – это область в верхней части земной коры, в которой осуществляется строительство подземного сооружения или системы горных выработок (в том числе открытых).

Модель – такая мысленно представляемая или материально реализуемая схема, которая, отображая или воспроизведя объект исследования, способна заменить его так, что ее изучение дает новую информацию об этом объекте и позволяет получить характеристику исследуемых явлений в наиболее общей математической форме. Модель должна быть пробна объекту: сплошность, изотропность, однородность.

1 Упругая модель массива пород

Упругая модель массива пород представляет собой линейно-деформируемую среду напряжения

$$\sigma = \frac{F}{S}, \qquad (5.1.1)$$

где F – сила, Н; S – плотность сечения, м^2.

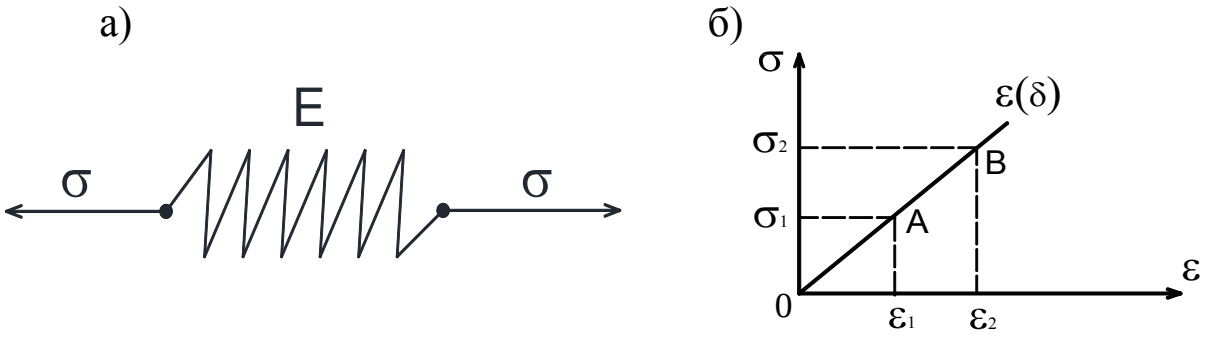


Рис.5.1.1. Упругая модель (модель Гука):
а – структурная схема; б – диаграмма напряжений; E – жесткость (модуль упругости, модуль деформации, модуль Юнга), Па; ε – деформация, м

Согласно закону Гука

$$\sigma = E\varepsilon. \qquad (5.1.2)$$

2 Пластическая модель массива пород

Пластическая модель массива характеризует процесс деформирования пластических горных пород под действием приложенных нормальных напряжений

$$\tau_{сд} = C + \sigma_n \operatorname{tg}\varphi, \qquad (5.1.3)$$

где $\tau_{сд}$ – напряжение сдвига породы; C – сцепление породы; φ – угол внутреннего трения породы.

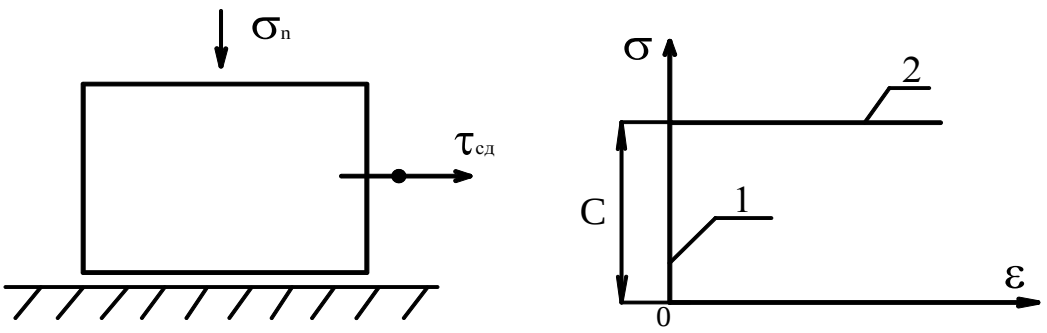


Рис. 5.1.2. Структурная схема (а) и диаграмма напряжений (б) пластической модели:
1 – отсутствие деформации; 2 – пластические деформации

3 Упругопластическая модель массива пород

Упругопластическая модель отличается от пластической учетом упругих деформаций, которые предшествуют пластическим. Структурная схема и диаграмма напряжений упругопластической модели массива пород показаны на рис. 5.1.3. До некоторого предела, определенного условием пластичности, в модели развиваются только упругие деформации, а по достижении указанного предела к ним добавляются пластические деформации.

