

ОЦЕНКА ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ЗАБОЕВ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ВЫБРОСАХ И СОТРЯСАТЕЛЬНОМ ВЗРЫВАНИИ

Вивчений механізм утворення вибухонебезпечної середовища і можливість її детонації у забоях виробок на викидонебезпечних вугільних пластах під час генерації вуглеводнів з макромолекул вугільної речовини при струсному підриванні.

Изучен механизм образования взрывоопасной среды и возможность ее детонации в забоях выработок на выбросоопасных угольных пластах во время генерации углеводородов из макромолекул угольного вещества при сотрясательном взрывании.

The mechanism of highly explosive environment and capacity of his detonation in faces of mine excavations on discharge-unsafe coal layers at the time of generation of hydrocarbons from macromolecules of coal substance in shaking explosion are examined in this article.

Взрывобезопасность производственных процессов является неотъемлемой частью системы охраны и безопасности труда на технологических выемочных и подготовительных участках угольных шахт. Вместе с тем, на выбросоопасных угольных пластах происходит неконтролируемое образование взрывоопасной смеси в забоях горных выработок при газодинамических явлениях и сотрясательном взрывании.

Анализ последних исследований показал, что неравновесные физико-химические процессы в угольном веществе, инициируемые деформациями генетического возврата, приводят к образованию метастабильных зон в угольных пластах, содержащих крайне опасные взрывчатые газовые смеси из водорода, метана, оксида углерода, ацетилена и метилена. При газодинамических явлениях, сотрясательном взрывании и генерации углеводородов угольным веществом на выбросоопасных пластах происходит образование и самовоспламенение взрывоопасной среды в горных выработках. Эффективных способов предотвращения подобных взрывов пока нет. Поэтому решение данной проблемы имеет важное научное и практическое значение для обеспечения охраны труда и техники безопасности в угольных шахтах, разрабатывающих выбросоопасные угольные пласты.

Целью данной статьи является исследование взрывобезопасности условий при выбросе угля и газа и пределов детонации газовых смесей, содержащих водород, ацетилен и метилен в забоях выработок, проводимых сотрясательным взрыванием.

Открытие проф. В.И. Николиным с сотрудниками явления склонности пород к деформациям генетического возврата дало возможность рассматривать неравновесные процессы физико-химических превращений в углях [1, 2]. Суть их заключается в механической активации угольного вещества, разрыве в нем различных химических связей и его диссоциации. При этом угольное вещество освобождается от избыточной энергии, приводящей к пластической деформации его структуры, связанной с движением внутри кристаллических дислокаций, путем разрыва химических связей в макромолекулах и самопроизвольного их разрушения. Скорость такого процесса в угле определяется его движущей силой – развитием деформации генетического возврата и сопротивлением – прочностью вещества на разрыв. При запредельных скоростях происходит механохимическая активация макромолекул и переход их в метастабильное состояние, имеющее склонность к самопроизвольной генерации углеводородов при разложении угля.

Будем считать, что изменение структуры и свойств угля характеризуется величиной скорости его деформации, а метастабильное состояние зависит от степени метаморфизма и конечного состава. При деформации происходит изменение внутренней энергии угольного вещества – ΔU за время его фазового перехода из устойчивого состояния в активированное. Так как этот процесс происходит в неравновесной напряженной зоне угольного пласта, то изменением объема этой зоны, охваченной структурными перестройками вещества из-за малости деформаций пласта можно пренебречь, то есть $dV = 0$, а $\Delta U = Q_V$ согласно первому закону термодинамики, где Q_V – удельная теплота реакции перестройки угольного вещества. Изменение внутренней энергии угольного вещества в результате механохимической реакции равно теплоте реакции его разложения:

$$Q_V = \sum_{i=1}^i n_i \cdot q_i - Q_{обр},$$

где n_i – количество молей i -го продукта реакции;

q_i – удельная теплота образования i -го моля реакции.

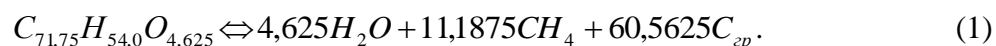
По элементному составу угля можно рассчитать его теплоту образования:

$$Q_{обр} = Q_{нз} - Q_{сз},$$

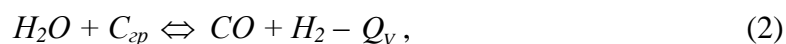
где $Q_{нз}$ – теплота образования продуктов сгорания угля;

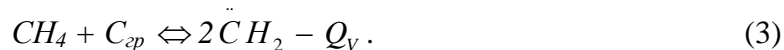
$Q_{сз}$ – калориметрическая теплота сгорания угля в зависимости от состава.

