

СВОЙСТВА ПОРОД ЗОН РАЗГРУЗКИ

Приведены структурные и физико-механические характеристики толщи пород в пределах региональных зон разгрузки. Показано их влияние на устойчивость горных выработок, поддерживаемых в под- и надработанной толще.

При разработке пологих угольных пластов Донбасса в сложных условиях больших глубин широко применяются новые и эффективные способы охраны подготавливающих выработок в региональных зонах разгрузки, в частности, проведение и поддержание основных наклонных выработок и магистральных штреков в породах почвы пласта в зоне предварительной разгрузки (так называемый способ предварительной надработки) или в обрушенных и уплотненных породах кровли пласта, создание зон последующей региональной

разгрузки для обеспечения устойчивости полевых выработок (способ последующей надработки). Формирование зон региональной разгрузки в толще горного массива осуществляется путем отработки разгрузочных лав длиной 150...250 м.

Устойчивость выработок, поддерживаемых в зонах разгрузки, зависит в основном от параметров расположения их относительно границ зоны разгрузки и плоскости, почвы отработанного пласта, типа и работоспособности применяемых крепей, способов защиты выработок от вредного воздействия смежных очистных работ, свойств пород зон разгрузки. Знание хотя бы в первом приближении структурных и физико-механических характеристик пород позволяет учитывать особенности поведения вмещающей среды в общем комплексе мероприятий по предотвращению проявлений горного давления в выработках. Авторы приводят результаты исследований по определению свойств пород зоны разгрузки применительно к условиям глубоких шахт Донецкого бассейна.

После выемки угля разгрузочной лавой в под- и надработанной толще горного массива образуются сводообразные зоны разгрузки, вытянутые в сторону большего размера очистной выработки. При этом в надработанной толще эта зона имеет форму перевернутого свода. Напряжения в породах зон разгрузки всегда меньше по сравнению с нетронутым массивом. Породы зоны разгрузки характеризуются большой трещиноватостью, интенсивность которой уменьшается по мере удаления от плоскости почвы отработанного пласта в глубину массива. При этом характерно, что ступенчатые скачки (всплески) роста трещиноватости приурочены к относительно слабым слоям пород, т. е. при переходе от прочного слоя к слабому.

В подработанной толще зона разгрузки включает обрушенные и уплотненные породы кровли пласта и вышележащие слои пород, претерпевшие процесс полных оседаний или шарнирно-блокового перемещения. На больших глубинах подготавливающие выработки чаще всего располагают в обрушенных и уплотненных породах кровли пласта. Это позволяет сохранить конструктивно простую схему подготовки горизонтов, панелей и блоков, сократить время подготовки запасов за счет расширения области применения проходческих комбайнов, обеспечить в большинстве случаев хорошую устойчивость выработок. Мощность обрушенных и уплотненных пород кровли по нормали к напластованию обычно составляет 2...6 мощностей отработанного пласта. Величина ее зависит от структуры и физико-механических свойств пород кровли и почвы, а также от мощности вынимаемого пласта.

При обработке пологих пластов мощностью 0,9...1 м и более, в непосредственной кровле которых залегают аргиллиты и алевролиты средней и ниже средней устойчивости, толща обрушенных и уплотненных пород состоит из двух подзон. Непосредственно на

почве отработанного пласта располагается слой мелкодробленых пород мощностью, как правило, менее вынимаемой мощности пласта. Обычно чем выше степень диагенеза вмещающих пород, тем меньше мощность слоя мелкодробленых пород кровли. По своим свойствам породы этого слоя достаточно близки к сыпучей среде, в которой обломки, куски и породная мелочь расположены хаотично. Структуру пород мелкодробленого слоя лучше всего характеризовать гранулометрическим составом, типичная кривая которого приведена на рис. 1. По составу мелкодробленые породы аналогич-

