УДК 622.235: 622.281.4

Л.И. Гречихин, Н.Г.Куць
Минский государственный высший авиационный колледж, г. Минск, Беларусь,
Луцкий национальный технический университет, г. Луцк, Украина
Тел. моб. 0660821228; E-mail: Kuts_n@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ И УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

Показано, что в ряде случаев, при низких температурах, молекулы кислорода, азота и азота с кислородом в большом количестве пребывают в виде кластеров. Поэтому в угольных шахтах атмосфера насыщена такими кластерами. В зимних условиях возникают взрывы, вызванные проведением взрывных работ и искрением. При наличии в угольной шахте частиц пыли, окутанной жидким кислородом, в нормальных условиях происходит самовозгорание со взрывом вблизи вентиляционного канала и этот локальный взрыв инициирует мощный взрыв метано-воздушной смеси во всем объеме шахты.
Ключевые слова: *метано-воздушная смесь, кластеры, шахта, самовозгорание, угольная пыль, метан, жидкий кислород.*

Введение. Работа оборудования угольных шахт сопряжена с опасностью горения и взрыва метано-воздушной смеси и угольной пыли в процессе ведения горных работ [1]. Подробный анализ условий возникновения горения и взрыва показал, что крупные взрывы-катастрофы происходят в межсезонье и в зимние месяцы [1]. В летние месяцы особо опасных взрывов не наблюдается. Полагают, что это обусловлено изменением парциального давления кислорода в атмосфере Земли. Так в течение года содержание кислорода в атмосфере изменяется от 18,9% в летние месяцы до 21,1% - зимой. Качественно причина вполне понятная. Однако, почему происходит такое изменение парциального давления кислорода в атмосфере Земли, остается не вполне ясным. Что при этом происходит с атмосферой, каково ее состояние и почему при этом взрывы-катастрофы в угольных шахтах возникают преимущественно в межсезонье и зимой, тогда как парциальное давление кислорода изменяется не существенно. В связи с этим возникает цель: выяснить, в чем причина изменения состава атмосферы в различные времена года и как такое изменение может повлиять на условия изменения самовозгорания метано-воздушной смеси и угольной пыли в угольных шахтах. Цель может быть достигнута путем решения следующих задач:

- рассмотреть динамику формирования двухатомных и моногоатомных молекул в атмосфере Земли;
- разработать механизм взаимодействия горючих газов с молекулами атмосферы Земли;
- определить какие процессы адсорбции и десорбции происходят на поверхности углеродных частиц;
- определить условия, при которых может происходить самовозгорание метано-воздушной смеси и угольной пыли.

Основное содержание и результаты работы. 1. Формирование многоатомных молекул кислорода и азота в атмосфере Земли. Атмосфера Земли состоит в основном из молекул азота и кислорода, которые взаимодействуют между

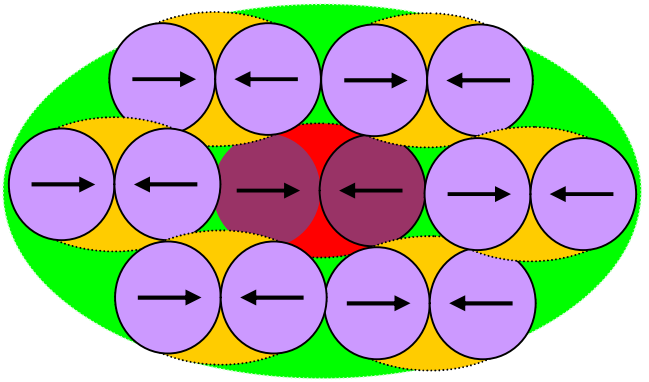

Рис. 1. Структура кластера из двухатомных молекул в горизонтальной плоскости

собой и друг с другом. Максимальная энергия бинарного взаимодействия реализуется, когда расположение этих молекул друг относительно друга будет такое, которое приведено на рис. 1. При таком расположении двухатомных молекул результирующая энергия связи равна сумме ковалентной, ионной, электрон-дипольной и диполь-дипольной

$$E_{св.} = E_{ков.} + E_{ион.} + E_{е-д} + E_{д-д} \quad (1)$$

Конкретный расчет всех видов взаимодействий, выполненный по методике, разработанной в [2] и приведен в табл. 1.