Начальное состояние макромолекулы угля определено его составом, химическим строением и энергией образования ($Q_{обр}$). Конечное состояние, в которое может перейти макромолекула угля, связано с изменением параметров его состояния, разрывом связей в молекуле и образованием новых связей, сопровождающихся выделением или поглощением энергии и изменением состава. Предельный случай изменения структуры макромолекулы угля при генерации углеводородов можно описать уравнением реакции его разложения. Рассмотрим протекание физико-химического процесса механохимической перестройки макромолекулы на примере угля марки Ж пласта ℓ_1 шахты им. А.Ф. Засядько, приводящего к генерации углеводородов по следующему уравнению реакции:



Теплота образования угля марки Ж пласта ℓ_1 равна: $Q_{обр} = 802,4$ кДж/кг. Удельная теплота, которая выделяется в результате реакции (1), равна: $Q_V = 1153,54$ кДж/кг, а температура продуктов реакции $T_{np} = 662,3^0 K$. Так как $dV = 0$, то энергия реакции расходуется на преодоление сдвиговой прочности вещества и инициирование обратных реакций, пытающихся привести систему в равновесное состояние. Условие равновесия системы определено минимумом энергии, при котором $dU = 0$. Однако разложившийся уголь не может быть снова превращен в исходное вещество из графита ($C_{гр}$), метана (CH_4) и паров воды (H_2O). Поэтому при его разложении и генерации углеводородов можно говорить о так называемом «ложном» равновесии, которое соответствует законам термодинамики, но при котором угольное вещество не восстанавливается. Тогда избыточная часть энергии системы «угольное вещество – графит – метан – пары воды» расходуется на обеспечение протекания реакций, уменьшающих энергию системы. Это может быть достигнуто за счет эндотермических реакций:

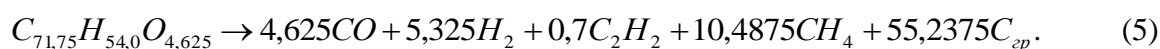




Реакции (2) и (3) идут с поглощением тепла, тем самым стабилизируют зоны с избыточной энергией. По реакции (3) в этих зонах накапливается метилен – активный радикал двухвалентного углерода, который превращается в более устойчивый, но крайне взрывчатый ацетилен:



С учетом реакций (2), (3) и (4), для условия «ложного» равновесия в системе уравнение разложения угля, подверженного структурным перестройкам и саморазрушению вещества можно подобрать. Так, если будет выполняться условие равновесия $dU = 0$, то изменение теплоты механохимической реакции $dQ_V = 0$ или $\sum_{i=1}^i n_i q_i = Q_{обр}$. Тогда равновесное уравнение разложения макромолекулы угля будет иметь вид:



Уравнение (5) позволяет предполагать, что угольное вещество генерирует углеводороды в зонах его метастабильного состояния при механохимической активации. При этом само вещество превращается в наноразмерные углеродные системы, образующие нанографеновые и нанографитовые структуры и газообразные продукты внедрения (рис. 1).

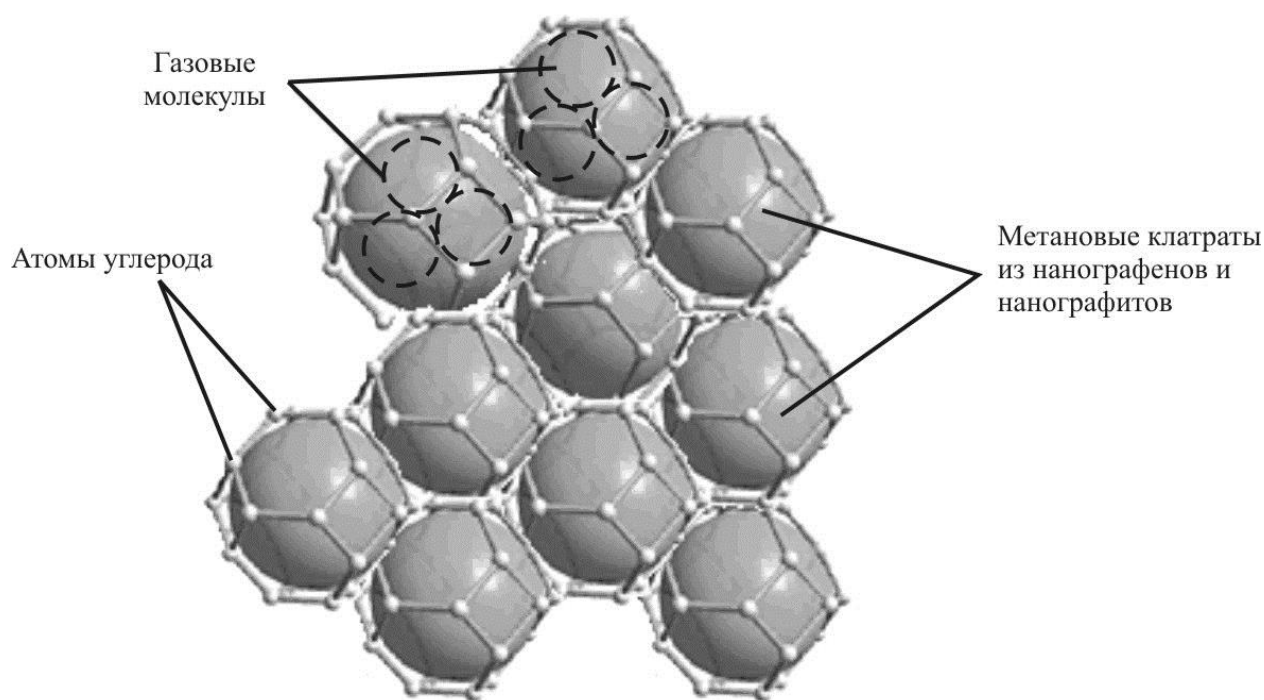
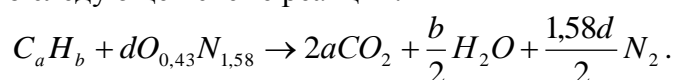


