

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫМ МАССИВОМ ГОРНЫХ ПОРОД

Звягильский Е.Л. (ш. им. Засядько, г. Донецк, Украина)

Назимко В.В., (ДонГТУ, г. Донецк, Украина)

Довготривалі осідання гірського масиву були проаналізовані методом термодинаміки незворотних процесів. Показано, що керування станом масиву доцільно базувати на слідуючих геомеханічних принципах. Штучне підвищення тріщинуватості та пустотності обвалених порід; штучне (примусове) дезорієнтування блоків обвалених порід; підвищення довговічності порід, які ще не обвалились. Доказано, що перші два фактори зв'язані з третім позитивним зворотним зв'язком, що сприятливо відбивається на стійкості поверхні над покинутими шахтами.

Long-term subsidence has been examined with thermodynamics of irreversible processes. Optimal methods of ground control are: artificial fracturing and disorientation of caved rocks; durability enhancing of rock mass. The first two factors are connected by positive feedback with the other. This is in favor with the stability of undermined rock mass.

Длительное разрушение породного массива является типичным необратимым процессом накопления повреждений и сдвижений. Такой процесс в наиболее общем виде описывается термодинамикой необратимых процессов [1]. Этот раздел науки имеет преимущества перед другими теоретическими методами. Эти преимущества заключаются в универсальности подхода к описанию всего комплекса изменчивых физических и механических полей и факторов в окрестности длительно деформирующегося массива горных пород. Так например теория упругости хорошо описывает лишь перераспределение

напряжений и деформаций вокруг подземной выработки до достижения предела прочности пород. Остальные важнейшие процессы, такие как накопление поврежденности, развитие трещин, обрушение пород и повторное их уплотнение под действием собственного веса теория упругости не в состоянии даже объяснить. Методы теории пластичности способны объяснить в некоторой степени механизм накопления поврежденности за пределом упругости породы, но процессы обрушений породных слоев, перешедших в запредельное состояние описать с помощью этой теории невозможно. Фотограмметрия дает возможность описать распределение кусковатости обрушенных пород, но не в состоянии объяснить механизм их обрушения и последующего уплотнения.

Другими словами все указанные методы изучают лишь отдельные стороны сложного процесса длительных сдвижений горных пород над заброшенными выработками. Только термодинамика необратимых процессов дает возможность абстрагироваться на достаточно высоком уровне, чтобы одновременно описать процессы перераспределения напряжений, накопление поврежденности в породах, их обрушение, кинематику активных сдвижений в процессе обрушения и наконец охарактеризовать трещиноватость и кусковатость обрушенных пород с помощью поверхностной энергии. В связи с этим в данной работе указанный метод принят в качестве инструментария для теоретического описания процесса длительных сдвижений массива горных пород над заброшенными выработками. Прежде чем приступить к теоретическому анализу вышеуказанного процесса, рассмотрим состояние обрушенных пород, которое является конечным результатом длительного процесса обрушения и оседания толщи.

Обследование структуры обрушенных пород

Структура обрушенных пород исследовалась на многих угледобывающих шахтах Украины, России и некоторых шахтах США. Ранее считалось, что зона беспорядочного обрушения

пород имеет высоту, равную 2-8 вынимаемым мощностям пласта [2]. В этом диапазоне породы перемешаны и ориентированы хаотично, что порождает существенный коэффициент разрыхления. Максимальное его значение достигает величины 1.28-1.30. Такое существенное разуплотнение обуславливает наличие значительного эффекта самоподдержки породного массива и может препятствовать его дальнейшему обрушению. Так массив на первоначальном интервале 5-6м в нетронутым состоянии способен после разрыхления компенсировать полость высотой 1,5-1,8м. Если бы это было так в действительности, то регистрируемые провалы поверхности от заброшенных на глубине 10м и более выработок не были бы возможны. На самом деле они происходят, причем глубина провалов соизмерима с высотой подземной заброшенной выработки. Это свидетельствует о том, что существующие представления о высоте зоны беспорядочного обрушения и величине коэффициента разрыхления неверны. Такое противоречие может быть объяснено тем, что структура обрушенных пород изучалась через скважины и на моделях из эквивалентных материалов, а не в натуральных условиях. Только натурные обследования могут дать надежные результаты.

