

предварительной подготовки их к выемке. Необходимо реализовать следующие меры.

Ввести максимально-допустимое значение природной метаносности, при которой разработка месторождения возможна без за-
благовременной дегазации (8-10 м³/т).

Повысить ответственность экспертов за выдаваемые заключения по проектам вплоть до уголовной при реализации аварий с тяжелыми последствиями на объектах, по которым были выданы положительные решения.

Повысить ответственность администрации шахт за отступления от проектных решений и требования Правил безопасности.

Обеспечить разработку современных норм технологического проектирования угольных шахт, нормативно-методической базы проектирования вентиляции и дегазации.

Эти меры относятся к компетенции государственных органов, которые и должны их реализовать, т.к. государство является основным гарантом безопасности труда согласно Конституции РФ.

ГИАБ

Коротко об авторе

Каледина Н.О. – профессор, доктор технических наук, зав. кафедрой «Аэрология и охрана труда» Московского государственного горного университета,



© В.Н. Одинцев, 2008

В.Н. Одинцев

**СТРУКТУРА УГЛЯ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ
СУФЛЯРА ВБЛИЗИ ТЕКТОНИЧЕСКОГО
НАРУШЕНИЯ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА***

Проблема прогноза опасных газодинамических явлений при разработке угольных пластов все еще не может считаться решенной, несмотря на то, что исследования ведутся десятки лет. Остаются неясными многие особенности этих явлений, не выработаны надежные прогностические параметры. Поэтому исследования должны быть продолжены, и более того расширены, поскольку понимание механизма выхода метана из угля должно способствовать решению другой актуальной научно-технической задачи - добычи метана из угольных пластов.

Среди природных факторов, которые в своей совокупности вызывают газодинамические явления, структура угля является наиболее изменяющимся фактором [1]. Именно структура угля может быть диагностическим признаком, определяющим характер и различие газодинамических и геомеханических процессов в угольных пластах. В настоящей работе разрабатывается новая идея о влиянии структуры угля на условия образования суфляра в горных выработках.

Известно, что суфляры - локальные выделения природного газа из видимых трещин, бывают геологического и эксплуатационного происхождения. Многие суфляры наблюдаются вблизи геологических нарушений пласта дизъюнктивного типа (сбросов, взбросов и т.п.) [2]. Рассмотрим условия образования суфляра вблизи взброса (рис. 1).

В области взброса уголь обычно сильно нарушен вследствие интенсивного сдвигового разрушения. Такой уголь характеризуется как раздробленный (IV степень нарушенности) со средним диаметром частиц около 0,05 мм или как «перетертый» (V степень нарушенности) со средним диаметром около 0,008 мм [1].

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 07-05-00704)

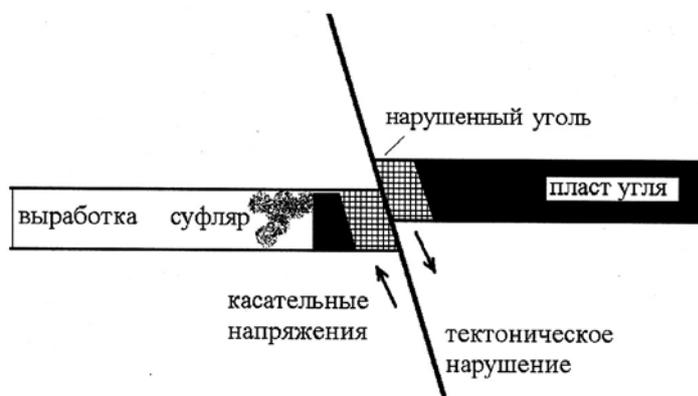


Рис. 1. Схема суфлярного выделения метана из области нарушенного угля вблизи взброса