Таблица 1. Энергия связи и ковалентные радиусы взаимодействующих молекул

Моле-кулы	Радиусы атомов, Å		Энергия связи, эВ				Результи-рующая, эВ
	$r_{ков.,1}$	$r_{ков.,2}$	Ков.	Ион.	$E_{е-д}$	$E_{д-д}$	
$N_2 – N_2$	0,71	0,71	0,762	0,458	-	0,0067	1,227
$O_2 – O_2$	0,66	0,66	0,799	0,468	-	0,039	1,306
$N_2 – O_2$	0,71	0,66	1,092	0,423	-	0,037	1,552

Так как энергия связи между двухатомными молекулами в воздухе достаточно большая, то получается, что в воздухе, как азот, так и кислород должны пребывать в виде кластерных образований, состоящих из 13 молекул (рис. 1). Такие кластеры в воздухе должны формироваться преимущественно в зоне тени (ночью), а днем под действием солнечного света они распадаются на отдельные молекулы, вследствие поглощения оптического излучения, начиная с ближнего инфракрасного диапазона. В шахтах и в пещерах воздух должен быть совершенно другой. Он достаточно насыщен кластерами двухатомных молекул.

При низких температурах воздуха (зимой) кластеры двухатомных молекул более устойчивые и их концентрация в воздухе возрастает. Попадая в шахту, такие кластеры не распадаются под действием света. Адсорбируясь на стенках, они создают жидкую пленку кислорода. Когда адсорбция происходит на угольной пыли, то частица угольной пыли обволакивается жидкой пленкой кислорода, а сталкиваясь с молекулами горючих газов происходит химическая адсорбция молекул кислорода с выделением тепла -- реализуется процесс горения в жидком кислороде. Чтобы выяснить, как происходит этот процесс горения на молекулах горючих газов, а конкретно на молекулах метана, рассмотрим строение молекулы метана.

Образование многоатомных молекул горючих газов и воды. Полагают, что молекулу метана можно описать тетраэдрической моделью. Кроме этого полагают, что ряды однотипных соединений этана (C_2H_6), пропана (C_3H_8), бутана (C_4H_{10}), пентана (C_5H_{12}) и т.д. являются гомологическим рядом и отличаются друг от друга группой CH_2, которая представляет собой устойчивую трехатомную молекулу. В этой молекуле атом углерода взаимодействует с молекулой водорода. Очевидно, что в молекуле метана атом

углерода взаимодействует с двумя молекулами водорода и образуется также устойчивая пятиатомная молекула. Молекула этана образуется в результате взаимодействия простейшей молекулы CH_2 с простейшей молекулой метана, а дальнейшее наращивание гомологического ряда происходит путем взаимодействия предыдущей молекулы в этом ряде с молекулой CH_2. В результате образуется гомологический ряд метана.

Если рассматривать образование молекулы CH_2 как бинарное взаимодействие атома углерода с молекулой водорода, то представляется возможность произвести расчет энергий бинарной связи C – H_2. Исходные данные для этих частиц приведены в табл. 2.

Таблица 2. Энергия ионизации (эВ), радиусы валентных электронов (Å) и эффективные заряды

Атом, молекула	Энергия ионизации			Радиусы электронов			Эффективный заряд			r_e, Å
	Θ_1	Θ_2	Θ_3	r_1	r_2	r_3	Z_1^*	Z_2^*	Z_3^*	
C	11,26	24,4	47,9	0,989	0,778	0,725	0,773	1,316	2,421	-
O	13,62	35,1	54,9	0,651	0,571	0,540	0,615	1,390	2,056	-
H_2	15,426	48,11	-	0,714	0,529	-	0,765	1,765	-	0,741
O_2	12,08	37,02	-	0,952	0,700	-	0,797	1,797	-	1,207
N_2	15,58	41,19	-	1,021	0,736	-	1,103	2,103	-	1,098
C_2	11,9	37,5	-	0,925	0,678	-	0,763	1,763	-	1,242
CH_2	10,396	31,46	60,5	1,270	0,878	0,695	0,916	1,916	2,916	
H_2O	12,614	43,06	91,54	1,226	0,694	0,484	1,072	2,072	3,072	
CH_4	11,81	34,39	68,27	1,35	0,883	0,656	1,106	2,106	3,106	

