

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.831.001

Г. А. Беспятов

УДАРНО-ВОЛНОВАЯ МОДЕЛЬ ВНЕЗАПНОГО ВЫБРОСА УГЛЯ И ГАЗА

Анализ существующих теорий внезапного выброса угля и газа показывает, что выброс представляет собой внезапное освобождение огромных запасов потенциальной энергии горного массива и заключенного в нем газа при потере несущей способности некоторой части горного массива как механической системы. Немаловажное значение в создании неустойчивого равновесия системы имеет влияние забоя выработки, его подвигание, условия деформирования и т.д..

Однако существующие механические теории не могут охватить всего многообразия факторов, обусловливающих выбросы. Более того, все существующие теории выбросов, основывающиеся на механике сложных сред, приводят к принципиальному противоречию с практикой. [10]. В связи с тем, что теория выброса построенная на основе механики гетерогенной насыщенной непрерывной среды, не может ответить на все вопросы, связанные с прогнозом выбросоопасного состояния и управлением динамическими проявлениями горного давления, необходимо исследование других «уровней» выбросоопасного состояния с использованием разработанных физических теорий: термодинамики, статистической физики, теории нелинейной акустики и т.п..

В данной работе изложены теоретические основы влияния волновых процессов на газодинамику угольных пластов, позволяющие совершенствовать методы прогноза и предотвращения внезапных выбросов угля и газа и обеспечить безопасные условия труда.

§ 1. Ультразвуковая кавитация в угольных пластах

Известно, что участки пластов, где происходят внезапные выбросы угля и газа, и особенно места, к которым приурочены эти динамические явления, обязательно слагаются нарушенными типами углей. Особенностью строения таких углей является то, что массив слагается из отдельных мелких зерен угля, между которыми располагается мелко-дисперсная фракция (угольная мука). По классификации это угли III, IV и V типов. [2]

В настоящие времена нет единого мнения об условиях появления большого количества мелко-дисперсных частиц в угольных пластах.

Наиболее удовлетворительное объяснение этого явления может дать теория ультразвуковой

кавитации. Наличие в микротрещинах, на контактах зерен или кристаллов адсорбционных пленок связной воды резко понижает поверхностную энергию угольного массива и тем самым облегчает развитие в угле различных механических микроразрушений, дислокации, микротрещин и т.д., особенно в условиях горного давления. Это одна из форм проявления эффекта Ребиндера.

За счет этого происходит релаксация напряжений в массиве, их ослабление, что выражается микроскопически в виде упругих колебаний и сброса напряжений. Процесс этот носит кинетический характер, поэтому наведенная волновая активность возрастает по мере разрушения массива и проникновении воды во вновь образовавшиеся трещины.

Возникающие в процессе трещинообразования акустические импульсы несут дополнительную энергию и усиливают эффект формирования новых трещин и их интенсивный рост. В зоне интенсивного трещинообразования формируются разночастотные волновые поля, в частности интерференционные волны, которые обладают высокой интенсивностью при относительно небольших амплитудных колебаниях. Затухающие интерференционные волны формируют ультразвуковые поля. [3]

Возможность ультразвуковой кавитации в угольных пластах обусловлена наличием в них воды. В порах угля, содержащих воду, отмечается гетерогенное образование зародышевой кавитации. Рядом исследований [4, 5 и др.] установлено, что в 1 см³ натуральной воды содержится свыше полумиллиона ядер кавитации (микропузырьков и механических включений) размером от нескольких до 200 мкм. В кавитационных пузырьках газовое давление превышает давление в окружающей жидкости, при условии, что такие пузырьки попадают в область пониженного давления в ультразвуковой волне. Анализ решения нелинейного дифференциального уравнения Нолтинга-Непайреса [6] показывает, что размеры кавитационных пузырьков резко возрастают в первый же полупериод разряжения, а затем совершают несколько пульсаций перед захлопыванием. С увеличением амплитуды звуковой волны возрастает максимальный радиус пузырька R_{max} , количество пульсаций, а также время захлопывания. В момент захлопывания пузырька давление и температура

газа достигает значительных величин, что приводит к порождению в окружающей жидкости вторичной ударной волны.