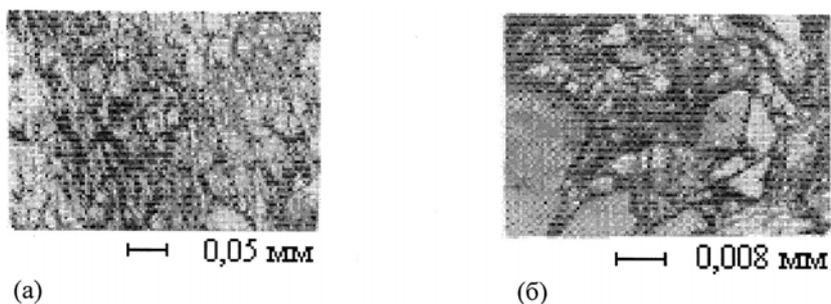


Рис. 2. Структура раздробленного (а) и перетертого (б) угля [1]

В суфляре проявляется действие свободного метана. Однако свободного метана в сильно нарушенном угле с предельно плотной упаковкой частиц крайне мало. В основном метан находится в сорбированном состоянии. Возникают вопросы, откуда берется свободный метан и как он может транспортироваться в выработку, если нарушенный уголь в естественном состоянии обладает очень низкой проницаемостью [3].

Для ответа на эти вопросы целесообразно рассмотреть структуру нарушенного угля с учетом современных представлений об

иерархии частиц в разрушенных геоматериалах. Согласно этим представлениям структура должна анализироваться



Рис. 3. Фрагмент керна материала породы из зоны интенсивного сдвигового разрушения массива пород при различных масштабах рассмотрения образца: (а) при увеличении в 100 раз; (б) - при увеличении того же фрагмента в 1600 раз

не в рамках одного масштаба, пусть даже весьма представительного, а с тенденцией ее зависимости от масштабного фактора.

К сожалению, мы не располагаем многомасштабными изображениями структуры перетертого и раздробленного угля, поэтому воспользуемся опубликованными экспериментальными данными о структуре частиц и масштабном факторе в раздробленной породе, взятой из катакластической зоны сильного сдвигового разрушения массива пород [4]. На рис. 3 для примера показаны два изображения из серии изображений в диапазоне от нескольких миллиметров до нескольких микрон.

На основании проведенного анализа опытных данных утверждается следующее [4]. 1) При различных масштабах картины раздробленности породы статистически подобны. Отдельные крупные зерна окружает рой зерен более мелкого масштаба, при этом отсутствует несущий скелет, представленный зернами одного размера. 2) Распределение частиц по размеру описывается степенным законом распределения. 3) Поры отсутствуют на всех масштабных уровнях. Последний вывод можно объяснить тем,

что в процессе перетираания материала поры любого масштаба заполняются более мелкими частицами.

Исходя из этих выводов, сформулируем основные положения наших исследований. 1) В сильно нарушенном угле имеет место иерархия частиц, которая прослеживается до частиц субмикронного уровня, возможно даже до частиц наномасштабного уровня. 2) При техногенном воздействии на угольный пласт природная нарушенность угля активизируется на всех масштабных уровнях. 3) На каждом масштабном уровне выдерживается определенное соотношение крупных и мелких частиц. Характер иерархии может быть различным для различных геологических условий залегания пласта. 4) Для математического анализа многомасштабного множества частиц целесообразен фрактальный подход, в основе которого лежит идея о самоподобии части целому [5-7].

Можно построить различные модели дробления геоматериала, которые отвечают степенному закону распределения частиц по размеру. Конкретные параметры распределения могут быть установлены путем обработки экспериментальных данных. В частности для случая, соответствующего рис. 3, распределение частиц по размеру на плоскости определяется по серии фотоизображений шлифа породы. В логарифмических координатах экспериментальные зависимости представляются прямыми линиями, имеющими фактически постоянный наклон к горизонтальной оси. Этот наклон определяется коэффициентом D^* , для которого справедливо $D^* = 1,60 \pm 0,11$.