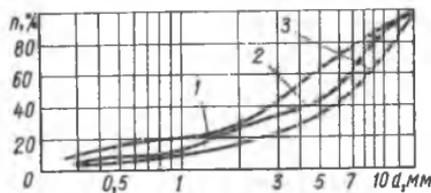


Рис. 1. Суммарное содержание n фракций частиц мелкодробленого слоя пород в зависимости от их диаметра d :

1, 2, 3 — соответственно кровля пластов m_3 , l_4 , h_{10}

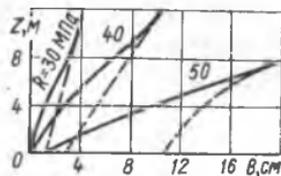


Рис. 2. Изменение блочности B пород зон разгрузки с увеличением расстояния Z от плоскости почвы отработанного пласта (сплошные кривые — кровли, пунктирные — почвы)

ны грунтам типа супесей или каменистых суглинков. Если эти породы размокают в воде, то они часто превращаются в пластическую среду с малым углом внутреннего трения, что весьма неблагоприятно сказывается на устойчивости выработок.

Над мелкодробленным слоем пород располагается подзона упорядоченной трещиноватости пород, разбитая двумя главными системами трещин (вертикальной и отдельностей) и представляющая собой блочную среду (аналогичную безрастворной кирпичной кладке). По мере удаления от мелкодробленого слоя уменьшается трещиноватость пород и увеличиваются размеры блоков. С увеличением прочности подработанных пород и уменьшением мощности вынимаемого пласта при прочих равных условиях возрастает блочность обрушенных пород. Величину блочности B в первом приближении можно определить по графикам, показанным на рис. 2 в зависимости от прочности пород в образце на одноосное сжатие R , МПа. Кривые блочности здесь соответствуют вынимаемой мощности пласта $m = 1$ м. Если мощность пласта изменяется в пределах 0,5... 2,5 м, тогда размер блока во второй подзоне обрушенных и уплотненных пород определяется по формуле $B_1 = B/m$.

Вертикальная система трещин является следствием проявлений сил горного давления. Она простирается параллельно линии очист-

ного забоя и почти перпендикулярна слоистости пород. Ее возникновение связано с действием скалывающих напряжений. Интенсивность трещин достигает $40 \dots 70 \text{ м}^{-1}$. Система отдельностей (трещин между слоями) образуется при обрушении в процессе отрыва нижних слоев от верхних. Интенсивность отдельностей достигает $60 \dots 100 \text{ м}^{-1}$. Независимо от направления подвигания лавы (по простиранию, восстанию или падению) трещины горного давления всегда примерно параллельны отработанному очистному забою. Кроме того, в обрушенных и уплотненных породах имеются плоскости скольжения (примерно через $3 \dots 5 \text{ м}$), по которым при посадке кровли происходило оседание породных блоков. Линии простирания этих плоскостей также параллельны очистному забою. Все эти системы трещин и исходная природная трещиноватость пород определяют блочность обрушенных и уплотненных пород в пределах зоны разгрузки.

Устойчивость подготавливаемых выработок, поддерживаемых в обрушенной и уплотненной толще, зависит в основном от физико-механических свойств и поведения пород мелкодробленого слоя, который располагается обычно в боках выработки на уровне ее подошвы или несколько выше. В связи с этим важно знать плотностные компрессионные, гидравлические и прочностные характеристики пород этого слоя. Согласно исследованиям, средняя плотность мелкодробленых пород зависит от степени их уплотнения и насыщения водой и изменяется от 1700 до 2300 кг/м^3 . Плотность скелета пород при этом составляет $2800 \dots 2900 \text{ кг/м}^3$, пористость их достигает $16 \dots 30 \%$, что создает благоприятные условия для проникновения в породы воды и последующего выветривания. Мелкодробленые породы низкой степени диагенеза (вмещающие угли марки Д и Г) в наибольшей мере подвержены выветриванию. Размокание их протекает в течение десятков дней и не превышает $1 \dots 2$ мес. Это способствует интенсивному проявлению пластических свойств, при этом число пластичности достигает 30% , что отрицательно сказывается на устойчивости выработок. Испытания мелкодробленых пород (их можно считать типичными) в сдвиговом приборе и одометре показывают, что повышение их влажности от $1,5$ до $7,1 \%$ приводит к уменьшению угла внутреннего трения от 43 до 18° (рис. 3). Результаты компрессионных испытаний пород (табл. 1) свидетельствуют о практически почти полной аналогии их с данными испытаний грунтов [8].

