

*В.К. Костенко, д-р техн. наук, профессор, Е.Л. Завьялова, канд. техн. наук, доцент
Т.В. Костенко, канд. техн. наук, доцент, А.А. Майборода, канд. пед. наук
(ДонНТУ, Донецк, ЧИПБ имени Героев Чернобыля, Черкассы)*

ВЗРЫВЫ АЭРОВЗВЕСЕЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕТАНООБИЛЬНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Статистические данные свидетельствуют о том, что взрывы аэрозолей в шахтах приводят к десяткам и сотням жертв. Несовершенство взрывозащиты выработок, обусловлено недостаточной изученностью механизма инициации и распространения в подземных горных выработках взрывов смеси угольной пыли с воздухом или с газовой средой (гибридные аэровзвеси). Развитие теории механизма взрывов пылегазовых смесей газообильных угольных пластов, с учетом метана, дополнительно выделяющегося из свежесформированной пыли. Использован теоретико-экспериментальный подход к достижению цели. Установлено, что диффузия метана из угольной пыли и формирования систем «угольная частица - газовая оболочка» может продолжаться от нескольких минут до нескольких дней.

Ключевые слова: гибридная аэровзвесь, диффузия метана, степень дегазации угля, взрыв аэровзвеси

Статистичні дані свідчать про те, що вибухи аерозолів в шахтах призводять до десятків і сотень жертв. Недосконалість вибухозахисту виробок, зумовлено недостатньою вивченістю механізму ініціації і поширення в підземних гірничих виробках вибухів суміші вугільного пилу з повітрям або з газоповітряним середовищем (гібридні аерозависі). Розвиток теорії механізму вибухів пилогазових сумішей багатогазовість вугільних пластів, з урахуванням метану, додатково виділяється з тільки що утвореного пилу. Використаний теоретико-експериментальний підхід для досягнення мети. Встановлено, що дифузія метану з вугільного пилу і формування систем «вугільна частинка – газова оболонка» може тривати від декількох хвилин до декількох днів.

Ключові слова: гібридна аерозавісь, дифузія метану, ступінь дегазації вугілля, вибух аерозависі

Statistics indicate that the explosions in mines aerosols lead to tens and hundreds of victims. Imperfection of explosion protection workings, due to insufficient study of the initiation and propagation mechanism in the underground mining of coal dust mixture with air or with gas-medium (hybrid aerosuspension) explosions. Development the theory of dust and gas mixtures gassy coal seams explosions mechanism, considering methane, which additionally released from the freshly formed dust. Used theoretical and experimental approach to achieve the goal. Found that diffusion of methane from coal dust and formation of systems "coal particles - gas shell" can proceed from several minutes to several days. Proved the possibility of compression degassing system "coal particles – gas shell" with the formation of local regions of the combustible gas environment with a sudden change of pressure in the mine workings

Keywords: hybrid aerovzves, diffusion of methane, the degree of degassing of coal, blast aerosuspension

Проблема и ее связь с важными научными и практическими задачами. Мировые статистические данные свидетельствуют о том, что в течение всей истории добычи угля взрывы аэрозолей в шахтах приводили к самым многочисленным катастрофам, исчисляемым десятками и сотнями жертв. В начале XXI века острота проблемы не уменьшилась, об этом свидетельствуют продолжающиеся взрывы пылегазовых смесей на шахтах Украины, России,

Китая, Казахстана и почти всех других угледобывающих стран [1]. Взрывы угольной пыли происходят также на обогатительных фабриках и теплоэлектростанциях, например в 2014 г. на Углегорской ТЭС в Донбассе.

Расследование обстоятельств и причин взрывов в некоторых случаях свидетельствует о нормальном проветривании выработок, удовлетворительном состоянии их взрывозащиты, малой мощности потенциальных источников воспламенения аэрозолей, выполнении других требований техники безопасности. Тем не менее, аварии продолжаются, например взрывы на шахте им. А.Ф. Засядько и некоторых других. По мнению авторов, причиной этого является несовершенная взрывозащита выработок, обусловленная недостаточной изученностью механизма инициации и распространения в подземных горных выработках взрывов смеси угольной пыли с воздухом или с газозвушной средой (гибридные аэровзвесей).