Рис. 1. Макромолекула угольного вещества в метастабильном состоянии

Эти углеродные системы состоят из конденсированной фазы (66%) в виде наночастиц графитизированного углерода, образующих кладратную структуру соединения внедренного графита и газообразных продуктов разложения (34%). В состав газообразных продуктов предполагаемой реакции механохимического разложения угля (5) для пласта l_1 входят 3,31% ацетилена, 25,2% водорода, 21,87% оксида углерода и 49,62% метана. При газодинамическом преобразовании угольного вещества в краевой части пласта происходит разложение газовых клатратов, образованная газовая смесь попадает в атмосферу выработки и образует взрывоопасную среду. Определить взрывоопасность данной газовой или газозооной смеси можно путем оценки ее концентрационных пределов воспламенения или

детонации. Для решения этого вопроса были проанализированы известные экспериментальные данные работ [3, 4], полученные при изучении детонации больших объемов газозвушных смесей в закрытых емкостях. В детонационной волне горючий газ реагирует с кислородом воздуха по следующей схеме реакций:



Можно найти кислородный коэффициент для воздуха – d_0 , при котором горючая смесь будет иметь максимальную удельную теплоту взрыва и детонации:

$$d_0 = \frac{2a + b/2}{0,43}.$$

Он характеризует стехиометрический коэффициент смеси – A_c на один моль газа:

$$A_c = \frac{1}{1 + d_0}. \quad (6)$$

В работе [5] установлены зависимости нижнего и верхнего концентрационного предела детонации газовых смесей от стехиометрического коэффициента смеси:

$$C_{nn} = 1,37345 + 21,5005 (A_c) + 79,877 (A_c)^2, \% \quad (7)$$

среднеквадратичное отклонение $/S/ = 0,66$, коэффициент корреляции $/r/ = 0,99$;

$$C_{en} = -1,61733 + 248,6746 (A_c) - 105,372 (A_c)^2, \% \quad (8)$$

среднеквадратичное отклонение $/S/ = 0,732$, коэффициент корреляции $/r/ = 0,999$.