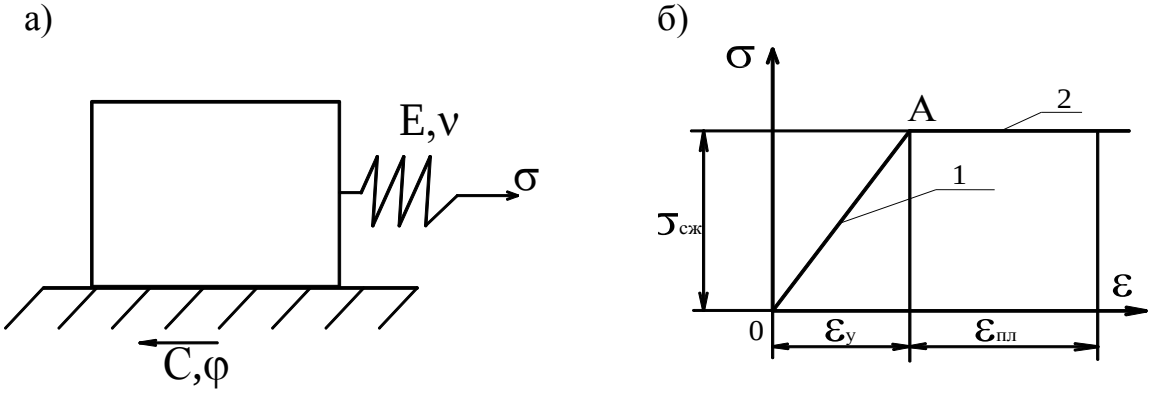


Рис. 5.1.3. Структурная схема (а) и диаграмма напряжений (б) упругопластической модели: 1 – область упругих деформаций; 2 – область пластических деформаций

$$\varepsilon_{об} = \varepsilon_{у} + \varepsilon_{пл} = \frac{d\sigma_{у}}{E} + \varepsilon_{пл}, \qquad (5.1.4)$$

4 Начальное напряженное состояние массива пород

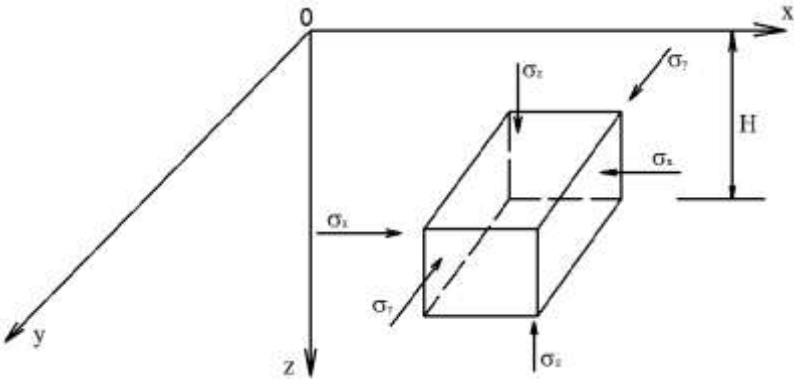


Рис. 5.1.4 Схема к определению напряжений
в ненарушенном массиве пород

5 Вертикальные напряжения

$$\sigma_z = \gamma H, \qquad (5.1.5)$$

где γ – объемный вес горных пород, Н/м^3; H – глубина от поверхности, м.

$$\gamma = \rho g, \qquad (5.1.6)$$

где ρ – плотность пород, кг/м^3; g – ускорение свободное падения, равно 9,81, м/с^2.

Если $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$, то $\sigma_x = \sigma_y = \lambda\gamma H$, (5.1.7)

где λ – коэффициент бокового давления;

$$\lambda = \frac{\nu}{I - \nu'}, \qquad (5.1.8)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

Задача 5.1.1

Определить напряжения в кровле пласта угля, залегающего в нетронутом массиве пород в вертикальном и горизонтальном направлениях. Глубина залегания почвы пласта угля мощностью 3 м, от поверхности составляет 300 м, средняя плотность вышележащих пород ρ = 2400 кг/м^3. В кровле пласта угля находится песчаник с коэффициентом Пуассона ν = 0,35.