Специальные исследования обрушенных пород были начаты в работе [3]. Условия, в которых производились натурные исследования были следующими: глубина разработки 500-1100м, предел прочности пород на одноосное сжатие изменялся от 30 до 60Мпа, мощность пласта 1-1,7м, уголь вынимался длинными очистными забоями, управление кровлей велось путем ее полного обрушения, скорость подвигания очистного забоя составляла 30-65м/мес.

Типичный вид обрушенных и уплотненных пород приведен на рис. 1-3. Были установлены существенные особенности строения обрушенных пород. Прежде всего оказалось, что беспорядочно ориентированные обрушенные породы занимают место в пределах высоты вынимаемой мощности пласта (рис. 1). Это означает, что породы обрушались в виде беспорядочно падающих кусков на высоту не более вынимаемой мощности

пласта. Остальная часть непосредственной кровли обрушалась упорядоченными блоками (рис. 2, 3). Такая ситуация порождает неожиданно низкое значение коэффициента разрыхления.

Он определялся как отношение высоты обрушенных пород к их первоначальной высоте в нетронутым состоянии перед обрушением. Оказалось, что действительный коэффициент разрыхления составляет 1.15-1,32 непосредственно в слое дробленых и дезориентированных пород и 1.07-1.14 в остальной части обрушенного массива. Это естественно, поскольку блоки обрушенных пород занимают примерно то же место, что и в нетронутым массиве до обрушения. Следовательно несущественное разрыхление может быть накоплено лишь с

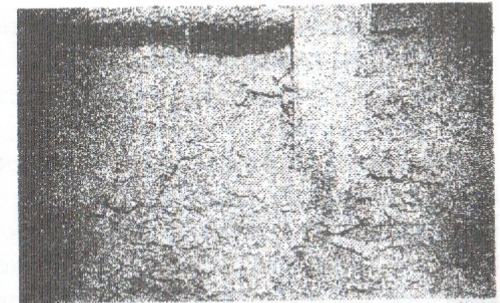


Рис.1. Внешний вид неупорядочно обрушенных пород.



Рис.2. Вид типичных пород обрушающихся ориентированными блоками.



Рис.3. Неповрежденный породный пласт в обрушенной породной массе.

ничтожных зазоров между хорошо пригнанными друг к другу блоками. И наоборот, значительное разрыхление может быть получено за счет зазоров между отдельными блоками породы, которые хаотически ориентированы друг относительно друга. Измерения площади поверхности трещин показали, что в ориентированных блочных массивах прочностью около 40МПа удельная поверхность трещин составляет примерно $1000-2000\text{ м}^2/\text{м}^3$, тогда как в хаотически ориентированных обрушенных массивах эта поверхность в 100-1000 раз больше.

Специальные обследования структуры обрушенных пород были проведены в американской шахте Клайд в штате Пенсильвания (рис. 4). Этот природный участок характерен тем, что при выемке угля применялась камерно-столбовая система разработки, которая как раз провоцирует задержанные во времени сдвигения и обрушения поверхности над горизонтальными одиночными выработками. Глубина разработки составляла 130м. Вынимаемая мощность пласта равнялась 1,6м. Пласт был отработан 30 лет назад. Высота камеры составляла 1,9-2,0м, ширина 4,9м. На момент обследования высота полости обрушения составляла 3,5-3,8м.

