

ГАЗОДИНАМИЧНОСТЬ НЕСТАБИЛЬНОЙ ЗОНЫ ПЛАСТА, В КОТОРОЙ ПРОИСХОДЯТ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ УГОЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА И ГЕНЕРАЦИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ

Изучен вопрос образования взрывоопасной среды и механизм ее детонации в зонах метастабильного состояния на угольных пластах при самопроизвольном преобразовании угольных макромолекул под действием запредельных деформаций и генерации взрывоопасных углеводородов из угля.

The question of explosive environment formation and the mechanism of its detonation in the metastable state zone on the coal-bed under the spontaneous transformation of coal macromolecules under the influence of deformation exceeding the maximum value and generation of highly explosive hydrocarbons from coal were examined in the article.

Взрывобезопасность производственных процессов является неотъемлемой частью системы охраны и безопасности труда на технологических выемочных и подготовительных участках угольных шахт. Вместе с тем, технически неконтролируемое образование взрывоопасной смеси в горных выработках, и ее взрывы поставили под сомнение целесообразность подземной добычи угля на выбросоопасных пластах ценой жизни шахтеров. В 2007 году на шахтах России, Украины и Казахстана в результате взрывов метановоздушной смеси (МВС) произошли крупные катастрофы, при которых погибло 296 шахтеров. Крупнейший по масштабу взрыв после выброса угля и газа в выработки уничтожил в 2008 году шахту им. Карла Маркса в Донбассе.

Анализ последних исследований и публикаций, посвященных данной проблеме показал, что современная техника взрывобезопасности в угольных шахтах основывается на трех принципах предотвращения взрывов газопылевоздушных смесей.

Первый принцип заключается в невозможности образования взрывоопасной среды из-за интенсивной вентиляции горных выработок и борьбы с пылеобразованием. Второй – в предотвращении возникновения источников, способных инициировать взрыв образовавшейся взрывоопасной среды, и третий – в создании взрывозащиты, при которой возможный очаг горения или взрыва будет ликвидирован. Однако масштабные катастрофы в угольных шахтах в результате взрывов МВС показали несовершенство существующей концепции обеспечения взрывобезопасности горных работ на выбросоопасных угольных пластах и потребовали фундаментальных исследований для ее усовершенствования. Более того, горная наука в решении проблемы борьбы с взрывами метана и угольной пыли на больших глубинах выбросоопасных пластов зашла в тупик. В этом вопросе остается неопределенным механизм газодинамических явлений, генерации углеводородов угольным веществом, образование и самовоспламенение взрывоопасной среды в горных выработках, что делает невозможным решение проблемы взрывобезопасности угольных шахт. Поэтому решение данной проблемы имеет важное научное и практическое значение для обеспечения охраны труда и техники безопасности в угольных шахтах.

Целью данной статьи является исследование процесса самопроизвольного преобразования угольного вещества при его деформации в зонах напряженного состояния пласта и генерации им углеводородов при газодинамических явлениях приводящих к образованию и взрывам МВС.

В данных исследованиях уголь рассматривается как сложная органическая смесь химических соединений, которая претерпела множество фаз биохимических и геохимических превращений. И если на биохимических фазах превращения растительного материала в смесь химических веществ, называемую каменным углем, оказывали влияние анаэробные микроорганизмы, то на геохимических – температура (Т), давление (Р) и время (t). С момента начала разработки угольных месторождений в результате механического воздействия на угольные пласты возникли различные факторы тектонической активности, проявляющиеся в изменении горного давления в сочетании с деформацией сдвига пород. Имеющиеся данные свидетельствуют о генетической связи сдвиговой тектоники с прочностью пород и расположением в горном массиве зон и участков с повышенной концентрацией энергии. В этих зонах начинают протекать деструктивные процессы, связанные с движением дислокаций и структурных дефектов в кристаллическом веществе, что приводит к химическим превращениям в нем. 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 активации угольного вещества, разрыве в нем различных химических связей и его диссоциации. При этом угольное вещество освобождается от избыточной энергии, связанной с движением дислокаций при деформации его структуры, путем разрыва химических связей и его самопроизвольного разрушения. Скорость такого процесса определяется его движущей силой – развитием деформации генетического возврата и сопротивлением – прочностью вещества на разрыв.

