

## ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ ВЗРЫВ В ЗАБОЕ ВЫРАБОТКИ ПРИ ВЫБРОСЕ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

*С. А. Калякин, Донецкий Национальный технический университет, Украина*

*Исследованы механизм образования взрывоопасной среды, ударных волн и возможность инициирования детонации газовоздушных смесей в забоях выработок на выбросоопасных угольных пластах в процессе разложения угольного вещества и генерации им углеводородов при выбросе угля и газа.*

**Введение.** Взрывобезопасность производственных процессов на технологических выемочных и подготовительных участках глубоких угольных шахт не соответствует техническим требованиям и стандартам охраны труда. Особенно актуальной эта проблема является для условий разработки выбросоопасных угольных пластов, на которых часто происходит неконтролируемое образование взрывоопасной смеси в забоях горных выработок при газодинамических явлениях и сотрясательном взрывании.

**Анализ последних исследований.** Он 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 на выбросоопасных пластах углеводородов угольным веществом может происходить образование взрывоопасной среды в горных выработках, и даже ее самовоспламенение. Очень часто это приводит к крупным катастрофам, как случилось, например, на шахтах им. А.Ф. Засядько, Карла Маркса и А.А. Скочинского. 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 механизма образования взрывоопасной среды, ее самовоспламенения при выбросе угля и газа и возникновения детонации газовых смесей, содержащих водород, ацетилен и метилен, инициируемой в забоях выработок ударными волнами. Для достижения поставленной цели необходимо:

- обосновать газодинамические параметры выброса угля и газа и установить возможность образования в забое выработки ударных волн;
- оценить вероятность инициирования детонации газовоздушной смеси отраженными ударными волнами и параметры ее самовоспламенения.

**Материалы исследований.** Сравнение параметров внезапного выброса угля и газа и взрыва показывает их схожесть при превращении конденсированного вещества. По М.И. Большинскому [1], выброс рассматривается как спонтанный, быстро протекающий процесс хрупкого самоподдерживающегося разрушения массива горных пород и перемещения их по выработкам за счет высвобождения энергии упругого деформирования массива и энергии сжатого газа. Определение взрыва в широком понимании смысла слова дано К.К. Андреевым и А.Ф. Беляевым в работе [2]: взрывом называют физическое или химическое превращение вещества, сопровождающееся крайне быстрым переходом его энергии в энергию сжатия и движения исходного вещества или продуктов его превращения и окружающей среды. Таким образом, крайне быстрое появление или проявление действия давления представляет собой основной характерный признак взрыва и выброса газа.

Учитывая этот признак, необходимо установить природу появления в призабойной части угольного пласта давления газа и провести аналогию со взрывом.

Открытие проф. В.И. Николиным с сотрудниками явления склонности пород к деформациям генетического возврата дало возможность рассматривать неравновесные процессы физико-химических превращений в угле [3]. Их суть 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 их переход 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 –  $\Delta U$  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 согласно первому закону термодинамики,  $\Delta U = Q_V$ , где  $Q_V$  – удельная теплота реакции перестройки угольного вещества. Изменение внутренней энергии угольного вещества в результате механохимической реакции равно теплоте реакции его разложения:

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

где  $n_i$  – количество молей  $i$ -го продукта реакции;

$q_i$  – удельная теплота образования  $i$ -го моля реакции;

$Q_{обр}$  – теплота образования угля.

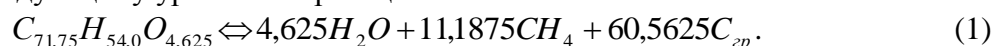
Теплоту образования можно рассчитать по элементному составу угля:

$$Q_{обр} = Q_{нг} - Q_{сг},$$

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

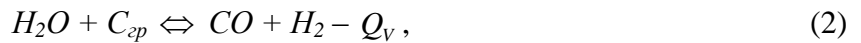
$Q_{сг}$  – калориметрическая теплота сгорания угля в зависимости от состава.

