

01;03

Равновесное распределение газов в угольных пластах

© А.Д. Алексеев, Э.П. Фельдман

Институт физики горных процессов НАН Украины, Донецк
E-mail: feldman@depm.fti.ac.donetsk.ua

В окончательной редакции 21 января 2008 г.

Вычислен термодинамический потенциал угольного пласта, рассматриваемого как твердотельный каркас вместе с содержащимся в нем газом. В явном виде найдена зависимость упругой энергии пласта от давления газа, упругих модулей и пористости угля. Минимизация термодинамического потенциала по отношению к распределению давления газа по пласту дала возможность указать участки пласта, в которых происходит повышение давления газа, а также оценить относительное изменение давления на этих участках при увеличении нагрузки на пласт. Полученные результаты могут служить основой прогноза локализации выбросоопасных участков пласта.

PACS: 62.20.Dc, 64.30.+t.

Рассмотрим угольный пласт, содержащий поры, заполненные газом. Для определенности речь будет идти о метане, ввиду особой важности проблемы безопасности добычи угля. Мы будем использовать модельные представления о метане в угольных пластах, развитые в [1].

Обозначим через P давление метана в порах, а через P_m — внешнее (горное) давление на пласт. Для вычисления упругой энергии угольного каркаса применим следующий прием: мысленно разбиваем пласт на шарообразные области радиуса R_2 , содержащие полости радиуса R_1 , заполненные метаном. Затем вычисляем упругую энергию каркаса как сумму упругих энергий всех таких областей.

Используя известное решение задачи о деформациях и напряжениях шара с концентрической шаровой полостью [2], подверженного действию внутреннего и внешнего давления, приходим к формуле для упругой энергии рассматриваемой области:

$$E_{elastic} = \frac{2\pi}{R_2^3 - R_1^3} \left[\frac{(PR_1^3 - P_m R_2^3)^2}{3K} + \frac{(P_m - P)^2 R_1^3 R_2^3}{4G} \right], \quad (1)$$

где K и G — модули всестороннего сжатия и сдвига соответственно. Учтем теперь, что отношение

$$\gamma = \frac{R_1^3}{R_2^2} \quad (2)$$

имеет четкий физический смысл пористости угля.

Тогда для плотности упругой энергии угля получим выражение, содержащее лишь хорошо определяемые в лабораторных и шахтных экспериментах параметры:

$$\varepsilon_{elastic}(P, P_m) = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left[\frac{(P_m - \gamma P)^2}{K} + \frac{3\gamma}{4G} (P_m - P)^2 \right]. \quad (3)$$

Поскольку $\varepsilon_{elastic}$ выражена через давление, она является упругой составляющей плотности термодинамического потенциала Гиббса газоугольного материала. Добавляя к $\varepsilon_{elastic}$ плотность потенциала Гиббса газа, находящегося в порах, найдем плотность φ потенциала Гиббса рассматриваемого нами угольно-газового массива:

$$\varphi(P; P_m) = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left[\frac{(P_m - \gamma P)^2}{K} + \frac{3\gamma}{4G} (P_m - P)^2 \right] + \gamma P \ln \frac{P}{P_T}. \quad (4)$$

Здесь P_T — величина размерности давления, зависящая от температуры и рода газа (см., например [3]).

Ввиду неоднородности пласта его упругие модули K и G , а также пористость γ могут быть разными в разных участках пласта, что обычно и наблюдается. Кроме того, при проведении горных работ сильно неоднородным становится внешнее давление P_m . Концентрация напряжений, вызванная наличием полости (выработки) в горном массиве, в максимуме (так называемое опорное давление) может в несколько раз превышать давление в нетронutom массиве. Во всех этих случаях давление газа перераспределяется по пласту. Чтобы выяснить характер пространственного изменения давления газа в состоянии равновесия, следует минимизировать термодинамический потенциал газоугольного материала по отношению к перераспределению давления газа в пласте. Мы предполагаем, что отсутствуют как утечка газа из пласта, так и поступление газа в пласт. Следовательно, необходимо учесть условие сохранения суммарного количества метана в пласте. В таком случае

условие термодинамического равновесия пластового газа состоит в однородности его химического потенциала μ :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = \gamma \mu = \text{const}, \quad (5)$$

где $n = P/T$ — плотность газа, T — абсолютная температура.

Сорбция метана в блоках угольного вещества изменяет давление метана в меру его растворимости. Поскольку практически всегда растворимость метана в угле не превышает 10^{-2} (соответствующие данные приведены в [1]), то при первичных расчетах давлений сорбцией метана допустимо пренебречь.

Использование формул (4) и (5) дает возможность в ряде практически важных случаев указать локализацию участков повышенного давления газа и оценить относительное изменение давления газа на этих участках.

С этой целью заметим, что константу, стоящую в правой части (5), можно получить, считая, что при $x \rightarrow \infty$ мы переходим на нетронутый массив.

Таким способом мы получаем рабочее соотношение:

$$\begin{aligned} \ln \frac{P(x)}{P_\infty} + \frac{1}{1-\gamma} \left[\left(\frac{\gamma}{K} + \frac{3}{4G} \right) P(x) - \left(\frac{1}{K} + \frac{3}{4G} \right) P_m(x) \right] \\ = \frac{1}{1-\gamma_\infty} \left[\left(\frac{\gamma_\infty}{K_\infty} + \frac{3}{4G_\infty} \right) P_\infty - \left(\frac{1}{K_\infty} + \frac{3}{4G_\infty} \right) P_{m\infty} \right]. \quad (6) \end{aligned}$$

Символ ∞ соответствует участку пласта, удаленному от геологической или техногенной неоднородности, сосредоточенной вблизи точки x . При использовании (6) следует иметь в виду, что упругие модули и пористость тоже могут зависеть от x .