Результаты анализа последних исследований и публикаций. На протяжении почти двухсот лет в различных странах проводят исследования взрывчатости углегазовых смесей в лабораториях, на стендах и в опытных выработках. На основе результатов исследований, выполненных в последние десятилетия отечественными и зарубежными исследователями, сложились доминирующие представления о механизме взрывов, происходящих в подземных выработках угольных шахт [1-3].

Принято считать, что риск возникновения взрыва аэровзвеси в конкретной выработке, а также его распространение, зависит от следующих природных факторов: количества угольной пыли, осевшей в выработке; дисперсности пылевых частиц; содержания летучих веществ в угле.

Источниками возникновения аэровзвесей в горных выработках угольных шахт является работа проходческих и выемочных механизмов, буровых установок; передвижка крепей; разрушение угля при взрывных работах; транспортирование горной массы, особенно ее перегрузка; переработка угля, в частности, сортировка и дробление. Данные ВостНИИ показывают, что при работе очистных комбайнов концентрация пыли в призабойном пространстве превышает 50...70 г/м³, проходческих – 20...25 г/м³.

Принято считать, что не менее 2...3% добычи превращается в пыль. Вентиляционной струей воздуха пыль переносится на значительные расстояния. При этом часть мелких пылинок, проходящих через сито с размером ячейки 75 мкм, оседает в верхней части выработки, а остальные – в нижней. При взрыве наибольшую опасность вследствие легкости взвихривания и тонкой дисперсности представляют прикровельные отложения пыли. Статистические данные свидетельствуют о том, что более 80% взрывов метана и угольной пыли произошло в призабойной части тупиковых выработок. Минимальное количество пыли, при котором возможно возникновение и перенос взрыва в горных выработках оценивают в 50 г/м³, а максимальное – около 1700 г/м³. Верхние значения концентрации соответствуют переходу во взвешенное состояние отложений на стенках и почве выработок. Полученные при лабораторных и полигонных испытаниях экстремальные значения верхнего и нижнего концентрационных пределов взрывчатости угольной пыли, составляют 10 и до 2500 г/м³, соответственно. Наибольшая энергия выделяется при содержании в воздухе около 300 г/м³ угольной пыли.

Во взрывах принимают участие угольные частицы размером менее 1000 мкм. С увеличением дисперсности до некоторого предела взрывчатость угольной пыли возрастает. Наиболее опасной ученые МакНИИ считают фракцию 75...100 мкм, польские исследователи – 45 мкм. Отдельные данные свидетельствуют о наибольшей взрывчатости фракции - 10...60 мкм. Очевидно, что эти результаты во многом определены различием химико-физических свойств углей и неодинаковыми условиями проведения испытаний.

Зависимость нижнего предела взрывчатости угольной пыли от содержания в ней летучих веществ по результатам исследований МакНИИ с достаточной для практики точностью выражают следующим соотношением:

$$\delta_{\text{отн}} = 55,3 \exp(-0,045 V_{\text{сф}}^{\text{daf}}) + 1,4 \exp(0,032 V_{\text{сф}}^{\text{daf}}) A_{\text{сф}}^s, \text{ г/м}^3, \quad (1)$$

где: $\delta_{омл}$ – нижний концентрационный предел взрывчатости угольной пыли шахтопласта, $г/м^3$; $V_{сф}^{daf}$ – выход летучих веществ, %; $A_{сф}^s$ – содержание в пластовой пробе негорючих веществ (зольность угля), %.

К опасным по взрывам пыли отнесены пласты с показателем $V_{сф}^{daf}$ не менее 15 %, и пласты углей (кроме антрацитов), имеющие меньший показатель $V_{сф}^{daf}$, взрывчатость которых установлена по результатам лабораторных испытаний.

