

1. При удалении полевого штрека от пласта по нормали от 5 до 20 м и угле наклона гезенка от 45 до 65°, ширина ленточного целика изменяется от 6 до 25 м.

2. Характер формирования зон ПГД от ленточных целиков, оставленных над вентиляционным горизонтом независимо от порядка отработки пластов в свитах, повышает вероятность возникновения ГДЯ на соседних сближенных выбросоопасных пластах. Рассмотрение данного вопроса особенно актуально при нисходящем порядке отработки пластов.

3. Эксплуатационные потери угля от оставления ленточных целиков угля в зависимости от мощности пласта составляют 3,9 - 46,8 на 1 м подвигания очистного забоя (в стоимостном выражении – 123,7 - 1484 грн./ м).

4. Для безопасного ведения горных работ и снижения эксплуатационных потерь угля наиболее рационально применять технологию отработки пластов без оставления ленточных целиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам. - М.: Институт горного дела им. А.А. Скочинского (ИГД им. А.А. Скочинского), 1989. – 191 с.

2 Типовые технологические схемы подготовки, отработки и изоляции шахтных полей и выемочных участков на крутопадающих пластах угля, склонных к самовозгоранию. - ДонУГИ, ВНИИГД, Донецк, 1986 г., 81 с.

3 Костыря В.Я. Разработка и внедрение способа локальной разгрузки крутых выбросоопасных угольных пластов полевыми выработками на шахтах Центрального района Донбасса. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Днепропетровск, 1993 г.

УДК 622.33:622.307.4:622.815

Д-р техн. наук **Л.М. Васильев**, канд. техн. наук **О.А. Усов**,
канд. техн. наук **Н.Я. Трохимец** (ИГТМ НАНУ),
инж. **П.Ю. Моисеенко** (ОАО «Краснодонуголь»)

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГИДРОРАЗРЫВА И ГИДРОРЫХЛЕНИЯ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ИМПУЛЬСНОМ НАГНЕТАНИИ В НЕГО ЖИДКОСТИ

В статті розглянуті моделі механізму гідророзриву та гідророзпушування вугільного пласта, які дозволяють з достатньою ймовірністю прогнозувати результати його гідрообробки.

THE MATHEMATICAL MODELS OF THE HYDROCUTTING AND THE HYDROLOOSING OF A COAL LAGER AT STATICALLY AND PULSE WATER PUMPING INTO ONE

In this article the models of process of the hydrocutting and the hydroloosing of a coal lager are observed that let you will predict the results of one hydraulic treat with sufficient probability.

Технологический процесс предварительной обработки угольного пласта путем нагнетания в него жидкости (воды) получил распространение как комплексное мероприятие по дегазации, уменьшению пылеобразования и опасности проявления выбросов угля, газа и горной породы в выработанное пространство.

В настоящее время на Украине процесс нагнетания воды в угольный пласт через скважины осуществляется насосными установками УНР, УГН, УНЩ, выпускаемыми заводами Украины. Эти установки обеспечивают статический режим нагнетания жидкости в угольный пласт, при котором возможен его гидроразрыв.

ИГТМ НАН Украины разработал генератор импульсов давления жидкости, основанный на явлении периодически срывной кавитации в трубке Вентури. Генератор размещается в герметизаторе в месте выхода с него жидкости.

Нагнетание жидкости в угольный пласт с применением генератора импульсов давления происходит в импульсном режиме, при котором гидроразрыв пласта отсутствует, а осуществляется его гидрорыхление, сопровождаемое выделением газа метана из призабойной зоны массива в выработанное пространство.

В данной работе рассмотрены математические модели гидроразрыва пласта при статическом режиме нагнетания воды в угольный пласт и его гидрорыхления при импульсном режиме нагнетания.

1. Математическая модель гидроразрыва пласта при статическом нагнетании жидкости

Разрушение горных пород любыми способами протекает в форме образования и развития трещин – областей разрыва сплошности, у которых один из размеров (раскрытие) намного меньше двух других (простираения).