Задача 5.1.2

Построить 2 диаграммы вертикальных и горизонтальных напряжений в зависимости от глубины их определения в точках через 15 м по вертикали. Условия задачи смотреть из таблицы «Вышележащие породы» (табл. 5.1.2).

Исходные данные вариантов к задаче 5.1.1

№ варианта	Мощность пласта h, м	Расстояние от поверхности до почвы пласта H, м	Средняя плотность пород залегающих под угольным массивом $\rho_{ср}$, кг/м^3	Коэффициент Пуассона ν
1	1,8	180	2300	0,30
2	3,0	185	2800	0,35
3	1,9	300	3000	0,31
4	2,0	292	2400	0,30
5	2,9	250	2500	0,40
6	2,1	260	2900	0,39
7	2,3	190	2700	0,33
8	2,4	195	2600	0,32
9	1,7	120	3000	0,34
10	2,2	210	2600	0,40
11	2,4	235	2550	0,36
12	2,0	241	2750	0,37
13	2,5	275	2990	0,38
14	2,6	295	3000	0,31
15	2,7	220	2300	0,30
16	3,0	230	2200	0,40
17	2,9	240	2900	0,35
18	1,7	250	2450	0,32
19	1,9	300	2550	0,33
20	1,8	290	2650	0,40

Таблица 5.1.2

Исходные данные вариантов к задаче 5.1.2

Номер варианта	Наименование пород	Мощность пласта, м	Объемная масса, т/м^3	Коэффициент Пуассона, ν
1	2	3	4	5
1	Глина	5,5	1,9	–
2	Аргиллит	10	2,4	0,35
3	Алевролит	20	2,5	0,3
4	Песчаник	30	2,7	0,27
5	Алевролит	15	2,4	0,24
6	Песчаник	25	2,8	0,26
7	Уголь	5,0	1,5	0,20

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5
8	Песчаник	12	2,6	0,24
9	Уголь	4,5	1,4	0,25
10	Алевролит	942	2,45	0,23
11	Глина	5,0	1,8	–
12	Аргиллит	9	2,2	0,4
13	Алевролит	19	2,0	0,31
14	Песчаник	25	3,1	0,28
15	Алевролит	20	2,5	0,20
16	Песчаник	18	3,0	0,25
17	Уголь	4,0	1,0	0,19
18	Песчаник	15	2,0	0,29
19	Уголь	4,0	1,2	0,20
20	Глина	4,5	1,5	–

Тема 5.2 Горные удары и их прогноз

Теоретические основы и рабочие формулы

Угольные пласты, рудные залежи и вмещающие породы на месторождении или части месторождения подразделяются на неопасные, угрожаемые и опасные по горным ударам (две последних категории склонные к горным ударам).

К угрожаемым относят – уголь, руда и породы с высокими упругими свойствами, способные к хрупкому разрушению под нагрузкой.

К опасным относят – угольные пласты, рудные залежи, породы на месторождении с глубины, на которой впервые зарегистрированы горные удары.

Проблема горных ударов существует более 100 лет на угольных шахах и рудниках. В настоящее время зарегистрировано свыше 750 горных ударов.

Горный удар – это хрупкое разрушение предельно напряженной части массива пород (угля, руды, соли) в зоне влияния горных выработок, возникающее в условиях, когда после достижения максимальной нагрузки на разрушаемый элемент приток энергии в него из окружающих пород превышает ее затраты на саморазрушение.

Такие условия необходимы для возникновения горных ударов, в математической форме можно записать по формуле (5.2.3):

Первое – условие достижения предельной нагрузки имеет вид

$$P_m \geq P_n, \qquad (5.2.1)$$

где P_m – максимальная нагрузка на массив; P_n – предельная нагрузка, которую способен выдержать рассматриваемый элемент массива.

Второе

$$\frac{M}{E_1}\frac{a_n}{h} \geq \mu_0, \qquad (5.2.2)$$

где a_n – размер зоны, в которой деформация происходит на падающем объекте зоны опорного давления (рис. 5.2.1 а); M – модуль спада разрушаемого массива (угля, руды, солей или пустой породы), характеризующий скорость падения абсолютной величины напряжений σ при росте абсолютной деформации ε на исходящем участке (рис. 11.1 б); E_1 – модуль упругости окружающих пород; h – характерный размер (мощность пласта, слоя, высота подготовительной выработки); μ_0 – критическое сочетание параметров, зависящее от рассматриваемых условий. Это условие, как видим, характеризует механическое состояние системы «Разрушаемый материал – вмещающие породы».