В том случае, когда в горной выработке помимо воздуха и угольной пыли содержится метан или другие горючие газы (тройные или гибридные смеси), энергия взрыва возрастает за счет связанных с окислением этих газов окислительных процессов. Нижний концентрационный предел взрывчатости угольной пыли при содержании в выработке метана можно определить по следующей эмпирической, установленной при взрывании искусственных смесей, формуле:

$$\delta_{мне} = \delta_{омл} \exp(-0,69 C_{сн4}), \text{ г/м}^3, \quad (2)$$

где: $\delta_{омл}$ – нижний концентрационный предел взрывчатости угольной пыли шахтопласта, $г/м^3$; $C_{сн4}$ – концентрация метана в воздухе.

Для воспламенения пылевоздушных аэрозолей необходим инициирующий источник во много раз более мощный, чем для воспламенения метановоздушных смесей. В реальных полидисперсных аэрозвесах, из-за значительных различий размеров угольных частиц, процессы горения летучих веществ и твердого остатка могут протекать одновременно. Распространение горения от поджигающего источника по всему объему аэрозвеси является сложным процессом, на который оказывают влияние размеры частиц, их концентрация в воздухе и физико-химические свойства угля, а также параметры источника воспламенения и другие факторы.

Нагревание метановоздушной смеси от исходной температуры в выработке происходит в течение некоторого промежутка времени без возникновения пламени (индукционный период, $\tau_{ин}$):

$$T_{ин} = 7994 \exp[-0,0113(T - 273)], \text{ с}, \quad (3)$$

где: T – температура источника воспламенения, K .

Взрывы пылевоздушных смесей происходят в газовой фазе за счет газификации пылевых частиц под действием инфракрасных лучей [2]. Нагрев пылевоздушных аэрозолей приводит к пиролизу дисперсной фазы (угольного вещества), сопровождающегося его газификацией с выделением горючих газовых компонентов (летучих веществ). Так у близких по составу к донецким силезских углей летучие вещества содержат около 18% водорода, 73% оксида углерода, 3% диоксида углерода, 4,5% метана, остальное – этан, пропан и сероводород.

В ходе турбулентного перемешивания летучих веществ с воздухом образуются горючие и взрывчатые газовые смеси. Оставшиеся после взрыва в опытной штольне шахты «Барбара» газы имели следующий состав, %: 3,7 – водорода, 10,8 – оксида углерода, 15 – диоксида углерода. Остаточное содержание кислорода не превышало 0,1%. Эти результаты показывают, что происходят химические реакции окисления, приводящие к практически полному расходованию окислителя. Горючие газы могли оставаться в избытке. Лабораторные исследования продемонстрировали, что при содержании в аэрозоле 2000 г/м^3 пыли – остаточный метан составлял около 1%, однако, с уменьшением содержания пыли до 500 г/м^3 и менее – горючего не оставалось.

В устьях опытных штолен и лабораторных установок, где имеется достаточный резерв кислорода, явно прослеживается горение твердого остатка угольной пыли. В подземных горных выработках при значительных отложениях пыли, как правило, отслеживают продукты неполного сгорания угольного вещества. После взрыва способных к спеканию углей на крепи и поверхности выработок находится «кокстик», а после взрыва неспекающихся – угольный остаток с пониженным содержанием летучих веществ.

Механизм зарождения взрыва угольной пыли в тупиковой части горной выработки принято рассматривать в следующей последовательности физико-химических процессов (табл.1).

По мнению авторов данной статьи, в общепринятом механизме зарождения и развития взрывов современные исследователи не учитывают вклад выделяющегося из отбитого угля метана в формирование и воспламенение гибридных смесей.

Таблица 1

Современное представление механизма возникновения взрыва в тупиковой горной выработке [2]

№пп	Процесс
1	– возникновение источника воспламенения, первичного взрыва и формирование фронта волны давления
2	– образование пылевого облака и его воспламенение от внешнего источника теплоты (экзовоспламенение)
3	– развитие и перемещение зоны горения
4	– перемещение ударной волны, поднимающей новые облака пыли с последующим их воспламенением от внешнего источника теплоты

Взрыв пылевоздушных смесей развивается по выработкам следующим образом (табл. 2).