Дефекты сплошности такой формы приводят к тому, что напряжения на контуре простираения трещины намного больше, чем в сплошном теле – явление концентрации напряжений. Концентрация напряжений на контуре обеспечивает возможность развития трещин: открытых – за счет растяжения, закрытых – за счет сдвига.

Сдвиговые трещины характеризуются невысокой газопроницаемостью и не эффективны в качестве дренажа газа для удаленных от скважины участков пласта. Поэтому, в рамках статьи рассматриваются трещины разрыва, берега которых не контактируют друг с другом.

Форма и ориентация в пространстве трещин гидроразрыва определяются довольно просто – отсутствие взаимного контакта берегов означает равенство касательных нагрузок в плоскости трещин – они ориентируются вдоль плоскостей главных напряжений.

В углях трещины практически не сопротивляются растяжению, их прочность на разрыв весьма мала порядка 0,1-1,0 МПа – в 30 раз меньше прочности на сжатие и горного давления. Поэтому, с высокой точностью можно считать, что главная отличительная особенность – концентрация напряжений в вершине трещины не оказывает влияния на давление, при котором начинается ее рост.

Таким образом, развитие трещины гидроразрыва происходит при давлении нагнетания, равном минимальной компоненте вектора главных напряжений. Форма и ориентация трещины гидроразрыва совпадает с поверхностью действия минимальной компоненты вектора главных напряжений.

Для завершения модели необходимо оценить раскрытие трещины гидроразрыва.

Для этого рассмотрим произвольное сечение пласта, перпендикулярное боковой поверхности трещины (рис. 1). В этом сечении действуют минимальная σ_3 и максимальная σ_1 компоненты вектора главных напряжений, давление воды в трещине P и силы сопротивления сдвигу T пачки угля (или всего пласта), вскрытой трещиной гидроразрыва мощностью h . L — длина зоны контактного скольжения пачки.

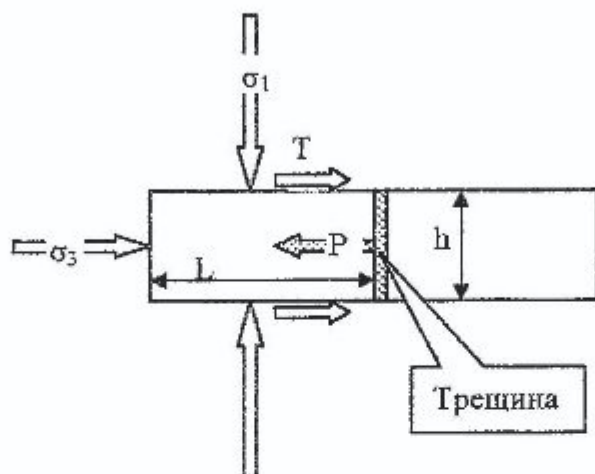


Рис. 1 — Схема нагрузок пласта с трещиной

Уравнение равновесия в этом случае имеет вид:

$$(P - \sigma_3) h = 2 T L. \quad (1)$$

Оно с высокой точностью описывает состояние среднего вдоль протяженности участка трещины, свободного от влияния неоднородности напряжений возле скважины и их концентрации у вершины. Если этот участок достаточно длинный, порядка $10h$, то влиянием сил сопротивления сдвигу в плоскости действия промежуточной компоненты σ_2 можно пренебречь.

Для решения (1) необходимо определить величину сил сопротивления сдвигу T . В данном случае их возникновение связано с трением на контакте и можно было бы записать $T = k \sigma_1$, если бы не действующее по контракту давление нагнетаемой жидкости, а при отсутствии ее проникновения — давление пластового газа, связанные с наличием в угле систем практически ортогональных эндогенных и экзогенных естественных трещин (кливажа), совпадающих с плоскостями действия главных напряжений и разбивающими пласт на совокупность полусвязных отдельныхностей.

На рис. 2 показан фрагмент массива — полусвязная отдельность, образованная взаимно-ортогональными трещинами.

