

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 622.411:241.54

В.В. Иванов, Н.Ф. Сурунов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА БЛОКОВЫЕ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Газоносность угольных пород и пластов является важным фактором, влияющим на безопасность ведения горных работ. Данные по газоносности действующих и разведываемых шахтных полей необходимы для прогноза газообильности горных выработок, разработки мер борьбы с газодинамическими явлениями, инженерных расчётов вентиляции и промышленной дегазации шахт. Оптимальность принимаемых в этом плане решений зависит также от объёма газа, дополнительно выделяющегося из угольных пород и пластов при сейсмическом воздействии на блоковые структуры земной коры.

Из геодинамики известно, что вся земная кора поделена на блоки различных размеров, начиная от сотен метров, и кончая мегаблоками, размеры которых сравнимы с размерами континентов. Все блоки отделены друг от друга разломами, по которым блоки могут перемещаться как в процессе медленных современных движений, обусловленных тектоническими напряжениями, так и в процессе резких динамических воздействий, например, сейсмических волн от землетрясений и горно-тектонических ударов. Такие резкие смещения могут приводить к раскрытию трещин и пор, «оживлению» разломов и дополнительному переходу метана угольных пластов из связанного в свободное состояние.

Теоретическую модель о дополнительном выделении газа при резонансных колебаниях блоков можно описать следующим образом.

Газосодержание V_g углей определяется двумя составляющими – объёмом сорбированного газа V_s в единице объёма угля и объёмом свободного газа V_f , содержащегося в полостях, трещинах и порах:

$$V_g = V_s + V_f, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (1)$$

Как правило, объём сорбированного газа определяется законом Лэнгмюра:

$$V_s = \frac{a_s b_s P}{1 + b_s P}, \quad (2)$$

где P – давление газа, Н/м²; a_s – предельное газосодержание сорбированного газа при высоких давлениях.

Коэффициенты a_s и b_s для разных углей меняются в следующих пределах: $a_s = 25 \div 70$, м³/м³; $b_s = 0,2 \div 3$, МПа⁻¹.

При резонансных колебаниях блоковых структур дополнительное газовыделение может быть связано с дилатацией пород блока, раскрытием трещин и пор, вызванных относительным изменением объёма блока, а также образованием новых трещин. Относительное изменение объёма блока

$$\theta = \frac{y_{\max} a^2}{a^2 H} = \frac{y_{\max}}{H}, \quad (3)$$

где a – продольный и поперечный размеры блока, м; H – высота блока, м; y_{\max} – максимальное смещение блока при резонансных колебаниях, м.

Дополнительное максимальное газовыделение, обусловленное переходом газа из сорбированного состояния в свободное, может быть определено по формуле

$$\Delta V_g = \Delta V_s = \theta a_s, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (4)$$

Тогда максимальный дополнительный объём газа Q , который переходит в свободное состояние при резонансных колебаниях блока, можно оценить следующим образом:

$$Q = \theta \left[\left(\sum_{i=1}^n m_i \right) a^2 \right] \cos \alpha a_s, \text{ м}^3, \quad (5)$$

где α – угол падения пластов в свите, расположенных в пределах блока; $\sum_{i=1}^n m_i$ – суммарная мощность угольных пластов в свите, попадающих в рассматриваемый блок, м.

Рассмотрим периодическую сейсмическую нагрузку, действующую на выделенный блок с частотой $\omega = 2\pi/T$, где T – период изменения нагрузки. Пусть для простоты расчётов эта нагрузка представляет собой прямоугольные импульсы с периодом T и амплитудой $A = F_u^{max}/m$, где m – масса блока, F_u^{max} – максимальная сила в импульсе, способная сдвинуть блок вдоль разломов и которая определяется по формуле [1:]

$$F_u^{\max} = 2f_s(\rho - \rho_\omega)gaH^2 + \rho g a^2 H, \quad (6)$$

где f_s – статический коэффициент трения по берегам разломов; ρ, ρ_ω – средняя плотность пород и воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; a – размеры блока по горизонтали, м; H – высота блока, м.