Пусть G – функция, описывающая свойства системы при деформации генетического возврата. Она определяется уравнением состояния системы:

$$\varphi(P, V, T, t) = 0. \quad (1)$$

Тогда

$$G = \varphi(P, V, T, t). \quad (2)$$

Изменение функции G при изменении состояния системы – давления (Р), объема (V), температуры (Т) и времени (t) задается следующим уравнением:

$$dG = \left(\frac{\partial G}{\partial P} \right)_{V, T, t} dP + \left(\frac{\partial G}{\partial V} \right)_{P, T, t} dV + \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_{P, V, t} dT + \left(\frac{\partial G}{\partial t} \right)_{P, V, T} dt. \quad (3)$$

Конечным результатом любого самопроизвольного процесса является состояние равновесия, при котором силы уравновешены и не имеют дальнейшего стремления к изменению, то есть, нет движущей силы. В этом случае $dG = 0$.

При неравновесной деформации генетического возврата время процесса ограничено временем долговечности горной породы: $t = \tau_0$. В этом случае неравновесное состояние системы полностью зависит от двух независимых переменных:

$$\left. \begin{aligned} P &= \varphi(V, T) \leq [\sigma]_{кр} \\ T &= \varphi(P, V) \leq T_{кр} \\ V &= \varphi(P, T) \leq V_{кр} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

и долговечности вещества [3]:

$$\tau_o = \tau_o \exp \left[\frac{E_o - V_y [\sigma] \cdot N_A}{kT} \right], \quad (5)$$

где τ_o - частота колебаний атомов кристаллической решетки твердого тела,

$$\tau_o = 10^{-13} \text{ с.};$$

k – постоянная Больцмана, $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

V_y – удельный объем единицы массы вещества, м³/кг;

N_A – количество молекул в единице массы вещества, кг/моль;

E_o – энергия связи между атомами в кристаллической решетке вещества, Дж/кг;

$[\sigma]$ – величина напряжений, возникающих при деформации твердого тела, Па.

Уравнения (4) и (5) характеризуют метастабильность твердого тела при деформации через критические параметры его состояния $V_{кр}, T_{кр}, [\sigma]_{кр}$ и долговечность. Существует и термодинамическое объяснение метастабильности вещества или системы из простых химических соединений. Механохимический разрыв связей в кристаллах вещества при их деформации приводит к возрастанию внутренней энергии вещества – U . Экстенсивные и интенсивные свойства термодинамической системы связывают химический потенциал μ_i , усиливающий свойства системы, с внутренней энергией и изобарным потенциалом – Z (свойства, связанные с количественными изменениями в системе):

$$\mu_i = \left(\frac{\partial U}{\partial N_i} \right)_{S, V, N_A} = \left(\frac{\partial Z}{\partial N_i} \right)_{P, T, N_A}. \quad (6)$$

Изменение параметров состояния системы приводит к изменению химического – $\Delta\mu_i$ и изобарного – ΔZ потенциалов. При этом система переходит в новое состояние, определяемое константой равновесия – K_p и температурой:

$$\Delta Z = \Delta\mu_i = -RT \ln K_p. \quad (7)$$

Уравнение (7) показывает, что чем больше температура и константа, характеризующие протекание реакции в системе, тем больше метастабильность системы ($\Delta Z \ll 0$).

Таким образом, установлено, что при механохимических изменениях состоящей из химических соединений системы, связанных с ее деформацией и изменением внутренней энергии, происходит переход этой системы в метастабильное состояние, имеющее склонность к самопроизвольному преобразованию и разрушению.

Уголь является сложным химическим органическим соединением. Поэтому при многообразии объемного приложения нагрузки на пласт и различных деформаций, приводящих к изменению его состава, возникают неконтролируемые зоны метастабильного состояния системы, состоящей из угольного вещества различной степени метаморфизма способного генерировать углеводороды, характеризующиеся спонтанным саморазложением. Оценку структурным изменениям угольного вещества и характеристику его метастабильного состояния дадим на основе данных по его элементному составу [4] (табл.1).

