

В.В. Власенко, инж.  
(ИГТМ НАН Украины),  
Д.М. Житленок, к.т.н.,  
О.В. Московский, инж.,  
С.В. Стародубцев, инж.  
(ГП «Дзержинскуголь»)

## КРИТЕРИЙ РАЗРУШЕНИЯ УГЛЯ ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПЛАСТ

Наведено математичну модель процесу руху рідини у вугільному пласті і його руйнування при цьому. Представлена теорія враховує зміни фільтруючого обсягу й ефективної пористості пласта, спричинених деформацією під час підвищення і різкого зменшення тиску, що відбувається при гідродинамічній дії.

## CRITERION OF DESTRUCTION OF COAL AT HYDRODYNAMIC INFLUENCE ON THE LAYER

The mathematical model of movement process of a liquid in a coal layer and its destructions is presented. Suggested theory considers changes of filtration volume and effective porosity of a layer, induced of deformation during increasing and dumping pressure at the hydrodynamic effect.

Существует ряд способов воздействия на угольный массив, где в качестве рабочего агента применяется жидкий флюид (вода). Способ гидродинамического воздействия коренным образом отличается от всех других способов, т. к. применяется знакопеременное воздействие на массив через скважину. Т. е. разрушение осуществляется наименее энергозатратным способом, путем создания усилий на отрыв. Поэтому определение критерия разрушения напряженного газонасыщенного слоя позволит разработать параметры условий разрушения и основные параметры процесса гидродинамического воздействия.

Определение критерия разрушения угля при гидродинамическом воздействии производится согласно математической модели приведенной ниже. Движение жидкости в угольном пласте выражается квазилинейным законом фильтрации:

$$v = -k(P)gradP,$$

где  $v$  – скорость движения жидкости;  $k(P)$  – коэффициент фильтрации, как функция давления;  $P$  – давление жидкости в точке в данный момент времени.

В общем случае эффективная пористость пласта и плотность жидкости также являются функциями давления  $m(P)$  и  $\rho(P)$ .

За время  $dt$  через площадку, перпендикулярную направлению движения жидкости, происходящего вдоль оси  $Ox$ , проходит масса жидкости

$$\rho v dt = -\rho \frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} dt.$$

Изменение массы жидкости в объеме, заключенном между двумя площадками, составит  $\frac{\partial}{\partial t} \rho m dx dt$ .

Согласно закону сохранения массы:

$$\rho k \frac{\partial P}{\partial x} dt = \frac{\partial}{\partial x} \rho m dx dt,$$

или же в другом виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho(P) k(P) \frac{\partial P}{\partial x} \right] = \frac{\partial}{\partial t} \rho(P) k(P).$$

Пренебрегая сжимаемостью жидкости, получим

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k(P) \frac{\partial P}{\partial x} \right] = \frac{\partial}{\partial t} \rho(P).$$

Учитывая изменение эффективной пористости пласта при гидродинамическом воздействии [1] и предположив постоянство коэффициента фильтрации  $k$  ( $k(P) = const$ ), имеем

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k_0}{3(1-m_0)} \frac{E}{1-2\nu} \left\{ 1 - \frac{1-2\nu}{E} \left[ H \left( \frac{1}{2} + 2\lambda \right) - 3P \right] \right\}^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2},$$

или же в случае зависимости коэффициента фильтрации  $k$  от давления  $P$  ( $k(P) \neq const$ ), выражение примет вид:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k_0}{3(1-m_0)} \frac{E}{1-2\nu} \left\{ 1 - \frac{1-2\nu}{E} \left[ H \left( \frac{1}{2} + 2\lambda \right) - 3P \right] \right\}^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial k(P)}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x}.$$

Для разрушения угольного пласта при гидродинамическом воздействии необходимо, чтобы возникающие при движении жидкости в пласте силы, направленные на отрыв слоя угля  $\sum F_{omp}$  превосходили по своему значению силы сцепления этого слоя с угольным пластом  $\sum F_{cy}$

$$\sum F_{omp} > \sum F_{cy}.$$

Наиболее существенное значение для разрушения угля имеют силы вязкого трения  $F_y$ , возникающие при движении жидкости в поровом пространстве и силы гидравлического давления  $F_s$ , которые возникают при сбросе давления в скважине. Силы вязкого трения при движении жидкости в пласте описываются уравнением [2]:

$$F_v = \frac{\mu m_n}{k_{np}} v V_y, \text{ Н},$$

где  $\mu$  - вязкость жидкости, Па·с;  $k_{np}$  - коэффициент проницаемости, м<sup>2</sup>;  $v$  - скорость фильтрации жидкости, м/с;  $V_y$  - объем угля, заполненный движущейся жидкостью, м<sup>3</sup>.