Для нахождения кинематических характеристик захлопывающегося кавитационного пузырька рассмотрим задачу о смыкании стенок сферической полости в несжимаемой жидкости под действием постоянного давления P . [6]

Кинетическая энергия слоя объемом $4\pi r^2 dr$ равна:

$$dW_{kin} = \left(\frac{\rho}{2}\right)v^2(r)4\pi r^2 dr, \quad (1)$$

а полная кинетическая энергия массы смыкающейся жидкости:

$$W_{kin} = 2\pi\rho \int_R^\infty v^2(r)r^2 dr. \quad (2)$$

Учитывая уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости:

$$v(r) = UR^2/r^2, \quad (3)$$

и интегрируя (2), найдем

$$W_{kin} = 2\pi\rho U^2 R^3. \quad (4)$$

Эта кинетическая энергия производит работу, совершающую силой давления P , по уменьшению объема плотности от первоначального значения

$$\frac{4}{3}\pi R_0^3 \text{ до конечного } \frac{4}{3}\pi R^3, \text{ т.е.}$$

$$A = \frac{4}{3}\pi(R_0^3 - R^3). \quad (5)$$

Приравнивая формулы (4) и (5), получаем выражение для нахождения скорости движения стенок захлопывающейся полости:

$$U = \sqrt{\frac{2}{3\rho} \left[\left(\frac{R_0}{r} \right)^3 - 1 \right]}. \quad (6)$$

Из выражения (6) найдем время захлопывания пустой полости с начальным радиусом R_0 [6]:

$$dt = R_0 \sqrt{\frac{\rho}{6P}} \int_0^1 x^{-\frac{1}{6}} (1-x)^{-\frac{1}{2}} dx \approx 0.91 R_0 \sqrt{\frac{\rho}{P}} \quad (7)$$

Расчеты по формуле (7) показывают, что время захлопывания пустой полости изменяется от $5 \cdot 10^{-2}$ до 10^{-2} с.

Кроме того, захлопывание кавитационных пузырьков в реальной жидкости сопровождается сильным всплеском давления, порождающим сферические быстро затухающие ударные волны. Проявлением этого служит так называемый «кавитационный шум». [5]

Рассчитаем теперь температуру парогазовой смеси, развивающуюся при ее адиабатической стадии в захлопывающемся пузырьке.

Для адиабатного процесса

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{R}{R_0}\right)^{3(\gamma-1)}. \quad (8)$$

В момент наибольшего сжатия при $\gamma = 1,31$ имеем:

$$T_{max} = \left(\frac{T_0}{3}\right) \left(\frac{P}{P_r}\right), \quad (9)$$

при $P=P_0=1$ атм и $\frac{P}{P_2}=q=0,02$, при $T_0=300K$ получает $T_{max} \sim 6000K$.

Нарушение теплового равновесия ведет к катастрофическому нарастанию количества тепла и термическому разрушению угля. Процесс разрушения угля можно разделить на два этапа.

На первом этапе за счет ультразвуковой кавитации угольный массив испытывает сложную деформацию, приводящую к разрушению межкристаллических связей и испарению жидкости в кавитационных пузырьках, что является причиной низкой влажности выбросных зон. Перетертые, мягкие угли выбросоопасных пластов, наряду с малой прочностью, отличаются высоким показателем хрупкости, поэтому даже энергии слабых ультразвуковых волн сжатия достаточно для разрушения микрокристаллических связей скелета угля.

На втором этапе начинается постепенное нарастающее проявление механической работы расширяющихся газов за счет появления интерференционных ударных волн. Вызываемое ударной волной смещение среды приводит к ее сжатию в радиальном направлении и растяжению по перпендикулярным направлениям. Растягивающие напряжения обусловливают отрыв частицы угля от берегов трещины. Суть последовательно отделяния частиц связана с разрывным характером газового давления, вызванного кавитацией. При наличии скачка давления стенки трещин испытывают растягивающую силу. При достаточно большой силе происходит полное отделение частиц и образование большого количества мелкодисперсных частиц, характерных при внезапных выбросах.

§ 2. Механизм формирования выбросоопасных зон

В большинстве исследований отмечается, что внезапные выбросы угля и газа происходят в тектонически нарушенных зонах. Особенностью таких зон является повышенное газовое давление и крайне низкая проницаемость. Установлено [1], что в выбросоопасных зонах угольных пластов при изменении нарушенности угля от I типа к IV газопроницаемость уменьшается более чем в 40 раз, и для углей нарушенности V типа составляет в среднем 3,6 Мд.

Рассмотрим механизм формирования в тектонически нарушенных углях низкой газопроницаемости. Исследованиями [7] установлено, что в угольных пластах давление газа зависит от пустотности угля в виде:

$$P = \frac{P_0 T (\mu - a)}{\Pi T}, \quad (10)$$

где $P_0 = 1 \text{ МПа}$; $T_0 = 273^\circ\text{K}$; μ – метаноносность угля, $\text{м}^3/\text{т}$; a – сорбционная способность угля, $\text{м}^3/\text{т}$; Π – пустотность угля, $\text{м}^3/\text{т}$; T – температура газа, K° .