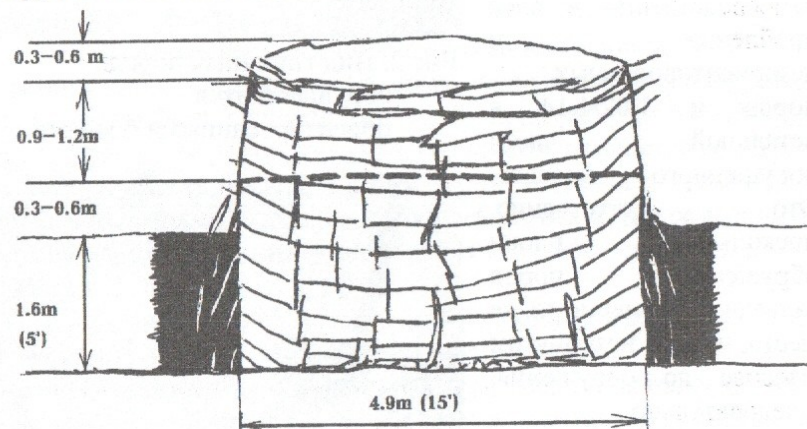


Рис.4. Внешний вид обрушенных пород в подземной камере.

Подчеркнем, что ориентация блоков обрушенных пород была неслучайной. Подавляющее число породных обрушенных блоков были упорядочены в пространстве и занимало примерно параллельное первоначальному положение. Было легко проследить положение породных слоев в толще обрушенных пород. В целом, обрушившаяся толща высотой 3,2м занимала первоначально место в массиве на высоту 1,6м, то есть разуплотнилась в 2 раза. Однако очевидно, что после обрушения вышележащих пород, она уплотнится под действием их веса существенно и коэффициент разуплотнения резко уменьшится. Такому уплотнению не будет значительных препятствующих сил, поскольку блоки породы ориентированы друг относительно друга. Именно поэтому возникают провалы толщи при глубине заложения выработок, равной 4-5 величин их высоты.

И еще одна особенность должна быть обязательно отмечена. Длительное самопроизвольное обрушение толщи над заброшенными шахтами будет порождать лучшую упаковку и согласную ориентацию блоков пород по сравнению с активным скоротечным обрушением толщи с помощью механизированных или посадочных индивидуальных крепей во время выемки угля длинными очистными забоями. Это означает, что конечная величина коэффициента разрыхления будет при камерно-столбовой системе разработки даже меньше, чем при системе отработки запасов длинными очистными забоями.

Проведенный анализ результатов обследования типичных структур толщи обрушенных и уплотненных пород обеспечивает более полный учет исходных условий и параметров для теоретического анализа длительного процесса обрушения толщи над заброшенными выработками.

Термодинамический анализ процесса длительных обрушений толщи

Длительное обрушение толщи над заброшенной выработкой является типичным линейным необратимым термодинамическим процессом, который описывается известным уравнением:

$$\Psi = \sum_i \sum_j F_{ij} X_{ij} = T dS/dt \quad (1)$$

Где Ψ есть диссипативная функция;

$\sum_i \sum_j$ символы суммирования соответствующих индексам факторов;

F_{ij} и X_{ij} термодинамические силы и потоки: индексы i и j указывают что термодинамическая сила типа i -порождает термодинамический поток j -типа и наоборот;

T – абсолютная температура; dS производство или приращение энтропии;

dt – время приращения.

Диссипативная функция характеризует скорость необратимого процесса. В данном случае она отражает скорость эволюции факторов, которые сопровождают процесс длительных сдвижений и оказывают на него существенное влияние. Термодинамические силы активируют необратимые процессы в толще, а потоки отражают последствия действия этих сил. Длительное сдвижение толщи под собственным весом является следствием накопления и размножения поврежденности массива. Поэтому в данном случае в качестве термодинамической силы может быть принят градиент концентрации дефектов в породной толще [4]. Энтропия S является мерой вероятности W состояния рассматриваемого массива (рис. 5).

$$S = k(\ln W) \quad (2)$$

Где k – константа Больцмана.

Окружающие выработку породы могут рассматриваться как изолированная система. Для такой системы энтропия S должна стремиться к максимальному значению с течением времени. Это отвечает переходу обрушенного массива в наиболее вероятное состояние. В предельном случае это состояние завершается провалом толщи [5].