Таблица 2

Механизм распространения взрыва в горной выработке

№пп	Процесс
1	– нагрев угольной аэрозвеси от внешнего источника теплоты
2	– пиролиз угольного вещества, сопровождающийся его газификацией с выделением горючих газовых компонентов (летучих веществ)

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x},$$

3	– образование взрывчатой смеси летучих веществ с воздухом и ее экзовоспламенение
4	– горение газовой среды и твердого остатка угольной пыли, генерация теплового потока в направлении распространения взрыва
5	– формирование ударной волны и нагрев следующего участка аэрозвеси

Постановка задачи исследований. Научная задача состоит в развитии теории механизма взрывов пылегазовых смесей газообильных угольных пластов, с учетом метана, дополнительно выделяющегося из свежобразованной пыли.

Результаты исследований.

Источник и формы существования метана. Не подверженные влиянию очистных и подготовительных работ угольные пласты характеризуются наличием в составе угольного вещества метана в свободной и связанной формах, т.е. таким показателем как метанообильность. Установлено, что при изменении под влиянием горных работ напряженно-деформированного состояния пласта, связанные газы переходят в свободное состояние и диффундируют в том направлении, где химический потенциал метана минимален [4,5].

С точки зрения термодинамики движущим началом любого выравнивающего процесса является рост энтропии. При постоянных давлении и температуре в этой роли выступает химический потенциал ψ , обуславливающий поддержание потоков вещества. Поток частиц вещества в некотором направлении x пропорционален при этом градиенту потенциала (первый закон Фика):

На практике, вместо химического потенциала ψ используют концентрацию C , и, вышеприведённую формулу заменяют другой: которая показывает, что плотность потока газа J , $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ пропорциональна коэффициенту диффузии D , $\text{см}^2\text{с}^{-1}$ и градиенту концентрации.

В общем случае коэффициент D зависит от температуры, но в относительно узком диапазоне температур горного массива и вентиляционных потоков в шахте ($15\dots 50^\circ\text{C}$) коэффициент диффузии газов в угле можно принимать как величину постоянную.

$$J \approx -\left(\frac{\partial\psi}{\partial x}\right)_{P,T}$$

Второй закон Фика связывает пространственное и временное изменения концентрации (уравнение диффузии):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

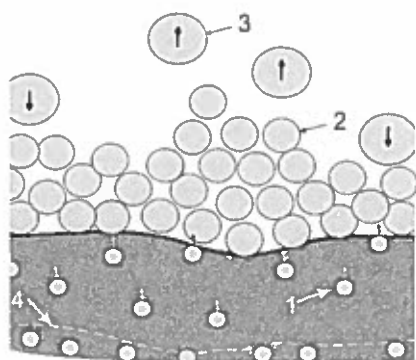
Из него следует, что продолжительность диффузии находится в квадратичной зависимости от расстояния перемещения в твердой среде молекулы освободившегося метана – размера пылинки. Чем меньше ее размер, тем быстрее происходит дегазация. Вначале выделяются молекулы газа, расположенные ближе к поверхности, затем расположенные глубже. Можно выделить существующую в начальный период дегазации концентричную границу (границу диффузии), внутри которой движения молекул нет, эта граница по мере истечения газа постепенно перемещается к центру.