Будем считать, что изменение структуры и свойств угля характеризуется величиной его деформации, а метастабильное состояние зависит от исходной степени метаморфизма угля. Структурные перестройки в макромолекуле угольного вещества развиваются под действием деформации генетического возврата, возникающего с изменением напряженного состояния вещества и превращающегося в движущуюся силу этого

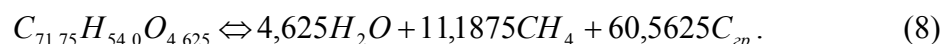
процесса. Под его действием в угле возникают механохимические превращения, связанные с разрывом химических связей в макромолекуле вещества и образованием но-

Таблица 1 - Характеристика угольного вещества

Марка угля, шахта, пласт	Технический анализ, %				Элементный анализ, %			Брутто-формула, атом на 1 кг макромолекулы угля		
	W _a	A _d	S _{dt}	V _{daf}	C _{daf}	H _{daf}	(O+N) _{daf}	C	H	O
Б, ш. Ново- миргород- ская	42,0	11,9	2,9	63,2	65,4	6,1	28,5	54,5	61,0	17,8125
Д, ш. Кура- ховская, ℓ ₄	1,9	8,6	5,6	43,0	79,0	5,2	13,0	65,833	52,0	8,125
Г, ш. Лиди- евка, ℓ ₃	1,6	0,4	2,3	38,0	82,2	5,4	10,9	68,5	54,0	6,8125
Ж, ш. За- сядько, ℓ ₁	-	7,2	1,1	32,7	86,1	5,4	7,4	71,75	54,0	4,625
К, ш. Бато- ва, к ₈	-	6,0	3,0	22,4	88,6	4,8	3,6	73,833	48,0	2,25
ОС, ш. Яси- новская- Глубокая, ℓ ₆	-	9,0	1,7	21,0	88,9	4,5	4,8	74,083	45,0	3,0
А, ш. Про- гресс, h ₈	-	7,3	1,5	4,2	93,7	1,9	2,9	78,083	19,0	1,812

вых связей. При этом происходит изменение внутренней энергии угольного вещества – ΔU во время его перехода из одного состояния в другое. Так как этот процесс происходит в угольном пласте, то изменением объема зоны, охваченной этими структурными перестройками вещества можно пренебречь, то есть $dV = 0$, а $\Delta U = Q_V$ согласно первому закону термодинамики, где Q_V – удельная теплота реакции перестройки угольного вещества.

Рассмотрим протекание физико-химического процесса механохимической перестройки макромолекулы угля марки Ж пласта ℓ₁ шахты им. А.Ф. Засядько, приводящему к газодинамическому явлению. Начальное состояние макромолекулы угля определено его 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. В этом случае для предельного изменения структуры макромолекулы угля при генерации углеводородов можно записать следующее уравнение реакции его разложения:



Изменение внутренней энергии системы в результате реакции (8) равно теплоте реакции:

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

где n_i – количество молей i -го продукта реакции;

q_i – удельная теплота образования i -го моля реакции.

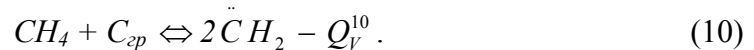
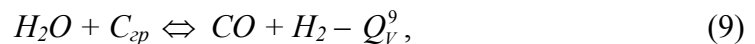
По элементному составу угля можно рассчитать его теплоту образования:

$$Q_{обр} = Q_{н.з.} - Q_{сз},$$

где $Q_{н.з.}$ – теплота образования продуктов сгорания угля;

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

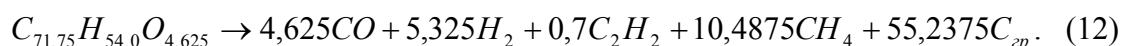
Теплота образования угля марки Ж пласта ℓ_1 равна: $Q_{обр} = 802,4$ кДж/кг. Удельная теплота, которая выделяется в результате реакции (8), равна: $Q_V = 1153,54$ кДж/кг, а температура продуктов реакции $T_{пр} = 662,3^0 K$. В связи с замкнутостью системы, в которой происходят механохимические изменения в угольном веществе ($dV = 0$), энергия реакции расходуется на преодоление сопротивления вещества его сдвиговой прочности и инициирование обратных реакций, пытающихся привести систему в равновесное состояние. Условие равновесия системы определено минимумом энергии, при котором $dU = 0$ или $Q_{обр} = \sum_{i=1}^i n_i q_i$. Однако при самопроизвольном преобразовании 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. В этом случае 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 (9) и (10) идут с поглощением тепла, тем самым стабилизируют зоны с избыточной энергией. По реакции (10) в этих зонах накапливается метилен – активный радикал двухвалентного углерода, который превращается в более устойчивый, но крайне взрывчатый ацетилен:



