

Гц для балки с теми же параметрами, что и в нашем расчете.

Разработанная программа расчета частот колебаний балки дает возможность оценить дополнительные пригрузки на угольный пласт со сторо-

ны вышележащих пород при различных длинах зависящей консоли в момент ее облома, а так же выбрать рекомендации по подбору крепи с целью повышения ее несущей способности с учетом возникающих при этом перегрузок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Работнов Ю.Н. Сопротивление материалов – М.: Физматгиз, 1962.
2. Штумпф Г.Г., Рыжков Ю.А., Шаламанов В.А., Петров А.И. Физико-технические свойства горных пород и углей кузнецкого бассейна. – М.: Недра, 1994.
3. Вольмир А.С., Григорьев Ю.П., Станкевич А.И. Сопротивление материалов – М: Дрофа, 2007.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10-ти т. Т. VII. Теория упругости: Учебное пособие. – М: Наука, 1987.
5. Дырдин В.В. Влияние сдвигений прочных пород кровли в выработанном пространстве на геомеханическое состояние угольного пласта // Дырдин В.В., Шиканов А.И., Кроль Г.В., Алексеев Д.В., Тациченко В.П.// – Известия вузов. Горный журнал. 1990 г. – С.23-25.
6. Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль . – Томск МП: Раско, 1992.

□ Авторы статьи:

Фофанов  
Андрей Алексеевич,  
ассистент каф. физики КузГТУ.  
E-mail: [thunder55@mail.ru](mailto:thunder55@mail.ru)

Дырдин  
Валерий Васильевич,  
докт. техн. наук, профессор,  
зав. каф. физики КузГТУ.  
Тел. (384-2) 58-30-80

УДК 622:51.001.57

**В. В. Дырдин, Т. Л. Ким, С. А. Шепелева**

## ВЛИЯНИЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПЕРЕДИ ЗАБОЯ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ

Впереди забоя подготовительных выработок, проводимым по угольным пластам, склонным или опасным по внезапным выбросам угля и газа, коэффициент концентрации напряжений в зоне опорного давления, как следует из экспериментальных результатов, не достигает значений, превышающих 1 [1]. Это объясняется принципиально другим характером нагружения краевой части по сравнению с очистной выработкой, где коэффициент концентрации напряжений в статике в точке максимума опорного давления может составлять 1,2 – 1,6 и выше. А при динамических обрушениях его величина много больше 1 [1]. Вместе с тем в ряде случаев подготовительная выработка может попадать в зону повышенного горного давления (ЗПГД). Коэффициент концентрации напряжений в локальных точках также может быть много больше 1. Это может быть также связано с влиянием взрывных работ или под влиянием опорного давления соседних выемочных участков.

В угольных пластах в зависимости от термодинамических условий природный газ может находиться в различных состояниях: свободном, сорбированном и твердом по типу газовых гидратов. Твердые растворы могут существовать при

определенных температурах и давлениях. Фазовый переход газа из твердой фазы в свободную возможен при условии, что фазовые параметры больше или меньше равновесных. Пусть в начальный момент времени газовое давление в угольном пласте 2,0 МПа (например, пласт «Владимировский» ш. «Северная»).

При резком возрастании напряжений в тонком слое угля  $\Delta X$  впереди забоя подготовительной выработки под действием нормальных и тангенциальных напряжений, направленных в сторону выработки, образуются трещины в плоскости, ортогональной оси выработки, то есть параллельно поверхности забоя. Согласно представлениям проф. Мурашева В.И. это возможно, когда подготовительная выработка резко внедряется из зоны крепких углей в зону нарушенных углей.

Повышенные механические напряжения сопровождаются уменьшением объема порового пространства и, как следствие, повышением газового давления (рис. 1, участок  $ab$ ). Вследствие интенсивного трещинообразования в плоскости, ортогональной оси выработки, происходит раскрытие трещин и снижение давления газа в данной зоне (рис. 1, участок  $bc$ ).

При падении газового давления до значений ниже давления равновесного состояния системы «уголь – поровая влага – гидраты природного газа» начинаются два процесса: десорбция газа с поверхности макропор и трещин, а также диссоциация газовых гидратов [2]. Диссоциация газовых гидратов приводит к повышению в 2,0 – 3,0 раза давления в краевой зоне угольного пласта. Если коэффициент выбросоопасности положительный, то в сторону угольного массива начнет распространяться волна дробления, которую можно рассчитать по модели акад. С. А. Христиановича [3]. Значение скорости волны дробления для выбранных условий может составить 10,34 м/с. Волна за время выброса пройдет расстояние вглубь массива 5,17 м. За это время может выделяться 5,7 м<sup>3</sup> газа с каждых 0,1 м. Таким образом, за время протекания внезапного выброса может выделяться 294,49 м<sup>3</sup> газа.