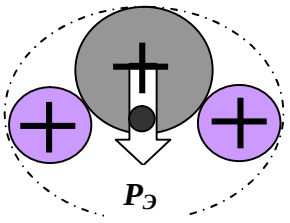

Рис. 2. Структура молекулы CH_2

Структура молекулы CH_2 показана на рис. 2. Энергия разрыва связи C – H_2 определяется ковалентной и ионной связью, которые составляют 3,97 эВ. Вероятность пребывания валентного электрона вблизи атома углерода P_1 = 0,454, а вблизи молекулы водорода P_2 = 0,107. Вероятность обмена валентными электронами между атомом углерода и молекулой водорода S = 0,372. Энергия ионизации

$$\Theta_{CH_2} = (1 - P_1 S)\Theta_C + P_2(1 - S)\Theta_{H_2} = 10{,}395 \text{ эВ}. \qquad (2)$$

Экспериментальное значение == 10,396 эВ [3]. Отличие незначительное, что свидетельствует о правильности выбранной модели. Следовательно, разработанная модель анализа бинарного взаимодействия атома углерода с двухатомной молекулой водорода является достаточно приемлемой. Угол между связями углерод-водород определен для молекулы метана и полагают, что он составляет 109^0 28’, т.е. молекула метана образует тетраэдр. В случае молекулы CH_2, предполагая угол между связями 109^0 28’, получаем, что межъядерное расстояние в молекуле водорода в составе CH_2 возрастает с 0,741 Å до ~ 1,8 Å. Это происходит вследствие расталкивания ядер атомов водорода в молекуле водорода, так как энергия ковалентной связи ослабевает вследствие обобщения одного валентного электрона молекулы водорода с образованием общей электронной оболочки молекулы CH_2. Получается, что при образовании молекулы CH_2

деформация электронного облака молекулы весьма существенная. Атом углерода в молекуле CH_2 с вероятностью P_1 = 0,454 пребывает в виде отрицательного иона. Учитывая это, встроенный дипольный электрический момент для атома углерода должен возрастать на величину деформации электронных оболочек

$$\Delta P_{Э,C} = P_1 e \Delta r \,, \qquad (3)$$

где $\Delta r = r_C - r_H$ – деформация электронной оболочки в атоме углерода, за вычетом зеркального взаимодействия иона атома водорода (r_C и r_H – соответственно ковалентный радиус атома углерода и водорода). Результирующий встроенный дипольный электрический момент молекулы CH_2

$$p_{Э,CH_2} = p_{Э,C} + \Delta p_{Э,C} = (3{,}851 + 1{,}81)\cdot 10^{-30} = 5{,}66 \cdot 10^{-30} \text{ Кл·м}. \qquad (4)$$

Здесь $p_{Э,C}$ – встроенный дипольный электрический момент атома углерода, [4].

Аналогичная структура, которая реализуется для молекулы CH_2, имеет место и для молекулы воды. Энергия разрыва связи O – H_2 4,99 эВ. Экспериментальное значение = 5,00 эВ [3]. Вероятность пребывания валентного электрона вблизи атома кислорода P_1 = 0,398, а вблизи молекулы водорода P_2 = 0,137. Вероятность обмена валентными электронами -- S = 0,385. Энергия ионизации – 12.83 эВ. Экспериментальное значение = 12,614 эВ. Угол между связями $104{,}3^0$, что близко к углу тетраэдра - 109^0 28’. Такой угол получается вследствие увеличения межъядерного расстояния в молекуле водорода с 0,741 Å до 1,74 Å. Результирующий дипольный электрический момент равен $6{,}032\cdot 10^{-30}$ Кл·м. Экспериментальное значение – $6{,}167\cdot 10^{-30}$ Кл·м.

Молекула метана образуется вследствие взаимодействия молекулы CH_2 с молекулой водорода. Только ковалентная и ионная связь участвуют в таком взаимодействии и составляют 1,084 эВ. Вероятность пребывания валентного электрона вблизи молекулы CH_2 P_1 = 0,414, а вблизи молекулы водорода P_2 = 0,127. Вероятность обмена валентными электронами -- S = 0,0865. Энергия ионизации молекулы метана по (2) равна 11,81 эВ. Дипольный электрический момент $p_{Э,CH_4}$ = (5,660 + 2,315)·10^{-30} = Кл·м.

