

01;03;05

Термодинамика газугольного массива и неоднородное распределение газов в угольных пластах

© А.Д. Алексеев, Э.П. Фельдман, Н.А. Калугина

Институт физики горных процессов НАН Украины,
83114 Донецк, Украина
e-mail: kalugina_n_a@inbox.ru

(Поступило в Редакцию 31 марта 2010 г.)

Путем вычисления термодинамического потенциала угольного пласта показано, что давление газа в трещиновато-поровой системе пласта распределено неоднородно. Оно повышено в „слабых“ участках пласта, т.е. в местах повышенной пористости, пониженных упругих модулей и растворимости, а также в местах повышенного опорного давления. Все эти явления обусловлены упругим взаимодействием газа с твердотельным каркасом угля и возможностью образования твердого раствора газа в угле. Оценено относительное повышение давления газа в указанных местах. Полученные результаты могут служить основой прогноза локализации взрыво- и выбросоопасных участков угольных пластов.

Введение

Угольные пласты практически всегда содержат в себе различного рода газы [1], образовавшиеся в длительные времена в результате геофизических и геохимических процессов. Наибольший интерес из этих газов вызывает метан, поскольку он содержится в угле в больших количествах (порядка нескольких весовых процентов) и поскольку этот газ является ценным энергоносителем. Вместе с тем внимание к метану обусловлено той опасностью, которую он представляет как источник взрывов, пожаров и внезапных выбросов угля и породы в шахтах.

С физической точки зрения угольный пласт представляет собой твердотельный каркас с содержащимся в нем и взаимодействующим с ним газом. Угольный каркас пронизан сетью трещин, пор и каналов, образующих в совокупности поровое пространство, заполненное газом. Кроме того, газ содержится в сорбированном виде в микроблоках угля, образуя структуру по типу твердого раствора [2].

В угольном пласте, не нарушенном ни природными факторами, ни выемочными работами, устанавливается термодинамическое равновесие по отношению к тепло- и массообмену между отдельными участками пласта. При этом происходит выравнивание температуры и химического потенциала газа вдоль пласта. Внешняя по отношению к пласту система, т.е. окружающие горные породы, играет роль термостата, задающего температуру и внешнее горное давление.

При производстве горных работ внешнее давление, оставаясь заданным, перераспределяется, возникает так называемое давление, которое на ограниченном участке может в несколько раз превышать горное. Газ, содержащийся в угле, получает возможность покидать пласт и выходить наружу по системе каналов. Однако на практике, в особенности на больших глубинах, внешнее

давление „закрывает“ каналы, примыкающие к выработанному пространству, так что газ может перетекать лишь внутри пласта, и можно считать, что пласт по-прежнему находится в термодинамическом равновесии.

Твердотельный угольный каркас пласта находится в напряженном состоянии под действием внешнего давления и давления газа, заключенного в поровом пространстве.

Принято считать, что в состоянии термодинамического равновесия давление газа однородно вдоль пласта, поскольку обеспечен переток газа по системе пор. В действительности однородным должен быть химический потенциал газа. При вычислении химического потенциала газа следует учесть, что имеется упругое взаимодействие между газом и твердотельным каркасом. Кроме того, часть газа находится не в порах, а в растворенном (сорбированном) виде внутри твердотельного каркаса. В результате давление газа может оказаться неоднородным. Для определения величины и местоположения этих неоднородностей следует вычислить термодинамический потенциал Гиббса системы уголь–газ и затем минимизировать соответствующий функционал по отношению к пространственному перераспределению давления газа в пласте. Поскольку пласт, как правило, неоднороден по упругим свойствам, по пористости, растворимости газа и, кроме того, внешнее давление распределено неравномерно, то и давление метана будет различным в разных местах. Как следствие, метан может скапливаться в определенных „слабых“ участках, создавая предпосылки для возникновения выбросов и взрывов [3], которые, к сожалению, во всех угледобывающих странах являются основной причиной гибели шахтеров.

Таким образом, предметом настоящей работы является перераспределение метана по фазовым состояниям и по давлению, указание локализации „слабых“ мест и оценка величины избыточного газового давления метана в них. Предварительные данные по этой теме были представлены в [4].

Термодинамический потенциал угольного пласта и химический потенциал метана в нем

Рассмотрим угольный пласт, содержащий поры, заполненные метаном. Обозначим через P давление в порах угольного вещества, а через P_m — внешнее (горное) давление на пласт. Для вычисления упругой энергии угольного каркаса применим следующий прием: мысленно разбиваем пласт на парообразные области радиусом R_2 , содержащие полости радиусом 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 [5].

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

$$E_{\text{elastic}} = \frac{2\pi}{R_2^3 - R_1^3} \left[\frac{(PR_2^3 - P_m R_2^3)^2}{3K} + \frac{(P_m - P)^2 R_1^3 R_2^3}{4G} \right], \quad (1)$$

где K и G — модули всестороннего сжатия и сдвига соответственно.