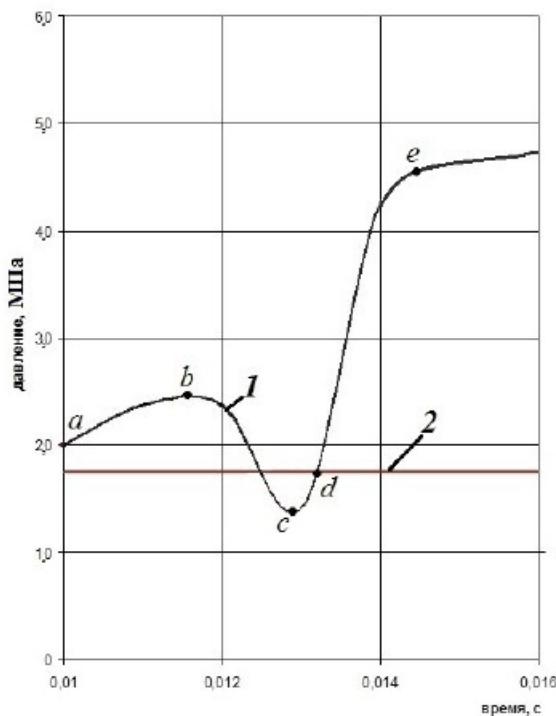


Рис. 1. Изменение давления со временем при исходной влажности угольного пласта 1 – 2%; 2 – давление равновесного состояния системы «уголь – поровая влага – газовые гидраты»

Если выбросоопасная ситуация не сформировалась, то начнется интенсивная фильтрация газа в сторону забоя выработки и ее дальнейшее загазование.

При исследовании фильтрации газа основное значение имеет тот факт, что сжимаемость газа обычно на несколько порядков превышает сжимаемость пористой среды. С учетом этого запишем уравнение неразрывности:

$$m \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vec{u} = 0, \quad (1)$$

где  $m$  – коэффициент пористости среды,  $\rho$  – плот-

ность газа,  $\vec{u}$  – скорость фильтрации газа.

В первом приближении будем считать, что фильтрация ламинарная. В этом случае скорость фильтрации газа сквозь пористую среду определяется законом Дарси:

$$\vec{u} = -\frac{k}{\mu} \operatorname{grad} P, \quad (2)$$

где  $k$  – проницаемость пористой среды;  $\mu$  – динамическая вязкость газа.

Исключая скорость фильтрации имеем:

$$m \frac{\partial \rho}{\partial t} = k \operatorname{div} \left( \frac{\rho}{\mu} \operatorname{grad} P \right). \quad (3)$$

Введем функции Лейбензона:

$$P(p) = k \int_0^p \frac{\rho(p) dp}{\mu(p)}, \quad \chi(p) = m \left( \frac{dp}{dp} \right)^{-1}. \quad (4)$$

(4)

Уравнение (3) принимает вид:

$$\frac{dP}{dt} = \chi(p) \Delta p, \text{ где } \Delta p = \nabla^2 p \quad (5)$$

В первом приближении газ можно считать термодинамически идеальным, а коэффициенты  $k$  и  $\mu$  постоянными при движении газа к забою выработки и что плотность газа зависит только от давления (баротропное приближение), получаем замкнутую систему уравнений.

$$\mu = \operatorname{const}; \quad \rho = \frac{(p_0 p)}{p_0}. \quad (6)$$

При этом функции Лейбензона примут следующий вид:

$$P(p) = \frac{k \rho_0 p^2}{2 \mu p_0}, \quad \chi = \frac{k p}{m \mu}. \quad (7)$$

Уравнение (5) преобразуется к виду, называемому уравнением Буссинеска [4]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{2 m \mu} \nabla^2 P^2. \quad (9)$$

Движение метана в пласте угля в сторону забоя, то есть для одномерного изотермического течения описывается уравнением:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{2 m \mu} \cdot \frac{\partial^2 P^2}{\partial x^2}, \quad (10)$$

где  $P$  – давление;  $\mu$  – динамическая вязкость газа.

Найдем закон изменения давления газа в области, находящейся за слоем угля  $\Delta X$ , то есть ближе к зоне «нетронутого» массива, после начала процесса диссоциации. Примем следующие начальные и граничные условия:

$P(x, 0) = P_0 = P_{atm}$ , при  $x \leq 0$  – начальное давление в выработке [5];

$P_1(x, t)|_{x=\zeta} = P_2(x, t)|_{x=\zeta} = P_p$ , где  $\zeta$  – граница разложения газовых гидратов в слое  $\Delta X$ ;

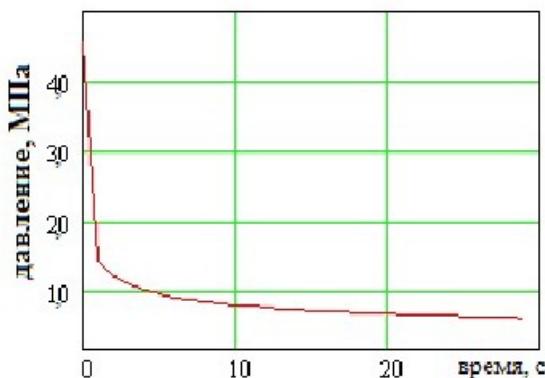


Рис.2. Изменение распределения давления газа в зоне, лежащей за слоем  $\Delta X$ , то есть ближе к границе зоны влияния выработки, после начала диссоциации газовых гидратов

$P_3(x,0) = P(x,t) = P_\Gamma$ , при  $x \geq a$ , где  $a$  - протяженность зоны влияния выработки.