Одной из основных характеристик обрушенных и уплотненных пород является их коэффициент бокового распора λ , характеризующий реакцию вмещающих выработку пород на внешние воздействия (обводненность, влияние очистных работ и др.). Значения λ определяли с помощью стабилметра в условиях объемного напряженного состояния. В целях снижения трудозатрат и повышения достоверности результатов испытаний использована методика пла-

нируемого эксперимента. По данным нагружений 16 образцов установлена следующая зависимость:

$$\lambda = 0,362 + 0,11 \ln(1 + PK) - 0,389/(1 + PW^2), \quad (1)$$

где $P = 30 \dots 10$ и $5 \dots 0$ % — число пластичности, для пород, вмещающих угли марок Д—Г и ОС—А (для марок Ж—К имеем промежуточные значения); $K = 8 \dots 20$ — коэффициент неоднородности гранулометрического состава пород; W — влажность пород.

Следует отметить, что при прочих равных условиях число пластичности всегда больше у пород с глинистым цементом, чем с карбонатным. Кроме того, чем больше содержание цемента, тем больше значения P . Формула (1)

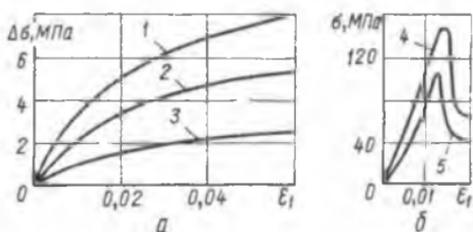
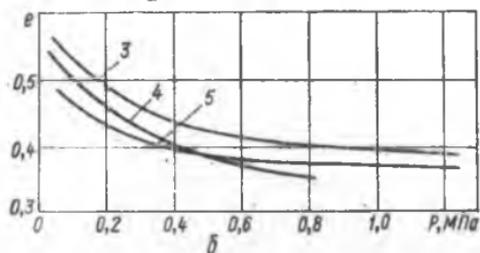
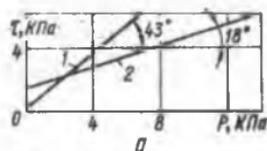


Рис. 3. Зависимость прочности на сдвиг τ мелкодробленых пород (а) и их коэффициента пористости e при компрессионных испытаниях (б) от нормального давления P :

1 и 2 — воздушная-сухая и влажная пробы; 3 — глина [1]. 4 и 5 — породы кровли пластов l_4 и m_5

Рис. 4. Результаты стабилометрических испытаний обрушенных мелкодробленых (а) и надработанных пород (б):

1, 2 и 3 — нормальные максимальные напряжения σ_1 , соответственно 12,6 и 3 МПа; 4 и 5 — то же, минимальные σ_3 , равные 20 и 10 МПа

Таблица 1

Тип пород	Предел пластичности, %		Число пластичности, %	Коэффициент уплотнения, м ² /МН	Модуль общей деформации, МПа
	нижний	верхний			
Глина	5—60	5—80	17—70	0,19/0,04	3,9/17,8
Суглинки	5—60	5—80	7—17	—	—
Породы кровли пласта:					
m_3	24,1	46,6	22,5	0,4/0,01	3,9/19,7
l_4	12,7	27,1	14,4	0,5/0,02	2,5/78,0
h_{10}	16,7	21,7	5,0	0,8/0,06	8,2/60,0

Примечание. В числителе приведены данные для давления 0,15 МПа; в знаменателе — для 1,2.

