

4. Руководство по определению сорбционной метаноемкости природного угля объемным методом с применением промежуточных емкостей для сжатого газа на установке ЯМР им. А.А. Скочинского. – М.: ИГД им. А.Д. Скочинского, 1977. – 28с.
5. Скляр П.А. Определение метаноносности угольных пластов расчетным методом / П.А. Скляр, Р.М. Кривицкая, Г.В. Струковская // Уголь Украины - 1982. - №7 – С.37-39.
6. Фертельмейстер Я.И. Определение давления газа в призабойной части пласта / Я.И. Фертельмейстер // Бюл. МакНИИ, 1958 - № 8.
7. Инструкция по определению и прогнозу газоносности угольных пластов и вмещающих пород при геологоразведочных работах М.: Недра, 1977. – 96 с.
8. Радченко С.А., Матвиенко Н.Г. Способ определения выбросоопасных зон и газоносности угольных пластов в призабойной зоне. - Патент России № 2019706, МКИЕ 21 F 5/00. 15.09.1994, Б. И. № 17.
9. Алексеев А.Д. Физика угля и горных пород / А.Д. Алексеев.- Киев: Наукова думка. – 394с.

**УДК 539.3:622.831.**

Д-р техн. наук В.Н. Ревва,  
канд. техн. наук В.В. Васютина  
(УкрНИМИ НАН Украины)

### **ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА НАД ВЫРАБОТАННЫМ ПРОСТРАНСТВОМ**

Запропонована геомеханічна модель оцінки та прогнозу граничного стану гірського масиву над виробленим простором при консервації вугільних шахт.

### **GEOMECHANICAL MODEL FOR EVALUATING AND FORECASTING LIMIT CONDITION OF THE ROCK MASSIF OVER THE GOAF**

The author proposes a geomechanical model for estimating and forecasting limit condition of the rock over the goaf when the mine is prepared for the preservation.

При эксплуатации и консервации угольных шахт вся геологическая толща горных пород, находящаяся над выработанным пространством, подвержена воздействию различных факторов, видимым проявлением которых является сдвигание земной поверхности.

Важнейшей проблемой геомеханики является оценка и прогноз устойчивости горных выработок и массива горных пород над ними, которые определяют способы управления горным давлением, типы выемочного оборудования, характеристики, схемы расположения и передвижения крепи, а при консервации угольного предприятия, прежде всего сдвигания земной поверхности.

Вопросы устойчивости непосредственно связаны с деформированием и разрушением горных пород, которые в отличии от других твердых тел, имеют свои специфические особенности, связанные, прежде всего с дефектностью структуры (трещины, поры), неоднородностью (слоистость) и гетерогенностью (присутствие флюидов) среды. Изменение деформационных и прочностных свойств горных пород определяет устойчивость горного массива.

В настоящей работе предлагается геомеханическая модель оценки и прогноза предельного состояния горного массива, находящегося над выработанным пространством при консервации угольной шахты, основанная на положениях механики разрушения.

Воспользуемся подходом, который впервые был предложен в работах [1, 2]. Рассмотрим предельный, в смысле устойчивости, случай, когда горный массив принимается упругим. В породах обладающих свойствами пластичности, со временем напряжения релаксируют. В связи со сложностью проблемы, ограничимся рассмотрением плоской задачи о напряженно-деформированном состоянии упругого горного массива над выработанным пространством, подверженного воздействию горного давления: вертикального  $\sigma_1 = k\gamma H$  и горизонтального  $\sigma_2 = k\lambda\gamma H$ , где  $\gamma$  -объемный вес пород;  $H$  – глубина залегания;  $k$  – коэффициент концентрации напряжений равный 1 вне зоны влияния выработки и  $\geq 2$  – в зоне влияния;  $\lambda$  - коэффициент бокового распора равный  $\frac{\nu}{1-\nu}$ ;  $\nu$  - коэффициент Пуассона.

Для оценки и прогноза предельного состояния горного массива над выработанным пространством, а следовательно и его устойчивости, рассмотрим в нём эффективную (интегрально учитывающую множество реальных трещин в массиве) прямолинейную трещину длиной  $2l$ , ориентированную под углом  $\psi$  к направлению действия, преобладающего сжимающего напряжения  $\sigma_1$ . Вдоль берегов трещин распределены нормальные напряжения  $Q$  (давление флюида на стенки трещины). Пренебрегаем влиянием фильтрации флюида (воды, газа) через стенки трещины на распределение давления вдоль её берегов. Согласно [3] коэффициенты интенсивности напряжений  $K_I$  и  $K_{II}$ , характеризующие локальное поле упругих напряжений соответственно нормального отрыва и поперечного сдвига у тупиковой части трещины, определяются по формулам

$$\begin{aligned} K_I &= \sqrt{\pi l} \left[ Q - \sigma_1 (\sin^2 \psi + \lambda \cos^2 \psi) \right], \\ K_{II} &= \frac{1}{2} \sqrt{\pi l} \sigma_1 (1 - \lambda) \sin 2\psi . \end{aligned} \quad (1)$$