Очевидно, что трещинообразование в горном массиве приводит к повышению пустотности, из уравнения (10) видно, что в этих зонах понижается давление газа. Под действием образовавшегося градиента давления начинается миграция газа из ненарушенного массива в зону тектонических нарушений. Выбросоопасные угольные пласты представляют собой массив нарушенных углей состоящих из отдельных мелких зерен угля между которыми располагается угольная мука.

Под силовым воздействием фильтрационного потока происходят фильтрационные деформации и фильтрационные разрушения в угольном пласте. Фильтрационные деформации меняют структуру скелета угольного массива, но сами частицы угля не теряют связи между собой. При изменении режима фильтрации наступают фильтрационные разрушения, при которых утрачивается связь ме-

жду мелкодисперсными частицами угля и под действием турбулентного фильтрационного потока эти частицы начинают движение через трещиноватопористую среду, т.е. происходит процесс механической супфузии [6]. В процессе супфузии часть частиц оседает в тупиковых порах и трещинах, закупоривает транспортные каналы, размеры которых соизмеримы с размерами частиц угля, движущихся в газовом потоке, т.е. происходит колматаж зоны нарушенного массива. Следовательно, принадлежность опасных участков к крупным тектоническим структурам объясняется условиями миграции газа и мелкодисперсных частиц угля и образованием газодинамических зон с низкой газопроницаемостью и высоким давлением свободного газа, который обладает большим запасом потенциальной энергии.

Для изучения зональности и установления размеров зон газодинамической активности было проанализировано более 10000 замеров показателя выбросоопасности угольных пластов на всех выбросоопасных шахтах. Нанесение показателя выбросоопасности на планы горных работ позволило на 40 выбросоопасных шахтопластах выявить 314 зон газодинамической активности, сделать вывод о их вытянутой форме и установить, что размеры зон в различных районах Кузбасса изменяются от $0,010 \text{ км}^2$ до $0,30 \text{ км}^2$. основываясь на шахтных замерах показателя выбросоопасности,

Таблица 1

Характеристика	Типы зон		
	I	II	III
Размеры зоны, $\text{м} \times \text{м}$	250×75	600×150	1250×250
Площадь зоны, км^2	до $0,015$	$0,015 \div 0,10$	более $0,10$
Количество выбросов в зоне	1-2	3-4	более 5
Общее количество выбросов	23	33	134
Максимальное количество выделившегося газа, тыс. м^3	13-30	6-60	10-50
Максимальное количество выброшенного угля, тыс. т	350	305	450
Количество выявленных зон	149	147	18
Общая площадь зон, км^2	2,2	9,5	3,1
Минимальная глубина зоны, м	300-600	200-300	150-200
Критическая газоопасность, $\text{м}^3/\text{т}$	15-18	13-16	11-13

Таблица 2

Шахта	Пласт	Константы абсорбции		Начальная пористость m_0	Пористость на кромке пласта m_1	Газопроницаемость $K \cdot 10^{20} \text{ м}^2$
		$a, \frac{\text{см}^2}{\text{кгс}}$	$b, \frac{\text{м}}{\text{м}^3} \cdot 10^{-3}$			
«Северная»	Кемеровский	0,312	17,2	0,05	0,26	180,4
«Северная»	Волковский	0,132	17,276	0,05	0,175	1014,39
«Северная»	Владировский	0,3046	16,334	0,05	0,15	2340,9
«Ноградская»	IV внутренний	0,275	15,864	0,05	0,2	650
«Ноградская»	III внутренний	0,286	15,634	0,05	0,2	1500

газодинамические зоны угольных пластов условно можно разделить на три типа. [8]

Первый тип зон характеризуется овальной формой с небольшими размерами 250×75 м и площадью до $0,015 \text{ км}^2$, второй тип имеет вытянутую форму и площадь от $0,015 \text{ км}^2$ до $0,10 \text{ км}^2$, а третий тип имеет линейно вытянутую форму с размерами 1000×100 м и площадью более $0,10 \text{ км}^2$. Типы потенциально выбросоопасных зон угольных пластов и их характеристики приведены в табл. 1.

Рассмотрим изменение фильтрационных параметров тектонически нарушенного угольного массива под влиянием механической супфозии.