Выразим энтропию упорядоченного массива горных пород в виде:

$$S = k \ln A \exp(1/T) [B \sum s_i + CP^2 + D] \quad (3)$$

Где A, B, C и D константы, отражающие свойства породы;
 s_i – удельная поверхностная энергия;
 P – средний уровень горного давления.

Удельная поверхностная энергия пропорциональна поверхности трещин и пустот.

Напомним, что при изменении термодинамического состояния слабо неравновесной системы производная энтропии по времени (так называемое производство энтропии) стремится к максимальному значению [1]. Как уже упоминалось, длительные сдвигения толщи над заброшенной шахтой являются типичным линейным термодинамическим процессом. Другими словами с достаточной для практики точностью можно принять, что все

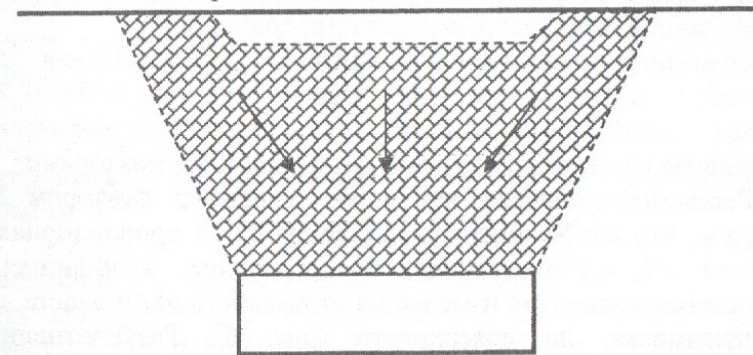


Рис 5. Изолированный участок смещения пород над заброшенными шахтами.

термодинамические характеристики в данном процессе изменяются настолько медленно, что его можно рассматривать как цепочку равновесных состояний. Это значит, что давление и температура могут быть приняты постоянными и поэтому производная будет зависеть только от удельной поверхностной энергии:

$$dS/dt \approx B_1 d\sum s_i / dt \quad (4)$$

Понятно, что ΣS_f может быть накоплена в результате истощения долговечности породы. В цитируемой статье было показано, что длительное разрушение породы может быть рассмотрено как термодинамический фазовый переход дефектов изнутри породного тела на поверхность трещин и пустот. Следовательно длительные сдвигения поверхности над заброшенными шахтами могут контролироваться удельной поверхностью трещин и долговечностью породных слоев. Это значит, что чем больше ΣS_f , тем ближе подработанный массив к устойчивому или наиболее вероятному своему состоянию. С другой стороны увеличение долговечности породных слоев приводит к затяжке во времени провалов поверхности. Эти два фактора являются очень важными для управления состоянием подработанной заброшенными шахтами толщи пород.

Отметим, что в отдельном контексте положительная роль увеличения долговечности пород очевидна и так, однако, как покажет дальнейший анализ существует специфическая неочевидная связь между двумя вышеуказанными факторами.

Рассмотрим сначала, как можно управлять фактором ΣS_f . Очевидно, что коэффициент разрыхления будет пропорционален величине ΣS_f . Естественное распределение коэффициента разрыхления монотонно изменяется от выработанного пласта, где он максимален, до поверхности (рис. 6). Разуплотненные



Рис. 6. Распределение коэффициента разрыхления.

вследствие разрушения породы увеличивают первоначальную высоту и таким образом способны компенсировать оседания поверхности. Степень компенсации будет пропорциональна площади под кривой. Однако есть возможность получить дополнительный выигрыш в этой компенсации путем особого перераспределения коэффициента разрыхления в пространстве (см. кривую 2 на рис. 6). Такое перераспределение может быть достигнуто специальной процедурой бурения и последующего взрывания обрушенных или зависших пород. Вышеуказанная технология заключается вкратце в бурении скважин до пустоты, образовавшейся над заброшенной шахтой и взрывании зарядов ВВ в этих скважинах в определенных местах. Порядок и места взрывания можно подобрать таким образом, чтобы получить местные увеличения фактора ΣS_f , и как следствие, увеличить коэффициент разрыхления и уменьшить сдвигения поверхности за счет самоподпора породного подработанного массива. Надо однако отметить, что детально предложенная технология не исследовалась и нет методики выбора ее рациональных параметров.