При этом скорость фильтрации определяем по выражению:

$$v = \frac{k_{np}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r}, \text{ м/с},$$

где  $\frac{\partial P}{\partial r}$  - градиент давления, Па/м.

Объем слоя угля равен:

$$V_y = \pi h \left[ \frac{r_c^2}{2} + b^2 - r_c^2 \right], \text{ м}^3,$$

где  $h$  - длина скважины по углю, м;  $r_c$  - радиус скважины, м;  $b$  - толщина разрушаемого слоя, м.

Кроме того, являясь упругой средой, угольный пласт в процессе гидродинамического воздействия изменяет свою эффективную пористость. При этом наиболее резкое изменение происходит на границе пласта и скважины, где пористость при сбросе давления жидкости от величины  $P$  до нуля изменяется от  $m_n$  до  $m$  за время, равное времени сброса.

Площадь пор, из определения пористости, равна

$$S_n = \frac{m S_{ск}}{1 + m}, \text{ м}^2,$$

где  $S_{ск}$  - площадь минерального скелета, м<sup>2</sup>.

При  $S_{ск}=1 \text{ м}^2$ , получим:

$$S_n = \frac{m}{1 + 2m}.$$

Если давление в скважине равно  $P$ , имеем:

$$S'_n = \frac{m_n}{1 + 2m_n}.$$

Изменение площади пор на стенках скважины во время сброса давления определяем по выражению:

$$\Delta S = \frac{m_0 - \frac{1-2\nu}{E} \left[ H \left( \frac{1}{r} + 2\lambda \right) - 3P \right]}{1 + 2m_0 - 3 \frac{1-2\nu}{E} \left[ H \left( \frac{1}{r} + 2\lambda \right) - 3P \right]} - \frac{m_0 - \frac{1-2\nu}{E} \gamma H \left( \frac{1}{r} + 2\lambda \right)}{1 + 2m_0 - 3 \frac{1-2\nu}{E} \gamma H \left( \frac{1}{r} + 2\lambda \right)}.$$

Так как при сбросе давления в скважине давление в пласте на глубине  $b$  на некоторое время остается близким к  $P$ , то возникающая сила гидростатического давления будет описываться уравнением

$$F_s = 2\pi r_c h \Delta P \left\{ \frac{m_0 - \frac{1-2\nu}{E} \left[ H \left( \frac{1}{r} + 2\lambda \right) - 3P \right]}{1 + 2m_0 - 3 \frac{1-2\nu}{E} \left[ H \left( \frac{1}{r} + 2\lambda \right) - 3P \right]} - \frac{m_0 - \frac{1-2\nu}{E} \gamma H \left( \frac{1}{r} + 2\lambda \right)}{1 + 2m_0 - 3 \frac{1-2\nu}{E} \gamma H \left( \frac{1}{r} + 2\lambda \right)} \right\}$$

Учитывая, что

$$F_{ct} = 2\pi r_c + b \vec{g} \sigma_p,$$

силовое условие отрыва слоя угля имеет следующий вид:

$$\Delta P > \frac{2r_c + b \vec{g} \sigma_p}{\left\{ 1 - \frac{1 - m_0}{1 - \frac{1-2\nu}{E} \left[ H \left( \frac{1}{r} + 2\lambda \right) - 3P \right]} \right\} + 2r_c \Delta S}.$$

Результаты оценочных расчетов необходимого падения давления в скважине приведены в табл. 1. Расчеты выполнены для угольного пласта  $l_7$  - «Пугачевка» (ш. им. Ф.Э. Дзержинского ГП «Дзержинскуголь», горизонт 1026 м), имеющего следующие характеристики: пористость  $m = 0,055$ ; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,2$ ; модуль продольной упругости  $E = 3 \cdot 10^8$  Па; коэффициент бокового распора  $\lambda = 0,5$ ; объемный вес угля  $\gamma = 1,35 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Таблица 1 - Необходимое падение давления в технологической скважине  $\Delta P$  (МПа) при различных пределах прочности угля на разрыв  $\sigma_p$  (МПа) и давлениях подачи рабочего агента  $P$  (МПа)

$P$ , МПа	$\sigma_p$				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1	1,967	3,933	5,900	7,867	9,833
2	1,698	3,396	5,093	6,791	8,489
3	1,497	2,994	4,491	5,988	7,485
4	1,342	2,683	4,025	5,366	6,708
5	1,218	2,435	3,653	4,870	6,088
6	1,116	2,233	3,349	4,465	5,581
7	1,032	2,064	3,096	4,128	5,160

Учитывая, что величина  $\sigma_r$  для выбросоопасных пластов Донбасса, как правило, не превышает 0,15 МПа, можно сделать вывод о возможности достижения разрушения угля гидродинамическим воздействием на всех выбросоопасных пластах региона.