С помощью зависимостей (7) и (8) были определены концентрационные пределы детонации МВС: $C_{nn} = 4,213\%$, $C_{en} = 21,527\%$. Таким образом, для МВС был найден интервал взрывоопасной концентрации – (4,213%; 21,527%), при которой возможна ее детонация. Аналогично были определены концентрационные пределы детонации для смеси воздуха с углеводородами, генерируемыми углем по уравнению реакции (5): $C_{nn} = 8,45\%$, $C_{en} = 42,244\%$, интервал взрывоопасной концентрации – (8,45%; 42,244%), то есть почти в два раза больше по сравнению с интервалом для МВС. Таким образом, получается, что смеси, образованные углеводородами, генерируемыми углем в метастабильных зонах при его механохимической активации и внезапном выбросе с воздухом, гораздо взрывоопаснее, чем МВС. Необходимо также отметить, что оценка взрывоопасности смесей горючих газов с воздухом по нижнему концентрационному пределу не всегда оправдана. Дело в том, что скорость газовой выделения может быть настолько большой, например, при внезапном выбросе газа, что за короткий промежуток времени газ заполняет значительный объем выработок и его концентрация достигает практически 100%. В дальнейшем она снижается и, в первую очередь, становится равной значению верхнего предела взрываемости газа. Поэтому ясно, что чем выше этот предел и больший концентрационный интервал взрываемости газа, тем более опасной является газовая обстановка в горной выработке. На это указывает и газодинамика процесса образования взрывчатых смесей в забоях выработок при внезапных выбросах газа. Выброс газа инициируется спонтанным разложением его клатратов в метастабильных зонах угольного пласта. Центры разложения возникают при запредельных сдвиговых деформациях, приводящих к разрыву связей между краевыми атомами углерода, образующими мезоскопическую пористую систему. Лавинообразный процесс возникновения таких центров приводит к потере структурной прочности угля и высвобождению газообразных продуктов. Скорость их высвобождения характеризует газодинамическое явление и взрывоопасность газовой смеси в горной выработке. Попытаемся обосновать и подтвердить данный подход.

На основании шахтных измерений продолжительности выбросов угля и газа Бобровым И.В. и Николиным В.И. было установлено, что скорость разрушения угля при выбросе составляет 10 т/с. Этот факт и предполагаемое уравнение разложения угольного вещества (5) позволяют определить основные газодинамические параметры выброса газа в

выработку. При описании состояния газовых включений в графитной клатратной системе было использовано уравнение реального газа в вириальной форме [6]. Оценка критерия сдвигового напряжения для разрушения угля представляет собой обобщенное условие Мизеса и дана в виде:

$$\frac{1}{2} S_{ij} \cdot S_{ij} = \frac{1}{3} [\sigma]_p^2, \quad (9)$$

где S_{ij} – компоненты девиатора тензора напряжений. Значение прочности угля $[\sigma]_p$ изменяется в соответствии с уравнением:

$$\frac{d\sigma}{dt} = \varphi(\sigma, \sigma_1^p, \sigma_2^p). \quad (10)$$

При $t < t_s$ $\sigma = \sigma_1^p$, а при $t = t_s + t_p$ $\sigma = \sigma_2^p$,

где t_s – момент начала разрушения;

t_p – характерное время разрушения,

$$\sigma_1^p = \sigma_{01} + \frac{\mu_1 P}{1 + \frac{\mu_1 P}{\sigma_1^p - \sigma_{01}}}, \quad (11)$$

$$\sigma_2^p = \sigma_{02} + \frac{\mu_2 P}{1 + \frac{\mu_2 P}{\sigma_2^p - \sigma_{02}}}, \quad (12)$$

где σ_1^p – предел прочности угля;

σ_2^p – предел текучести разрушенного угля;

σ_{01}, σ_{02} – предельные значения сил сцепления и сдвиговой прочности угля;

μ_i – коэффициент трения дилатансирующих частиц угля;

P – давление в местах включения газообразных продуктов в клатрат.

Уравнение состояния в вириальной форме для реальных газов при высокой плотности может быть представлено в следующем виде:

$$P = N \cdot R \cdot T \cdot \rho_k \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \left(1 + \frac{b_0}{V_y} + 0,625 \frac{b_0^2}{V_y^2} + 0,287 \frac{b_0^3}{V_y^3} + 0,193 \frac{b_0^4}{V_y^4} \right), \quad (13)$$

где N – количество молей газообразных продуктов реакции;

R – газовая постоянная;

T – абсолютная температура;

ρ_k – плотность газографитного клатрата;

ε – относительная доля конденсированной фазы в клатрате;

b_0 – второй вириальный коэффициент для газа;

V_y – объем для «упаковки» молекул газа в газовом клатрате.

Если принять плотность метастабильного газографитного клатрата после перестройки макромолекулы угля $\rho_k = 1075 \text{ кг/м}^3$, а абсолютную температуру угольного вещества $T = 300^0 \text{ К}$ при $\varepsilon = 0,66$ [5], то остальные величины могут быть получены, исходя из уравнения (5) и данных термодинамических свойств газов [7]. Для расчета принято:

– удельный объем газографитного клатрата $V_k = \frac{1}{\rho_k} = 930,23 \text{ см}^3/\text{кг}$;

– удельный объем каркаса клатрата из атомов углерода $V_{yc} = 5,3 \cdot 55,2375 = 292,76 \text{ см}^3/\text{кг}$;

– удельный объем для «укладки» молекул газа в клатрате $V_y = V_k - V_{yc} = 637,47 \text{ см}^3/\text{кг}$;

– собственный удельный объем молекул газа $b_0 = \sum b_i \cdot N_i = 33,95 \cdot 4,625 + 13,62 \cdot 5,325 + 18,63 \cdot 0,7 + 8,3 \cdot 10,4875 = 329,63 \text{ см}^3/\text{кг}$;

– отношение $\frac{b_0}{V_y} = \frac{329,63}{637,47} = 0,517$.