На характер диффузии существенное влияние оказывает текстура угля, генетически наследующая строение исходного растительного материала. Однако, при исследовании измельченного и перемешанного сыпучего материала этот фактор нивелируется, и дисперсное угольное вещество предполагают изотропным. Величину коэффициента диффузии считают примерно постоянной, экспериментально установлена ее величина для каменного угля $D=10^{-12} \text{ м}^2\text{с}^{-1}$ [6]. Предложено рассчитывать длительность t истечения газов из угольных частиц, исходя из их среднего размера δ [7]:

$$t = \frac{\delta^2}{D}. \quad (4)$$

Результаты расчетов показывают, что длительность диффузии (истечения) всего метана из частицы может составлять от получаса при размере пылинок δ около 10 мкм, до 10...12 суток – при δ около 1000 мкм. Учитывая, что скорость вентиляционного потока в горных выработках составляет до 4...6 м/с, можно констатировать, что пылью, из которой диффундирует метан, могут быть заражены участки протяженностью от 200 м до нескольких километров. Эти участки непосредственно примыкают к источникам образования пыли, т.е. призабойным пространствам лав, подготавливающих выработок, скважин. На этих участках чаще всего фиксируют гипоцентры взрывов.

Диффундирующий из пылинок газ не сразу рассеивается в воздухе, а, вследствие значительных сорбционных свойств угля, накапливается вблизи поверхности в виде оболочек, состоящих из метановых молекул, (рис. 1). Молекулы газа могут отделяться от оболочки (десорбция), смешиваясь с воздухом, одновременно возможен и обратный процесс (сорбция).



- 1 – диффузия из угольного вещества;
- 2 – абсорбция у поверхности (аккумулятивное);
- 3 – сорбция-десорбция в воздухе;
- 4 – перемещающаяся в глубину частицы граница диффузии

Рис. 1. Динамика движения молекул метана вблизи поверхности угольной частицы

Таким образом, частицу угольной пыли, как витающую в воздухе, так осевшую на поверхность выработки или элементы шахтной крепи, можно представить как открытую газуюгольную систему, состоящую из насыщенного свободным метаном угольного тела, окруженного газовой оболочкой, имеющей свободный газообмен с воздухом горной выработки или с подобными системами.

Толщина газовой оболочки зависит от ряда факторов, таких как природная метанонасыщенность пласта, его сорбционные свойства, размер угольной частицы, продолжительность ее существования (длительность диффузии), термодинамические параметры вентиляционной струи, состав воздуха и др. Газовая оболочка будет сохраняться и после дегазации угольных частиц, однако лишенная подпитки диффундирующим метаном, она будет иметь минимальные размеры.

Подтверждением этого могут служить результаты исследования химической активности угля фракции 0,25...0,5 мм, находившегося в различных газодинамических условиях. Три вида проб угля марки Ж пласта т₃ арендного предприятия «Шахта им. А.Ф. Засядько» были проанализированы с помощью газохроматографического метода [9]. Первая проба три недели находилась в вакуумированной герметичной упаковке; вторая параллельная проба три недели находилась в открытом сосуде; третья проба была «свежей», то есть, взята из материала, доставленного из шахты непосредственно перед анализом. Результаты исследований химической активности углей сведены в табл.3, из которой видно, что активность первой и третьей проб была значительно выше, чем второй.

Таблица 3

Химическая активности угля пласта т₃ АП «Шахта им. А.Ф.Засядько»

Температура угля, °С	Константа скорости реакции окисления угля, k , м ³ /(моль·с)		
	1 проба	2 проба	3 проба
30	$2,057 \cdot 10^{-9}$	$1,073 \cdot 10^{-9}$	$1,732 \cdot 10^{-9}$
50	$2,15 \cdot 10^{-9}$	$1,682 \cdot 10^{-9}$	$2,192 \cdot 10^{-9}$
70	$3,159 \cdot 10^{-9}$	$2,025 \cdot 10^{-9}$	$2,797 \cdot 10^{-9}$
90	$4,649 \cdot 10^{-9}$	$2,880 \cdot 10^{-9}$	$3,657 \cdot 10^{-9}$
110	$6,450 \cdot 10^{-9}$	$3,947 \cdot 10^{-9}$	$5,678 \cdot 10^{-9}$
130	$10,635 \cdot 10^{-9}$	$6,791 \cdot 10^{-9}$	$9,679 \cdot 10^{-9}$
140	$15,596 \cdot 10^{-9}$	$8,756 \cdot 10^{-9}$	$12,802 \cdot 10^{-9}$

Это объясняется тем, что их углеродная поверхность была ограждена от доступа кислорода. Анализы второй пробы иллюстрируют значительную окисленность поверхности находившегося в продолжительном контакте с воздухом угля.