Начальное состояние макромолекулы угля определено его составом, химическим строением и энергией образования. 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  $\ell_1$  шахты им. А.Ф. Засядько, приводящего к генерации углеводородов по следующему уравнению реакции:



Теплота образования угля марки Ж пласта  $\ell_1$  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

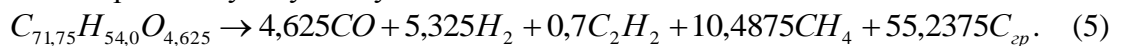
преодоление сдвиговой прочности вещества и инициирование обратных реакций, пытающихся привести систему в равновесное состояние. Условие равновесия системы определено минимумом энергии, при котором  $dU = 0$ . Однако разложившийся уголь не может быть снова превращен в исходное вещество из графита ( $C_{гр}$ ), 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 и перестройку структуры вещества. 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  $\sum_{i=1}^i n_i q_i = Q_{обp}$ . 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 и меняет структуру. При этом само вещество превращается в наноразмерные углеродные системы, образующие нанографеновые и нанографитовые структуры и газообразные продукты внедрения. Углеродные атомы, соединенные одинарными и двойными связями, образуют каркасы из шестиугольников или пятиугольников, которые являются основой углеродных систем. Известны фуллерены, нанотрубки, наноторы, представляющие аллотропные формы углерода. Основой их является нанографен. Стопка из нескольких плоских графенов образует графит. Нанографены образуют многогранники, состоящие из шестиугольников и пятиугольников в форме футбольного мяча – фуллерены. Внутри них имеется межплоскостное пространство, в котором может находиться молекула включения. Подобные соединения называются клатраты. В природе известны метановые клатраты (гидраты метана), которые устойчивы при высоких давлениях среды. Графиты образуют соединения внедрения – интеркалаты. Поэтому, учитывая то, что при разложении угольного вещества образуется большое количество газообразных продуктов реакции, можно предположить образование соединений внедренного газа в полости кристаллического каркаса, образованного нанографенами и нанографитами (рис. 1). Эти соединения устойчивы при высоких давлениях внешней среды и крайне не устойчивы при атмосферном давлении. Состоят такие углеродные системы из конденсированной фазы (66%) в виде наночастиц углерода, образующих клатратную структуру соединения внедренного графита, и газообразных продуктов разложения угля (34%) и находятся в метастабильном состоянии. Длительность устойчивого состояния метанового клатрата зависит от давления внешней среды и предела прочности угольного вещества, в котором образуются газовые клатраты. Равновесие в та-

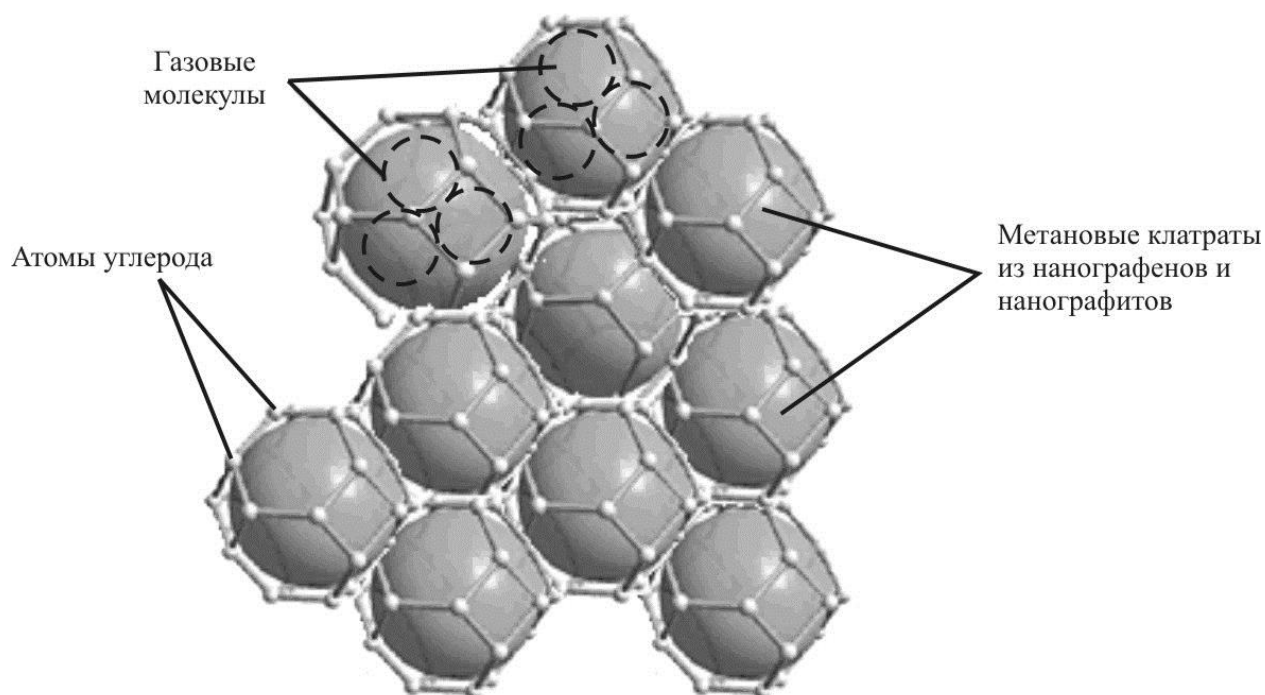
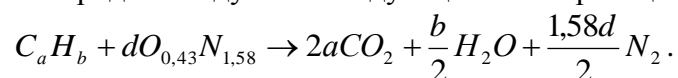