Рассмотрим еще один фактор, которым можно управлять сдвижением поверхности над заброшенной шахтой. Следует иметь в виду, что с помощью взрыва, или используя другие искусственные приемы или даже естественные обстоятельства, мы можем эффективно нарушать естественную ориентацию обрушенных пород, располагая отдельные блоки и куски в хаотическом порядке. Согласно [6] беспорядок вносит свой существенный вклад в увеличение энтропии S_{disord} :

$$S_{disord} \approx k N_p \{ (n-1) \ln((z-1)/e) + \ln n \} \quad (5)$$

Где N_p — число блоков отдельных элементов системы (в данном случае блоков обрушенных пород);
 n — число сегментов, из которых состоит блок;
 $z-1$ — число узлов (расчетных или условных) выработанного пространства, через которые могут пройти или пролететь обрушающиеся породы.

Обычно пространственный шаг между этими узлами принимается соизмеримым характерному размеру блока породы.

Итак для рассмотрения теоретической модели ориентационной компоненты энтропии выработанное пространство разобьем на решетку с узлами (рис. 7, 8). Каждый блок породы будем рассматривать как составное из сегментов тело. Расстояние между соседними сегментами примем согласно [6] равным шагу расчетной решетки. В процессе обрушения, каждый блок породы может занять различное число узлов в решетке. Это число зависит от ориентации самого блока и его соседей.

Рассмотрим простейший случай, когда блок состоит из 2 сегментов ($n=2$). Разделим выработку сеткой размерами

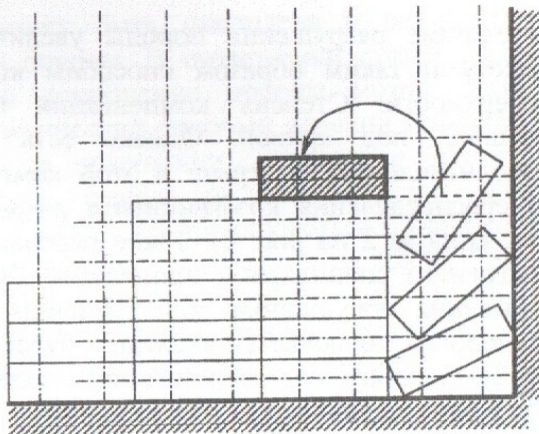


Рис. 7. Теоретическая модель процесса обрушения при дезориентации породных

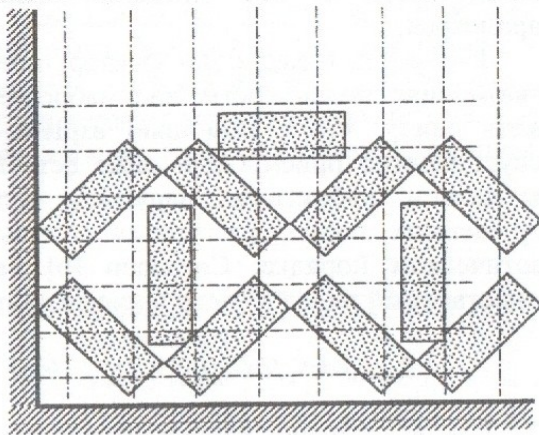


Рис. 8. Теоретическая модель процесса обрушения при случайной ориентации породных блоков.