Некоторые из фрактальных моделей дробления геоматериала на каждом масштабном уровне показаны на рис.4. Фрактальная модель в рамках простейшей геометрии, во-первых, показывает, на какое количество неделимых частиц (белые фрагменты) и частиц делимых в процессе дробления (штрихованные фрагменты), разделяется частица и, во-вторых, дает некоторое представление о возможной упаковке частиц.

Например, модель, схематично изображенная на рис. 4, а, соответствует степенному закону распределения частиц, который для плоских изображений имеет указанное выше значение показателя D^* . Согласно этой модели при разделении частицы на более мелкие из одной частицы ранга i образуется две целые неделимые частицы ранга $i + 1$ и шесть частиц, которые будут разделены в процессе дробления.

В рамках фрактальной модели дробления можно получить выражение для количества частиц N в зависимости от их линейного размера l_i и параметра, характеризующего иерархию частиц - фрактальной размерности множества частиц D . Этот показатель определяется соотношением $D = (\ln n) / (\ln(1/r))$, где n - число подобъектов, подлежащих дальнейшему разделению, r - коэффициент масштабного подобия подобъектов исходному фрагменту [6]. В частности для модели, соответствующей рис. 4, а, имеем $N_i = (l_0/l_i)^{D/3}$.

Здесь $D = \ln 6 / \ln 2 \approx 2,58$, поскольку $n = 6$, $r = 1/2$. Отметим, что в этой фрактальной модели показатели степенного закона распределения частиц по размеру в пространственном и плоском случаях связаны соотношением $D = D^* + 1$. Для модели, соответствующей рис. 4, б, имеем $N_i = (l_0/l_i)^D$, где $D = \ln 8 / \ln 3 \approx 1,89$; ($n = 8$, $r = 1/3$). Для модели, соответствующей рис. 4, в, имеем $N_i = (l_0/l_i)^D$ где $D = \ln 32 / \ln 4 \approx 2,5$; ($n = 32$, $r = 1/4$).

Удобство фрактальных моделей состоит в том, что с их помощью можно провести некоторые полезные оценки. Например, можно определить суммарную поверхность частиц различных масштабных уровней. Это важно в оценках степени «быстроты» выхода сорбированного метана из угольного вещества. При этом надо исходить из того, что выход молекул метана из частиц, осуществляемый по механизму диффузии, за характерное время (часы, сутки) может происходить только из приповерхностного слоя частиц толщиной порядка микрона, поскольку значение коэффициента диффузии метана в угольном веществе имеет порядок 10^{-12} см²/сек [8]. Отсюда ясно, что количество метана, «быстро» выходящего из частиц, определяется в первую очередь именно величиной суммарной поверхности частиц.

Расчеты на основе фрактальных моделей показывают, что в общем случае суммарная поверхность частиц i -го ранга определяется следующими соотношениями

$$S_i = \zeta l_0^2 \frac{r^{2-D}}{1 - r^{2-D}},$$

если $D < 2$ и $S_i = \zeta l_0^2 \frac{r^{-(D-2)i}}{1 - r^{-(D-2)}}$, если $D > 2$; l_0 - линейный размер

некого исходного фрагмента, подвергшегося дроблению, ζ - безразмерный численный коэффициент, отражающий специфику модели.