Рис. 1. Макромолекула угля в метастабильном состоянии

кой системе нарушается, как только внутреннее давление газов клатрата превышает внешнее давление и предел прочности среды. При этом газы покидают полости через нарушенные слои каркаса углеродной структуры. При разрушении и газодинамическом преобразовании угля в краевой части пласта происходит разложение газовых клатратов, образованная газовая смесь попадает в атмосферу выработки и образует взрывоопасную среду. Например, в состав газообразных продуктов предполагаемой реакции механохимического разложения угля (5) для пласта  $\ell_1$  входят 3,31% ацетилена, 25,2% водорода, 21,87% оксида углерода и 49,62% метана. Определить взрывоопасность данной газовой или газовой смеси можно путем оценки ее концентрационных пределов воспламенения или детонации. Для решения этого вопроса были проанализированы известные экспериментальные данные работ [4,5], полученные при изучении детонации больших объемов газовой смеси в закрытых емкостях. В детонационной волне горючий газ реагирует с кислородом воздуха по следующей схеме реакции:



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

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

С его помощью рассчитывается стехиометрический коэффициент смеси –  $A_c$  на один моль газа:

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

В работе [6] установлены зависимости нижнего и верхнего концентрационного предела детонации газовой смеси от стехиометрического коэффициента смеси:

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

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:  $C_{ни} = 4,213\%$ ,  $C_{en} = 21,527\%$ . 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):  $C_{ни} = 8,45\%$ ,  $C_{en} = 42,244\%$ , 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 выделенной 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 становится равной, в первую очередь, значению верхнего предела взрываемости газа. Поэтому ясно, что чем выше этот предел и больше 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 для данного процесса параметры газодинамического потока и возможность образования ударных волн в выработке, приводящие к воспламенению образованной взрывоопасной среды.

На основании шахтных измерений продолжительности выбросов угля и газа И.В. Бобровым и В.И. Николиным 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. Для описания состояния газовых включений и определения внутреннего давления в нанографитной клатратной системе было использовано уравнение реального газа в вириальной форме [7]. Для реальных газов при высокой плотности это уравнение имеет следующий вид:

$$P_{\kappa} = NRT\rho_{\kappa}(1 - \varepsilon) \left( 1 + \frac{b_0}{V_y} + 0,625 \frac{b_0^2}{V_y^2} + 0,287 \frac{b_0^3}{V_y^3} + 0,193 \frac{b_0^4}{V_y^4} \right), \quad (9)$$

где  $N$  – количество молей газообразных продуктов реакции;

$R$  – газовая постоянная;

$T$  – абсолютная температура;

$\rho_{\kappa}$  – плотность газографитного клатрата;

$\varepsilon$  – относительная доля конденсированной фазы в клатрате;

$b_0$  – второй вириальный коэффициент для газа;

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

Оценка устойчивости газового клатрата в угольном веществе при разрушении угля представляет собой обобщенное условие:

$$P_{\kappa} - P_{\varepsilon} \leq [\sigma]_p, \quad (10)$$

где  $P_{\kappa}$  – внутреннее давление газа в клатрате;

$P_{\varepsilon}$  – горное давление;

$[\sigma]_p$  – предел прочности угля на разрыв.