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

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

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

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

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

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

Плотность упругой энергии [4] содержит две составляющие. Первая отвечает энергии всестороннего сжатия, а вторая — энергии сдвиговых деформаций. В отсутствии пор, $\gamma = 0$, приходим к стандартной формуле для плотности энергии всесторонне сжатого материала. Для такого материала, как уголь, с его развитой поровой структурой и низким значением модуля сдвига, основную роль может приобрести энергия сдвига.

Поскольку упругая энергия выражена через давление, то она является упругой составляющей плотности потенциала Гиббса газоугольного материала.

Плотность потенциала Гиббса газа, находящегося в свободном состоянии в порах угля, равна

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

При выводе (5) учтено, что метан в порах угля является идеальным газом; коэффициент γ появился ввиду того, что энергия берется нами в расчете на единицу объема газоугольного материала. В формуле (5) величина P_T равна

$$P_T = T \left(\frac{mT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \left(\frac{T}{T_r} \right)^{3/2},$$

где m — масса молекулы метана, T — абсолютная температура в энергетических единицах,

$$T_r = \left(\frac{18}{\pi} \right)^{1/3} \frac{\hbar^2}{J}$$

— так называемая ротационная температура, J — момент инерции молекулы метана. При расчете P_T были приняты во внимание лишь поступательные и вращательные степени свободы молекулы метана (см., например [6]). В общем случае величина P_T зависит от рода газа и по порядку соответствует давлению снижения газа при рассматриваемой температуре.

В собственно угольный каркас (с относительным объемом $(1-\gamma)$) метан входит помоллекулярно в виде твердого раствора концентрации \bar{c} . Плотность потенциала Гиббса этого (слабого) твердого раствора газа концентрации \bar{c} равна (см., например, [6])

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

где ψ — энергия связи молекулы метана с углем, Ω — объем, приходящийся на одну молекулу метана в твердом растворе. В состоянии термодинамического равновесия связь между концентрацией и давлением дается законом Генри

$$c = \nu \frac{P}{T}, \quad (7)$$

где ν — растворимость метана в угле, определяемая его температурой:

$$\nu = \frac{T}{P_T \Omega} e^{-\frac{\psi}{T}}. \quad (8)$$

Для рассматриваемого нами угольно-газового массива плотность термодинамического потенциала Гиббса получается путем суммирования упругой (4), газовой (5) и „твердорастворной“ (6) составляющих. Учитывая соотношения (7) и (8), получим в итоге:

$$\varphi = \varepsilon_{\text{elastic}} + \varphi_g + \varphi_s = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left[\frac{(P_m - \gamma P)^2}{K} + \frac{3\gamma}{4G} (P_m - P)^2 \right] + [\gamma + \nu(1-\gamma)] P \ln \frac{P}{P_T}. \quad (9)$$

Ввиду неоднородности пласта его упругие модули K и G , а также пористость γ и растворимость ν могут быть разными в разных участках пласта, что обычно и наблюдается. Кроме того, при проведении горных работ внешнее давление становится существенно неоднородным. Концентрация напряжений вызывается наличием полости (выработки) в горном массиве. В перечисленных случаях давление газа перераспределяется по пласту. Чтобы выяснить характер перераспределения, следует минимизировать термодинамический потенциал

$$\Phi = \int \varphi(\mathbf{r})dV$$

газоугольного материала по отношению к пространственному перераспределению $P(\mathbf{r})$ газа в пласте. Предполагаем, что отсутствуют как утечка газа из пласта, так и поступление газа в пласт. Следовательно, при минимизации функционала Φ необходимо учесть условие сохранения суммарного количества метана в пласте. Предполагается, кроме того, однородность температуры угля. В таком случае условие термодинамического равновесия пластового газа состоит в однородности его химического потенциала. Учитывая, что газ распределен между порами и твердым раствором, получаем следующую форму записи условия равновесия:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial P} = \frac{\mu}{T} [\gamma + \nu(1 - \gamma)] = \text{const}, \quad (10)$$

где $\mu = \text{const}$ — химический потенциал газа в угле.

Далее, для упрощения записи, но без ограничения общности, рассмотрим одномерную задачу, когда все величины меняются только вдоль координаты x по простиранию пласта. Перепишем (10) в развернутом виде, учитывая найденный явно (9) вид зависимости $\varphi(P)$:

$$\frac{1}{(1 - \gamma)[\gamma + \nu(1 - \gamma)]} \left[\left(\frac{\gamma}{K} + \frac{3}{4G} \right) P - \left(\frac{1}{K} + \frac{3}{4G} \right) P_m \right] + \ln \frac{P}{P_T} = \frac{\mu}{T} = \text{const}. \quad (11)$$

Все характеристики угольного материала γ , ν , K , G , а также внешнее давление P_m могут меняться с координатой. В соответствии с этим, согласно (12), должно перераспределяться и давление газа.

Участки повышенного пластового давления газа — локализация и степень повышения

Использование формулы (11) позволяет в ряде практически важных случаев указать локализацию участков повышенного давления газа и оценить относительное изменение давления на этих участках. С этой целью заменим константу, стоящую в правой части (11), на значение левой части вдали от мест, где ищется давление газа, т. е. в нетронутом массиве.