Критическая температура угля каждой пробы определялась по графику, построенному в аррениусовских координатах (зависимость логарифма константы скорости окисления $\ln k$

то обратной температуры T'). Проекция точки пересечения двух прямых на ось абсцисс показывает температуру, которая и является критической для исследуемого угля. Результаты определения критической температуры и константы скорости реакции окисления угля представлены в табл. 4. Увеличение почти вдвое константы скорости реакции окисления предварительно вакуумированного угля объясняется увеличением удельной реакционной поверхности последнего вследствие десорбции газов. При этом физико-химические свойства угольного вещества остаются неизменными, о чем свидетельствует стабильная величина (в пределах погрешности методики) критической температуры возгорания.

Таблица 4

*Критическая температура и константы скорости реакции окисления угля
АП «Шахта имени А.Ф.Засядько»*

Номер пробы	1	2	3
Критическая температура самовозгорания угля, $T_{кр}$	383	378	370
Константа скорости окисления угля, $K_{кр}$	$6,44 \cdot 10^{-9}$	$3,44 \cdot 10^{-9}$	$3,83 \cdot 10^{-9}$

Эти результаты подтверждают предположение о наличии над поверхностью угольных частиц концентрированной углеводородной среды, которая вследствие отсутствия кислорода, характеризуется превышающим верхний предел горючести содержанием газа. Наличие такой оболочки оказывает тормозящее влияние на процессы окисления недавно отбитого угля, как медленного – самонагревание, так и быстрого – взрыв.

Для развития взрыва газопыльной взвеси необходимо действие, приводящее к отрыву от пылинок газовой оболочки, что определяет образование гремучей газовой смеси в выработке, а также увеличенную химическую активность угольной компоненты взвеси.

Формирование взрывчатой среды. Для описания состояния метана в пределах газовой оболочки подходит теория потенциальной адсорбции Поляни [8], что обосновывается следующими исходными положениями этого научного направления:

1. Адсорбция обусловлена чисто физическими силами.
2. На поверхности адсорбента нет активных центров, а адсорбционные силы действуют вблизи поверхности адсорбента и образуют около этой поверхности со стороны газовой фазы непрерывное силовое поле.
3. Адсорбционные силы действуют на расстояния большие, чем размеры отдельных молекул адсорбтива, и поэтому можно говорить о существовании у поверхности адсорбента адсорбционного объема, который заполняется молекулами адсорбтива.
4. Действие адсорбционных сил по мере удаления от поверхности уменьшается и на некотором расстоянии практически становится равным нулю.
5. Притяжение данной молекулы поверхностью адсорбента не зависит от наличия в адсорбционном пространстве других молекул, вследствие чего возможна полимолекулярная адсорбция.
6. Адсорбционные силы не зависят от температуры, и, следовательно, с изменением температуры адсорбционный объем не изменяется. Это не противоречит тому, что с повышением температуры адсорбция уменьшается; в этом случае снижение адсорбции обуславливается не уменьшением адсорбционных сил, а увеличением в результате нагревания интенсивности теплового движения адсорбированных молекул, что приводит к увеличению десорбции.

Известные результаты теоретических исследований, основанных на потенциальной теории адсорбции Поляни [8], указывают что адсорбционные силы совершают обратимое изотермическое сжатие газа от парциального давления p на расстоянии, где сорбционными силами можно пренебречь до p_s над поверхностью сорбента. Основным параметром, определяющим потенциал адсорбции ε пропорционален натуральному логарифму отношения давлений p_s и p :

$$\varepsilon = R \cdot T \cdot \ln(p_s/p) \quad (5)$$

Можно допустить, учитывая отсутствие температурных условий для конденсации сорбируемого метана (температура кипения метана на линии насыщения при 760 мм рт.ст. - 161,6°C), что величина p_s не может превышать уровня пластового давления метана. По мере дегазации угольного пласта, а затем пылевых частиц значение p_s резко уменьшается, согласно второму закону Фика.

