

УДК 622.831.537.86

**МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПЕСЧАНИКА С УЧЁТОМ ФАЗОВОГО  
СОСТОЯНИЯ КВАРЦА И ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ  
КОМПОНЕНТ**

**д.т.н. Стариков Г.П., к.т.н. Гладкая Е.В., к.т.н. Завражин В.В.,  
асп. А.В. Кравченко (ИФГП НАНУ)**

*Приведені результати досліджень механізму руйнування пісковика, дано оцінку впливу поліморфізму кварца і водовміщуючих компонент у пісковика на особливості руйнування привибійної зони пласта  $l_1$ , визначені умови формування зон з підвищеним газовмістом та порушеністю і обґрунтовані критерії їх прогнозу.*

**THE MECHANISM OF DESTRUCTION OF SANDSTONE IN VIEW OF  
THE PHASE CONDITION OF QUARTZ AND THE HYDROGEN  
CONTAINING COMPONENTS**

**Starikov G.P., Gladkaya E.V., Zavrazhin V.V., Kravchenko A.V.**

*The results of researches of mechanism of destruction of sandstone are resulted, influencing of polymorphism of quartz is appraised and hydrogen containing components in sandstone on the feature destruction area near of wall seam  $l_1$ , the terms of forming of areas with the promoting gas-contain and breaking were defined and the criterions of their prognosis were grounded.*

Непрогнозируемые процессы газовой выделения из горного массива негативно сказываются на безопасности ведения очистных работ. К ним в первую очередь следует отнести метановыделение из вмещающих угольный пласт пород, представленных газоносными выбросоопасными песчаниками, находящимися в условиях высоких геостатических напряжений.

Традиционно при исследовании песчаников обращали внимание на его физико-механические свойства, пористость, газопроницаемость, минеральный состав и структуру. В целом эти параметры достаточно полно характеризуют породу как коллектор газа, однако не дают достоверной информации о возможном формировании зон с аномальным газосодержанием и повышенной трещиноватостью.

Для прогноза объемов и установления природы газовой выделения в атмосферу выработок необходимо определение и контроль месторасположения зон потенциального газовой выделения в толще песчаника, которые активизируются волной разгрузки, возникающей при подвигании очистного забоя.

Анализ существующих представлений о свойствах и особенностях структуры песчаников показывает, что их физико-механические, сорбционные и фильтрационные свойства зависят от количественного содержания и фазового состояния кварца. Поэтому, изучение фазового состояния кварца и водородосодержащих компонент, как базовых элементов песчаников является

одним из возможных путей решения таких актуальных задач, как прогноз метановыделения из вмещающих угольный пласт пород.

Для обоснования и выявления связи изменений различных свойств углевмещающих пород были проведены исследования структурного состояния кристаллической решетки породообразующих минералов и водородосодержащих компонент песчаника основной кровли пласта  $l_1$  в пределах поля шахты им. А.Ф. Засядько.

При этом использовались методы рентгеновской дифракции, ядерного магнитного резонанса и термогравиметрии [1, 2, 3]. Исследование физико-механических свойств образцов горных пород проводились на установке трехосного сжатия, которая позволяет моделировать процессы деформирования и разрушения реальных горных пород при любых соотношениях между компонентами сжимающих напряжений, соответствующих натурным условиям разработки угольных пластов [4].

Для определения физико-механических свойств песчаника был отобран керновый материал в интервалах 40, 60, 80, 100 м при бурении скважины №1 (ПК 15+8 м) и 1 и 20,7 м соответственно при бурении скважины №2 (ПК 26).