Как известно, реальный горный массив представляет собой неоднородную слоистую среду. Поэтому, учитывая также то, что неоднородность упругих свойств горных пород существенно уменьшает их трещиностойкость (сопротивляемость развитию в них дефектов типа трещин [3]), воспользуемся условием локального разрушения для эффективной трещины, находящейся на границе раздела упругих сред (границе слоев), в виде [4]

$$\eta = [k_I^2 + k_{II}^2] = 8\Gamma ,$$

где

$$\eta = \frac{(\mu_1 + \mu_2 \aleph_1)(\mu_2 + \mu_1 \aleph_2)}{\mu_1 \mu_2 [\mu_2 (\aleph_1 + 1) + \mu_1 (\aleph_2 + 1)]} , \quad (2)$$

$$\mu_i \frac{E_i}{2 \cdot (1 + \nu_i)}$$

$E_i$  – модуль Юнга  $i$ -го слоя;  $\lambda_i = 3 - 4\nu_i$ ;  $\nu_i$  – коэффициент Пуассона  $i$ -го слоя;  $\Gamma$  – эффективная поверхностная энергия (ЭПЭ) (энергия необходимая для образования нового элемента поверхности, интегрально учитывающая все механизмы разрушения). В выражении (2)  $\Gamma$  – ЭПЭ менее трещиностойкого слоя.

После подстановки (1) в (2) и соответствующих преобразований получим критериальное соотношение, позволяющее оценить и спрогнозировать предельное состояние (состояние предшествующее началу развития трещины и потери устойчивости) горного массива над выработанным пространством с учетом физико-механических свойств горных пород, глубины залегания и трещиностойкости:

$$\frac{\pi l \eta}{8} \left\{ [Q - k\gamma H (\sin^2 \psi + \lambda \cos^2 \psi)]^2 + \frac{(k\gamma_i H)^2}{4} (1 - \lambda)^2 \sin^2 2\psi \right\} = \Gamma \quad (3)$$

В случае однородной среды (отсутствия границы раздела) критериальное соотношение имеет вид

$$\frac{\pi l (1 - \nu^2)}{2E} \left\{ [Q - k\gamma H (\sin^2 \psi + \lambda \cos^2 \psi)]^2 + \frac{(k\gamma_i H)^2}{4} (1 - \lambda)^2 \sin^2 2\psi \right\} = \Gamma \quad (4)$$

Оценка параметров  $E$ ,  $V$  и  $\Gamma$  в соотношениях (3) и (4) может осуществляться согласно экспериментальным методикам, апробированных для горных пород [5]. Поскольку в условиях объемного сжатия горные породы разрушаются за счет скачкообразного прорастания, критически ориентированных сдвиговых трещин [3] согласно [6] наиболее опасные трещины могут быть расположены под углом  $\psi = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \rho$  к направлению преобладающего сжимающему напряже-

нию  $\sigma_1$ ,  $\rho$  – коэффициент внутреннего трения. Размер эффективной трещины можно оценить в соответствии с [7].

Следует заметить, что флюиды, находящиеся в поровом пространстве горных пород, оказывают не только чисто механическое влияние на их деформирование и разрушение, которые мы учли через параметр  $Q$  (по разным представлениям это давление изменяется от 3 до 10 МПа), но и физико-химическое. Физико-химическое влияние (эффект Ребиндера [8]) объясняется адсорбцией флюида на внутренних поверхностях, что приводит к уменьшению свободной энергии на границе фаз. Уменьшение поверхностной энергии понижает параметр прочности.

Поэтому весьма актуальным является исследование физико-химического влияния флюидов, особенно водонасыщения, на параметры предлагаемого критерия предельного состояния горного массива при мокрой консервации угольных шахт.

Согласно [3] при влагонасыщении эффективная поверхностная энергия песчаников с силикатным цементом (как правило, высокопористых) уменьшается до 8 раз. При этом наибольшее уменьшение происходит при содержании физически связанной влаги в пределах 1,2-1,5 %. При дальнейшем увлажнении ЭПЭ изменяется незначительно. В песчаниках с карбонатным цементом ЭПЭ уменьшается только в 1,5 раза, при этом наибольшее уменьшение происходит при содержании физически связанной влаги от 0,5 до 0,75 %. Газонасыщение также существенно уменьшает трещиностойкость песчаников, но в сравнении с водой менее значительно.

Следует отметить, что влияние воды и газа на физико-механические свойства горных пород в основном имеет противоположный характер. Водонасыщение приводит к уменьшению упругих свойств горных пород, к увеличению деформаций и к пластификации, локализует разрушение, реализуемое развитием сдвиговых трещин. Газонасыщение горных пород приводит к увеличению их упругих характеристик, повышает хрупкость материала, интенсифицирует трещинообразование по всему объему, а разрушение носит динамический характер.