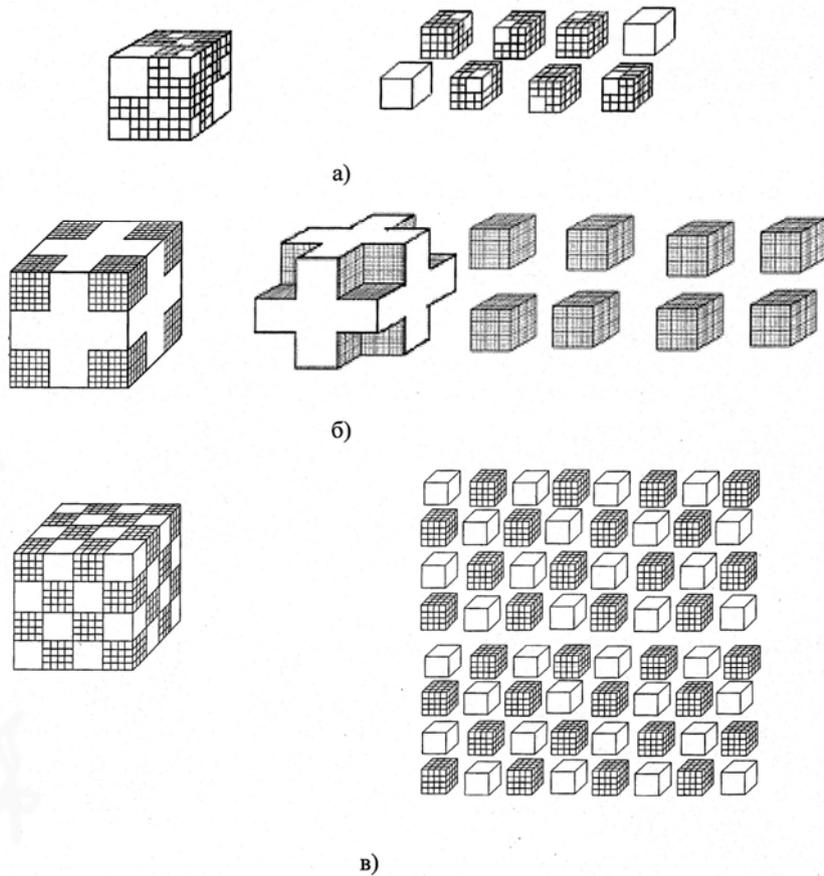


Рис. 4. Фрактальные модели дробления геоматериала, соответствующие: (а) - структуре частиц, изображенной на рис.3; (б) - фракталу «пыль Серпинского» [8]; (в) - фракталу с равной долей делимых и неделимых частиц

Полученные соотношения имеют принципиальное различие. В первом случае S_i , при $i \rightarrow \infty$, т.е. при развитии процесса дробления, стремится к конечной величине. Во втором случае S_i стремится к

бесконечности, поскольку $r < 1$. Таким образом, в первом случае в раздробленном материале суммарная поверхность частиц остается конечной величиной, даже если процесс дробления частиц продолжается до наномасштаба. (Это происходит потому, что основная часть раздробленного геоматериала представлена относительно крупными частицами.) Во втором случае суммарная поверхность частиц неограниченно возрастает за счет образующегося при дроблении множества мельчайших частиц.

Если это рассуждение применить к процессу активации нарушенности метанонасыщенного угля и рассматривать при этом процесс десорбции, то можно сделать следующее заключение. В первом случае, т.е. для нарушенного угля с фрактальной размерностью множества частиц $D < 2$, содержащийся в частицах сорбированный метан должен относительно медленно, но достаточно долго выщеляться из угля, если для этого есть подходящие условия. В этом случае выделение метана будет определяться крупными частицами, составляющими основную массу угля. Во втором случае, т.е. если $D > 2$, процесс массового выхода молекул метана из угля может быть практически мгновенным, если для этого имеются соответствующие условия. По-видимому, первый случай, характеризующийся продолжительным выходом сорбированного метана из техногенно дезинтегрированного в глубине пласта угля, может соответствовать явлению суффлера, второй - «быстрому» выходу огромного количества метана, что характерно для внезапных выбросов угля и газа.