Зависимость, позволяющая оценить возможность разрушения угля при различных значениях  $P$  для выбросоопасных пластов, представлена на рис. 1. Разрушение может происходить лишь в зоне под пунктирной линией, где величина необходимого сброса давления  $\Delta P$  меньше величины давления подачи жидкости  $P$  в угольный пласт.

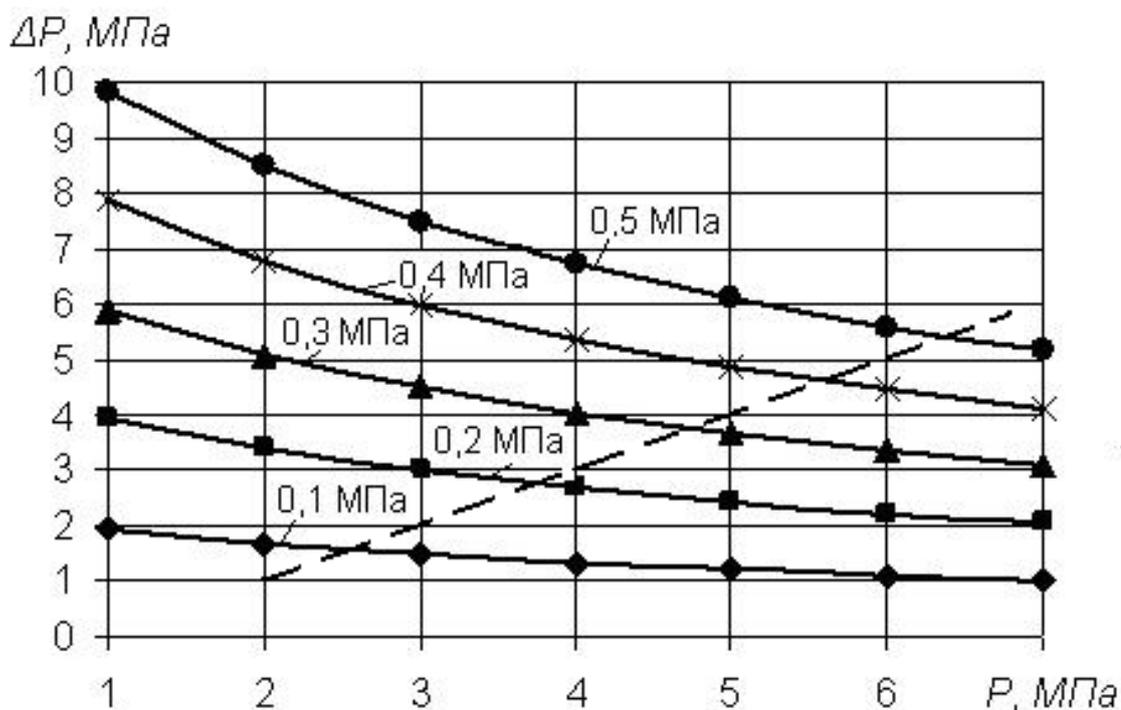


Рис. 1 - Зависимость величины сброса давления  $\Delta P$  от давления подачи жидкости  $P$  для углей с различным пределом прочности на разрыв  $\sigma_p$

Таким образом, на основании результатов численного решения математической модели процесса движения жидкости в угольном пласте, учитывающей тот факт, что при гидродинамическом воздействии угольный пласт ведет себя как упругая среда, установлено изменение эффективной пористости пласта, при этом на отрыв слоя угля направлены не только силы вязкого трения, но и силы гидравлического давления. В таком случае разрушение угля происходит с превышением равнодействующей этих сил над силами сцепления данного слоя с пластом, а изменение эффективной пористости оказывает влияние на выполнение силового условия разрушения угля и позволяет снизить необходимый перепад давления в скважине. Причем с увеличением давления подачи жидкости в пласт уменьшается необходимый для разрушения перепад давления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Силин Д.П. Изменение напряженно-деформированного состояния угольного пласта гидродинамическим воздействием // Проблемы аэрологии горнодобывающих предприятий. – №5. - Днепропетровск: НГА Украины, 1999. – С. 177 – 179. – (Сб. научн. тр. НГА Украины).
2. Софийский К.К., Калфакчян А.П., Воробьев Е.А. Нетрадиционные способы предотвращения выбросов и добычи угля. – М.: Недра, 1994. – 192 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н Л.М. Васильєвим 18.08.09*