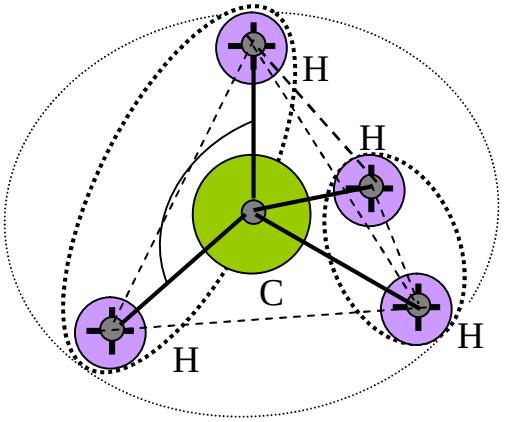

Рис.3. Строение молекулы метана

Молекулы водорода и метана на рис. 3 обведены пунктирными линиями. Радиус шаровой поверхности, которая описывает тетраэдр с квадратным основанием в 1,8 Å с учетом ковалентных радиусов углерода и водорода, равен 1,35 Å.

Взаимодействие молекул воздуха в угольных шахтах происходит не только с горючими газами, но и с угольной пылью. Уголь представляет собой слоистую структуру, которая формируется взаимодействием двухатомных молекул углерода, энергия связи которых приведены в табл. 3 [5].

Таблица 3. Энергия связи двухатомных молекул углерода в слое и между слоями

Вещество	Энергия связи, эВ				Результи-рующая, эВ	$E_{д-д}$ / $E_{рез}$
	Ков.	Ион.	$е-д$	$д-д$		
$C_2 - C_2$ в слое	-1,209	-0,005	-0,162	-2,496	-1,855	1,346
$C_2 - C_2$ между слоями	-0,025	-0,022	-0,003	+0,232	+0,182	1,275
слой под слоем	-0,025	-0,022	-0,003	-0,240	-0,290	0,83

Энергия связи двухатомных молекул углерода в графене в основном определяется диполь-дипольным взаимодействием. Небольшое механическое смещение слоев друг относительно друга приводит к разлету слоев. Поэтому в забое и при проведении взрывных работ в угольных шахтах образуется достаточно мелкая углеродная пыль в чешуйчатом виде, т.е. в виде графена. Зная структуру и величину различных энергий связи, рассмотрим процесс адсорбции на молекулах горючих газов, на угольной пыли и на кластерных образованиях воды молекул воздуха.

Адсорбция молекул воздуха на молекулах горючих газов, на угольной пыли и на водяных каплях. Молекулы азота и кислорода воздуха достаточно интенсивно взаимодействуют друг с другом и с молекулами окружающей среды, а также с жидкими и кристаллическими телами. Такое взаимодействие обуславливает явление адсорбции. Различают физическую и химическую адсорбцию. Процесс взаимодействия вначале сопровождается физической, а затем переходит в химическую адсорбцию. При адсорбции молекул кислорода выделяется теплота и при этом происходит излучение света инфракрасного и видимого диапазона длин волн. Такой процесс называется горением. Горение происходит как в парогазовой фазе, так и на поверхностях жидких и твердых тел. Скорость протекания процесса горения в парогазовой фазе меньше, чем на жидких и твердых поверхностях. Рассмотрим процесс физической адсорбции с переходом в химическую на различных адсорбентах.

На основании данных табл. 1 был произведен расчет бинарного взаимодействия молекул метана с молекулами азота и кислорода с учетом ковалентной, ионной, электрон-дипольной и диполь-дипольной связей. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4. Энергия связи бинарного взаимодействия между различными частицами в эВ

Пара-метры	Молекула CH_2			Метан		Уголь		Вода	
	O_2	N_2	H_2	O_2	N_2	O_2	N_2	O_2	N_2
$E_{ков.}$	0,684	0,545	1,023	1,131	0,534	2,073	1,924	1,200	1,248
$E_{ион.}$	0,038	0,022	0,061	0,054	0,019	0,140	0,088	0,103	0,076
$E_{е-д}$	0,723	0,428	-	0,876	0,553	0,406	0,341	0	0
$E_{д-д}$	0,111	0,038	-	0,218	0,080	0,109	0,036	0,219	0,071
$E_{рез}$	1,358	1,033	1,084	2,225	1,29	2,728	2,388	1,522	1,396

Из табл. 4 следует, что на молекулах CH_2 и метане, а также на угольной пыли и на поверхности воды молекулы кислорода и азота адсорбируются достаточно эффективно. Когда происходит адсорбция кислорода на метане, то выделяется энергия 2,225 эВ, что значительно превышает энергию связи молекул CH_2 и H_2. Поэтому, как только на поверхности метана появляется молекула кислорода, происходит мгновенный переход физической адсорбции в химическую. Появляются молекулы