С учетом реакций (9), (10) и (11) для условия «ложного» равновесия в системе уравнение разложения угля, подверженного структурным перестройкам и саморазрушению вещества можно подобрать. Так, если выполняется условие $dU = 0$, то $Q_V = 0$ или $\sum_{i=1}^i n_i q_i = Q_{обр}$. Тогда уравнение (8) при разложении макромолекулы угля в зоне его метастабильного состояния примет вид:



Уравнение (12) позволяет предполагать, что система из угольного вещества, генерирующего углеводороды в зонах ее метастабильного состояния, содержит 66% конденсированной фазы в виде наночастиц графитизированного углерода образующих клатратную структуру соединения внедренного графита и 34% газообразных продуктов разложения (технический анализ дает выход летучих около 33%). В состав газооб-

разных продуктов реакции саморазрушения угля 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 газового клатрата, образованная газовая смесь попадает в атмосферу выработки и образует взрывоопасную среду. Определить взрывоопасность данной газовой или газоздушнoй смеси можно путем оценки ее концентрационных пределов воспламенения или детонации. При этом в работах [5, 6] одни ученые считают, что при детонации концентрационные пределы у взрывоопасной смеси сужаются по сравнению с горением, а другие, наоборот, рассматривают процесс детонации как наиболее опасный, способный реализоваться в более широких концентрационных пределах горючего в воздухе. Тем не менее, несмотря на то, что в угольных шахтах сравнительно часто происходят взрывы взрывоопасной среды, пределы детонации метана и его смесей с другими горючими газами и воздухом исследованы не достаточно. Для практических целей при оценке взрывоопасности технологического процесса добычи угля пределы воспламенения МВС приравнивают к пределам детонации. Этот подход вызывает сомнение и может быть абсолютно неприемлем для смесей горючих газов, подобных смеси продуктов реакции при разложении угольного вещества в метастабильных зонах. Для решения этого вопроса были проанализированы известные экспериментальные данные работ [5, 6], полученные при изучении детонации больших объемов газоздушных смесей в закрытых емкостях. Данные этих работ представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Концентрационные пределы детонации различных газоздушных смесей

Горючий газ	Химическая формула	Кол-во кислорода воздуха для окисления, d_v , атом	Теплота образования, $Q_{обр}$, кДж/кг	Теплота сгорания, $Q_{сг}$, кДж/кг	Пределы детонации, %		Стехиометрический коэффициент смеси, A_c
					нижний ($C_{н.п}$)	верхний ($C_{в.п}$)	
Ацетилен	C_2H_2	11,628	-8721,08	48319,19	2,1-2,5	~100,0	0,0792
Бензин (пары)	$(C_{1,025}H_2)_n$	7,09	-	42603,32	~5,6	>9,4	0,1236
Бутан	C_4H_{10}	30,233	2175,0	45847,945	1,98	6,18	0,0302
Водород	H_2	2,326	0,0	121038,19	15,0	63,5	0,300
Пропан	C_3H_8	23,256	2360,16	46492,50	2,57	7,37	0,0412
Пропилен	C_3H_6	20,93	-486,05	45901,31	3,55	10,4	0,0456
Этан	C_2H_6	16,279	2822,23	47634,56	2,87	12,2	0,0576
Этилен	C_2H_4	13,953	-1867,25	47282,51	3,32	14,7	0,0669
Бензол (пары)	C_6H_6	34,884	-1063,17	40661,28	1,6	5,55	0,0279
Оксид углерода	CO	2,326 (воздух) 1,0 (кислород)	4251,15	-	- ~38,0 (кислород)	- ~90,0 (кислород)	0,30 (воздух) 0,50 (кислород)
Метан (расчет)	CH_4	9,302	4678,75	50186,63	4,213	21,527	0,09707