Подставляя все значения в уравнение (13), получаем внутреннее давление газа в клатрате: $P = 3,3481 \cdot 10^7 \text{ Па}$.

Согласно уравнениям (9), (10), (11), (12), если $P \geq [\sigma]_p$, то процесс разрушения вещества не обратим. В этом случае сплошность угольной среды нарушается и образуется газугольный поток, движущийся в направлении свободного объема выработки. Плотность этого потока – ρ_n для адиабатического процесса истечения может быть определена по формуле:

$$\rho_n = \rho_\kappa \left(\frac{[\sigma]_p}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma_n}},$$

где γ_n – показатель адиабаты для смешанного газугольного потока: $\gamma_n = 0,66\gamma_{zp} + 0,34\gamma_\Gamma = 0,66 \cdot 1,05 + 0,34 \cdot 1,342 = 1,15$.

Принимаем, что при сдвиговой деформации угольного вещества критический предел его прочности мало отличается от сдвиговой прочности угля. Средний предел прочности на сдвиг для угольного вещества $[\sigma]_p = 1,0 \text{ МПа}$. Тогда плотность газугольного потока при выбросе $\rho_n = 50,68 \text{ кг/м}^3$. Если выброс происходит в подготовительной горной выработке, то скорость разрушения угля в пласте составляет 10 т/с и можно установить скорость газугольного потока – u_n :

$$u_n \cdot S_{nl} \cdot \rho_n = 10000 \text{ кг/с},$$

где S_{nl} – критическое сечение угольного пласта, через которое истекает газугольный поток: $S_{nl} = 0,5 \cdot B \cdot m_{nl}$, B – ширина выработки по почве пласта, м; m_{nl} – средняя мощность пласта, м.

Для пластов средней мощности, равной 1,5 м, можно принять: $S_{nl} = 4,0 \text{ м}^2$. Тогда средняя скорость газугольного потока у забоя выработки составит:

$$u_n = 10000 / (4 \cdot 50,68) = 49,33 \text{ м/с}.$$

За единицу времени угольный поток при истечении займет объем выработки, равный:

$$V_{zg} = S_{gc} \cdot u_n = 887,92 \text{ м}^3,$$

где S_{gc} – сечение выработки в черне, м^2 ; принято $S_{gc} = 18 \text{ м}^2$.

Объем газа, который выделяется за это время из угольного вещества в объеме выработки, равен:

$$V_{газа} = 10 \cdot 473,48 = 4734,8 \text{ м}^3.$$

Для адиабатического процесса расширения газа его давление будет равно:

$$P_e = P_a \left(\frac{V_{газа}}{V_{zg}} \right)^{\gamma_z} = 1,02 \cdot 10^5 \left(\frac{4734,8}{887,92} \right)^{1,342} = 9,641 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Скорость расширения газа может быть установлена из риманского решения основных уравнений гидродинамики. Это решение основано на предположении, что $u_z = \varphi(V_z)$, где V_z – удельный объем газа, u_z – скорость газа [8]. Тогда оказывается, что

$$du = -\sqrt{-dPdV}.$$

Для идеального газа в работе [8] получено решение этого уравнения:

$$u_z = u_0 + \frac{2}{\gamma_z - 1}(C - C_0), \quad (14)$$

где u_0 – начальная скорость газа; C – скорость звука в расширяющемся газе; C_0 – местная скорость звука в невозмущенной атмосфере, $C_0 = 340$ м/с.

При истечении газа в атмосферу его скорость звука может быть найдена из выражения:

$$C = 340 \left(\frac{P_z}{P_a} \right)^{\frac{\gamma_z - 1}{2\gamma_z}} = 340 \left(\frac{9,641 \cdot 10^5}{1,02 \cdot 10^5} \right)^{0,1274} = 452,65 \text{ м/с.}$$

По уравнению (14) находим скорость расширения газа: $u_z = 708,1$ м/с.

Скорость расширения газа сверхзвуковая, поэтому в выработке газ начнет сжимать воздух и в нем образуется ударная волна. Давление ударного сжатия воздуха во фронте волны равно:

$$P_{y\phi} = \frac{\gamma_\phi + 1}{2} \rho_\phi u_z^2 = \frac{1,4 + 1}{2} \cdot 1,253 \cdot 708,1^2 = 7,54 \cdot 10^5 \text{ , Па,}$$

где γ_ϕ , ρ_ϕ – показатель адиабаты и плотность шахтного воздуха соответственно.