CH_2O_2 и H_2 с выделением энергии 2,225 – 1,084 = 1,141 эВ. В свою очередь молекула CH_2O_2 претерпевает изменение вида

$$CH_2 + O_2 \leftrightarrow CO + H_2O\ . \qquad (5)$$

При этом выделяется энергия

$$\Delta E = D_{CO} + D_{H_2-O} - D_{C-H_2} - D_{O_2} = 11{,}09 + 5{,}0 - 3{,}97 - 5{,}12 = 7{,}0 \text{ эВ}.$$

Итак, в начальной стадии процесса горения метана в окружающую среду поступают молекулы водорода, угарного газа и молекулы воды с выделением энергии 785,5 МДж/кмоль. Затем, при наличии в окружающей среде кислорода, молекулы водорода и угарного газа продолжают гореть, формируя фазу догорания. Действительно, спектроскопическими исследованиями горения топливо-воздушной смеси было доказано, что в фазе догорания горят угарный газ и водород [6,7]. На сажевых частицах протекают реакции горения с достаточно большим выделением энергии

$$C_{\square} + O_2 \leftrightarrow 2CO + 331{,}9 \text{ МДж/кмоль}. \qquad (6)$$

В начальной стадии горения сажевых частиц в окружающую среду поступают молекулы только угарного газа, а в процессе догорания горит угарный газ. Учитывая это, получается, что молекул угарного газа в горючей смеси должно быть больше, чем молекул водорода. Конкретный анализ состава горючих газов при горении топлива, проведенный в [8] убедительно подтверждает этот вывод.

Адсорбция молекул кислорода на поверхности воды не приводит к горению. Реализуется только физическая адгезия. Молекулы кислорода обладают большей энергией связи по сравнению с азотом. При достаточно длительном времени пребывания в атмосфере поверхность воды полностью покроется кислородной пленкой. Расположение молекул кислорода на водной поверхности показано на рис.4. Количество монослоев молекул кислорода, которые адсорбируются на поверхности воды, в зависимости от температуры получено в работе и показано, что в нормальных условиях количество монослоев кислорода на поверхности воды достигает до четырех. С уменьшением температуры количество монослоев возрастает почти по экспоненте.

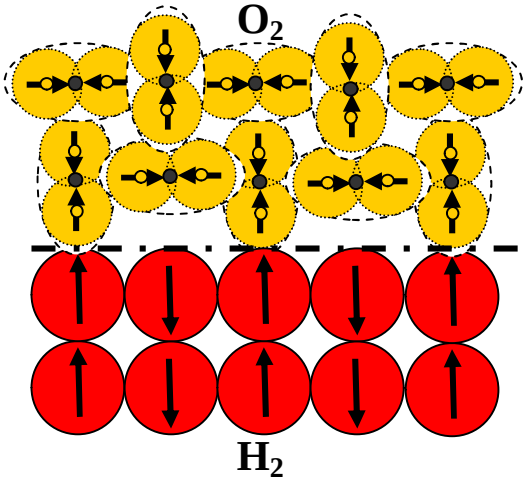

Рис. 4. Наиболее вероятное расположение молекул кислорода на поверхности воды

Если в атмосфере присутствуют пары воды, то они покрыты жидким слоем кислорода. Особенно это явление должно проявляться на частицах тумана и в пургу на снежных частицах. Попадая в шахту, такие частицы привносят туда огромное количество кислорода. Это неизбежно приводит к самовозгоранию угольной пыли и метано-воздушной смеси.

Самовозгорание угольной пыли при химической адсорбции метана. Явление самовозгорания используется в двигателях внутреннего сгорания, работающих по циклу Дизеля, а также при взрывах взрывчатых веществ (ВВ). Как происходит взрыв топливно-воздушной смеси (ТВС) в камере сгорания при осуществлении цикла Дизеля подробно описано в работе [9], а взрыв ВВ -- в [10]. Взрыв метано-воздушной смеси (МВС) совместно с угольной пылью существенно отличается от взрыва ТВС и ВВ. В первом случае взрыв происходит, когда горючая смесь находится в газовой фазе, а во втором -- в конденсированной фазе. При этом окислитель и горючее перемешаны на молекулярном уровне и спрессованы в твердую фазу.