Сформулированные условия объясняют механизм горного удара. Хрупкое разрушение полезного ископаемого или пустой породы носит характер цепной реакции. В зоне А (см. рис. 5.2.1), находящейся в критическом состоянии при появлении трещин разрывов, концентрация напряжений, возникающая вокруг нее, приводит к разрушению материала вблизи нее. Разрушение материала в зоне А сопровождается мгновенным переходом потенциальной энергии этой зоны в кинетическую, следствием чего является выброс материала зоны В в выработку и удар в сторону целика (зона С), а так же в сторону кровли и почвы.

Ликвидация любого названного условия исключает возможность возникновения горного удара, т. е. достаточно выполнения оного из условий, противоположных (5.2.1) и (5.2.2)

$$P_m \langle P_n; \qquad (5.2.3)$$

$$\frac{M}{E_1}\frac{a_n}{h} < \mu_0. \qquad (5.2.4)$$

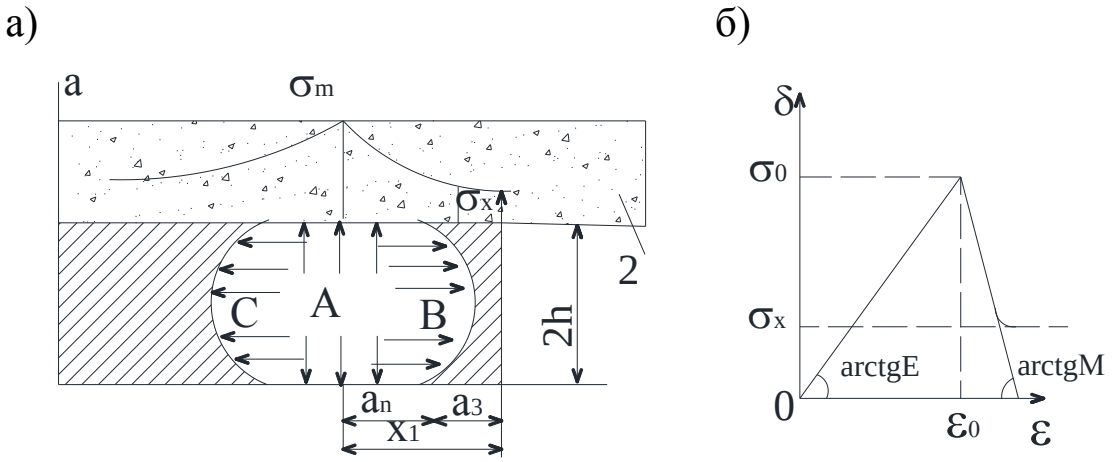


Рис. 5.2.1. Схема, иллюстрирующая условия и механизм возникновения горного удара (а) и диаграмма «напряжение - деформация» для хрупких горных пород (б);
1 – угольный пласт (рудная залежь); 2 – пласт (слой) вмещающих пород

Условие (5.2.3) всегда выполняется, пока призабойная область (краевая часть массива у выработки) находится под нагрузками, меньшими предела прочности породы (угля, руды) при одноосном сжатии в куске $\sigma^{к}_{сж}$, с учетом коэффициента длительной прочности *ƀ* и структурного ослабления λ, т. е.

$$P_m = \sigma_n k < P_n = \nu\lambda\sigma^{к}_{сж}, \qquad (5.2.5)$$

где σ_n – наибольшее нормальное напряжение, имевшее место до проведения горной выработки (нетронутого массива горных пород); k – коэффициент концентрации напряжений.

Коэффициент концентрации напряжений в более общем виде может быть записан так

$$k = k_c\, k_д\,, \qquad (5.2.6)$$

где k_c – статический коэффициент концентрации напряжений; $k_д$ – динамический коэффициент концентрации напряжений, характеризующий возрастание напряжений в момент обрушения труднообрушаемых зависших пород.

Напряженное состояние нетронутого массива горных пород обусловлено силами гравитационного и тектонического происхождения, а так же напряжениями, отражающими структурную расчлененность массива локального характера (тектонического, разрывного и пликативного типов). Условие (5.2.4) может быть достигнуто путем

изменения физических свойств разрушаемого материала (угля, руды, соли, пустой породы) или окружающих его вмещающих пород.