Из кернов изготавливались кубические образцы с размером грани ребра 60 мм и испытывались на установке трехосного нагружения по программе  $\sigma_1 \neq 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$  и  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \gamma H / \lambda$  с последующей разгрузкой  $\sigma_3 = 0$ , где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения,  $\lambda$  – коэффициент бокового подпора,  $\gamma$  – объемный вес горных пород,  $H$  – глубина залегания песчаника. Первая программа позволила установить прочность песчаника на одноосное сжатие и степень повреждаемости структуры. Вторая программа моделировала напряженно-деформированное состояние кровли пласта в условии обобщенного сжатия с переходом в обобщенное растяжение при ее обнажении. В каждом исследуемом образце с применением методики ядерного магнитного резонанса [1] определялось содержание адсорбированной влаги при  $T = 150^\circ\text{C}$ , потеря массы  $\Delta W$  при  $T = 700^\circ\text{C}$ .

Анализ результатов исследований процесса деформирования и механизма разрушения показал, что прочность песчаника в условиях одноосного нагружения составляет  $\sigma_{сж} = 79$  МПа, а плоскости разрушения распространяются параллельно действию разрушающего напряжения. Содержание адсорбированной влаги в данной серии образцов находится в пределах 0,54–0,82%. В тоже время потеря массы в среднем составила 2,24–3,48%, а в интервале 60 м (скважина №1) была равна  $\Delta W = 6,59\%$ . Основным механизмом разрушения – сдвиг с растяжением, либо сдвиг. Модуль упругости в среднем составляет  $1,1 \cdot 10^4$  МПа и имеет тенденцию к росту до  $1,9 \cdot 10^4$  МПа при увеличении  $\Delta W$  (табл. 1).

Таким образом, выполненный цикл исследований позволил установить, что основная кровля пласта  $l_1$ , представленная песчаником  $l_1Sl_2^1$ , при разгрузке может разрушиться по плоскостям, параллельных пласту (растяжение), либо под углом 45–72° к вертикальной составляющей горного давления (сдвиг).

При первой схеме разрушения вполне возможно накопление метана в системе параллельных плоскостей. Это связано с особенностями поведения функционала свободной энергии системы «порода-газ». С целью проведения цикла исследований по установлению механизма разрушения кровли пласта  $l_1$ , обоснования физических условий накопления метана и оценки времени его десорбции при развитии очистных работ от разрезной печи был отобран керновый материал при бурении скважин с 13 восточного вентиляционного штрека (ПК 15+8 м, ПК 26) по песчанику основной кровли.

Таблица 1  
Физические и деформационные свойства песчаника  $l_1Sl_2^1$

Физико-механические свойства песчаника в керновых пробах	Интервалы отбора кернов по длине скважины, м					
	Скважина №1 (158 м. от вент. ходка 13 вост. вент. штрека)				Скважина №2 (280 м от вент. ходка 13 вост. вент. штрека)	
	40	60	80	100	1	20,7
Прочность на одноосное сжатие, МПа	74,9	92,1	75,1	77,4	68,2	71,4
Модуль упругости, $10^4$ МПа	1,3	1,92	1,31	1,4	1,27	0,93
Содержание физически связанной воды, % ( $T = 250^\circ\text{C}$ )	0,8	0,67	0,82	0,73	0,54	0,6
Содержание твердофазной воды, % ( $T = 700^\circ\text{C}$ )	2,24	6,56	2,74	3,48	3,84	2,88
Механизм разрушения при моделировании обобщенного растяжения	Растяжение перпендикулярно вертикальной составляющей горного давления	Сдвиг под $45^\circ$ к вертикальной составляющей горного давления	Сдвиг по плоскости $72^\circ$ к верт. составляющей горного давления	Растяжение перпендикулярно вертикальной составляющей горного давления	Сдвиг под $45^\circ$ к вертикальной составляющей горного давления <sup>0</sup>	Сдвиг по плоскости $72^\circ$ к верт. составляющей горного давления