Пусть в зоне разгрузки угольного пласта от горного давления общая начальная пористость будет равна m_0 . На момент времени $t > 0$ концентрация твердых частиц в газовом потоке порового пространства будет C_0 . Запишем уравнение баланса вещества в единице объема:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{V_0}{m} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{m_0} \frac{\partial m}{\partial t}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} = (m_0 - m) \frac{V_0}{K_0 m} - mC, \quad (12)$$

$$V_0 = K_0 m \frac{\partial P}{\partial x}. \quad (13)$$

С учетом супфозийных процессов граница зоны роста концентрации дисперсных частиц перемещается с некоторой скоростью V , следовательно, система уравнений (11)-(13) в подвижной системе координат $z = x - vt$ примет вид:

$$\left(\frac{V_0}{m} - V \right) \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{V_0}{m} \frac{\partial m}{\partial z} = 0, \quad (14)$$

$$V \frac{\partial m}{\partial z} + (m_0 - m) \frac{V_0}{K_0 m} - mc = 0, \quad (15)$$

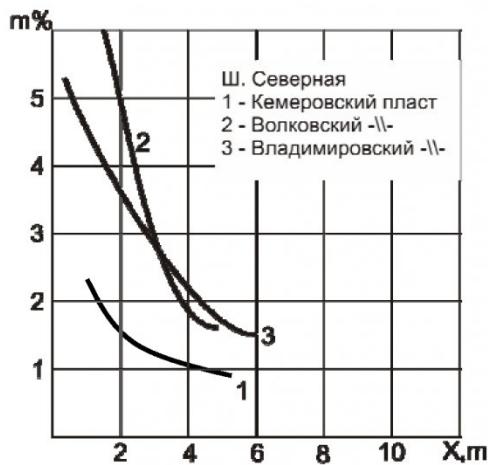


Рис.1. Изменение пористости угольных пластов в зоне влияния механической супфозии

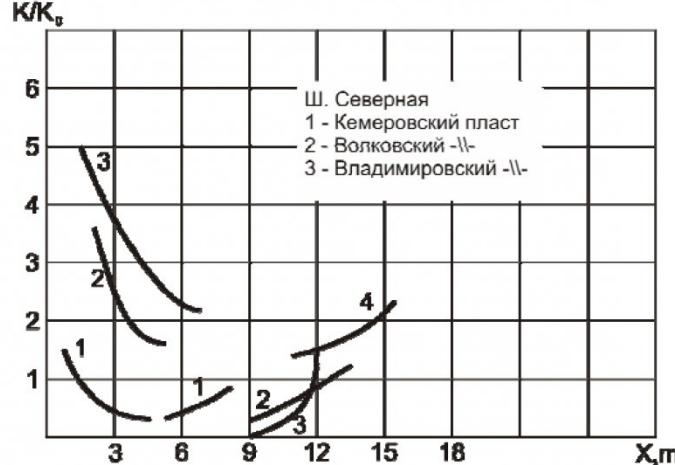


Рис.2. Изменение газопроницаемости угольных пластов в зоне влияния механической супфозии

$$V_0 = K_0 m \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (16)$$

В новой системе координат краевые условия будут:

$$\begin{cases} C(-\infty) = C_0 \\ m(-\infty) = m_1 \end{cases}, \quad (17)$$

$$\begin{cases} C(+\infty) = 0 \\ m(+\infty) = m_0 \end{cases}, \quad (18)$$

где m_1 фильтрующая плоскость.

Решая уравнения (12) найдем:

$$m_1 = 0,5 [\sqrt{\beta(\beta + 4m_0)} - \beta]. \quad (19)$$

Решение уравнения (14) при краевых условиях (18), имеет вид:

$$C(x, t) = (1 + m / m_0) + V_0 / Vm_0 \cdot \ln \left| \frac{V_0 - Vm}{V_0 - Vm_0} \right|. \quad (20)$$

При краевых условиях (17) из решения (20) определим:

$$\frac{V_0}{V} = \frac{m_0(C_0 - 1) - m_1}{\ln \left| \frac{V_0 - Vm}{V_0 - Vm_0} \right|}. \quad (21)$$

Подставляя (21) в (20), найдем зависимость между концентрацией $C(x, t)$ и пористостью $m(x, t)$:

$$C(x, t) = \frac{m_0 - m}{m_0} + \frac{m_0(C_0 - 1) - m_1}{\ln \left| \frac{V_0 - Vm}{V_0 - Vm_0} \right|} \cdot \ln \left| \frac{V_0 - Vm}{V_0 - Vm_0} \right| \quad (22)$$

С учетом кольматации, когда $m(x, t) \approx m_0$ уравнение (22) примет вид:

$$C(x,t) = \frac{m_0 - m(x,t)}{m_0(m_0 - m_1)} \cdot C_0, \quad (23)$$

или

$$m(x,t) = \frac{m_0}{C_0} [C_0 - C(x,t)(m_0 - m_1)]. \quad (24)$$

Анализ выражений (23) и (24) показывает характер снижения пористости в зависимости от концентрации частиц угля в газовом потоке.