Каждая грань отдельности взаимодействует с остальным массивом частично через цельный материал, а частично через кливаж, воспринимающий нормальную нагрузку полностью, а касательную — пропорционально коэффициенту трения.

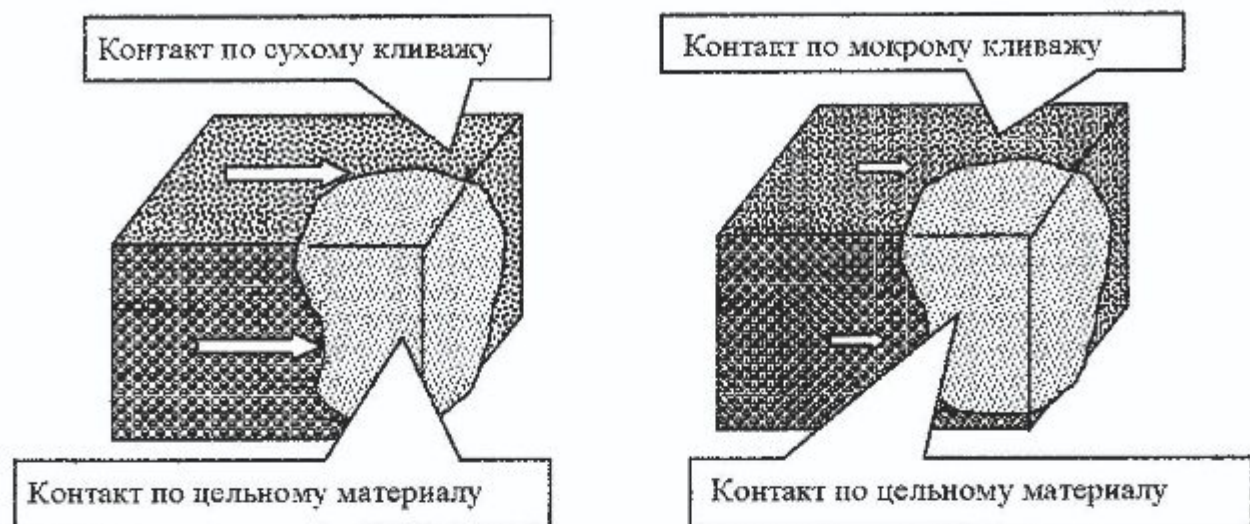


Рис. 2 – Изменение силы трения на контактах трещин в угольном массиве при нагнетании воды

Силы трения на контакте по кливажу T (на рис. 2 они обозначены стрелками) оцениваются соотношением

$$T = k \{ \sigma_l - p^* [1 - S_c(\sigma_l, p^*)] \}, \quad (2)$$

где: k – коэффициент трения по берегам кливажной трещины; p^* – внутреннее давление в контакте по кливажу; S – общая площадь контакта по кливажу; $S_c(\sigma_l, p^*)$ – удельная площадь контакта между берегами кливажной трещины по твердому скелету.

Последняя функция $S_c(\sigma_l, p^*)$ отражает те экспериментально подтвержденные факты, что естественные трещины сохраняют какую-то проницаемость для жидкости (газа) даже будучи сжаты горным давлением, т.е. их берега контактируют между собой не по всей площади S , а по некоторой ее части $S_c(\sigma_l, p)$, причем с ростом внутреннего давления газа или жидкости относительная площадь контакта уменьшается, о чем свидетельствует рост проницаемости трещины. В пределе, когда давление жидкости сравняется с горным, контакт между берегами исчезнет:

$$S_c(\sigma_l, \sigma_l) = 0.$$

Подставляя (2) в (1) найдем

$$L = \frac{2(P - \sigma_3)h}{k \{ \sigma_l - p^* [1 - S_c(\sigma_l, p^*)] \}}. \quad (3)$$

Среднюю деформацию участка длиной L можно приближенно определить по среднему напряжению $(P + \sigma_3)/2$, а смещение границы трещины – по закону Гука: $u_3 = (P + \sigma_3) L / 2E_3$. Учитывая, что полное раскрытие трещины $\delta_3^1 = 2u_3$, получим

$$\sigma_3^+ = \frac{2(p^2 - \sigma_3^2)h}{E_3 k \{ \sigma_1 - p^* [1 - S_c(\sigma_1, p^*)] \}} \quad (4)$$