Таким способом получаем рабочее соотношение:

$$\frac{1}{(1 - \gamma)[\gamma + \nu(1 - \gamma)]} \left[\left(\frac{\gamma}{K} + \frac{3}{4G} \right) P - \left(\frac{1}{K} + \frac{3}{4G} \right) P_m \right] + \ln \frac{P}{P_\infty} = \frac{\nu_\infty}{(1 - \nu_\infty)[\gamma_\infty + \nu_\infty(1 - \gamma_\infty)]} \times \left[\left(\frac{\gamma_\infty}{K_\infty} + \frac{3}{4G_\infty} \right) P_\infty - \left(\frac{1}{K_\infty} + \frac{3}{4G_\infty} \right) P_{m_\infty} \right]. \quad (12)$$

Символ ∞ соответствует участку пласта, удаленному от интересующей нас геологической или техногенной неоднородности. При переходе от общей формулы (11) к рабочему соотношению (12) исчезает P_T , поскольку температура пласта предполагается однородной.

Рассмотрим частные случаи, представляющие наибольший интерес.

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

$$G = G_\infty, \quad K = K_\infty, \quad \gamma = \gamma_\infty, \quad \nu = \nu_\infty.$$

Заметим, что слагаемым в (12) γ/K можно пренебречь в сравнении с $3/4G$. На то имеются две причины. Во-первых, $\gamma < 1$, 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 σ — коэффициент Пуассона. В углях средней степени метаморфизма, согласно экспериментальным данным [7], 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 (12) к виду:

$$\ln \frac{P(x)}{P_\infty} = -\frac{3}{4G} (P - P_\infty) + \frac{3}{4G} (P_m - P_{m_\infty}). \quad (14)$$

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

$$\frac{P(x) - P_\infty}{P_\infty} = \frac{3}{4G} (P_m(x) - P_{m_\infty}). \quad (15)$$

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

Принимая $G = 800$ МПа [7] и давление метана в ненарушенной части пласта $P_\infty = 5$ МПа, получим, согласно (15), 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 большим, так как к упругим деформациям может добавляться пластическая деформация, так что эффективные модули будут еще меньше.

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

Заметим, что в настоящее время в мировой практике нет экспериментальных замеров увеличения внутрислоевого давления угля при увеличении внешней нагрузки. Нами получена теоретическая оценка (12) этого увеличения с использованием концепции однородности с учетом влияния газа на напряженно-деформированное состояние пласта.

б) Внешнее давление однородно, а макроструктура угля существенно неоднородна.

Рассмотрим 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_∞ в основной части пласта:

$$\ln \frac{P}{P_\infty} = \frac{\gamma}{(1-\gamma)[\gamma + \nu(1-\gamma)]} \times \left[\frac{3}{4G_\infty} (P_\infty - P_m) - \frac{3}{4G} (P - P_m) \right]. \quad (16)$$

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

$$P - P_\infty \approx \frac{3P_\infty}{4G} (P_m - P_\infty). \quad (17)$$

Поскольку всегда горное давление P_m больше пластового давления метана P_∞ , то из (17) следует, что в ослабленном участке пласта ($G \ll G_\infty$) давление метана

превышает его давление в основном (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 (800 МПа, см. пункт а)), а горное давление $P_m = 25$ МПа, то $P - P_\infty = 0.75$ 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, получим оценку:

$$P - P_\infty \approx \frac{3P_\infty}{4G} \frac{(\gamma - \gamma_\infty)(P_m - P_\infty)}{(1 - \gamma_\infty)(1 - \gamma)}, \quad (18)$$

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 в случае $\nu > 1$. Тогда оценка изменения давления метана в области отклонения растворимости от номинальной такова:

$$\frac{P - P_m}{P_\infty} \approx - \frac{3\gamma P_m}{4G} \frac{(\nu - \nu_\infty)}{(\gamma + \nu)(\gamma + \nu_\infty)}. \quad (19)$$

Видно, что на участках с повышенной растворимостью 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 [1,7], 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 нами рассматривается ситуация, 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

Заключение

Идея работы состоит в учете влияния газа на упругую энергию угольного каркаса. Базируясь на этой идее, авторы показали, что в условиях, когда газ не имеет возможности вытекать из угольного пласта в окружающую среду, он 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 так называемого 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.V.* Coal. Amsterdam: Elsevier, 1993. 1002 p.
- [2] *Алексеев А.Д., Василенко Т.А., Фельдман Э.П.* и др. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 4. С. 65.
- [3] *Эттингер И.Л.* Необъятные запасы и непредсказуемые катастрофы. М.: Наука, 1988. 175 с.
- [4] *Алексеев А.Д., Фельдман Э.П.* и др. // ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 14. С. 48.
- [5] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория упругости. М.: Наука, 1965. 203 с.
- [6] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Статистическая физика. Ч. 1. М.: Наука, 1976. 584 с.
- [7] *Стариков Г.П.* // Сб. „Технологии на рубеже XX века“. Донецк: ДНТУ, 2001. Т. 1. № 81.
- [8] *Христианович С.А.* // Изв. АН СССР. ОТН. 1953. Т. 12.