Анализ результатов цикла исследований по установлению механизма разрушения кровли пласта  $l_1$ , обоснования физических условий накопления метана и оценки его десорбции при развитии очистных работ от разрезной печи показал, что фактически, при нарушении равновесного состояния части кровли пласта за счет ее упругого восстановления, свободная энергия системы «порода – газ» уходит из минимума энергии [5]. Для того чтобы восстановить этот минимум, при неизменной температуре в системе, начинает увеличиваться давление метана на величину, пропорциональную снижению упругой энергии. Поскольку модули упругости пород в исходном состоянии

(до разгрузки массива) имеют порядок  $10^4$  МПа, а при деформировании они уменьшаются в 10 – 100 раз, то соответственно давление возрастает в 2,7-4,6 раз, что аналогично увеличению сорбционной метаноемкости породы на ту же величину. В результате, в зоне растяжения кровли формируется очаг с большим объемом свободного метана. Время его выхода  $t$  при образовании трещин сдвига составит [6]:

$$t = \frac{\gamma \mu c}{k} \frac{l}{\Delta p}$$

где  $\mu$  – вязкость метана ( $\mu = 0,015 \cdot 10^{-6}$  МПа·с);  $c$  – коэффициент сжимаемости метана ( $c = 10$ );  $k$  – коэффициент проницаемости песчаника ( $k_p = 10^{-10} \text{ м}^2$ );  $l$  – мощность песчаника ( $l = 21$  м);  $\Delta p$  – давление метана ( $\Delta p = 2,5$  МПа);  $\gamma$  – открытая пористость.

Расчеты показывают, что время десорбции метана из объема нарушенного песчаника может составить 25,0–30,0 мин. Эта ситуация наиболее вероятна при отходе очистного забоя от разрезной печи. В случае сдвигового механизма разрушения кровли с образованием двух поверхностей стока метана условие (2.9) никогда не будет выполняться, и накопление метана исключено.

Для определения структурных превращений в породообразующих минералах, фазового состояния и количества водородных компонент в песчаниках отбирались пробы породы объемом 0,15–0,2 кг через каждые 10 м по длине 11 технологических скважин, пробуренных по песчанику  $l_1Sl_2^1$  с  $13^\circ$  конвейерного и  $13^\circ$  вентиляционного штреков. Пробы доставлялись в лабораторию и высушивались при температуре 30–35°C в течении 24 часов и дробились до фракции 0,4–0,5 мм для рентгеновских, спектрометрических и термогравометрических исследований.

Для определения водородосодержащих компонент применялся метод ЯМР, подробно описанный в [1]. Он позволяет рассчитывать количество протонов водорода в песчанике по производной спектров поглощения, включающих составляющие гауссово и лоренцевого типа с шириной линии  $\Delta H = 6$  Э и  $\Delta H = 0,5$ –1,0 Э. Для исследований использовались пробы крупностью 0,4–0,5 мм, массой 1–1,5 г, которые помещались в измерительную часть автодиноного спектрометра и записывались спектры широкой и узкой компонент полного спектра в оптимальных условиях для каждой из линий. Полученная последовательность спектров математически обрабатывалась и определялись параметры соответствующих линий поглощения ЯМР  $^1\text{H}$ , необходимые для расчета.

Количество водосодержащих компонент определялось по формуле:

$$\Delta W = k(S_{y,i}/S_{ш,i}) \quad (2)$$

где  $\Delta W$  – масса водосодержащей компоненты;  $k$  – нормирующий коэффициент;  $S_{y,i}$  – площадь составляющих узкую линию спектров ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $S_{ш,i}$  – площадь под широкой линией спектра.

Кроме этого определялось весовое содержание водородосодержащих компонент в пробах песчаника при двух температурах нагрева 250°C, 750°C с продолжительностью выдержки при конечной температуре 60 мин. Температурный диапазон, используемый в данной работе согласно [2] соответствовал десорбции физически связанной влаги и физико-химической влаги. Анализ полученных результатов при рентгенографическом изучении проб песчаника  $I_1SI_2^1$  свидетельствует о существенном изменении его структурного состояния. При этом наличие нескольких фаз породообразующего минерала кварца характеризует его метастабильное состояние.