Рассмотрим частные случаи, представляющие наибольший интерес.

1. Характеристики материала однородны, а внешнее давление неоднородно. Тогда $G = G_\infty$, $K = K_\infty$ и $\gamma = \gamma_\infty$.

При рассмотрении угольного материала слагаемыми, содержащими в знаменателе модуль всестороннего сжатия K , можно пренебречь в сравнении со слагаемыми, содержащими модуль сдвига G . В углях средней степени метаморфизма, согласно экспериментальным данным [4], модуль сдвига G в $4 \div 5$ раз меньше модуля K . С учетом этого

обстоятельства, считая $\gamma \ll 1$ и производя стандартное разложение логарифма в ряд, приходим к следующей оценочной формуле:

$$\frac{P(x) - P_\infty}{P_\infty} = \frac{3}{4G} (P_m(x) - P_{m\infty}). \quad (7)$$

Как было уже упомянуто, при обработке пласта формируется так называемое опорное давление, которое на расстоянии нескольких метров от забоя может в $5 \div 8$ раз превысить горное давление. Расчет [5,6] и эксперимент [7] дают весьма широкий разброс коэффициента концентрации напряжений ($2 \div 10$) в зоне опорного давления в зависимости от горно-геологических условий, мощности пластов и геометрии расположения выработок. Мы акцентируем внимание на предкритических ситуациях. Например, на глубине ~ 1000 m горное давление ($P_{m\infty}$) равно 25 МПа, опорное давление $P_m(x) \approx 8P_{m\infty} = 200$ МПа.

Таким образом, на участке сосредоточения опорного давления газовое давление повышается на 15% (~ 8 atm) по отношению к давлению на удаленных участках пласта. В действительности повышение давления газа будет еще больше, поскольку к упругим деформациям может добавиться пластическая деформация и эффективные модули уменьшатся. Физика, на первый взгляд, парадоксального явления возрастания давления газа в участках с большим внешним давлением состоит в том, что газ создает противодействие, которое уменьшает сдвиговую часть упругой энергии угольного каркаса.

Известно [8], что даже незначительное увеличение давления газа при нахождении пласта в предельном состоянии в зоне опорного давления может привести к превращению пор в трещины с дальнейшим их развитием и выбросу угля и газа послойным отрывом, согласно концепции Христиановича [9].

Заметим, что в настоящее время в мировой практике нет экспериментальных замеров увеличения внутрипорового давления угля при увеличении внешней нагрузки. Мы получили теоретическую оценку (7) этого увеличения, используя концепцию однородности химического потенциала, с учетом влияния газа на напряженно-деформированное состояние пласта.

2. Внешнее давление однородно, а макроструктура угля существенно неоднородна.

Пусть координата x отмечает участок, в котором упругие модули G и K значительно меньше соответствующих модулей в ненарушенном

участке, т. е. $G \ll G_\infty$ и $K \ll K_\infty$. Чаще всего речь идет о геологических нарушениях пласта. Если пористость неизменна вдоль пласта и сдвиговой модуль значительно меньше модуля сжатия, то из (6) нетрудно получить следующую реалистичную оценку:

$$P - P_\infty \approx \frac{3P_\infty}{4G} (P_m - P_\infty). \quad (8)$$

Поскольку всегда горное давление P_m больше пластового давления метана, то из (8) следует, что в ослабленном участке пласта ($G \ll G_\infty$) давление метана превышает его давление в ненарушенном участке. Величина эффекта определяется отношением P_∞/G и величиной горного давления. К примеру, если $P_\infty = 5$ МПа, модуль сдвига $G = 100$ МПа, т. е. в 8 раз меньше своего стандартного значения (см. пункт 1), а горное давление $P_m \approx 25$ МПа, то $P - P_\infty = 0.75$ МПа.

Если ослабление пласта происходит за счет увеличения пористости ($\gamma \gg \gamma_\infty$), то с помощью рассуждений, аналогичных ранее приведенным, получаем оценку:

$$P - P_\infty \approx \frac{3P_\infty}{4G} \frac{(\gamma - \gamma_\infty)(P_m - P_\infty)}{(1 - \gamma_\infty)(1 - \gamma)}. \quad (9)$$

Из (8) и (9) следует, что газ скапливается в участках с низким сопротивлением сдвигу и в участках с повышенной пористостью, что согласуется с шахтными исследованиями и наблюдениями.

В указанных местах скопления метана его давление может превышать среднее давление по пласту на $10 \div 20\%$, что создает предпосылки для возникновения выбросоопасности на этих участках. Наша работа позволяет дать предварительные прогнозы локализации и степени критичности возможных газодинамических явлений в шахтах.

Список литературы

- [1] Алексеев А.Д., Василенко Т.А., Фельдман Э.П. и др. // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 4. С. 65.
- [2] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1965. 203 с.
- [3] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука, 1964. 567 с.
- [4] Стариков Г.П. Особенности деформирования и разрушения углей при объемном сжатии / Сб. Технологии на рубеже XX века. Д.: ДНТУ, 2001. Т. 1. № 81.

- [5] *Якоби О.* Практика управления горным давлением. М.: Недра, 1987. 566 с.
- [6] *Петухов И.М., Линьков А.М.* Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983. 280 с.
- [7] *Колесов О.А., Вайнштейн П.А., Колтин Г.И.* // Матер. 24 Междунар. конфер. науч.-исслед. институтов по безопасности горных работ. Донецк, 23–28 сентября 1991 г. С. 391–401.
- [8] *Эттингер И.Л.* Необъятные запасы и непредсказуемые катастрофы. М.: Наука, 1988. 175 с.
- [9] *Христианович С.А.* // Изв. АН СССР. 1953. Т. 12 ОТН.