Экспериментальные данные, приведенные в табл. 2, были подвергнуты корреляционному анализу. Он позволил установить зависимость нижнего и верхнего концентрационных пределов детонации газовоздушных смесей от величины стехиометрического коэффициента смеси – A_c , характеризующего их удельную теплоту взрыва и энергию детонации:

$$A_c = \frac{1}{1 + d_e}. \quad (13)$$

Для нижнего концентрационного предела детонации получена такая эмпирическая зависимость:

$$C_{н.н.} = 1,37345 + 21,5005 (A_c) + 79,877 (A_c)^2, \% \quad (14)$$

среднеквадратичное отклонение $/S/ = 0,66$, коэффициент корреляции $/r/ = 0,99$; для верхнего концентрационного предела:

$$C_{в.н.} = -1,61733 + 248,6746 (A_c) - 105,372 (A_c)^2, \% \quad (15)$$

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

С помощью зависимостей (14) и (15) были определены концентрационные пределы детонации МВС: $C_{н.н.} = 4,213 \pm 0,508\%$, $C_{в.н.} = 21,527 \pm 0,678\%$. Была также сделана оценка взрывоопасности газообразной смеси продуктов реакции, полученных при разложении угольного вещества в метастабильных зонах пласта. Отличительной особенностью этой смеси является то, что она содержит крайне взрывчатый ацетилен. Ацетилен $H - C \equiv C - H$ – это одно из самых мощных взрывчатых веществ (ВВ), по удельной энергии взрыва и способности к детонации он превосходит печально известный нитроглицерин. Ацетилен крайне нестабилен и детонирует при сравнительно невысоких температуре (около $330^{\circ}C$) и давлении (0,2 МПа), для его взрывчатого разложения не нужно кислорода воздуха. Поэтому взрывчатость и способность к детонации исходной газообразной смеси, содержащей ацетилен, в зоне саморазложения угольного вещества определяется только концентрацией ацетилена. Нижний концентрационный предел взрывчатости газовых смесей, содержащих ацетилен равен 2,1%. При более высоких концентрациях ацетилена в газовых смесях они могут детонировать только за счет его детонационного распада. Приведенная в данной работе равновесная смесь газообразных продуктов разложения угля марки Ж пласта ℓ_1 содержит 3,31% ацетилена, что больше 2,1%. Поэтому эту смесь можно отнести к взрывчатой, способной к детонации. Более того, столь высокое содержание ацетилена в клатратной системе, состоящей из графитизированного угольного вещества и газообразных продуктов распада угля, делает ее взрывчатой и способной к детонации в зонах самого пласта. Если принять укладку частичек графита в клатратных зонах как объемно-центрированную структуру с коэффициентом укладки $K = 0,7163$, то получим плотность массы вещества в зоне метастабильного состояния угля $\rho_{см} \approx 1075 \text{ кг/м}^3$. Для порошкообразных конденсированных взрывчатых систем, имеющих плотность патронирования 1050-1150 кг/м^3 , показатель политропы при детонации – n приблизительно равен 2. Если предположить, что показатель политропы для образовавшегося углеводородного газографитового клатрата при плотности 1075 кг/м^3 имеет то же значение, а энергия разложения ацетилена как сенсibilизатора взрывного процесса в этой системе равна $Q_v = 158690 \text{ Дж/кг}$, то скорость движения детонационной волны при разложении элементов образующих клатрат можно определить по формуле:

$$D = (1 - \varepsilon)^{0,5} \cdot \sqrt{2Q_v (n^2 - 1)} \approx 567 \text{ м/с},$$

где ε – удельное содержание в клатратной системе частичек графитоподобного углерода, $\varepsilon = 0,66285$.