Полученная формула дает оценку раскрытия трещины, находящейся под давлением. Применяя тот же подход, можно оценить уменьшение этого раскрытия после окончания гидрообработки и снижения давления в массиве до значения пластового газового p_i :

$$\delta_3 = \frac{2(\delta_3^2 - p_i^2)p}{E_3 k \{ \sigma_1 - p_i [1 - S_c(\sigma_1, p_i)] \}} \quad (5)$$

Остаточное раскрытие трещины гидроразрыва определится разностью

$$\delta_3 = \delta_3^+ - \delta_3^- \quad (6)$$

Соотношения (1) – (6) устанавливают возможность создания раскрытой трещины в диапазоне давлений нагнетания $\sigma_3 < p < \sigma_1$.

Компоненты σ_1 , σ_3 могут определяться по экспериментальным данным для пласта, на котором проводится гидроразрыв, или принятой теоретической оценкой по коэффициенту Пуассона:

$$\sigma_3 = \frac{\mu \sigma_1}{1 - \mu} = \frac{\mu \gamma H}{1 - \mu}.$$

Удельная площадь контакта по кливажу $S_c(\sigma_1, p^*)$ определяется экспериментально, или оценивается по прочности угля на одноосное сжатие

$$S_c(\sigma_1, p^*) = \frac{(\sigma_1 - p^*)}{(\sigma_{сж} - p^*)} \quad (7)$$

При определении раскрытия трещины гидроразрыва вблизи скважины компоненты вектора главных напряжений определяются суперпозицией с компонентами горного давления.

2. Математическая модель формирования трещин при импульсном режиме действия жидкости

Источники динамического воздействия на угольные пласты по способу подвода энергии можно разделить на «сухие» и «мокрые».

К первым относятся воздействия, генерируемые с помощью в скелете пласта при его контакте с твердым телом – источником колебаний – акустическим устройством, механическим вибратором, или импульсами давления от не

фильтрующей жидкости. В процессе динамического воздействия форма и положение источника колебаний не изменяются. За счет эффектов усталости изменяются прочностные характеристики скелета – прочность на сжатие, растяжение и эффективная поверхностная энергия.

Затухание динамических напряжений при их передаче по твердому скелету прямо пропорционально скорости распространения упругих волн C и обратно пропорционально частоте импульсов ω . Радиус 90% снижения амплитуды [1]

$$R_{90} \approx C/2\omega.$$

С расстоянием от источника динамические напряжения снижаются по обратной экспоненте [2].

В целом, с учетом этих факторов, радиус эффективного влияния источника может приниматься для угля в пределах 1 - 2 м.

Анализ этих способов импульсного воздействия, наиболее разработанных теоретически, не входит в задачу исследований, однако целый ряд характерных для них эффектов переносится и в рассматриваемую математическую модель. К ним относятся:

- использование динамических коэффициентов интенсивности для оценки концентрации напряжений в вершине трещины;
- использование условия постоянства энергии разрушения в качестве критерия старта, остановки и распространения трещины;
- эффект остановки стартовавшей трещины после трехкратного увеличения ее длины.

Мы моделируем процессы, в которых источником колебаний является жидкость, способная заполнять трещины и проникать в поры пласта.

При передаче колебаний жидкостью, заполняющей шпур, к напряжениям, передаваемым от стенок шпура по скелету пласта, добавляются напряжения от колебаний жидкости, заполняющей трещины. Это позволяет преодолеть ограничение по радиусу эффективного влияния шпура (скважины), характерное для механических источников возбуждения колебаний. Однако, для передачи амплитуды трещина должна иметь достаточное раскрытие, снижающее потери давления по ее длине. С увеличением же раскрытия трещины увеличивается объем находящейся в ней жидкости, что приводит к снижению амплитуды импульса.