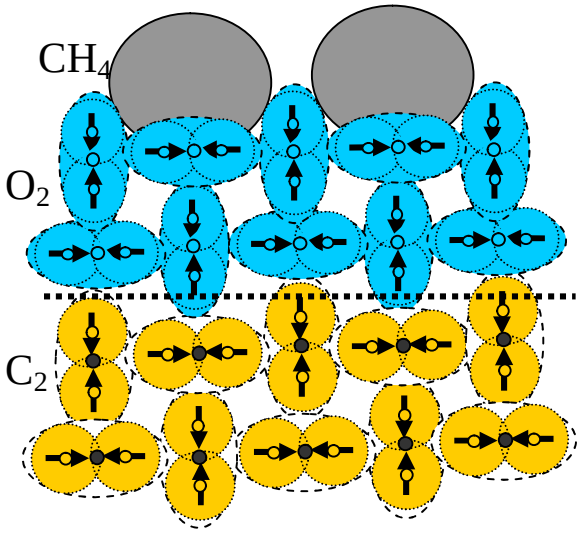

Рис. 5. Наиболее вероятное расположение молекул кислорода на поверхности угольной пыли и молекул метана на жидком кислороде

В угольной шахте угольная пыль и горючий газ метан совместно с воздухом образуют горючую смесь. При этом угольная пыль и молекулы метана с кислородом воздуха взаимодействуют независимо. Максимальное тепловыделение при взаимодействии метана с кислородом воздуха происходит только при определенном соотношении концентраций окислителя и горючего. Известно [10], что это происходит, когда в воздухе находится ~ 10% молекул CH_4. Реально в шахте такая концентрация метана если и возникает, то очень редко. Но даже в этом случае, чтобы произошел взрыв, необходимо внешним воздействием как-то поджечь такую смесь и существенно увеличить концентрацию взаимодействующих частиц путем повышения давления, как это имеет место в цикле Дизеля. Если где-то в забое и возникают условия для взрыва, то они локализуются в сравнительно малом пространстве и не приносят больших разрушений. В случае угольной пыли при температуре окружающей среды 15-30^{0}С, константа химической реакции горения настолько незначительная, что горение угля вообще не должно возникать, а тем более взрыв.

Почему же возникают мощные взрывы в угольных шахтах, и тем более в межсезонье, а также в зимних условиях (в основном в феврале) следует выяснить. В этом случае в шахту нагнетается воздух, насыщенный частицами воды в жидкой (туман) или твердой (снежинки) фазе, которые окутаны кислородом. Эти частицы адсорбируются на угольной пыли, образуя на ее поверхности кислородную пленку, как это показано на рис. 5. Получается, что молекула метана взаимодействует не с отдельной молекулой кислорода, а с жидкой кислородной пленкой и возникает каталитическое горение. Кинетика реакций горения достаточно проста [8]

$$\frac{dn}{dt} = k_f n_T n_K . \qquad (7)$$

Здесь количество прореагировавших частиц в единице объема за единицу времени dn/dt пропорциональна константе прямой химической реакции k_f и произведению $n_T n_K$ соответственно концентрации частиц топлива n_T (CH_4) и окислителя n_K (O_2).

Константа химической реакции [8]

$$k_f = 2(r_1 + r_2)^2 (2\pi k_Б T / \mu)^{1/2} \exp(-E_a / k_Б T), \quad (8)$$

где r_1, r_2 – ковалентные радиусы взаимодействующих частиц; $\mu = M_1M_2/(M_1 + M_2)$ – приведенная масса; M_1 и M_2 - соответственно массы взаимодействующих частиц.

Энергия активации для реакции вида AB + CD ◄► AC + BD [9]

$$E_a = 0{,}29(D_{AC} + D_{BD} - D_{AB} - D_{CD}). \quad (9)$$

D_{AB}, D_{CD} *и* D_{AC} и D_{BD} – соответственно энергии диссоциации молекул до протекания реакции и после ее протекания. Для реакции горения метана на жидкой пленке кислорода $E_a \sim 0{,}331$ эВ.