Скорость ударной волны в воздухе определяется по формуле:

$$D_{y\phi} = 315,4 \left(1,46245 + \frac{P_{y\phi}}{P_a} \right)^{0,49305} = 925 \text{ , м/с,}$$

а температура ударного сжатия газа во фронте ударной волны равна:

$$T_\phi = T_0 - 12,061 + 0,03436 \cdot D_{y\phi} + 4,4974 \cdot 10^{-4} \cdot D_{y\phi}^2 - 6,872 \cdot 10^{-8} \cdot D_{y\phi}^3 = 650 \text{ , } ^\circ \text{K.}$$

Результаты аналитических исследований показали, что выброс угля и газа имеет взрывоподобный характер, в результате которого в выработке образуется мощная ударная волна с параметрами, достаточными для воспламенения взрывоопасной среды [9]. Необходимо обратить внимание на особую опасность и отраженных ударных волн. Наличие в горной выработке горношахтного оборудования и крепи приводит к регулярному отражению от них ударной волны, в результате чего в отраженных ударных волнах давление возрастает почти в 8 раз. В отраженной ударной волне, согласно приведенному выше расчету, давление может достигнуть величины более 60 атм. Соответственно температура воздуха будет 2000⁰ К и выше. При таких ударных нагрузках разрушаются оборудование, крепь, происходит воспламенение взрывоопасной среды. Полученные результаты расчетов хорошо согласуются с данными измерений при выбросах угля и газа на экспериментальном участке пласта Дерезовка шахты «Красный Профинтерн», проведенных почти 50 лет назад И.В. Бобровым [10]. Было установлено, что скорость выброса угля у груди забоя составила 38,4...50,0 м/с, а скорость движения газового потока в выработке – 416...500 м/с, что выше скорости звука. Принимая во внимание сделанный ряд допущений при аналитических исследованиях, а также то, что рассматривается предельный случай разложения угольного вещества без учета зольности и влажности пласта, можно считать, что совпадение результатов расчета и шахтных измерений вполне удовлетворительное. Это указывает на то, что внезапный выброс угля и газа необходимо рассматривать как газодинамический взрыв, при котором в выработке образуются прямые и отраженные ударные волны. Действие ударных волн и наличие в газообразных продуктах разложения угольного вещества водорода, ацетилена и метилена способствуют воспламенению взрывоопасной среды в выработках. Эти выводы требуют пересмотра доктрины безопасности применения сотрясательного взрывания как способа, провоцирующего выброс угля и газа

и нормализующего обстановку в забое. Цель сотрясательного взрывания – динамически изменить напряженное состояние горного массива, чем вызвать выброс угля и газа в отсутствие в выработках людей. Опыт его применения показывает, что выбросы могут происходить:

- мгновенно, одновременно с взрывом шпуровых зарядов;
- квазимгновенно, то есть через короткий промежуток времени (0,2...2,0 с) после взрывания шпуровых зарядов;
- с замедлением, через 5...20 с после взрывания.

Таким образом, можно оценить уровень взрывобезопасности в забое при сотрясательном взрывании с учетом возникновения газодинамических явлений в выработках. При сотрясательном взрывании разрешается применять непридохранительные ВВ II класса и ПВВ III и IV классов. Получается, что в наиболее опасной газовой обстановке разрешено применение ВВ, обладающих крайне низким уровнем предохранительных свойств и не разрешено применение высокопредохранительных ВВ V и VI классов. Исследованиями, выполненными в МакНИИ Ф.М. Галаджием, В.И. Зениным, Б.И. Вайнштейном и В.М. Расторгуевым, было установлено, что ПВВ с низким уровнем предохранительных свойств воспламеняют МВС во всем концентрационном интервале взрываемости метана. Ранее А.И. Селезнев и А.И. Гольбиндер установили, что добавление к МВС водорода резко повышает взрывчатость этой смеси, а предохранительные свойства ВВ в ней снижаются в несколько раз. Последние исследования [11] показали, что присутствие в МВС ацетилена и метилена делает ее самовоспламеняющейся и способной к детонации при минимальном содержании кислорода в смеси. Следовательно, если выброс угля и газа происходит одновременно с взрыванием шпуровых зарядов, то параметры газодинамического взрыва возрастают пропорционально количеству взрываемого ВВ. Очевидно, что при этом увеличивается вероятность взрыва газовой смеси, так как возрастают параметры прямых и отраженных ударных волн в выработке. Не лучше складывается и ситуация в выработке, когда газодинамическое явление происходит после сотрясательного взрывания. В этом случае взрывание шпуровых зарядов создает ударные волны, которые интенсивно перемешивают метан с воздухом, выдавливают его из трещин массива и куполов за контуром выработки и переводят угольную пыль во взвешенное состояние. Следующий за взрывом ВВ выброс газа приводит к газодинамическому взрыву, действие которого на «подготовленную» метано-пылевоздушную смесь может привести к ее воспламенению. Вероятность воспламенения взрывоопасной среды при сотрясательном взрывании существенно возрастает при наличии в газах выброса ацетилена и метилена, которые способствуют ее самовоспламенению и детонации без участия кислорода воздуха, а продукты взрыва низкопредохранительного ВВ не могут оказывать на газовую среду взрывозащитного действия.