Поскольку масса блока равна $m = \rho a^2 H$, то амплитуда может быть определена из выражения:

$$A = \frac{F_u^{\max}}{m} = g[2Hf_s(1 - \rho_\omega/\rho)/a + 1] \quad (7)$$

Уравнение вынужденных колебаний блока запишется следующим образом:

$$\ddot{y} + 2b\dot{y} + k^2 y = \mp \frac{2f_d(1 - \rho_\omega/\rho)gH}{a} + \\ + A \left[\eta(t) - \eta\left(t - \frac{T}{2}\right) + \eta(t - T) - \right. \\ \left. - \eta\left(t - \frac{3}{2}T\right) + \eta(t - 2T) - \eta\left(t - \frac{5}{2}T\right) + \dots \right], \quad (8)$$

где y – динамическое смещение блока, м; $2b = \alpha/\rho Ha^2$, с⁻¹; α – коэффициент вязкого сопротивления на границе разломов, кг/с; $k = \sqrt{c/\rho Ha^2}$ – частота собственных колебаний блока [1], с⁻¹; T – период импульсной нагрузки, с; f_d – динамический коэффициент трения на границах разломов; $\eta(t)$ – единичная функция Хэвисайда.

Диаграмма нагружения блока сейсмоисточником представлена на рисунке.

Общее решение уравнения (8) представляет собой сумму затухающих колебаний с декрементом затухания b и вынужденных колебаний за счёт виброисточника.

Частное решение уравнения (8), описывающее вынужденные колебания имеет вид:

$$y(t) = \frac{A}{k^2} \left[\eta(t) - \eta\left(t - \frac{T}{2}\right) + \eta(t - T) - \eta\left(t - \frac{3}{2}T\right) + \dots \right] \quad (9)$$

Представим периодическую функцию в правой части уравнения (8) её разложением в ряд Фурье:

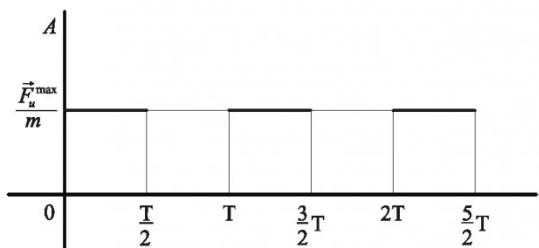


Диаграмма импульсной нагрузки блока при воздействии сейсмоисточника колебаний

рье:

$$f(t) = A \left[\eta(t) - \eta\left(t - \frac{T}{2}\right) + \dots \right] = \quad (10)$$

$$c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(2\pi nt/T) + b_n \sin(2\pi nt/T)],$$

$$\text{где } a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(2\pi nt/T) dt;$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(2\pi nt/T) dt;$$

$$c_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt = A/2; \quad a_n = 0.$$

Вычисляя интегралы, получим:

$$f(t) = \frac{A}{2} + \frac{A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(1 - \cos \pi n)}{n} \sin \frac{2\pi nt}{T} = \quad (11)$$

$$= A \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(1 - \cos \pi n)}{n} \sin n\omega t \right),$$

где $\omega = 2\pi/T$ – частота сейсмоисточника.

Оставим в этом выражении наиболее существенную – первую форму колебаний (первую гармонику):

$$f(t) \approx \frac{A}{2} + \frac{2A}{\pi} \sin \omega t. \quad (12)$$

Уравнение (8) примет теперь вид:

$$\ddot{y} + 2b\dot{y} + k^2 y = \lambda + \frac{A}{2} + \frac{2A}{\pi} \sin \omega t, \quad (13)$$

$$\text{где } \lambda = \mp \frac{2f_d(1 - \rho_\omega/\rho)gH}{a}.$$

Общее решение уравнения (13) может быть представлено в виде:

$$y(t) = Be^{-bt} \sin(k_1 t + \psi) + \frac{2\lambda + A}{k^2} + y_u(t), \quad (14)$$

где $k_1 = \sqrt{k^2 - b^2}$; B и ψ – константы, определяемые из начальных условий задачи; $y_u(t)$ – частное решение неоднородного уравнения (13), обусловленное первой гармоникой колебаний сейсмоисточника, которое является для нас определяющим.