По степени удароопасности участки пластов делят на три категории:

1. Участок представляет повышенную опасность. До приведения выработок в неудароопасное состояние постоянное пребывание и передвижение людей, не связанных с профилактической обработкой, не разрешается.
2. Участок опасен по проявлению горного удара. Выработка должна быть приведена в неудароопасное состояние.
3. Участок соответствует неудароопасному состоянию.

Для оперативной оценки степени удароопасности в шахте пользуются методами относительной оценки напряженного состояния по показателям, характеризующим степень удароопасности краевой части пласта.

На рис. 5.2.2 приведена принципиальная схема к интерпретации результатов, получаемых различными методами, по определению расстояния до максимума опорного давления. По экстремальным значениям того или иного показателя определяется расстояние до максимума зоны опорного давления.

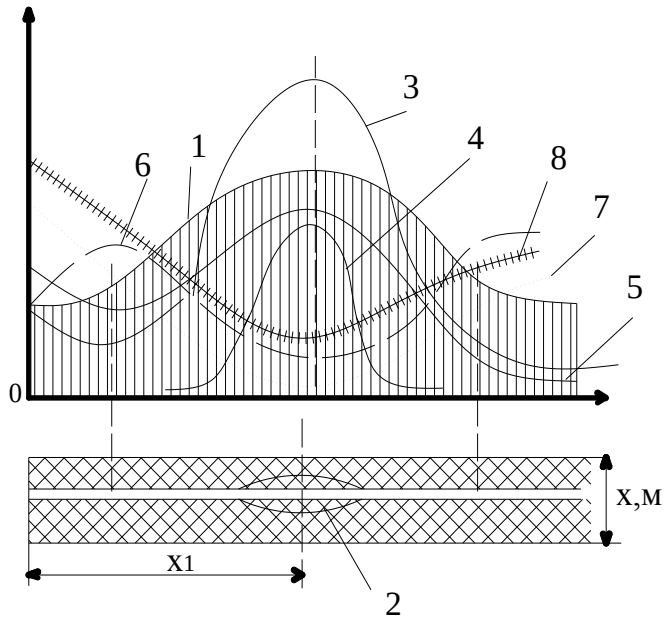


Рис. 5.2.2. Схема к определению расстояния до максимума опорного давления: 1 – распределение нагрузок в зоне опорного давления; 2 – область предельного напряженного состояния угля вокруг скважины; 3 – выход штыба; 4 – сейсмоакустическая активность; 5 – крупность штыба; 6 – усилие вдавливания Пуассона; 7 – электропроводность; 8 – влажность; X – расстояние до максимума опорного давления

Методика определения удароспособности участков пластов, прошедшая апробацию на шахтах Кузбасса по потенциалу естественного электрического поля и по изменению удельного электрического сопротивления угля в массиве заключается в следующем.

Удароспособность оценивают с использованием эмпирического показателя удароопасности

$$Д_у = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{заб}}{10x_1}, \qquad (5.2.7)$$

где σ_{max} – максимальное напряжение в краевой части пласта, Па; $\sigma_{заб}$ – напряжение на кромке пласта, Па; x_1 – расстояние до максимума опорного давления, м.

Величины σ_{max} и $\sigma_{заб}$, входящие в формулу (5.2.7), определяют из выражений

$$\sigma_{max} = \left[1 + 1{,}5e^{\frac{x_1}{1+r_0}}\right]\gamma H; \qquad (5.2.8)$$

$$\sigma_{заб} = \frac{36}{\left[1 + e^{-7{,}28(f-0{,}75)}\right]}, \qquad (5.2.9)$$

где r_0 – шаг обрушения пород основной кровли, м; f – коэффициент крепости угля по шкале М. М. Протодьяконова.

При $Д_у$ >10 оцениваемый участок считают удароопасным, при $Д_у$ < 10 – неудароопасным. Для контроля за удароопасностью выработок строят зависимость показателя удароопасности $Д_у$ от расстояния до максимума опорного давления x_1 по формуле (5.2.7) и устанавливают безопасные пределы измерения расстояния x_1.

Удароопасность контролирую путем измерения расстояния до максимума опорного давления электрометрическими методами и сравнения данного расстояния с безопасными пределами измерения x_1. При этом, если измеренное значение x_1 оказывается меньше критического, соответствующего $Д_у$ = 10, то выработка считается удароопасной, в противном случае – неудароопасной.