Из сравнения характеристик изменения пористости и газопроницаемости установлена пропорциональная зависимость газопроницаемости от пористости в виде:

$$K = ame^{-bP}, \quad (25)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты, значения которых приведены в [9].

Расчеты пористости и газопроницаемости угольных пластов опасных по внезапным выбросам показали, что в выбросной зоне, не тронутой горными работами, газопроницаемость составляет $28 \cdot 10^{-5}$ мД. Для неопасных по выбросам пластов (ненарушенные угли) этот коэффициент равен $177 \cdot 10^{-5}$ мД, т.е. в 6 раз больше, чем в первом случае. В зависимости от типа углей газопроницаемость опасной газодинамической зоны уменьшается от 10 до 40 раз.

§ 3. Развитие внезапного выброса и формирование полости выброса

Выбросы, как и многие природные явления, не происходят мгновенно. Они развиваются во времени и в пространстве, представляя собой единый процесс. Рассматривая развитие выбросов во времени, выделяют четыре стадии этого процесса: подготовительную, инициирования, протекания и затухания.

Если рассматривать явления выброса в пространстве, то можно выделить четыре зоны: 1 – призабойная часть, находящаяся в допредельном состоянии; 2 – область непосредственного примыкающая к обнаженной поверхности, в которой происходят процессы разрушения (формируется полость выброса); 3 – область распространения гетерогенного потока; 4 – сеть горных выработок, по каждым происходит напорное движение газо-воздушной струи выброса.

Рассмотрим механизм разрушения массива угля ударной волной. По характеру и скорости распространения ударных волн механизм разрушения угля можно разделить на два основных процесса: 1 – послойный отрыв – волны дробления; 2 – лавинообразное разрушение массива угля за счет трещинообразования.

Первый процесс протекает сравнительно медленно и не сопровождается каким-либо звуковым эффектом. Он характеризуется относительно быстрым нарастанием газового давления, за счет об-

нажения поверхности угля и способностью выделившихся газов производить работу по перемещению отделившихся частиц.

Отличительной чертой второго процесса, по сравнению с послойным отрывом, является переменная скорость распространения волны разрушения, которая значительно превышает скорость послойного отрыва. Разрушение массива угля происходит за счет микро и макротрещин сдвига и отрыва, прорастания по какой-либо части контура существующей трещины, потери несущей способности какого-либо объемного концентратора напряжений и т.д.

При интенсивностях волн, близких к минимально возможным, число трещин растет, при этом увеличивается длительность акустического импульса. Акустический импульс, образующийся вместе с трещиной, распространяется в среде, взаимодействующей с ней. Импульс несет определенную энергию и способен создавать давление P , прибавка которого к общему статическому напряжению (вызываемому внешними силами) будет усиливать эффект образования новых трещин и их интенсивный рост, что вызывает генерацию следующего акустического импульса, т.е. наступает этап нестабильно трещинообразования. Избыток выделенной энергии переходит в кинетическую энергию, которая определяет скорость распространения трещины в массиве и ее ветвление. Ветвление в свою очередь определяет скорость распространения трещины. В момент ветвления увеличение кинетической энергии резко замедляется. Это означает, что раздвоенные трещины двигаются медленнее, чем одиночные. В конечном итоге кинетическая энергия будет полностью израсходована на распространение ответвления трещины. Если не будет дополнительного притока энергии, то скорость распространения трещины упадет до нуля.

Приток дополнительной энергии в выбросоопасной газодинамической зоне возможен за счет увеличения газового давления. Рост внутренней энергии за счет газового давления приводит к состоянию неустойчивого равновесия системы газонаполненных трещин. С течением времени размер области фильтрационного взаимодействия растущих магистральных трещин увеличивается. Таким образом, в газодинамической зоне происходит передача упругой энергии по схеме: трещина – волна – трещина, что приводит к генерации лавинного трещинообразования. На фронте волны происходит комуфлетное микроразрушение с постоянной скоростью, превышающей скорость распространения звука в данной среде [6].

По мере ведения горных работ акустическая зона перемещается в глубь угольного массива, охватывая новые области пласта. В этих областях, наряду с процессами упругого деформирования и пластического течения, развиваются и процессы хрупкого разрушения. В результате усилий аку-

стического поля процесс хрупкого разрушения становится неравновесным и может набрать темп, достаточный для перехода от микроразрушений к макроскопическому, лавинообразному разрушению. В процессе такого разрушения формируется полость будущего внезапного выброса. Таких полостей иногда формируется несколько, в результате чего может произойти последовательно не один выброс.

