

## НЕРАВНОМЕРНОСТИ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ МЕТАНА В УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ

д.т.н. Алексеев А. Д., д.ф.-м.н. Фельдман Э.П. (ИФГП НАНУ)

*Обчислено термодинамічний потенціал Гіббса вугільного пласта, який розглядається як твердотільний каркас разом з газом метаном. У явному вигляді знайдена залежність пружної енергії пласта від тиску газу, пружних модулів та пористості вугілля. Мінімізація потенціала Гіббса по відношенню до перерозподілу газу дала можливість встановити ділянки пласта, де відбувається підвищення тиску газу, а також оцінити відносну зміну тиску на у цих ділянках при збільшенні навантаження на пласт. Одержані результати можуть бути основою прогнозу локалізації викиднебезпечних ділянок пласта.*

## UNEVENNESSES OF METHANE DISTRIBUTION IN COAL BEDS

Alexeev A.D., Feldman E.P.

*We have calculated Gibbs thermodynamic potential of a coal bed that is considered as a solid-state framework filled with gaseous methane. We have found the explicit dependence of the elastic energy of the bed on the gas pressure, elastic modules and coal porosity. The minimization of Gibbs potential with respect to gas redistribution gave us an opportunity to establish the parts of the bed where the increase of the gas pressure took place and to estimate relative change of the pressure located there at the growing loading of the bed. The obtained results can be the basis of the predictive localization of the parts of the bed dangerous with respect to outbursts.*

### 1. Введение

Горные породы и, в частности, угольные пласты представляют собой пример материалов с выраженной иерархической трещиновато-поровой структурой. Газы, образовавшиеся за весьма большие (геологические) времена, содержатся в ископаемых углях в различных фазовых состояниях. Речь может идти о метане или углекислом газе. Нас интересует метан, являющийся эффективным энергоносителем и ввиду особой важности проблемы безопасности добычи угля.

Метан содержится в угле в виде свободного газа в порах, трещинах и каналах, образующих в совокупности фильтрационный объем угля. Часть метана входит помоллекулярно в базовые фрагменты угольного материала, образуя твердый раствор газа в угле. Кроме того, имеется метан, адсорбированный на весьма разветвленной внутренней поверхности угля [1].

Существенным является то, что угольный пласт окружен породами, передающими горное давление. В отсутствие техногенного фактора передаваемое давление можно считать однородным. При проведении горных работ давление на угольный пласт перераспределяется, становясь резко неоднородным (появляются сильно нагруженные участки).

Окружающие породы можно считать по отношению к угольному пласту термостатом, поддерживающим давление (быть может, неоднородное) и температуру пласта. Угольный каркас пласта находится в напряженно – деформированном состоянии под действием внешнего давления термостата (окружающих пород) и давления метана изнутри.

Принято считать, что в состоянии термодинамического равновесия давление газа однородно вдоль пласта. В действительности однородным должен быть химический потенциал газа, который вычисляется с учетом того, что напряженно-деформированное состояние угольного каркаса определяется воздействием как горного, так и газового давления.

В рассматриваемом нами случае следует вычислить термодинамический потенциал Гиббса пласта вместе с содержащимся в нем метаном и затем минимизировать этот потенциал по отношению к перераспределению давления газа. Поскольку пласт, как правило, неоднороден по упругим свойствам, по пористости и, кроме того, внешнее давление распределено неравномерно, то и давление метана будет различным в разных местах. Как следствие, метан может скапливаться в определенных «слабых» местах, создавая предпосылки для возникновения выбросов и взрывов [2], которые, к сожалению, во всех угледобывающих странах являются причиной гибели шахтеров. Задачей настоящей работы является указание локализации «слабых» мест и оценка величины избыточного давления метана в них.

## **2. Термодинамический потенциал метано-угольного пласта и химический потенциал метана в угольном каркасе**

Рассмотрим угольный пласт, содержащий поры, заполненные метаном. Обозначим через  $P$  давление метана в каркасе угольного вещества, 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.

В предположении, что пластические деформации отсутствуют, решение задачи о деформациях и напряжениях шара с концентрической шаровой полостью, подверженного действию внутреннего и внешнего давления, хорошо известно [3].

Используя это решение, после элементарных вычислений, приходим к формуле для упругой энергии шара с полостью:

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

где  $K$  и  $G$  – модули всестороннего сжатия и сдвига соответственно.