Задача в такой постановке автомодельна, решение ее известно [6], а закон распределения давления запишется в виде:

$$P = \sqrt{P_\Gamma^2 + (P_p^2 - P_\Gamma^2) \frac{x}{a\sqrt{t}}}, \quad (11)$$

где  $P_\Gamma$  – постоянное газовое давление;  $P_p$  – давление разложения гидрата при пластовой температуре (рис. 2).

В результате расчетов при  $T = 278$  К получаем распределение газового давления после начала процесса диссоциации твердых растворов природных газов по типу газовых гидратов (рис. 3). Расчет произведен при следующих значениях:  $P_p = 1,7 \cdot 10^6$  Па;  $P_\Gamma = 46 \cdot 10^6$  Па;  $\kappa = 0,01$  дарси;  $P_0 = 10^6$

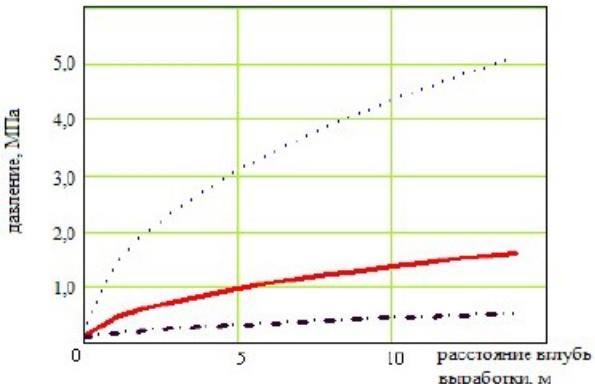


Рис.3. Распределение давления газа после начала диссоциации газовых гидратов при различном коэффициенте проницаемости пористой среды (сплошная линия –  $\kappa = 0,01$  дарси; точки –  $\kappa = 0,001$  дарси, пунктир –  $\kappa = 0,1$  дарси)

$$\text{Па; } m = 0,10; \quad a = \frac{k \cdot p_0}{m \cdot \mu_\Gamma}; \quad \mu_\Gamma = 0,00001 \text{ Па}\cdot\text{с.}$$

При высоком коэффициенте проницаемости будет происходить загазование выработки. При малой проницаемости пористой среды вблизи забоя создаются высокие газовые давления, что может повлечь за собой формирование выбросоопасной ситуации.

Таким образом, проведенные исследования позволили оценить состояние призабойной зоны массива вследствие газодинамических процессов, и разработать определенные меры по созданию безопасных условий при разгазировании выработки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вылехагин В. Н. Структурные модели горного массива в механизме геомеханических процессов / В. Н. Вылехагин, П. В. Егоров, В. И. Мурашев // АН СССР, Сиб. отд-ие, Ин-т угля. – Новосибирск: Наука, 1990, 291 с.
2. Дырдин В. В. Влияние газогидратов на формирование выбросоопасных ситуаций в угольных пластах / В. В. Дырдин, С. А. Шепелева // Известия высших учебных заведений. Горный журнал – № 6. – 2010. – С. 95 – 98.
3. Христианович С. А. О волне дробления // Известия АН СССР, ОТН. – №12. --1953. -- С. 1689 – 1699.
4. Барренблатт Г. И. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа / Г. И. Барренблатт, В. М. Ентов, В. М. Рыжик - М.: Недра, 1972, 288 с.
5. Ким Т. Л. Математическое моделирование процесса диссоциации кристаллогидрата в краевой зоне угольного пласта / Т. Л. Ким, В. В. Дырдин, В. А. Белков // Вестник КузГТУ - №2. – 2011. – С. 19 – 21.
6. Веригин Н. Н. Линейная задача о разложении гидратов газа в пористой среде / Н. Н. Веригин, И. Л. Хабибуллин, Г. А. Халиков // Известия АН СССР, МЖГ. – 1980. – №1. – С. 174 – 177.

□Авторы статьи:

Дырдин  
Валерий Васильевич,  
докт. техн. наук, проф.,  
зав. каф. физики КузГТУ  
e-mail: vvd1941@mail.ru

Ким  
Татьяна Леонидовна,  
ассистент каф. физики  
КузГТУ  
email:tanyakim@list.ru

Шепелева  
Софья Алексеевна,  
ассистент каф. физики  
КузГТУ  
email:vr\_sonya@mail.ru