Порода	Предел прочности (МПа) при боковом давлении, МПа		Модуль, ГПа			Контактная прочность, МПа
	10	20	деформации	разгрузки	спада	
Аргиллит	117/89	133/126	13/15	22/24	22,3/12,8	640/506
Уголь	64	96	2,1	5,6	—	—
Алеврит	285/130	353/150	29,8/18,2	38,8/28,8	20,1/12,8	—/506
Песчаник	290/206	360/—	23/30,5	38/38,7	—	910/—

Примечание. В числителе приведены данные для пласта h_{10} шахты им. Калининна, в знаменателе — для пласта m_3 шахты им. Бажанова.

позволяет оценивать значения по геологическим данным вмещающих пород. По мере увеличения λ ухудшается устойчивость выработки, поддерживаемой в обрушенных и уплотненных породах.

В зонах разгрузки горные выработки поддерживаются в породах, находящихся в условиях всестороннего сжатия. Учитывая это, прочностные и деформационные характеристики таких пород определяли в объемном напряженном состоянии. Испытания 42 породных образцов проведены в стабиллометрах собственной конструкции [1] и ВНИМИ, имеющем жесткую нагрузочную характеристику. На рис. 4 показаны деформационные кривые образцов пород обрушенной и надработанной толщи. В связи с очень малым сцеплением обрушенные и уплотненные породы не имеют нисходящей характеристики и деформируются аналогично пластической среде. В табл. 2 приведены типичные характеристики пород под- и надработанной толщи для условий Донецко-Макеевского угленосного района Донбасса. На основе статистической обработки результатов испытаний установлена зависимость главной нормальной деформации ϵ_1 породы от действующих главных нормальных напряжений σ_1 и σ_3 :

$$\epsilon_1 = \frac{K_0 \Delta\sigma}{K_1 [2C + (\sigma_1 + \sigma_3) (1 - \lambda) / (2\sqrt{\lambda}) - \Delta\sigma]}, \quad (2)$$

где $K_0 = 30,72$ МПа; $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$, МПа; K_1 — модуль объемного сжатия, МПа; C — сцепление пород, МПа.

Зависимость (2) позволяет описать нелинейное поведение пород зон разгрузки на любой стадии их деформирования вплоть до прогрессирующего разрушения (при условии сложного неравнокомпонентного сжатия). Она является основой нелинейной модели для расчета напряженно-деформированного состояния пород разгруженной толщи.

Чтобы определить в первом приближении свойства пород зон разгрузки в натуре, воспользуемся методиками перехода от свойств их в образце к свойствам в массиве. Прочностные характеристики

образца при таком переходе обычно умножают на коэффициент структурного ослабления [2], определяемый по формуле $K_2 = C_m/C_0$, где C_m и C_0 — сцепление пород соответственно в массиве и образце, МПа. В литературе имеется две зависимости, по которым чаще всего рассчитывают значения этого коэффициента [3; 7]: $K_2 = (H/B_1)^{-0,6}$ и $K_2 = [1 + a \ln(H/B_1)]^{-1}$, где H — размер, рассматриваемой области массива; B_1 — блочность обрушенных пород; $a = 3...5$ для пород средней крепости с нормально секущей трещиноватостью.

Блочность обрушенных пород колеблется обычно от 1 до 100 см и более. Размер области влияния горной выработки на окружающий массив составляет 10...40 м. При таких значениях исходных величин отношение H/B_1 имеет очень большой диапазон, а следовательно, значение $K_2 = 0,25...0,03$. Характерно, что обе зависимости дают достаточно близкие расчетные результаты.

Для обрушенных и уплотненных пород угол внутреннего трения по контактам трещин составляет 16...30° [4]. Системная трещиноватость толщи в пределах зоны разгрузки существенно изменяет деформационные свойства такой толщи. Так, при блочности 3...5 см расчетная пустотность обрушенных пород составляет 1...2 % [5], модуль деформации толщи таких пород в 2 раза меньше, чем в образце. Пустотность сообщающихся трещин обуславливает значения коэффициента фильтрации в пределах $10^4...10^{-3}$ см/сут.