Для нахождения плотности упругой энергии пласта необходимо разделить  $E_{упр}$  на объем шара (вместе с полостью):

$$\varepsilon_{упр} = \frac{3E_{упр}}{4\pi R_2^3}. \quad (2)$$

Теперь разделим числитель и знаменатель в (2) на  $R_2^6$  и заметим, что отношение  $R_1^3/R_2^3$  имеет четкий физический смысл пористости угля  $\gamma$ :

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

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

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

В частности, при  $\gamma = 0$ , приходим к стандартной формуле для плотности упругой энергии материала, подверженного всестороннему сжатию.

Поскольку  $\varepsilon_{упр}$  выражена через давление, то она является упругой составляющей плотности термодинамического потенциала Гиббса газоугольного материала.

Плотность потенциала Гиббса метана, находящегося в фильтрационном объеме, равна

$$\varphi_g = \gamma P \ln \frac{P}{P_T}, \quad (5)$$

и мы учли, что метан находится только в порах угля.

В формуле (5)  $P_T$  - величина размерности давления, зависящая от температуры и рода газа. По порядку  $P_T$  соответствует давлению ожижения газа при рассматриваемой температуре.

Плотность потенциала Гиббса твердого раствора газа концентрации  $c$  равна

$$\varphi_s(c, T) = (1-\gamma)(c\psi + cT \ln c\Omega), \quad (6)$$

где  $c = vP/T$ ,  $v$  – растворимость метана в угле,  $\psi$  – энергия связи молекулы метана с углем,  $\Omega$  – объем, приходящийся на одну молекулу метана в твердом растворе.

Итак, для рассматриваемого нами угольно-газового массива плотность термодинамического потенциала имеет вид:

$$\begin{aligned} \Phi = \varepsilon_{упр} + \Phi_g + \Phi_s = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left[ \frac{(P_m - \gamma P)^2}{K} + \frac{3\gamma}{4G} (P_m - P)^2 \right] + \\ + \gamma P \ln \frac{P}{P_T} + (1-\gamma)(c\psi + cT \ln c\Omega). \end{aligned} \quad (7)$$

Ввиду неоднородности пласта его упругие модули  $K$  и  $G$ , а также пористость  $\gamma$  и растворимость  $\nu$  могут быть разными в разных участках пласта (что обычно и наблюдается). Кроме того, при проведении горных работ внешнее давление становится существенно неоднородным. Концентрация напряжений, вызванная наличием полости (выработки) в горном массиве, в максимуме (так называемое опорное давление) может в несколько раз превышать давление в нетронутом массиве. В перечисленных случаях давление газа перераспределяется по пласту. Чтобы выяснить характер равновесного перераспределения, следует минимизировать термодинамический потенциал газугольного материала по отношению к пространственному распределению 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  $\mu$ :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial P} = \frac{\mu}{T} [\gamma + \nu(1-\gamma)] = \text{const}. \quad (8)$$

Далее, для упрощения записи, но без ограничения общности, рассмотрим одномерную задачу, когда все величины меняются только вдоль координаты  $x$  по простиранию пласта. Перепишем (8) в развернутом виде, используя (7):

$$\frac{\gamma}{(1-\gamma)[\gamma + \nu(1-\gamma)]} \left[ \left( \frac{\gamma}{K} + \frac{3}{4G} \right) P(x) - \left( \frac{1}{K} + \frac{3}{4G} \right) P_m(x) \right] + \ln \frac{P(x)}{P_T} = \frac{\mu}{T} = \text{const}. \quad (9)$$

### 3. Формирование участков повышенного пластового давления газа

Использование формулы (9) дает возможность в ряде практически важных случаев указать локализацию участков повышенного давления газа и оценить относительное изменение давления на этих участках.

С этой целью заметим, что константу, стоящую в правой части (9), можно получить, считая, что при  $x \rightarrow \infty$  мы переходим на нетронутый массив.

Таким способом мы получаем рабочее соотношение:

$$\begin{aligned} \frac{\gamma}{(1-\gamma)[\gamma + \nu(1-\gamma)]} \left[ \left( \frac{\gamma}{K} + \frac{3}{4G} \right) P(x) - \left( \frac{1}{K} + \frac{3}{4G} \right) P_m(x) \right] + \ln \frac{P(x)}{P_T} = \\ = \frac{\gamma_\infty}{(1-\gamma_\infty)[\gamma_\infty + \nu_\infty(1-\gamma_\infty)]} \left[ \left( \frac{\gamma_\infty}{K_\infty} + \frac{3}{4G_\infty} \right) P_\infty - \left( \frac{1}{K_\infty} + \frac{3}{4G_\infty} \right) P_{m_\infty} \right] + \ln \frac{P_\infty}{P_T}. \end{aligned} \quad (10)$$

Символ  $\infty$  соответствует участку пласта, удаленному от геологической или техногенной неоднородности, сосредоточенной вблизи точки  $x$ . При записи (10) имеем в виду, что упругие модули, пористость и растворимость также могут зависеть от  $x$ .