По уравнению (9) можно определить внутреннее давление газа в клатрате. Так, если принять плотность метастабильного газографитного клатрата после перестройки макромолекулы угля  $\rho_{\kappa} = 1075 \text{ кг/м}^3$ , а абсолютную температуру угольного вещества  $T = 300^{\circ} \text{ К}$  при  $\varepsilon = 0,66$  [8], то остальные величины могут быть получены, исходя из уравнения (5) и данных термодинамических свойств газов [9]. Для расчета принято:

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

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

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

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

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

Подставляя все значения в уравнение (9), получаем внутреннее давление газа в клатрате:

$$P_{\kappa} = 3,3481 \cdot 10^7 \text{ Па.}$$

Согласно условию (10), если происходит разгрузка пласта, горное давление снижается и становится равным нулю, тогда при выполнении условия  $P_{\kappa} \geq [\sigma]_p$  процесс разрушения газового клатрата в угольном веществе не обратим. В этом случае сплошность угольной среды нарушается и образуется газоугольный поток, движущийся в направлении свободного объема выработки. Плотность этого потока –  $\rho_n$  для адиабатического процесса истечения газа может быть определена по формуле:

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

где  $\gamma_n$  – показатель адиабаты для смешанного газоугольного потока, определяемый по формуле:  $\gamma_n = 0,66\gamma_{\text{ep}} + 0,34\gamma_{\Gamma}$ ;  $\gamma_n = 0,66 \cdot 1,05 + 0,34 \cdot 1,342 = 1,15$ .

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 газоугольного 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 скорость газоугольного потока –  $u_n$  можно установить из уравнения:

$$u_n = \frac{10000}{S_{\text{нл}} \rho_n}, \text{ м/с,}$$

где  $S_{\text{нл}}$  – критическое сечение угольного пласта, через которое истекает газоугольный поток:  $S_{\text{нл}} = 0,5 B m_{\text{нл}}$ ,  $B$  – ширина выработки по почве пласта, м;  $m_{\text{нл}}$  – средняя

мощность пласта, м.

Для пластов средней мощности, равной 1,5 м, можно принять:  $S_{пл} = 4,0 \text{ м}^2$ . 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:

$$V_{зв} = S_{вч} u_n = 887,92 \text{ м}^3,$$

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

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:

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

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 [10]. Тогда оказывается, что

$$du = -\sqrt{-dP dV}.$$

Для идеального газа в работе [10] получено решение этого уравнения:

$$u_z = u_0 + \frac{2}{\gamma_z - 1} (C - C_0), \quad (11)$$

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

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 (11) находим скорость расширения газа:  $u_z = 708,1 \text{ м/с}$ .

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:

$$P_{ув} = \frac{\gamma_g + 1}{2} \rho_g u_z^2 = \frac{1,4 + 1}{2} \cdot 1,253 \cdot 708,1^2 = 7,54 \cdot 10^5 \text{ Па},$$

где  $\gamma_g$ ,  $\rho_g$  – показатель адиабаты и плотность шахтного воздуха соответственно.

Скорость ударной волны в воздухе определяется по формуле:

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

а температура ударного сжатия газа во фронте ударной волны равна:

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

Результаты аналитических исследований показали, что выброс угля и газа имеет взрывоподобный характер, аналогичный взрыву, в результате которого в выработке образуется мощная ударная волна с параметрами, которые могут быть достаточными для воспламенения взрывоопасной среды. Для подтверждения этого вывода были проведены специальные исследования, которые моделировали условия взрыва и образования ударных волн с

различными параметрами. По методике, предложенной проф. Н.Р. Шевцовым, заряд ВВ отделялся воздушной оболочкой от взрывоопасной МВС, находящейся в опытном штреке. Размеры воздушной оболочки подбирали таким образом, чтобы в одном случае через нее не передавалась детонация от ВВ и не происходили воспламенения МВС, а в другом – смесь воспламенялась хотя бы в одном опыте из десяти. Параметры ударных волн в воздухе в момент их входа в МВС определяли по известной формуле М.А. Садовского и эмпирическим зависимостям, полученным в работе [11]. В качестве воспламеняющих МВС зарядов использовали заряды литого и прессованного тротила, а также патронированные ВВ II класса – аммонит 6ЖВ и детонит 10А. Результаты этих опытов приведены в табл.1.