Каталитические реакции горения метана на угольной частице протекают не одновременно на всех частицах. Поэтому возгорание угольных частиц, которые покрыты слоем кислорода при адсорбции на ней молекулы метана, следует рассматривать последовательно в виде протекания цепной реакции, т.е. возгорание метана на одной частице инициирует возгорание близлежащих частиц путем их возбуждения ударной волной, возникающей при микровзрыве на одной из частиц. Угольная пыль формируется двухатомными молекулами углерода, образуя при этом структуру графена, как это показано на рис. 1. Кластер графена содержит 13 молекул. Эффективный радиус такого кластера ~ $2{,}86 \cdot 10^{-10}$ м. С учетом протекания реакций (5) и (6) в момент адсорбции молекулы метана на угольной частице выделяется вначале энергия 8,141 эВ, а при догорании -- 9,00 эВ. Мгновенное выделение такой энергии приводит к микровзрыву углеродной частицы. Реализуется точечный взрыв, который создает сферическую ударную волну, скорость которой [8,11,12]

$$v_{уд.в.} = \frac{2}{5}\left(\frac{Q}{\alpha' \rho_c}\right)^{1/2} \frac{1}{r^{3/2}}, \quad (10)$$

где Q – энерговыделение каталитической реакции горения, α' – постоянная, равная 0, 851, и r - радиус взорвавшейся частицы.

За скачком уплотнения ударной волны термодинамические параметры определяются следующим образом [17]:

$$v = \frac{2}{\gamma + 2}\left(1 - \frac{1}{M^2}\right) v_{уд.в.};$$
$$P = P_\infty \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{\gamma/(\gamma-1)}; \quad (11)$$
$$T = T_\infty \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right).$$

Здесь P_∞ и T_∞ - соответственно давление и температура в окружающей среде, M – число Маха и γ – отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме.

При рассмотрении процесса самовозгорания уравнения (11) применимы только тогда, когда скорость ударной волны больше скорости звука, т.е. $v_{уд.в.} > c = \sqrt{\gamma P_\infty / \rho_\infty}$. Взрыв происходит в объеме угольной частицы, на которой находится адсорбированный слой молекул кислорода. Тогда

$$v_{уд.в.} = \frac{2}{5}\left(\frac{8{,}141 \cdot e}{0{,}851 \cdot 1{,}29}\right)^{1/2} \cdot \frac{1}{(3 \cdot 0{,}925 \cdot 10^{-10} + 4 \cdot 0{,}952 \cdot 10^{-10})^{3/2}} = 25{,}8 \cdot 10^3 \text{ м/с.} \quad (12)$$

Расстояние, на котором скорость ударной волны будет равна скорости звука:

$$r_c = \left[\frac{2/5(Q/\alpha'\rho)}{c}\right]^{2/3} = 1{,}2 \cdot 10^{-8} \text{ м.} \quad (13)$$

В сферическом объеме такого радиуса произойдет возгорание ~ 18 частиц. После их сгорания дополнительно выделится энергия $(318\text{-}18) \cdot 8{,}141 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж. Энергия точечного взрыва соответствует радиусу $1{,}2 \cdot 10^{-8}$ м и формирует ударную волну, которая обладает скоростью $1{,}4 \cdot 10^3$ м/с. В соответствии с (13) радиус, на котором скорость ударной волны равна скорости звука, равен $3{,}14 \cdot 10^{-8}$ м, а скорость ударной волны -- $1{,}36 \cdot 10^3$ м/с. Расстояние, на котором скорость ударной волны станет равной скорости звука $1{,}48 \cdot 10^{-7}$ м. Длина свободного пробега молекул метана при столкновении с частицами угольной пыли ~ $1{,}45 \cdot 10^{-7}$ м. Следовательно, на третьем шаге последовательного приближения полностью сформируется самовзрыв угольной пыли, окутанной жидким слоем молекул кислорода, при взаимодействии с молекулами метана. Температура во фронте ударной волны в соответствии с (11) равна ~ 1300 К. При такой температуре метан с кислородом в газообразном состоянии будет гореть с выделением мощности в единице объема (1 м^3) ~ 10^{10} Вт, т.е. произойдет взрыв метано-воздушной смеси с распространением по всему объему шахты.

Заключение

В атмосфере Земли при низких температурах и, особенно в ночных условиях, молекулы кислорода в большом количестве пребывают в виде кластеров. Поэтому в шахтах и подземельях образуются кластерные образования кислорода, азота и азота с кислородом. Это следует учитывать, что атмосфера в шахтах и подземельях совершенно другая, чем на поверхности Земли, и особенно в зимних условиях. В зимних условиях возникают взрывы, вызванные проведением взрывных работ и инициированием локальных электрических разрядов (искрение). В этом случае реализуется каталитическое горение угольной пыли и кластеров из молекул метана.