§ 4. Условия образования нелинейных ударных волн в выбросоопасной зоне

Опасные газодинамические явления происходящие в шахте можно отнести к физике высоких плотностей энергии, учитывая определенную специфику этих явлений. Известно [3, 5, 6 и др.], что в условиях сильных отклонений термодинамических систем от равновесия под действием потоков вещества и энергии возможно образование диссипативных структур, которые по своим свойствам значительно отличаются от свойств первоначального вещества. Диссипативная структура определяет нелинейный характер выбросоопасной газодинамической зоны.

Рассмотрим условия, связанные с образованием и генерацией нелинейных волн в выбросоопасной зоне.

Во-первых, в массиве угля имеют место деформации обусловленные созданием в массиве плоскостей обнажения при проведении горных работ. В условиях быстрой разгрузки в угле возникает волна разряжения, представляющая собой быстропротекающий процесс деформации упругого восстановления среды. Под действием растягивающих напряжений волны разряжения производят деформации элемента горного массива. Источником таких деформаций являются запасы потенциальной энергии упруго сжатой среды, такие деформации носят импульсный характер, что служит источником зарождения упругих нелинейных волн в призабойной зоне выбросных угольных пластов.

Кроме того, повышение сейсмоактивности горного массива происходит в результате неравномерного сближения почвы и кровли на угольных пластах.

В ряде случаев незатухающие колебания могут возникнуть за счет источников энергии, не обладающих колебательными свойствами. Системы такого типа называются самовозбуждающими или автоколебательными. Автоколебательными называются системы с сухим трением. Для характеристики трения можно принять закон Кулона, учитывая разницу между силой трения покоя R_1 и силой трения движения R_2 . по данным ИФЗ АН СССР и ВНИИМИ отмечено, что превышающие частоты автоколебаний угольных пластов лежат в интервале 100-2000 Гц [11].

При воздействии горнодобывающей техники в

горном массиве возбуждаются импульсные колебания разных гармоник. Основная энергия импульсов, возникающих в угольном пласте проходит на звуковые частоты 100-1500 Гц. [10]. Максимальные частоты микроударов о поверхность массива составляют 50-60 кГц. При определенных скоростях работы горных агрегатов частота их колебаний может стать близкой к частоте собственных колебаний массива. В итоге может наступить резонанс. Образовавшиеся таким образом упругие волны называются авторезонансными волнами.

Таким образом, под воздействием различных сил призабойная часть угольного пласта подвергается упругому воздействию, что свидетельствует о наличии акустически активной нелинейной среды.

Рассмотрим нелинейную модель движения диссипативной сплошной среды, т.е. модель нелинейных волн. Обозначим через $n(x,t)$ - плотность частиц. Закон сохранения массы примет вид:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + V \frac{\partial n}{\partial x} = 0, \quad (26)$$

где $V \frac{\partial x}{\partial t}$ - скорость частиц в нелинейной среде

$V=V(n)$. Уравнения характеристик

$$\frac{\partial x}{\partial t} = V(n) \text{ и } \frac{\partial n}{\partial t} = 0 \quad (27)$$

определяют решение при начальном условии $V(x,0)=F(x)$ в виде волны Римана

$$n(x,t) = F[x - v(n) \cdot t]. \quad (28)$$

Профиль волны $n(x,t)$ выражен неявно. Кроме того, скорость движения различных точек профиля различна. Она зависит от значения $n(x,t)$ в каждой точке. Если $V'(n)>0$, то волна Римана укручивается и при этом возможно ее опрокидывание. Исследуем условие опрокидывания волны, для чего продифференцируем решение (28) по x и t .

$$\frac{\partial n}{\partial x} = \left(1 - \frac{dV}{dn} \cdot \frac{\partial n}{\partial x} \cdot t \right) F' \quad (29)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \left(-V - \frac{dV}{dt} \cdot \frac{\partial n}{\partial t} \cdot t \right) F' \quad (30)$$

отсюда

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{F'}{1 + F' \cdot t \cdot \frac{\partial V}{\partial n}}; \quad \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{V(n) \cdot F'}{1 + F' \cdot t \cdot \frac{\partial V}{\partial n}}. \quad (31)$$

Опрокидывание сопровождается обращением в бесконечность производных $\frac{\partial n}{\partial x}$ и $\frac{\partial n}{\partial t}$.

Проанализируем условия, при которых происходит укручение волны. Нелинейный закон Гука при решении волнового уравнения приводит к зависимости фазовой скорости от деформации.