Ищем это частное решение с помощью преобразования Лапласа:

$$(P^2 + 2bP + k^2) \bar{y}_u(P) = \frac{2A}{\pi} \cdot \frac{\omega}{(P^2 + \omega^2)}, \quad (15)$$

где $\bar{y}_u(P)$ – образ функции $y_u(t)$. Из (15) находим:

Таблица 1

Исходные данные для расчёта объёмов дополнительного газовыделения

$\rho = 2574, \text{ кг}/\text{м}^3$	$\rho_0 = 1425, \text{ кг}/\text{м}^3$	$\rho_w = 1000, \text{ кг}/\text{м}^3$
$\nu = 0,27$	$f_s = 0,85$	$\sigma = 0,8, \text{ с}^{-1}$
$E = 2,5 \cdot 10^4, \text{ МПа}$		$E = 2,5 \cdot 10^{10}, \text{ Па}$
$a = 1,719$	$b = -3,017 \cdot 10^{-3}$	$c = 2,137 \cdot 10^{-3}$
$H = 150 \text{ м};$ $H^a = 5504,28 (\text{м});$ $\exp(b \cdot 150 \text{ м}) = 0,636$	$H = 500 \text{ м};$ $H^a = 43604,31 (\text{м});$ $\exp(b \cdot 500 \text{ м}) = 0,221$	$H = 600 \text{ м};$ $H^a = 59654,33 (\text{м});$ $\exp(b \cdot 600 \text{ м}) = 0,164$
$\Sigma m_i = 10 \text{ м}$	$\Sigma m_i = 15 \text{ м}$	$\Sigma m_i = 20 \text{ м}$
$\alpha = 9^\circ$	$\cos \alpha = 0,99$	$a = 500 \text{ м}$
		$a = 600 \text{ м}$

$$\bar{y}_u(P) = \frac{2A\omega}{\pi} \cdot \frac{1}{(P^2 + \omega^2)[(P+b)^2 + k_1^2]}. \quad (16)$$

Последнее можно разложить на простые дроби:

$$\begin{aligned} \bar{y}_u(P) = & -\frac{A}{2\pi k_1} \left(\frac{1}{P-i\omega} - \frac{1}{P+i\omega} \right) \times \\ & \times \left(\frac{1}{P+b-ik_1} - \frac{1}{P+b+ik_1} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

Применяя к уравнению (17) обратное преобразование Лапласа и пренебрегая затухающими составляющими решения, получим:

$$y_u(t) = 2 \frac{A}{\pi} \left\{ -\frac{2b\omega \cos \omega t}{[(k^2 - \omega^2)^2 + 4b^2\omega^2]} + \right. \\ \left. + \frac{(k^2 - \omega^2)\sin \omega t}{[(k^2 - \omega^2)^2 + 4b^2\omega^2]} \right\}.$$

Последнее можно представить в виде:

$$y_u(t) = \frac{2A \sin(\omega t - \beta)}{\pi \sqrt{4b^2\omega^2 + (k^2 - \omega^2)^2}}, \quad (18)$$

$$\text{где } \tan \beta = \frac{2b\omega}{(k^2 - \omega^2)}.$$

В случае $k = \omega$ имеем:

$$y_u(t) = -\frac{A}{\pi b \omega} \cos \omega t. \quad (19)$$

В этом случае амплитуда колебаний блока существенно возрастает, т.к. коэффициент b , связанный с вязким сопротивлением, мал в сравнении с A .

Максимальная динамическая составляющая амплитуды резонансных колебаний блока равна:

$$y_{\max} = \frac{A}{\pi b \omega} = \frac{2g\rho[2Hf_s(1 - \rho_\omega / \rho)/a + 1]Ha^2}{\pi \omega \bar{\alpha}} \quad (20)$$

где $\bar{\alpha}$ – коэффициент вязкого сопротивления, $\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}$; $\omega = k = \sqrt{\frac{c}{\rho a^2 H}}$, Гц; c – коэффициент жёсткости пород основания блока, который может быть оценен по формуле $c = \frac{Ea^2}{H}$, где E – модуль Юнга пород основания блока, Па.

Коэффициент вязкого сопротивления $\bar{\alpha}$ оценивается по формуле $\bar{\alpha} = 2b\rho Ha^2$, а параметр b находится по затуханию собственных колебаний блока при однократном импульсном воздействии.