При наличии в угольной шахте частиц пыли, окутанной жидким кислородом, в нормальных условиях происходит самовозгорание со взрывом вблизи вентиляционного канала и этот локальный взрыв инициирует мощный взрыв метано-воздушной смеси вплоть до выработки. Во время осеннего и весеннего тумана, а также возникновения метели в зимних условиях угольную шахту нельзя вентилировать, а, следовательно, нельзя осуществлять выработку. В этих погодных условиях следует строго запретить выработку и немедленно эвакуировать весь рабочий персонал из угольной шахты.

Список литературы:

1. Калякин С.А. Развитие научных основ безопасного производства взрывных работ в газоносных массивах угольных шахт: доктор. дис. / С.А. Калякин. – ДонНТУ, 2011.

2. Гречихин Л.И. Влияние стационарной и нестационарно теплопроводности на эффективность работы двигателя внутреннего сгорания / Л.И. Гречихин, Н.Г. Куць // Наукові нотатки. – 2010. – Вип. №28.

3. Физические величины: справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

4. Гречихин Л.И. Наноуровень обоснования ОКГ конденсированных сред / Л.И. Гречихин, Ю. Шмермбекк. – Мн.: «Право и экономика», 2010. – 75 с.

5. Гречихин Л.И. Наночастицы и нанотехнологии / Л.И. Гречихин. – Мн.: «Право и экономика», 2008. – 403 с.

6. Гейдон А. Спектроскопия и теория горения / А. Гейдон. – М.: Изд-во ин. лит., 1950. – 308 с.

7. Nagase K. Spectroscopic analysis of diesel combustion flame by means of streak camera / Nagase K., Funatsu K. //SAE Techn. Pap. Ser. – 1989. – № 881226. – P. 1-9.

8. Гречихин Л.И. Двигатели внутреннего сгорания. Физические основы технической диагностики и управления / Л.И. Гречихин. – Мн.: Навука і техніка, 1995. – 270 с.

9. Семенов Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности / Н.Н. Семенов. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 587 с.

10. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва / Л.Н. Хитрин. – М.: Изд-во московского университета, 1957. – 442 с.

11. Коробейников В.П. Теория точечного взрыва / В.П. Коробейников, В.С. Мельникова, Е.В. Рязанов. – М.: Физматгиз, 1961. – 332 с.

12. Костенбойм Х.С. Точечный взрыв. Методы расчета / Х.С. Костенбойм. – М.: Наука, 1974. – 255 с.

Надійшла до редколегії 08.02.2012.

Л.І. Гречихин, Н.Г.Куць

ФІЗИКА ГОРІННЯ І ВИБУХУ МЕТАНО-ПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ ТА ВУГІЛЬНОГО ПИЛУ

Показано, що в атмосфері Землі при низьких температурах в нічних умовах, молекули кисню, азоту та азоту з киснем у великій кількості перебувають у вигляді кластерів. Тому в шахтах і підземеллях атмосфера насичена такими кластерами. У зимових умовах виникають вибухи, викликані проведенням вибухових робіт та іскрінням. При наявності у вугільній шахті частинок пилу, оповитих рідким киснем, в нормальних умовах відбувається самозаймання з вибухом у районі вентиляційного каналу і цей локальний вибух ініціює потужний вибух метано-повітряної суміші в усьому обсязі шахти.

Ключові слова: *метано-повітряна суміш, кластери, шахта, самозаймання, вугільний пил, метан, рідкий кисень.*

L.I. Grechikhyn, N.G. Kuts

PHYSIC OF THE COMBUSTION AND EXPLOSION OF THE METHAN-AIR MIXUTE AND COAL DUST

It is shown that the Earth's atmosphere at low temperatures at night, a molecule of oxygen, nitrogen, and nitrogen and oxygen in large quantities are in the form of clusters. Therefore, in mines and caves of the atmosphere is saturated with such clusters. In winter there are explosions caused by blasting and sparks. In the presence of coal mine dust, shrouded in liquid oxygen, in normal conditions, spontaneous combustion occurs with bursting near the ventilation duct and this local explosion initiates a massive explosion of methane-air mixture in the whole volume of the mine.

Keywords: *methane-air mixture, clusters, mine, spontaneous combustion, coal dust, methane, liquid oxygen.*