Таблица 1. – Критические параметры воздушных оболочек заряда ВВ и ударных волн в них при воспламенении МВС

ВВ	Приведенный радиус заряда ВВ, $r_3$ , м	Критический радиус оболочки, $R$ , м	$\frac{R}{r_3}$	Начальные параметры ударной волны в воздухе		Критические параметры ударной волны, воспламеняющей МВС	
				давление, $\Delta P_\phi$ , Па	скорость истечения ПД, $W_n$ , м/с	давление, $\Delta P_\phi$ , Па	скорость, $D_u$ , м/с
1	2	3	4	5	6	7	8
Тротил	0,03581	1,3	36,303	$7,5946 \cdot 10^7$	7024,9	$5,343 \cdot 10^5$	805,7
Аммонит 6ЖВ	0,03581	0,65	18,151	$6,9044 \cdot 10^7$	7851,3	$1,264 \cdot 10^6$	1153,8
-//-	0,0451	0,88	19,512	-//-	-//-	$1,1442 \cdot 10^6$	1103,4
-//-	0,0516	1,05	20,3488	-//-	-//-	$1,08 \cdot 10^6$	1076,0
Детонит 10А	0,0343	0,78	22,7405	$8,293 \cdot 10^7$	7968,3	$1,1126 \cdot 10^6$	1090,0
-//-	0,04315	0,95	22,016	-//-	-//-	$1,163 \cdot 10^6$	1111,5
-//-	0,05435	1,2	22,079	$8,293 \cdot 10^7$	7968,3	$1,159 \cdot 10^6$	1109,5

Выбор ВВ для экспериментов был сделан, исходя из следующих соображений. Известно, что тротил имеет резко отрицательный кислородный баланс. Поэтому при детонации заряда в продуктах взрыва образовывается большое количество продуктов неполного окисления химических элементов, входящих в состав ВВ. Экспериментально было установлено, что при взрыве открытого заряда тротила в его продуктах взрыва образуется большое количество оксида углерода, водорода, метана и присутствует небольшое количество ацетилена и цианистого водорода. Таким образом, газообразные продукты взрыва тротила близки по своему составу газообразным продуктам разложения угольного вещества при выбросе. Это позволяет смоделировать условия воспламенения взрывоопасной среды при выбросе в результате действия ударных волн в горной выработке. Для определения критических параметров ударных волн, вызывающих воспламенение взрывоопасной среды, содержащей водород и ацетилен, необходимо было установить влияние этих газов на данные параметры. В этом случае для воспламенения МВС использовали заряды ВВ II класса, которые имеют нулевой кислородный баланс и сбалансированы по кислороду. В продуктах взрыва этих ВВ нет ацетилена и содержание водорода не большое.

Результаты исследований показали существенные отличия параметров ударных волн, необходимых для воспламенения взрывоопасной среды, от состава продуктов взрыва ВВ. Так, критические параметры ударных волн, вызывающие воспламенение МВС при взрыве зарядов аммонита 6ЖВ и детонита 10А, отличаются не значительно в пределах ошибки измерений. Эти ВВ существенно отличаются между собой по удельной теплоте взрыва и температуре продуктов взрыва, тем не менее, критические параметры ударных волн в эксперименте практически равны, то есть продукты взрыва данных ВВ не оказывают влияние на процесс воспламенение МВС ударной волной. Иные результаты получены при



взрывании зарядов тротила. Для условий воспламенения взрывоопасной среды ударными волнами, образованными взрывом тротила, критические параметры ударной волны существенно изменились, их значения уменьшились по сравнению с условиями взрывания зарядов аммонита и детонита. Это указывает на то, что присутствие водорода и ацетилена за фронтом ударной волны существенно влияет на ее воспламеняющие параметры. Когда за фронтом ударной волны отсутствует водород и ацетилен, то воспламенение МВС может произойти, если температура в ударном фронте более  $775,3 \text{ }^{\circ}\text{K}$ , тогда как в случае присутствия этих газов температура воспламенения резко снижается до  $559,6 \text{ }^{\circ}\text{K}$ . Это указывает на то, что реакция окисления метана ускоряется, а период индукции взрывоопасной среды снижается за счет попадания в смесь атомов водорода и радикалов, образующихся при разложении ацетилена.