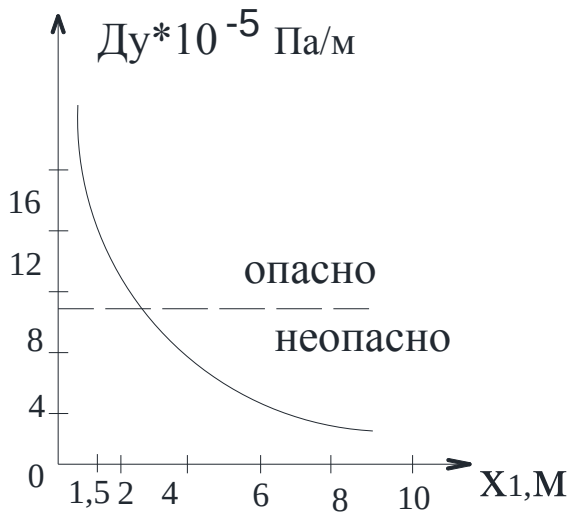


Рис. 5.2.3. График для оценки удароопасности участков пласта

Задача 5.2.1

Исходные даны: глубина H = 400 м, $\gamma_н = 10 \cdot 10^6$ Па; шаг обрушения основной кровли r_0 = 10 м; измеренное расстояние до максимума опорного давления X = 4 м; f = 0,7. Строим зависимость $Д_у(x_1)$ по формуле (5.2.7) – рис. 5.2.3 По кривой $Д_у(x_1)$ определить x_1.

Необходимо оценить удароопасность участка пласта угля. Расстояние до максимума опорного давления измеряют двумя независимыми методами – по потенциалу естественного электрического поля и по распределению удельного электрического сопротивления угля в массиве.

Исходные данные вариантов к задаче 5.2.1

Номер варианта	Глубина заложения угольного пласта H, м	Насыпная плотность угольного пласта $\rho_н$, Па	Шаг обрушения основной кровли пласта P_0, м	Измеренное расстояние до максимума опорного давления X , м	Коэффициент крепости угля по шкале Протодьяконова, f
1	2	3	4	5	6
1	250	10,	7,	2,	0,7
2	400	12,0	15,0	6,0	0,8
3	390	13,0	12,5	2,5	1,3
4	350	11,2	13,5	5,5	1,0
5	360	10,1	14,0	3,5	0,7
6	260	11,5	14,5	3,9	1,2

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6
7	270	12,0	8,3	4,8	0,9
8	380	12,9	9,1	3,7	0,7
9	280	10,5	10,6	5,5	1,3
10	370	10,9	8,9	5,9	1,0
11	270	11,1	11,5	3,7	1,2
12	360	12,9	12,5	4,5	0,8
13	400	12,5	14,5	5,1	0,9
14	240	10,8	13,5	6,0	1,0
15	250	11,3	9,5	5,3	1,2
16	340	11,6	10,9	4,2	1,3
17	270	12,4	14,8	3,2	0,7
18	390	12,3	13,3	4,6	0,8
19	300	13,0	12,7	5,3	0,9
20	320	12,0	12,2	5,6	1,3

Список рекомендуемой литературы

1. 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. – Кемерово, 2015. – 309 с. – Доступна электронная версия: http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=91287&type=utchposob:common

2. Дементьев, А. В. Геомеханика [Электронный ресурс] : 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» / ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева», Каф. стр-ва подзем. сооружений и шахт. – Кемерово, 2015. – 105 с. – Доступна электронная версия: http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=91292&type=utchposob:common

3. Геомеханика : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров «Горное дело» и по направлению подготовки диплом. специалистов «Горное дело» / Э. В. Каспарьян [и др.]. – Москва : Высшая школа, 2006. – 503 с.

4. Борщ-Компониец, В. И. Практическая механика горных пород. – Москва : Горная книга, 2013. – 322 с.

Содержание

Предисловие. 3
ИДДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 1
Методика расчета плотностных и прочностных свойств горных пород. 5
ИДДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 2
Методика определения реологических свойств, структурно-текстурной неоднородности и структурно-текстурного ослабления горных пород 27
ИДДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 3
Методика анализа акустических и упругих свойств горных пород. 37
ИДДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 4
Методы исследования напряженного состояния горных пород вокруг проводимых выработок. 43
ИДДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 5
Методы исследования влияния горно-динамических проявлений при ведении горных работ. 56
Список рекомендуемой литературы. 68