Вследствие этого разные фазы волны имеют разную скорость, поэтому форма волны по мере распространения изменяется от симметричной в начале к волне с крутым фронтом. Укручение волны связано с тем, что материальные частицы среды, находящиеся в ее кучности (где плотность выше) движутся быстрее, чем соседние частицы вне кучности волны, где плотность среды ниже.

Накапливающиеся нелинейные эффекты приводят к увеличению крутизны *профиля* волны. Нелинейные эффекты характеризуются числом Maxa $M=U/C$, где U – амплитуда колебательной скорости частиц; C – скорость звука в данной среде.

При $M \ll 1$ волна успевает затухнуть прежде, чем в ней разовьются нелинейные эффекты. При $M > 1$ влияние накапливающихся нелинейных эффектов оказывается более сильным, чем влияние диссипативных процессов, обусловливающих затухание волны.

Соотношение нелинейных диссипативных процессов количественно характеризуется числом Рейнольдса:

$$\text{Re} \sim \frac{\nu_x}{\nu} \sim \frac{x_0}{\Delta x} . \quad (32)$$

В опасных тектонически нарушенных зонах вязкость ν существенно уменьшается, а в окружающем горном массиве вязкость ν_x достаточно велика, поэтому $\text{Re} \gg 1$. При $\text{Re} \gg 1$ преобладают нелинейные эффекты и происходит сильное искажение профиля волны, приводящее к образованию уединенных ударных волн. В асимптотическом приближении уединенные волны можно записать в виде [6]:

$$U(x,t) = -\frac{1}{2} a^2 \operatorname{sech}^2 \left[\frac{a(x-a^2 t)}{2} \right]. \quad (33)$$

Из выражения (33) следует, что уединенные волны распространяются со скоростью a^2 , которая пропорциональна амплитуде и имеет ширину, обратно пропорциональную квадратному корню из амплитуды, т.е. $\Delta x = \sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}$, где $\alpha = |U-C|$. Чем

быстрее (по отношению C) движется уединенная волна, тем короче становится ширина фронта Δx , и чем выше дисперсия среды, тем больше становиться ширина фронта.

Характерной особенностью нелинейных волн является их нелинейное взаимодействие, т.е. уединенные волны после столкновения сохраняют в точности первоначальную форму. Такое взаимодействие показывает, что энергии, переносимая волной, может распространяться в виде локализованных устойчивых «пакетов» без рассеяния.

§ 5. Распространение нелинейных уединенных волн (УВ) в призабойной зоне

Пусть в начальный момент времени $t=0$ в массиве угля произошло инициированное УВ и возмущение стало распространяться в сторону забоя. Через время $t=T>0$ в пласте угля она сформировала три области: 1) нетронутого вещества с плотностью ρ_1 ; 2) вещества повышенной плотности ρ_2 , находящегося в области повышенной плотности УВ, в которой интенсивно, разрушаются перенапряженные элементы массива и выделяющаяся энергия поддерживается в незатухающей форме; 3) за фронтом УВ с плотностью разрушенного вещества ρ_3 ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$).

Запишем закон сохранения массы твердого вещества. Масса единичного объема вещества, заключенного в области от груды забоя до фронта ударной волны будет $m_1 = \rho_1 U_a$, где U_a - скорость фронта УВ. С другой стороны, масса рассматриваемого объема вещества равна сумме масс $m_2 = \rho_2 |U_a - C|$; $m_3 = \rho_3 |C - U|$, где C - скорость звука, U - скорость частиц вещества за фронтом УВ. Приравнивая массу вещества, будем иметь

$$\rho_1 U_a = \rho_2 (U_a - U_c) + \rho_3 (C - U), \quad (34)$$

откуда

$$\rho_1 \frac{U_a}{C} = \rho_2 \left(\frac{U_a}{C} - 1 \right) + \rho_3 \left(1 - \frac{U}{C} \right). \quad (35)$$

В связи с тем, что $U \ll C$, то $\frac{U}{C} \sim 0$, получим

$$\frac{U_a}{C} = \frac{\rho_2 - \rho_3}{\rho_2 - \rho_1}. \quad (36)$$

Так как $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$, то $\frac{\rho_2 - \rho_3}{\rho_2 - \rho_1} > 1$, т.е.

$U_a > C$, т.е. скорость фронта УВ больше скорости звука в данной среде.