Таким образом доказано, что метастабильная клатратная система в зоне самопроизвольного преобразования угля и генерации им углеводородов способна к детонационному распаду с низкой скоростью. В работе [7] определены критические условия воспламенения и детонации МВС при инициировании ее взрывом заряда ВВ. Критический заряд ВВ или любой другой конденсированной системы, способной к детонации, может вызвать взрыв МВС, если его масса больше массы предельного заряда, то есть:

$$M_{кр} \geq m_{пр} = \frac{1,18942114 \cdot 10^{16}}{\rho_{ВВ}^{0,5015} \cdot D^{4,5045}} = \frac{1,18942114 \cdot 10^{16}}{(1075)^{0,5015} \cdot (567)^{4,5045}} \approx 142 \text{ кг.}$$

Получен результат, который показывает, что в краевой части угольного пласта метастабильная система из угольного вещества и газа ацетилена может взорваться в этой зоне, если давление газов достигнет 0,2 МПа. Взрывной импульс такого газодинамического потока из продуктов взрыва этой системы будет способен вызвать выброс угля или воспламенение МВС. Так, если этим процессом будет охвачена зона с общей массой угля более 142 кг, то воспламенение МВС произойдет по ударному механизму волной сжатия.

Не менее опасными являются смеси генерируемых углем при его разложении углеводородов с воздухом. Их смешение с воздухом снижает концентрацию ацетилена в смеси, однако за счет того, что содержание водорода и окиси углерода в смеси велико, газозвдушная смесь имеет очень высокий верхний концентрационный предел детонации. По правилу Ле Шателье и данным табл. 2 можно определить верхний концентрационный предел детонации для данной газозвдушной смеси, он оказался равным $C_{в.п.} = 32,3\%$. Такие смеси могут быть образованы в скважинах при дегазации угольных пластов и выработанного пространства. Их взрывчатость ставит под сомнение безопасность процесса дегазации на угольных шахтах.

Приведенные результаты исследований позволяют сделать следующие выводы и наметить перспективные способы борьбы с взрывами газозвдушной среды на выбро-соопасных пластах.

Выводы

1. Неравновесные физико-химические процессы в угольном веществе, инициируемые напряженным состоянием и деформациями генетического возврата, приводят к образованию метастабильных клатратных зон в угольных пластах, содержащих генерируемые углем крайне опасные взрывчатые газовые смеси из водорода, метана, окиси углерода, ацетилена, метилена.

2. Взрывоопасность и способность к детонации таких газовых смесей определяется содержанием в них ацетилена и метилена. Они способны детонировать как в газовой, так и в конденсированной фазе при установке жесткой структуры двухфазной среды из газа и частиц графита или углерода в метастабильных зонах угольных пластов.

3. Взрыв этих смесей, как самопроизвольно в газовой фазе, так и в краевой части угольного пласта способен воспламенить взрывоопасную среду в забое, при газодинамическом явлении и микровыбросе сравнительно небольшой силы воспламенение МВС происходит по ударному механизму волной сжатия.

4. Верхний концентрационный предел детонации газовой смеси генерируемой при самопроизвольном преобразовании угольного вещества очень высок и составляет около 33%, что ставит под сомнение безопасность проведения дегазации выработанного пространства на выемочных участках угольных шахт.

Дальнейшие исследования необходимо проводить в направлении разработки способов обнаружения в пласте метастабильных зон, в которых происходит самопроизвольное преобразование угольного вещества в газографитные клатраты и борьбы с образованием в них газов ацетилена и метилена.

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. – Макеевка-Донбасс: МАКНИИ, 2007. – (Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах). (Сб. научн. трудов; вып.20).
3. Успехи физических наук: материалы конференции по механическим свойствам неметаллов / УФН.- т. LXVII. – вып. 1, 1959. – С. 177-184.
4. Шевкопляс В.Н Оценка структурных и технологических характеристик углей по данным дериватографии и пиролиза / Шевкопляс В.Н., Лящук С.Н., Бутузова Л.Ф. – (Химия твердого топлива, № 5), 2004. - С. 68-75.
5. Розловский А.И. Научные основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами / Розловский А.И. – М.: Химия, 1972. – 364с.
6. Балаганский И.А. Действие средств поражения и боеприпасов: учебник / Балаганский И.А., Мержиевский Л.А. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2004. – 408с.
7. Калякин С.А. Критические условия инициирования взрыва метановоздушной смеси открытым зарядом взрывчатого вещества / Калякин С.А. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2007. – С. 170-181. (Взрывное дело. Вып. № 97/54).