Давление воздуха в горных выработках характеризуется колебаниями, обусловленными различными причинами как внешнего характера (изменение атмосферного давления на поверхности, регулирование режимов работы вентиляционных установок главного проветривания и др.), так и внутреннего (поршневой эффект рельсового транспорта, осадки кровли в очистных выработках, открытие вентиляционных дверей и др.). Однако периодичность и амплитуда этих колебаний, как правило, незначительны, поэтому величину парциального давления метана p в нормальных технологических условиях реальных горных выработок можно считать постоянной. В пределе величина p_s приближается к p .

Таким образом, в горных выработках вблизи источников пылеобразования всегда существует участок, где в витающей пыли продолжается диффузия метана и частицы покрыты газовыми оболочками. Этот процесс продолжается и в тех частицах, которые оседают на поверхность выработки и оборудования (рис.2). Скрытая опасность такой ситуации состоит в том, что содержание метана в воздухе выработки может быть гораздо ниже, чем этого требуют нормы безопасности, а абсорбированный, способный принимать участие во взрыве, метан в нормальных условиях не обнаруживается средствами газометрии.

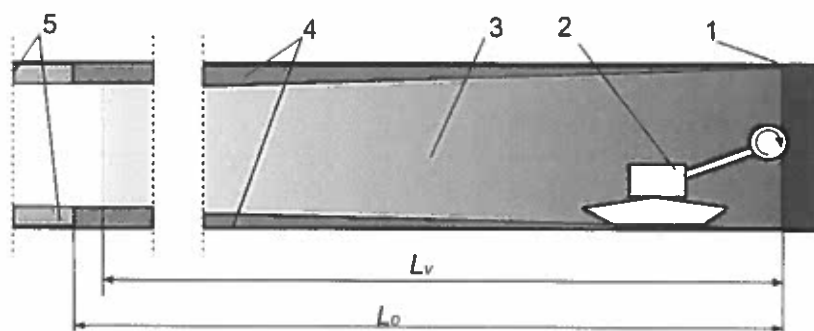


Рис.2. Схема формирования взрывоопасной среды в тупиковой выработке:

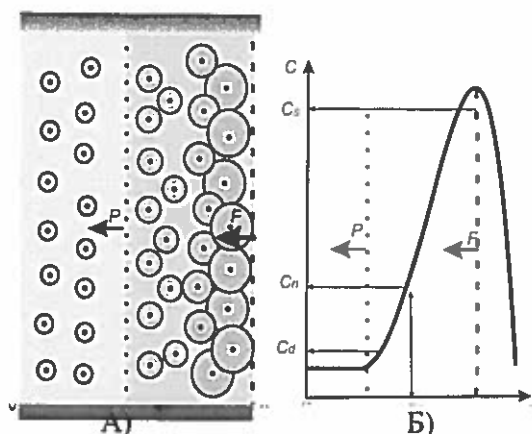
1 – угольный пласт; 2 – выемочный механизм; 3 – облако взвешенной пыли; 4, 5 – отложения пыли, соответственно, из которой диффундирует метан и дегазированной; L_v, L_o – протяженность участков 3 и 4, соответственно

Зарождение и развитие взрыва. Для возникновения взрыва угольной пыли необходим инициирующий источник, в роли которого могут выступать вспышка метановоздушной смеси, взрывные работы, электрический разряд. Согласно современным представлениям [2], энергия, генерированная источником должна быть достаточной, чтобы взвихрилась осевшая пыль, сформировалось аэрозольное облако, в нем произошло нагревание от инициирующего источника поверхности угольного вещества, выделение летучих веществ и их экзотермическое возгорание.