Основной задачей разработки математической модели является определение изменения амплитуды и частоты импульсов по длине трещины. Для этого необходимо знать не только сжимаемость воды, но и вибросмещения берегов трещины.

Для анализа разделим импульсные нагрузки на высокочастотные и низкочастотные. Под первыми будем понимать нагрузки, для которых минимальной значение давления в импульсе соответствует минимальной компоненте вектора главных напряжений

$$\sigma_{min} \geq \sigma_3.$$

К низконапорным импульсным нагрузкам отнесем нагрузки с максимальным значением давления в импульсе, меньшим минимальной компоненты вектора главных напряжений

$$\sigma_{max} < \sigma_3.$$

Это позволяет не учитывать деформации стенок трещины, которая при низконапорных нагрузках остается в закрытом состоянии.

Для высоконапорных нагрузок вибросмещения определяются рассмотрением той же расчетной схемы, представленной на рис. 1.

Уравнение движения элемента массива на контакте с трещиной имеет вид

$$[P(t) - \sigma_3] \cdot H = \frac{2TL(t) + 0,5\rho HL(t)d^2 L(t)}{dt} \quad (8)$$

где ρ – плотность угля, остальные обозначения те же, что и на рис. 1. Сопротивление сдвигу T определяется формулами (1) и (3).

Мгновенные значения раскрытия трещины δ_3 определяются соотношением

$$\delta_3(t) = \frac{[H(t) + \sigma_3]L(t)}{E_3} \quad (9)$$

Соотношение (8) должно быть дополнено уравнением материального баланса жидкости в трещине (рис. 3).

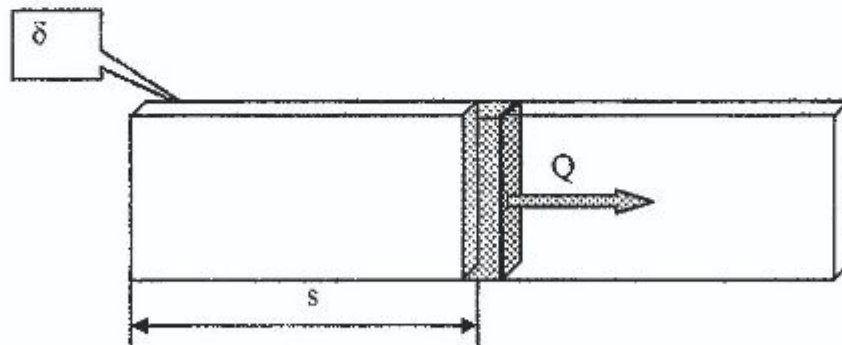


Рис. 3 – Движение жидкости вдоль трещины

Обозначая мгновенное значение объемной скорости колебаний жидкости в трещине $Q(s, t)$, модуль объемного сжатия жидкости $\beta_{жс}$, получим для высоконапорной импульсной нагрузки

$$\frac{dQ(s, t)}{ds} = \left[\frac{h\delta_3(t)}{\beta_{жс}} \right] \cdot \frac{dP(t)}{dt} + \frac{hd\delta_3(t)}{dt} \quad (10)$$

для низконапорной импульсной нагрузки

$$\frac{dQ(s,t)}{ds} = \left[\frac{h\delta_3(t)}{\beta_{жс}} \right] \cdot \frac{dP(t)}{dt} \quad (11)$$

Система уравнений (8)–(11) позволяет найти связь между объемной скоростью колебаний жидкости и давлением на любом расстоянии от устья трещины, куда подаются исходные импульсы с заданной характеристикой $Q = f(P)$.

Важность этого распределения характеристик импульса хорошо иллюстрируется следующим примером.

Представим, что гармонические низконапорные колебания в устье трещины возбуждаются поршнем насоса с частотой 50 Гц (3000 об/мин). Время прямого хода поршня при такте сжатия воды в устье скважины – 1/100 с. Поскольку волна возмущения распространяется со скоростью звука ~ 1300 м/с, она от начала до конца такта сжатия успеет пройти только 13 м. Естественно, что в трещине такой или большей длины параметры импульса как по амплитуде, так и по частоте будут совершенно иными, чем в генераторе.