При детонации газовой смеси во фронте волны преобладающим является разветвленно-цепной механизм протекания быстрых химических реакций. Условием цепного механизма протекания взрывной реакции в газовой среде, включая МВС, является преобладание скорости зарождения и разветвления цепей химических реакций над скоростью обрыва и гибели радикалов. Основы теории цепных реакций позволяют выбрать способ химического регулирования скорости и полноты реакции МВС при детонации путем ее ингибирования. Реализуется такой способ применением специальных ингибиторов – веществ, тормозящих скорость химических реакций. Тормозящее действие обусловлено тем, что ингибитор блокирует активные центры-радикалы, с помощью которых развиваются цепные реакции, и переводит их в малоактивные продукты. Ингибирование цепных реакций характеризуется длительностью тормозящего действия ингибитора τ_u . Число цепей $-f$, которые обрывает одна молекула ингибитора, последовательно вступая в реакции обрыва цепей, называют стехиометрическим коэффициентом ингибирования. При ис-

ходной концентрации ингибитора – C_u и скорости инициирования цепей реакции – ω_o время тормозящего действия ингибитора равно:

$$\tau_u = \frac{f \cdot C_u}{\omega_o} \quad (15)$$

Известно, что скорость инициирования цепей реакции зависит от концентрации радикалов – n и времени их «жизни» – t_R , следовательно, ее можно определить по формуле:

$$\omega_o = \frac{n}{t_R} \quad (16)$$

Принимаем во внимание, что тормозящее действие ингибитора должно быть не меньше периода индукции цепного взрыва, то есть $\tau_u \geq t_i$. Тогда, подставив уравнение (16) в уравнение (15) и сделав преобразования, получим критическое условие для процесса ингибирования цепных реакций:

$$\frac{t_i}{t_R} = \frac{fC_u}{n} = 1, \quad (17)$$

устанавливающее концентрацию ингибитора, при которой в МВС происходит торможение цепных реакций.

Исследование влияния концентрации ингибитора на взрывчатость МВС было проведено в опытном штреке МакНИИ, в котором моделировали аварийные ситуации, возникающие в выработке при выбросе метана. По специальной методике, предложенной проф. Н.Р. Шевцовым, в МВС расплылись взрывом ВВ соли-ингибиторы окисления метана и подавался инициирующий импульс, вызывающий взрыв этой смеси. Результаты исследований позволили обосновать связь параметров ингибирования взрывоопасных смесей с концентрацией в них солей-ингибиторов и перейти к разработке технических средств взрывозащиты. При сотрясательном взрывании в качестве таких средств можно использовать шпуровые заряды высокопредохранительных ВВ. Эти ВВ представляют собой высокоплотные порошкообразные смеси, состоящие из 10% сенсibilизатора детонации и 90% ионообменной пары солей, образующих при взрывной реакции за фронтом детонационной волны ультрадисперсную соль-ингибитор в виде наночастиц. Заряды из таких ПВВ детонируют с низкой скоростью – около 1500...1800 м/с, в зависимости от плотности патронирования и диаметра ВВ, и обладают высокими предохранительными свойствами по газу. При их детонации образуется соль-ингибитор в виде наночастиц, которая расширяющимися продуктами взрыва сенсibilизатора вовлекается в движение со скоростью около 1000 м/с. В результате этого в течение всего нескольких миллисекунд наночастицы соли-ингибитора флегматизируют и ингибируют большие объемы взрывоопасных газоздушных смесей. В табл. 1 приведены экспериментальные данные, с помощью которых определялись параметры подавления взрывов МВС детонирующими зарядами ПВВ.