10(высота) на 30(ширина) узлов. Каждый узел будет отстоять от соседнего на 0,2м. Если обрушение происходит естественным образом, каждый блок будет занимать, как показали натурные исследования, грубо говоря 2 узла расчетной сетки или решетки на самом дне выработки, то есть ($z-1=2$). Лишь только два крайних блока займут примерно 3 узла расчетной сетки. С этим можно вполне согласиться, сравнив рис. 7 и 4. Следовательно после каждого цикла обрушения ряд блоков займет $(28*2+2*3)=62$ узла. В результате каждый цикл обрушения поглотит $62-60=2$ узла выработанного пространства дополнительно. Таким образом полость выработанного пространства будет полностью компенсирована лишь после $10*30/2=150$ циклов обрушения, потому, что по крайней мере каждый крайний блок с каждой стороны не найдет места в своем ряду и будет периодически оставаться в верхнем (чужом) ряду (рис. 7). Тогда среднее значение $z-1=62/30=2.07$; величина ориентационной компоненты энтропии $S_{disord} \approx 0.41$.

При искусственном обрушении каждый блок может в принципе занять по 3 позиции (узла выработанного пространства – рис. 8). Как следствие, каждый ряд блоков займет $30*3=90$ узлов решетки; каждый цикл обрушения может поглотить $90-60=30$ узлов. Пустота выработки будет компенсирована за $300*30=10$ циклов обрушения. Среднее значение $z-1=90/30=3$; $S_{disord} \approx 0.78$.

Более вероятно, что некоторые блоки займут только по 2 узла решетки при искусственном обрушении и действительное число циклов N_c обрушения, за которые обрушенные породы займут все выработанное пространство выработки будет находиться в пределах $10 < N_c < 150$. Во всяком случае ясно, что искусственная дезориентация блоков при их обрушении дает существенную прибавку коэффициента разрыхления, которая может в пределе составить $0.78/0.41=1.9$ раза.

Теперь вернемся к выяснению связи между искусственным увеличением трещиноватости, дезориентации блоков породы и возможным увеличением долговечности породных слоев, которые пока не обрушились. Внимательный анализ взаимосвязи

этих факторов показывает, что между ними существует обратная положительная связь, которая очень выгодна с точки зрения предотвращения провала поверхности или по крайней мере увеличения интервала времени, за который она произойдет. Рост трещиноватости совместно с увеличением дезориентации породных обрушенных блоков влияет благоприятно на увеличение коэффициента разрыхления обрушившихся пород. Как показал анализ выше, это приводит к самоподпору и самоподдержанию подработанного массива. В результате слои пород, которые еще не обрушились имеют возможность остаться в устойчивом зависшем положении дольше время. В предельном случае при достаточном подпоре слои никогда не обрушатся. Конечным положительным результатом будет устойчивое состояние поверхности над заброшенной шахтой или по крайней мере оттяжка срока провала и/или меньшая величина провала. То есть провал как наиболее неблагоприятная и разрушительная форма потери устойчивости земной поверхности сменится опусканием, что менее разрушительно для зданий и сооружений. Именно в этом состоит неочевидная связь между энтропийными трещинной и дезориентационной компонентами необратимых сдвижений и долговечностью еще не обрушенных пород.

Таким образом теоретически установлено, что управление состоянием массива над заброшенными шахтами целесообразно базировать на следующих трех принципах:

- Искусственное увеличение трещиноватости и пустотности обрушенных пород;
- Искусственная дезориентация блоков обрушающихся пород;
- Увеличение долговечности пород, которые еще не обрушились.

При этом показано, что первые два фактора связаны положительной обратной связью с третьим, что выгодно использовать для управления массива горных в окрестности заброшенных шахт.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. —М.: Мир, 1973.—280с.
2. Peng S.S., Chiang H.S. 1984. Longwall mining. Wiley, New York
3. Nazimko V.V. 1981. Roadway Stability Enhancement in the Caved and Compacted Rock Mass. Candidate dissertation. Donetsk Polytechnic Institute. Donetsk.
4. Nazimko V.V. Grayson L.R. 1995. Thermodynamic method of rock durability. *Rock Mechanics Proceedings of the 35th U.S. Symposium*. Balkema, Rotterdam. Pp. 363-365.
5. Peng S.S. 1992. Surface Subsidence Engineering. Soc. For Min., Met and Explor., Inc.
6. Ziman J.M. 1979. Models of Disorder . The Theoretical Physics of Homogeneously Disordered Systems. Cambridge University Press. Cambridge.