В угольных шахтах источниками газовыделения служат разрабатываемые, а также смежные подрабатываемые или надрабатываемые пласты угля и пропластки, вмещающие породы. Выделяются газы через свободную поверхность пласта и из отбитого угля.

Прогноз ожидаемого газовыделения осуществляется в настоящее время расчёты методом по природной газоносности пластов с учётом принятой системы разработки и порядка отработки пластов в свите. Полученный таким образом прогноз не содержит газовую составляющую, образуемую при тектонических подвижках.

Для условий шахты «Распадская» была произведена оценка возможного дополнительного газовыделения из угольных пород и пластов при сейсмическом воздействии на блоки.

Нами предлагается метод определения дополнительного газовыделения в горные выработки,

который учитывает раздробленность шахтного поля на блоки, испытывающие различной природы силовые нагрузки. В расчётную формулу вводятся геометрические параметры блока и суммарная мощность угольных пластов, находящихся в этом блоке.

Такой подход к решению данной задачи продиктован всеобщим характером структуированности земной коры на блоки разных размеров. Блок того или иного ранга, участвуя в геодинамических процессах, выступает в качестве целостного объекта как относительно самостоятельная единица.

Это свидетельствует о необходимости использования его характеристик в подобных расчётах. Сейсмическое воздействие на блок вызывает дополнительное выделение газа.

Различные сейсмические события природного и техногенного характера приводят к резонансным колебаниям блоков, в силу которых выделяется дополнительный объём газа из угольных пород и пластов.

Расчёт объёмов дополнительного газовыделения производился по формуле

$$Q = g \cdot [2Hf_s(1 - \rho_w/\rho)/a + 1] \cdot a_s \\ \times \pi b \sqrt{\frac{E}{\rho}} \\ \times \left[\left(\sum_i m_i \right) a^2 / \cos \alpha \right],$$

где

$$a_s = cH^a \exp(bH)/1,425.$$

Исходные данные о физико-технических свойствах и газоносности угольных пород и пластов шахты «Распадская», необходимые для расчёта объёмов дополнительного газовыделения при сейсмическом воздействии на блоки, были взяты из [2, 3] (табл. 1).

Расчёт дополнительного газовыделения производился для блоков разных размеров, содержа-

Таблица 2
Объём газа, который может дополнительно выделяться из сейсмически активизированных блоков разных размеров

H – высота блока, м	a – размеры блока по горизонтали, м	$\sum m_i$ – суммарная мощность угольных пластов в свите	Q – дополнительное газовыделение, м ³
150	500	10	22115,9
		15	32517,3
		20	43356,4
500	500	10	92712,9
		15	139069,4
		20	185425,8
600	600	10	135539,2
		15	203308,8
		20	271078,4

щих суммарные мощности угольных пластов 10, 15 и 20 метров. Объёмы возможного дополнительного выделения газов из блоков при их сейсмических подвижках приведены в табл. 2.

Дополнительное выделение больших объёмов газа (табл. 2), являясь производной сейсмических подвижек блоков, увеличивает вероятность воспламенения метана и других газодинамических явлений. Поэтому учёт дополнительного газовыделения из угольных пород и пластов важен при проектировании шахт и отработке угольных месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тёркот Д. Геодинамика. В 2 ч. Ч. 2. Геологические приложения физики сплошных сред / Д. Тёркот, Дж. Шуберт. – М.: Мир, 1985. – 360 с.
2. Штумпф Г.Г. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна: справочник / Г.Г. Штумпф, Ю.А. Рыжков, В.А. Шаламанов, А.И. Петров. – М.: Недра, 1994. – 447 с.
3. Шахты Кузбасса: справочник / В.Е. Брагин, П.В. Егоров, Е.А. Бобер [и др.]; под ред. П.В. Егорова и Е.А. Бобера. – М.: Недра, 1994. – 352 с.

Авторы статьи:

Иванов
Вадим Васильевич
- докт. техн. наук, проф. каф.
теоретической и геотехнической
механики

Сурунов
Николай Фёдорович
- инженер геологического
музея