Рассмотрим два частных случая, представляющих наибольший интерес.

а) Характеристики материала однородны, а внешнее давление  $P_m$  неоднородно.

Тогда  $G = G_\infty$ ,  $K = K_\infty$  и  $\gamma = \gamma_\infty$ .

Заметим, что слагаемым  $\frac{\gamma}{K}$  можно пренебречь в сравнении с  $\frac{3}{4G}$ . На то имеются две причины. Во-первых, пористость  $\gamma < 1$ , а часто и  $\gamma \ll 1$ . Во вторых, модули  $G$  и  $K$  связаны соотношением

$$\frac{K}{G} = \frac{2(1+\sigma)}{3(1-2\sigma)},$$

где  $\sigma$  – коэффициент Пуассона. В углях средней степени метаморфизма, согласно экспериментальным данным [4], коэффициент Пуассона колеблется вблизи значения  $\sigma = 0,4$ . Следовательно, модуль сдвига  $G$  в 4÷5 меньше модуля всестороннего сжатия.

С учетом этого обстоятельства (а также считая  $\gamma \ll 1$  и  $\nu \ll 1$ ) преобразуем (10) к виду:

$$\ln \frac{P(x)}{P_\infty} = -\frac{3}{4G}(P(x) - P_\infty) + \frac{3}{4G}(P_m(x) - P_{m\infty}). \quad (11)$$

Для достаточно надежной, хотя и грубой, оценки давления метана, произведем разложение логарифма по (предполагаемо) малому отношению  $\frac{P(x) - P_\infty}{P_\infty}$  и, считая давление газа в ненарушенной части пласта много меньшим модуля сдвига ( $P_\infty \ll G$ ), приходим к оценочной формуле:

$$\frac{P(x) - P_\infty}{P_\infty} = \frac{3}{4G}(P_m(x) - P_{m\infty}). \quad (12)$$

Как было уже упомянуто, при отработке пласта формируется т.н. опорное давление, которое на расстоянии нескольких метров от забоя может в 5–8 раз превысить горное давление. Для определенности, на глубине  $\sim 1000$  м горное давление ( $P_{m\infty}$ ) равно 25 МПа, опорное давление ( $P_m(x)$ )  $\approx 8 P_{m\infty} = 200$  МПа.

Принимая  $G = 800$  МПа [4] и давление метана в ненарушенной части пласта  $P_\infty = 5$  МПа, получим, согласно (12), изменение давления метана в месте приложения опорного давления

$$P(x) - P_\infty \approx 0,8 \text{ МПа}.$$

Таким образом, на участке сосредоточения опорного давления газовое давление повышается на 15 % (~ 8 атмосфер) по отношению к давлению в удаленных участках пласта.

В действительности повышение давления газа будет бóльшим, так как к упругим деформациям может добавляться пластическая деформация, так что эффективные модули будут еще меньше.

Но даже незначительное увеличение внутривещного 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 [5].

Заметим, что в настоящее время в мировой практике нет экспериментальных замеров увеличения внутривещного давления угля при увеличении внешней нагрузки. Мы получили теоретическую оценку (12) этого увеличения, используя концепцию однородности химпотенциала с учетом влияния газа на напряженно-деформированное состояние пласта.

б) 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.

Для определенности и упрощения записи положим, что пористость и растворимость неизменны вдоль пласта и что сдвиговой модуль значительно меньше модуля сжатия. В этих предположениях имеем уравнение, позволяющее оценить давление газа  $P$  в ослабленном участке пласта, т.е. там, где модуль сдвига  $G$  много меньше модуля сдвига  $G_\infty$  в основной части пласта:

$$\ln \frac{P(x)}{P_\infty} = \frac{\gamma}{(1-\gamma)[\gamma + \nu(1-\gamma)]} \left[ \frac{3}{4G_\infty}(P_\infty - P_m) - \frac{3}{4G}(P - P_m) \right]. \quad (13)$$

И в этом случае, как и при выводе (12), допустимо разложение логарифма в ряд по параметру  $\frac{P(x) - P_\infty}{P_\infty}$ . Кроме того, заботясь лишь об оценках, можно принять, что  $P_\infty \ll G$  и  $\gamma \ll 1$ . В итоге получим реалистичную оценку

$$P - P_\infty \approx \frac{3P_\infty}{4G}(P_m - P_\infty). \quad (14)$$

Поскольку всегда горное давление  $P_m$  больше пластового давления метана  $P_\infty$ , то из (14) следует, что в ослабленном участке пласта ( $G \ll G_\infty$ ) давление метана превышает его давление в основном (ненарушенном) участке. Величина эффекта определяется отношением  $\frac{P_\infty}{G}$  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 ( $800\text{МПа}$ , см. пункт а)), а горное давление  $P_m = 25\text{МПа}$ , то  $(P - P_\infty) = 0,75\text{МПа}$ .