Необходимо обратить внимание на особую опасность и отраженных ударных волн. Наличие в горной выработке горношахтного оборудования и крепи приводит к отражению от них ударной волны, в результате чего в отраженных ударных волнах давление и температура возрастают. Согласно работе [12] установлено, что в случае сильной падающей волны давление во фронте отраженной можно определить по формуле:

$$\frac{P_{\text{отп}}}{P_{\text{ув}}} = \frac{3\gamma_{\text{с}} - 1}{\gamma_{\text{с}} - 1},$$

где  $P_{\text{отп}}$ ,  $P_{\text{ув}}$  – давление в отраженной и падающей ударных волнах соответственно.

В реальных условиях фронт падающей ударной волны образует некоторый угол  $\alpha$  с поверхностью стенки выработки. При отражении от жесткой стенки падающей под углом ударной волны давление воздуха в отраженной волне можно определить по уравнению:

$$P_{\text{отп}} = 2P_{\text{ув}} + \frac{\gamma + 1}{2} \rho_{\text{с}} u_{\text{ув}}^2 \cos^2 \alpha,$$

а температуру за отраженной ударной волной по формуле:

$$\frac{T_{\text{отп}}}{T_{\text{у}}} = \left( \frac{P_{\text{отп}}}{P_{\text{ув}}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}.$$

Расчет параметров отраженных ударных волн в горной выработке по приведенным формулам показывает, что давление воздуха за фронтом волны может возрасти в 8 раз, а температура – почти в 2 раза. Это указывает на то, что условия воспламенения взрывоопасной среды ударными волнами в выработках существенно «облегчаются» по сравнению с условиями действия взрыва в безграничной среде. В целом, полученные результаты позволяют объяснить причины катастроф на угольных шахтах и наметить действенные меры по борьбе со взрывами. Результаты расчетов хорошо согласуются и с данными измерений при выбросах угля и газа на экспериментальном участке пласта Дерезовка шахты «Красный Профинтерн», проведенных почти 50 лет назад И.В. Бобровым [13]. Было установлено, что скорость выброса угля у груди забоя составила  $38,4 \dots 50,0 \text{ м/с}$ , а скорость движения газового потока в выработке –  $416 \dots 500 \text{ м/с}$ , 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.

## **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, ацетилена и метилена, способные к разложению в виде газодинамического взрыва.

2. При газодинамическом взрыве, параметры которого подобны обычному взрыву ВВ, в выработке образуются прямые и отраженные ударные волны с параметрами, достаточными для воспламенения взрывоопасной среды.

3. Наличие в газообразных продуктах выброса водорода, ацетилена и метилена существенно «облегчает» воспламенение взрывоопасной среды за фронтом ударной волны.

Дальнейшие исследования необходимо направить на изучение способов борьбы с ударными волнами и разработку средств активного подавления взрывной реакции в газовой среде путем ее ингибирования.

## **Список литературы**

1. Большинский М.И. Теория внезапных выбросов угля, пород и газа / Большинский М.И. – Донецк: ДонНТУ, 1993. – 139с.

2. Андреев К.К. Теория взрывчатых веществ / Андреев К.К., Беляев А.Ф. – М.: Оборонгиз, 1960. – 595с.

3. Снижение травматизма от проявлений горного давления / [Николин В.И., Подкопаев С.В., Агафонов А.В., Малеев Н.В.]. – Донецк: НОРД-ПРЕСС, 2005. – 327с.

4. Розловский А.И. Научные основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами / Розловский А.И. – М.: Химия, 1972. – 364с.

5. Балаганский И.А. Действие средств поражения и боеприпасов: учебник / Балаганский И.А., Мержиевский Л.А. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2004. – 408с.

6. 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).

7. Тейлор Дж. Детонация конденсированных взрывчатых веществ/ Тейлор Дж. – Оксфорд, 1952. – 259с.

8. 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.

9. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание: в 4 т./Л.В. Гурвич, И.В. Вейц и др. – М.: Наука, 1978. – 496с.

10. 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.

11. Адушкин В.В. О формировании ударной волны и разлете продуктов взрыва в воздухе / Адушкин В.В. – ПМТФ. - № 5, 1963. – С. 107-115.

12. Орленко Л.П. Физика взрыва и удара / Орленко Л.П. – М.: Физматлит, 2008. – 303с.

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