Разработанная модель распространения импульсов давления по длине протяженной трещины позволяет с достаточной достоверностью спрогнозировать результаты импульсной гидрообработки пласта.

Вывод: наиболее подходящей структурной моделью пласта для процессов трещинообразования при нагнетании воды является его представление в виде совокупности полусвязных отдельностей.

Развитие трещин при статическом нагнетании определяется следующими факторами:

- величиной и распределением компонент горного давления;
- отношением длины к диаметру нагнетательной камеры скважины – они определяют первоначальную ориентацию трещины;
- изменением коэффициентов внутреннего и внешнего (по контактам естественной трещиноватости) трения, вызванным проникновением воды в трещины;
- темпом нагнетания.

Математическая модель гидроразрыва пласта при статическом нагнетании представлена зависимостями (2) – (7). Ее основная особенность – возможность оценки раскрытия трещины, как в процессе, так и после окончания гидроразрыва.

Развитие трещин при импульсном нагнетании определяется, в основном такими факторами как:

- изменение прочностных характеристик и коэффициентов внутреннего и внешнего трения в угле в результате передачи колебаний по твердому скелету и воде;
- амплитудой, размахом и частотой колебаний возбуждаемых в жидкости и твердом скелете;

- давлением газа в пласте;
- изменением амплитуды и частоты колебаний твердого скелета и жидкости в угольном массиве по мере удаления от источника колебаний;
- величиной и распределением компонент горного давления.

Математическая модель формирования трещин при импульсном нагнетании представлена зависимостями (10) и (11). Ее основная особенность – возможность оценки связи между объемной скоростью колебаний жидкости и давлением на любом расстоянии от источника – устья трещины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полищук А.В. Определение радиуса гидродинамического воздействия через скважину. Механика и разрушение горных пород / ИГТМ НАНУ – Киев.: Наукова думка 1993. – С. 66 – 68.
2. Калфакчиан А.П., Воробьев Е.А., Андреев С.Ю. и др. Вскрытие крутых выбросоопасных угольных пластов / ИГТМ НАНУ – Дн-ск, Січ, 1992. – 150 с.

УДК 622.381.325:532.5.013

Канд. техн. наук **Б.В. Бокий,**

инж. **В.В. Чередников** (АП «Шахта им. А.Ф. Засядько»),

инж. **Е.Г. Барадуллин,** асп. **В.Г. Золотин** (ИГТМ НАНУ)

УСЛОВИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ УГЛЯ И ГАЗА

У статті приведено обґрунтування умов застосування гідродинамічного впливу на напружений газонасичений вугільний масив для підвищення темпів проведення підготовчих виробок і навантаження на лаву.

THE CONDITIONS OF THE USE HYDRODINAMIC INFLUENCES FOR PREVENTION SUDDEN SURGE COAL AND GAS

Motivation of the conditions of the using hydrodynamic influences upon tense gas-saturated coal array for increasing rate conduct of the mountain work is brought in article.

Увеличение глубины разработки угольных пластов влечет за собой повышение выделения метана и интенсификацию возможности развязывания выбросов угля и газа. Тенденция к усложнению горно-геологических условий разработки угольных месторождений имеет постоянный характер. Вследствие этого самая совершенная добычная и проходческая техника не может компенсировать влияние постоянно ухудшающихся горно-геологических условий на технико-экономические показатели работы шахт.

За последние десять лет произошли существенные изменения в оснащении подготовительных работ более совершенной и производительной техникой, однако воспроизводство объема линии очистных работ сдерживается из-за непроизводительной работы проходческой техники, что обусловлено большими затратами времени на выполнение профилактических работ, связанных с выполнением противовыбросных мероприятий.

Добыча угля на пластах, склонных к внезапным выбросам угля и газа, в настоящее время составляет более 30% от всей добычи в отрасли. Более 80% объема подготовительных выработок проводится с применением локальных