В соответствии с [9-12] при насыщении углей водой происходит уменьшение его упругих свойств (модуль деформации, сдвига и объемного сжатия уменьшаются, а коэффициент поперечной деформации увеличивается), локализуется разрушение в одной плоскости и реализуется сдвиговый механизм разрушения.

Метанонасыщение приводит к повышению хрупкости угля, увеличению упругих свойств и предельной прочности, разрушение носит динамический характер, трещины близки к трещинам отрыва.

При деформировании и разрушении газонасыщенных угольных образцов, в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия несоответствие между видами напряженного и деформационного состояний имеет сложную зависимость, а для водонасыщенных, за счет гомогенизации среды, стремится к соответствию.

Таким образом, с позиции механики разрушения предложена геомеханическая модель оценки и прогноза предельного состояния горного массива над выработанным пространством закрываемых угольных шахт, которая учитывает изменение физико-механических свойств горных пород, присутствие флюидов, глубину залегания и трещиностойкость. Предложенный критерий может стать основой для разработки способов оценки и прогноза устойчивости горного массива при консервации угольных шахт.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ревва В. Н. Влияние температуры на предельное состояние породного массива в окрестности горной выработки / В.Н. Ревва // Физика и техника высоких давлений. Донецк ДонФТИ НАН Украины.- 1997. том 7 № 2. – С.133 - 136.

2. Ревва В.Н. Оценка устойчивости кровли в окрестности горных выработок / В.Н. Ревва, // Физика и техника высоких давлений. Донецк ДонФТИ НАН Украины.- 1997. том 7 № 4. – С.114 - 116.
3. Алексеев А. Д. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений / А. Д. Алексеев, В. Н. Ревва, Н. А. Рязанцев - К: Наукова думка, 1989. - 168 с.
4. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов - Москва: Наука. 1974. - 640 с.
5. Методические указания по определению эффективной поверхностной энергии горных пород [Текст] Донецк: ИФГП НАНУ, 2009. - 23 с.
6. Черепанов Г.П. О развитии трещин в сжатых телах. Практическая математика и механика / Г.П. Черепанов - Москва: Металлургия. 1966. Том 30. - С. 82 - 93.
7. Хеккель К. Техническое применение механики разрушения/ К. Хеккель Москва. Металлургия, 1974. - 64 с.
8. Лихтман В. И. Физико-химическая механика металлов / В. И. Лихтман, Е.Д. Щукин, П.А. Ребиндер - М: Издание АН СССР. – 1962. – 303 с.
9. Ревва В. Н. Влияние глубины залегания угольных пластов на механические свойства угля / В.Н. Ревва, А.В. Молодецкий // Физико-технические проблемы горного производства. Донецк. – 2009.- № 12. - С. 55 - 58.
10. Ревва В.Н. Разрушение водонасыщенного угля при различных видах деформационного состояния / В.Н. Ревва, А.Н. Молодецкий, Д.С. Кодберг // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины – Днепропетровск, 2010. - № 89. – С.152 - 156.
11. Разрушение водонасыщенного угля при различных видах напряженного состояния / В.Н. Ревва, А. В. Молодецкий, В.В. Завражин, Н.И. Василенко // Физико-технические проблемы горного производства. – Донецк. – 2010. - № 13. – С. 117 – 121.
12. Деформирование и разрушение газонасыщенного угля при разных видах напряженного состояния / В.Н. Ревва, В.В. Завражин, А. В. Молодецкий, Д.С. Кодберг // Вести Донецкого горного института. – Донецк. – 2011. - № 1. – С. 66 - 70.

**УДК 622.817.47.002.5:621.643.2:533.1**

Мл. научн. сотр. Л.А. Новиков  
(ИГТМ НАН Украины)

### **ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СРЕДЫ В ВАКУУМНОМ ДЕГАЗАЦИОННОМ ТРУБОПРОВОДЕ**

Розглянуті особливості зміни динамічної та кінематичної в'язкості аеродисперсної системи на ділянках дегазаційного трубопроводу у залежності від от масової концентрації твердої фази

### **PHYSICAL PROPERTIES OF MEDIUM IN THE VACUUM DEGASSING PIPELINE**

Specific change of dynamic and kinematic viscosity of air-dispersed system in areas of degassing pipeline depending on mass concentration of the solid phase is described.

При разработке угольных месторождений на больших глубинах в сложных горно-геологических условиях актуальным вопросом является совершенствование технологий и технических средств дегазации, а также проведение необходимых дегазационных мероприятий для обеспечения безопасных условий труда.

Эффективность функционирования шахтной дегазационной системы зависит от сложности газопроводной сети, мощности вакуум-насосов, числа подсоединенных к трубопроводу дегазационных скважин, величины расхода газа и влаги из дегазационных скважин, а также технического состояния трубопровода. В процессе развития горных работ увеличивается число последовательных соединений участковых трубопроводов и возрастает их суммарное гидравлическое сопротивление. По этой причине прокладывают дополнительные параллельные