Превышение давления метана в рассматриваемом участке над средним уровнем происходит именно за счет низкого сопротивления сдвигу на этом участке.

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

$$P - P_\infty \approx \frac{3P_\infty (\gamma - \gamma_\infty)(P_m - P_\infty)}{4G (1 - \gamma_\infty)(1 - \gamma)}, \quad (15)$$

откуда следует, что газ может скапливаться в областях с повышенной пористостью ( $\gamma > \gamma_\infty$ ), что известно из шахтных исследований и наблюдений.

г) Роль растворимости в возникновении неоднородностей распределения метана по пласту становится существенной при пониженных температурах, когда  $\nu \geq 1$ .

Тогда оценка изменения давления метана в области отклонения растворимости от номинальной такова:

$$\frac{P - P_\infty}{P_\infty} \approx -\frac{3\gamma P_m (\nu - \nu_\infty)}{4G(\gamma + \nu)(\gamma + \nu_\infty)}. \quad (16)$$

Видно, что на участках с повышенной растворимостью ( $\nu > \nu_\infty$ ) давление снижается. Этот эффект объясняется тем, что метан уходит из пор в твердый раствор.

Следует отметить, что в зонах геологических нарушений, кроме изолированных пор, в угле имеются сильно развитые транспортные каналы, по которым газ может быстро дренировать на больших площадях. Значительно медленнее, по механизму твердотельной диффузии [6], происходит перетекание газа из закрытых пор в транспортные каналы. Но в любом случае, термодинамической движущей силой для перетекания газа является градиент химического потенциала. Эта кинетика выходит за рамки предлагаемой работы.

Физика на первый взгляд парадоксального явления перетекания газа от участков с меньшим внешним давлением к участкам с большим внешним давлением состоит в том, что газ создает противодействие, которое, частично компенсируя внешнее давление, уменьшает упругую энергию угольного каркаса.

Главным образом уменьшается та часть упругой энергии, которая соответствует деформациям сдвига. Именно поэтому относительное изменение газового давления определяется, в основном, модулем сдвига.

Напомним, что мы рассматриваем ситуацию, при которой газ не выходит за пределы пласта, например, из-за блокировки фильтрационных каналов на границе пласта с вмещающими породами.

Важно отметить, что большинство внезапных выбросов связано с зонами геологических нарушений, где суммируются все эффекты, описанные ранее. В зоне геологических нарушений имеем опорное давление, закрытую пористость, транспортные каналы и большую податливость материала.

#### **4. Заключение**

Идея работы состоит в учете влияния газа на упругую энергию угольного каркаса. Базируясь на этой идее, мы показали, что в условиях, когда газ не имеет возможность вытекать из угольного пласта в окружающую среду, метан распределяется по пласту неравномерно. Газ перераспределяется так, чтобы минимизировать термодинамический потенциал системы газ – угольный каркас. В состоянии термодинамического равновесия происходит частичная компенсация внешнего давления противодействием газа. Он скапливается либо в местах ослабления материала (угольного каркаса), либо там, где внешнее давление на пласт значительно превышает горное давление. Напомним, что локальное увеличение внешнего давления происходит при нарушении целостности пласта в результате горных работ и реализуется в виде т.н. опорного давления.

В указанных местах скопления метана его давление может превышать среднее давление по пласту на 15%, 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. Van Krevelen D.W., Coal, Amsterdam: Elsevier, 1993, 1002 p.
2. И.Л. Эттингер, Необъятные запасы и непредсказуемые катастрофы, М.: Наука, 1988, 175 с.
3. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Теория упругости, М.: Наука, 1965, 203 с.
4. Г.П. Стариков, Особенности деформирования и разрушения углей при объемном сжатии; сб. «Технологии на рубеже XX века».– Донецк: ДНТУ, 1, 81 (2001).
5. С.А. Христианович, Известия АН СССР, ОТН, 12, 1953.
6. А.Д. Алексеев, Т.А. Василенко, Э.П. Фельдман и др. ЖТФ, 77/4, 65 (2007).