Наблюдаемые на дифракционных картинах рентгено-дифракционные линии выделяют зоны с аномальной структурой кварца в песчанике по длине скважин. Сопоставимость экспериментальных данных с результатами геологической съемки позволили выявить связь между структурными изменениями и некоторыми проявлениями горного давления, в частности по скважинам № 46, 48, 60, 64, пробуренных с 13<sup>0</sup> конвейерного штрека. и № 44 – вентиляционного штрека.

Из анализа результатов рентгеновских исследований следует, что песчаник имеет высокую степень неоднородности по количеству и фазовому составу кварца. Установлено, что с появлением в песчанике  $\beta$ -фазы в створе этих зон по угольному массиву наблюдается внезапные отжимы (ПК 44,46,46), либо обрушения непосредственной кровли (ПК 60). Кроме этого, у каждой модификации кварца при кристаллизации объем изменяется от 0,6 до 17,4% [7, 8]. Естественно можно утверждать, что на контактах разных фаз имеются разрывы сплошности с образованием трещин различной ориентации. Это, с одной стороны, обеспечивает возможность аккумуляции значительных объемов метана, а с другой стороны, способствует быстрой фильтрации при разгрузке.

Особо следует отметить приуроченность внезапных отжимов и обрушений к минимальным значениям  $\Delta W$ . Анализ спектрометрических данных свидетельствует, что водосодержащая компонента ( $\Delta W$ ) идентифицируется как твердая фаза, при этом с увеличением ее концентрации в структуре песчаника ее модуль упругости возрастает (табл. 1). Аналогичная закономерность наблюдается у кварца [9], в частности, модуль упругости  $\alpha$ -фазы в 1,3–1,7 раза больше, чем у  $\beta$ -фазы.

В соответствии с [2] определены условия развития неустойчивости системы «порода – угольный пласт» по соотношению их упругих свойств в виде зависимости:

$$a_{\text{п}} = 0,73mE/M \quad (3)$$

где  $a_{\text{п}}$  – длина участка призабойной части пласта при  $M \neq 0$ ;  $m$  – мощность пласта;  $E$  – модуль упругости пород основной кровли;  $M$  – модуль спада угля.

Из анализа данной формулы следует, что с уменьшением модуля упругости пород основной кровли при постоянном модуле спада ( $M = \text{const}$ ) при-

оритетным является хрупкое разрушение угля (потеря устойчивости), поскольку не формируется его остаточная прочность и соответственно зона отжима.

Как видно из результатов исследования, это условие выполняется как для водородсодержащей компоненты  $\Delta W$ , так и для породообразующего кварца в виде  $\beta$ -фазы. Это в свою очередь дает основание для применения этих параметров в качестве критериальных при прогнозе месторасположения аномальных зон в толще песчаника.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.Д. Алексеев, В.Е. Зайденварг, В.В. Синолицкий, Е.В. Ульянова, Радиофизика в угольной промышленности. – М.: Недра, 1992. – 184 с.
2. Филипов В.А. Технология сушки и термокласификация углей. М.: Недра, 1987. – 283 с.
3. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. – М.: Недра, 1983. – 280 с.
4. Алексеев А.Д., Стариков Г.П., Бойко И.А. Совершенствование УТС с целью повышения точности измерений // ФТВД. – 1987. – №25. – С. 23–28.
5. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Статическая физика. Часть 1. – М.: Наука, 1986. – 583 с.
6. Евдокимова В.А., Кочина И.Н. Сборник задач по подземной гидравлике. М.: Недра, 1979. – 168 с.
7. Ботвинкин О.К., Запорожский А.И. Кварцевое стекло. – М, 1965.
8. Дмитриев А.П., Гончаров С.А. Термодинамические процессы в горных породах. М.: Недра, 1983. – 312 с.
9. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. Под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодьяконова. М. «Недра». 1975, 279 с.