Когда ударная волна, распространяющаяся по массиву угля, выходит на свободную поверхность забоя, сжатое вещество расширяется, или как говорят, разгружается до нулевого давления. Образовавшаяся волна разгрузки (разряжения) бежит назад по пласту со скоростью звука, соответствующей состоянию за фронтом ударной волны, а саморазрушающееся вещество приобретает дополнительную скорость U_1 в направлении первоначального движения ударной волны. Давление в волне падает от начального ($P = \rho_0 C U$) до нуля, при этом

$$U_1 = -\frac{\Delta P}{\rho_0 C} = \frac{P}{\rho_0 C} \quad (\text{т.к. } \Delta P = -P).$$

Из сопоставления этих формул следует, что дополнительная скорость частиц U_1 равна массовой скорости частиц в ударной волне ($U_1 = U$).

Т.е. при выходе ударной волны на свободную поверхность скорость частиц удваивается ($U_+ + U_- = 2U_0$).

После отражения ударной волны сжатия от поверхности забоя в массиве угля возникают отрицательные давления и на массив угля действуют растягивающие усилия δ_f (волна разряжения) [12]

$$\delta_f = A + F \left(\frac{\Delta \delta}{x} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (37)$$

где x – расстояние от поверхности забоя; $\Delta \delta/x$ – градиент отражения.

Если растягивающее напряжение превышает предел прочности угольного массива на разрыв $\delta_f > \delta_p$, то в соответствующем месте поверхности забоя происходит «откол» (волна дробления), т.е. от поверхности забоя откалывается пластины угля и, отделяясь от массива, отлетают в сторону выработки. Появление волны дробления является предвестником ВВГУ.

По мере ведения горных работ акустическая зона охватывает все новые области пласта, в которых наряду с процессами упругого деформирования и пластического течения, развиваются и процессы хрупкого разрушения. Поведение процесса разрушения во времени аналогично его поведе-

нию в пространстве, т.е. вариации растрескивания имеют различный характер по плоскости забоя. Это означает, что в предвыбросные периоды разрушения концентрируются в определенных зонах поверхности забоя, которые чередуются с областями упрочнения, запирающим газ, десорбирующийся в местах усиленного разрушения. В этих зонах могут быть созданы местные условия высокой концентрации микроразрушений при общем среднем невысоком уровне акустической активности. В результате усилий акустического поля процесс хрупкого разрушения становится неравновесным и может набрать темп, достаточный для перехода от микроразрушений к макроскопическому, катастрофическому разрушению. При достаточно высоком уровне энергии ударной волны, который превысит концентрационные порог наименее разрушенной призабойной зоны произойдет разрушение угольного массива. Проявлением такого разрушения будет взрыв на выброс угля и газа с образованием воронки выброса (горловина полости выброса). Если давление газа в полости выброса резко упало за счет дегазации полости выброса, то вместо выброса произойдет высapsulation мелкодисперсных частиц угля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Премыслер Ю.С., Яновская М.Ф. Коллекторские свойства углей. – В кн.: Физико-химия газодинамических явлений в шахтах. – М.: Наука, 1973, - с.19-83.
2. Айруни А.Т. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах. – М.: Наука, 1987.
3. Энгельбрехт Ю.К., Никул У.К. Нелинейные волны деформаций. М.: Наука, 1981.
4. Перник А.Д. Проблемы кавитации. – Л.: Издательство ЛГУ, 1966. 439 стр.
5. Nolting B.E., Neppiras E.A. Cavitation produced by ultrasonics// Proc. Phys. Soc., 1950, vol. 63 B, P. 9, P. 674-685; 1951, vol. 64 B, P. 12, P. 1032-1038.
6. Беспятов Г.А., Вылегжанин В.Н., Золотов С.С. Синергетика выбросоопасной горной среды. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение. 1996.
7. Петросян А.Э., Иванов Б.М., Крупеня В.Г. Теория выброса угля и газа. – М.: Наука, 1983. – 152с.
8. Беспятов Г.А., Егоров П.В., Кнуренко В.А. Механизм образования выбросоопасных зон угольных пластов. – Кемеровский ЦНТИ, 1996. Серия Р-052.01.93. №192 – 1996. -5с
9. Беспятов Г.А., Колмаков В.А., Тарасов Б.Г. Определение фильтрационных параметров угольного пласта при ведении очистных работ. //Вопросы рудничной аэрологии: Сб. науч. теории// Кузбасский политехнический институт. – Кемерово. Вып. 3. – 1973.
10. Николин В.Н. Представления (гипотеза) о природе и механизме выброса угля, породы и газа. – МакНИИ, 1976. – 24с.
11. Волошин Н.Е. Внезапные выбросы и способы борьбы с ними в угольных шахтах. – К.: Техника, 1985. – 127с.
12. Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику. – М.: Наука, 1988, - 368с.

Автор статьи:

Беспятов
Геннадий Александрович
- докт.техн.наук, проф. каф.
высшей математики