Таблица 1 – Результаты взрывоподавления МВС с помощью зарядов детонирующих ПВВ

Характеристика и состав ПВВ			Плотность ПВВ, г/м ³	Скорость, Д, м/с	Предельный заряд, кг	Параметры взрывоподавления МВС	
сенсibilизатор	ионообменная пара	ингибитор				концентрация ингибитора, г/м ³	объем флегматизации, м ³
1	2	3	4	5	6	7	8
Нитроэфир	NaNO ₃ -NH ₄ Cl	NaCl	1,17	1676	1,03	5,83	65,2
То же	NaNO ₃ -(NH ₄) ₂ HPO ₄	Na ₃ PO ₄	1,22	1550	1,43	5,45	95,0

1	2	3	4	5	6	7	8
Нитро-эфир	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} \cdot \text{NH}_4\text{Cl}$	CaCl_2	1,2	1700	0,954	5,53	62,3
То же	$\text{KNO}_3 \cdot \text{NH}_4\text{Cl}$	KCl	1,2	1800	0,737	7,420	41,7
То же	$\text{LiNO}_3 \cdot \text{NH}_4\text{F}$	LiF	1,25	1600	1,230	2,60	101,8

Результаты исследований показывают, что детонирующие шпуровые заряды ПВВ VI класса массой 1,2...1,4 кг могут предотвращать воспламенение больших объемов МВС (до 100 м³). Учитывая эффективность этих ПВВ при короткозамедленном взрывании, можно успешно заменить низкопредохранительные ВВ при сотрясательном взрывании и одновременно предупредить взрывы МВС в тех случаях, когда в забоях выработок происходят газодинамические явления.

Выводы

1. Угольное вещество в напряженном состоянии при деформациях образует метастабильные газоклатратные углеродные системы, содержащие крайне опасные взрывчатые газовые смеси из водорода, метана, окиси углерода, ацетилен, метилена, способные к разложению в виде газодинамического взрыва.

2. При газодинамическом взрыве в выработке образуются прямые и отраженные ударные волны с параметрами, достаточными для воспламенения взрывоопасной среды.

3. Сотрясательное взрывание провоцирует газодинамические явления, однако при его проведении, вследствие того, что применяют опасные ВВ и происходит выброс газа, не может быть достигнут приемлемый уровень взрывобезопасности разрушения пород при прохождении горных выработок.

4. Предупреждение взрывов МВС при сотрясательном взрывании и газодинамических взрывах может быть достигнуто только путем превентивного ингибирования взрывоопасной среды высокопредохранительными ВВ VI класса, способными при детонации шпуровых зарядов предотвращать воспламенение метана и других горючих газов.

Библиографический список

1. Снижение травматизма от проявлений горного давления / [Николин В.И., Подкопаев С.В., Агафонов А.В., Малеев Н.В.]. – Донецк: НОРД-ПРЕСС, 2005. – 327с.
2. Калякин С.А. Борьба со взрывами метана на выбросоопасных угольных пластах / Калякин С.А.// Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. трудов; вып.20. – Макеевка-Донбасс: МАКНИИ, 2007. – С. 15 – 25.
3. Розловский А.И. Научные основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами / Розловский А.И. – М.: Химия, 1972. – 364с.
4. Балаганский И.А. Действие средств поражения и боеприпасов: учебник / Балаганский И.А., Мержиевский Л.А. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2004. – 408с.
5. Калякин С.А. Механизм образования взрывоопасной среды и ее детонации в зонах метастабильного состояния угольного вещества / Калякин С.А.// Вести Донецкого горного института. – Донецк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. – С. 27-34. (ч.2).
6. Андреев К.К. Теория взрывчатых веществ / Андреев К.К., Беляев А.Ф. – М.: Оборонгиз, 1960. – 595с.
7. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание: в 4 т./Л.В. Гурвич, И.В. Вейц и др. – М.: Наука, 1978. – 496с.
8. Ландау Л.Д. Определение скорости истечения продуктов детонации некоторых газовых смесей / Ландау Л.Д., Станюкович К.П.// Собрание трудов Л.Д. Ландау. – М.: Наука, 1969. – С. 496-498.

9. Калякин С.А. Критические условия инициирования взрыва метановоздушной смеси открытым зарядом взрывчатого вещества. Сб. Взрывное дело. Вып. № 97/54. / Калякин С.А. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2007. – С. 170-181.

10. Бобров И.В. Способы безопасного проведения подготовительных выработок на пластах, опасных по выбросам / Бобров И.В. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 263с.

11. Калякин С.А. Охрана труда как результат применения безопасных средств и способов разрушения горных пород / Калякин С.А., Шевцов Н.Р. // Вести Донецкого горного института. – Донецк: ДНВЗ «ДонНТУ», 2008. – С. 76-83. (ч.1).