Для расчета деформационных характеристик толщи пород зон разгрузки наиболее приемлем метод из работы [6]:

$$E_T = E / [1 + \sum_{i=1}^K \eta_i (1 - \sin^4 \varphi_i)], \quad (3)$$

где E_T и E — модуль деформации трещиноватого массива и монолитного породного образца; φ_i — угол, образуемый трещинами i -й системы с горизонтом; $\eta_i = \delta/(\xi h)$ — геометрическая характеристика трещин i -й системы; δ и h — среднее раскрытие трещин и расстояние между ними; $\xi = 0,0003$ — безразмерная площадь контакта берегов трещин.

В табл. 3 в качестве примера приведены деформационные характеристики трещиноватой вмещающей толщи, претерпевшей влияние отработки пласта h_{10} в условиях шахты им. Калинина ПО «Донецк-уголь». Данные ее показывают, что разгруженная толща имеет существенно меньшие модули деформации по сравнению со значением модуля образца пород. Особенно велика эта разница для пород обрушенной и уплотненной толщи (примерно в 3,4 раза). Отсюда следует, что податливость разгруженной толщи увеличивается пропорционально интенсивности ее трещиноватости (надработанной и обрушенной соответственно в 1,1...1,2 и 3,3...4,4 раза). Обобщающие характеристики пород зон разгрузки приведены в табл. 4

Таблица 3

Толща пород	δ , мм	h , мм	φ , ... °	η	Модуль деформации пород, ГПа			
					образца	массива*		
						E	E_z	E_x
Надработанная	0,01	200	90 ± 10	0,167	38,8	33,2	33,2	38,0
	0,005	100	0 ± 20	0,167				
Обрушенная и уплотненная	0,02	30	90 ± 10	2,22	22,2	5,0	6,8	21,0
	0,01	10	0 ± 20	3,333				

Примечание. В числителе приведены структурные и деформационные характеристики трещин горного давления, в знаменателе — отдельностей.

* Направление z нормально к напластованию; x — параллельно подвиганию разгрузочной лавы, y — параллельно забою лавы.

Таблица 4

Толща пород	Коэффициент структурного ослабления K_2	Угол внутреннего трения по контактам, ... °	Отношение модуля деформации образца к модулю массива	Коэффициент фильтрации, см/сут
Подработанная	0,25 ... 0,05	16 ... 30	1,1 ... 3	$10^{-5} \dots 10^{-6}$
Обрушенная	0,03 ... 0,05	10 ... 40	3 ... 6	$10^{-4} \dots 10^{-3}$
Надработанная	0,25 ... 0,10	16 ... 30	1,1 ... 1,5	10^{-5}

Таким образом, главными особенностями структуры разгруженной толщи является ее ярко выраженная зольность, большая интенсивность и закономерная направленность наведенной трещиноватости, что уменьшает в 4...20 раз прочность пород и увеличивает в 1,7...4,4 раза их податливость по сравнению с аналогичными характеристиками в образце.

В объемном напряженном состоянии поведение пород под и надработанной толщи в качественном плане принципиально не отличается от поведения их в монолитном образце. Мелкодробленые породы обрушенного и уплотненного слоя деформируются как пластические среды. По своим плотностным, компрессионным и деформационным свойствам они весьма близки к глинистым грунтам и суглинкам и оказывают при прочих равных условиях основное влияние на устойчивость выработок, поддерживаемых в зонах разгрузки.

Список литературы

1. А. с. 883432 СССР, МКИ⁴ Е 21С 39/00. Стабилометрическое устройство для испытаний образцов на объемное сжатие.
2. Баклашов И. В. Деформирование и разрушение породных массивов. — М.: Недра, 1988. — 271 с.