Другое заключение в отношении различия газодинамических явлений, сопровождающих разрушение метанонасыщенного угля, связано с особенностью «упаковки» угольных частиц, а именно с существованием или отсутствием скелета, представленного частицами какой-либо одной крупности. Если такой скелет существует, то при сдвигении раздробленной массы вследствие взаимодействия частиц этой крупности и их разворота должно происходить изменение изначально плотной упаковки частиц. Это должно сопровождаться увеличением объема деформируемой массы (дилатансией) [9]. В метанонасыщенном угле увеличение объема ведет к падению давления свободного метана (если он имеется) и выходу из угольного вещества молекул сорбированного метана. Дилатансия может отсутствовать или проявляться в существенно меньшей мере, если скелет из частиц одной крупности отсутствует.

Моделью дробления, подразумевающей существование скелета, является модель рис. 4, б. Модель, в которой скелет отсутствует, соответствует рис. 4, а. Модель, показанная на рис. 4, в, отражает некоторый переходный случай. Приблизительно условие наличия скелета выражается соотношением $D < 2$. По-видимому, в раздробленном угле, показанном на рис. 1, а, имеется скелет из частиц одной крупности, в перетертом угле (рис. 1, б) такой скелет отсутствует.

Таким образом, если при сдвиговой деформации угольного пласта активируется его природная нарушенность и при этом фрактальная размерность множества частиц меньше двух, то происходит относительное увеличение объема нарушенной части пласта и создается возможность появления в ней свободного метана. Процесс появления свободного метана должен быть достаточно продолжительным вследствие медленного выхода молекул метана из сравнительно крупных частиц, составляющих основную массу нарушенного угля при $D < 2$. Необходимо добавить, что сдвижение раздробленной массы часто связано с локализацией деформации [9], что можно представить как образование некоей магистральной трещины. В угле десорбция метана сопровождается уменьшением объема (усадкой) угольного вещества на несколько процентов [1], поэтому с течением времени может происходить увеличение ширины магистральной трещины, по которой в выработку выходит появляющийся свободный метан.

Если фрактальная размерность больше двух ($D > 2$), то описанный механизм образования суфляра вблизи взброса реализоваться не может. Молекулы метана будут находиться в частицах угля до тех пор, пока при техногенном воздействии не реализуются условия развития отрывного разрушения угольного пласта вблизи тектонического нарушения. При этом возможно такое газодинамическое явление, как внезапный выброс угля и газа из области пласта, прилегающей к тектоническому нарушению.

Выводы

Иерархия природной нарушенности геоматериалов позволяет использовать фрактальный подход в анализе условий появления свободного метана в угольном пласте и его выхода в выработку в виде суфляра. Фрактальная размерность нарушенности угля сможет быть прогностическим параметром газодинамических явлений,

при этом условие образования суфляра геологического происхождения определяется соотношением $D < 2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Эттингер И.Л.* Внезапные выбросы угля и газа и структура угля. - М.: Недра, 1969, 160 с.
2. Фролов М.А., Бобров А.И. Суфлярные выделения метана в угольных шахтах. - М.: Недра, 1971, 160 с.
3. *Чернов О.И., Пузырев В.Н.* Прогноз внезапных выбросов угля и газа. - М.: Недра, 1979, 296с.
4. *Sammis Ch.G., King G., Biegel R.* The kinematics of gouge deformation//PAGEOPH. – 1987, V.125. – N5. - P. 777-812.
5. *Мандельброт Б.* Фрактальная геометрия природы. - М.: Институт компьютерных исследований, 2002, 656 с.
6. *Кроновер Р.М.* Фракталы и хаос в динамических системах. - М.: Постмаркет, 2000, 352 с.
7. *Викторов С.Д., Одинцев В.Н.* Оценка условий образования высокодисперсных частиц при разрушении породы // ГИАБ. - 2005. - №2. - С.104-108.
8. *Ковалева И.Б., Соловьева Е.А.* Зависимость кинетики сорбции метана от структуры угля // ФТПРПИ. - 2006. - №2. - с.28-35.
9. *Ревуженко А.Ф.* Механика сыпучей среды. - Новосибирск: Офсет, 2003, 373 с. **ГИАБ**

Коротко об авторе

Одинцев В.Н. – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, ИПКОН РАН.