В первом приближении самые наилучшие условия для максимального нагревания (оптимистичный сценарий нагревания частиц) представляются следующим образом. Известно, что при тепловом воздействии происходят следующие стадии нагревания угля, °C: предварительное до 100; сушка 100...125; полукоксование 225...500 высокотемпературное коксование 900...1100. При ускоренном режиме нагревания за время $\tau_{ин}$, как показывает опыт коксования углей [10], сушка и газовыделение происходят одновременно, образуется низкокалорийная и трудновоспламеняемая парогазовая смесь. Для получения горючих смесей газов нужен повышенный уровень нагревания - более 350°C. Следовательно, пылевидное угольное вещество для создания взрывных условия необходимо разогреть от температуры воздуха в шахте (20...25°C) на $\Delta T=300...1100^\circ C$ чтобы произошло коксование угольного вещества и выделились газовые компоненты. На это необходимо, по нашему мнению, израсходовать значительную энергию в течение длительного периода.

Менее энергоемким представляется вариант развития взрыва с участием свежей пыли, в которой продолжается диффузия метана, и образовались газовые оболочки. Характер сорбционных процессов на поверхности угольных частиц определяется соотношением давлений p_s/p (см. уравнение 5), если это отношение больше единицы происходит сорбция метана, меньше единицы – десорбция.

Когда в выработке происходит скачок давления (выполнение взрывных работ, взрыв метановоздушной смеси или др.) увеличивается параметр p и соотношение p_s/p становится менее единицы. Это определяет условия десорбции сконцентрированного вокруг пылинок метана, назовем этот процесс *компрессионной дегазацией газопылевой системы*. При этом внутренняя энергия молекул газовой смеси резко увеличивается, что способствует не только отрыву метана от пылинок, но и интенсивному перемешиванию их с воздухом с образованием локальных участков горючих смесей (рис.3).



(А) и содержания метана (Б) в области ударного (P) и огневого (F) фронтов взрыва в выработке: C_d , C_n , C_s – концентрации метана в воздухе, соответственно, фоновая, нижний предел горючести, стехиометрическая; x_n – расстояние, где достигается нижний предел горючести

Рис. 3. Динамика газовых оболочек

Горючие газовые смеси способны легко самовоспламеняться при резком увеличении давления газов (во фронте ударной волны), а также имеют низкую температуру экзотермического самовоспламенения (см. уравнение 2).

Во фронте давления последовательно происходят три процесса:

- повышение концентрации угольной пыли, что объясняется сжатием воздушной среды в выработке, когда в единице объема оказывается значительно больше частиц пыли, чем при нормальном давлении;
- распад окружающих пылинки газовых оболочек, из-за нагревания сжимаемого газа с увеличением внутренней энергии образующих оболочку газовых молекул и нарушением их связей с сорбентом;
- смешивание освобожденного метана с воздухом и образованием горючих газовой смеси, которые при достаточно высоком давлении могут самопроизвольно воспламеняться, зарождая огневой фронт.

Таким образом, предлагаемый авторами механизм (табл. 5) зарождения и развития взрывов в запыленных участках выработок, обслуживающих газообильные пласты, представляется более расширенным, чем известный (см.табл. 1) и менее энергоемким.

Из него видно, что при взрывах гибридных смесей активное участие принимает метан, высвобождающийся под действием ударной волны, имеющий относительно невысокую температуру воспламенения и способный к самовоспламенению при скачкообразном значительном повышении давления. Еще одним важным аспектом развития взрыва является высокая константа скорости окисления освобожденного от метана угля, что увеличивает генерацию тепла в огневом фронте взрыва.

Таблица 5

Механизм возникновения взрывов гибридной взрывозвеси в тупиковых горных выработках

№пп	Процесс
1	– возникновение источника воспламенения, первичного взрыва и формирование фронта волны давления
2	– образование облака содержащей диффундирующий метан пыли и увеличение ее концентрации
3	– компрессионная дегазация пылегазовых систем
4	– обнажение неокисленных угольных поверхностей с естественной химической активностью
5	– самовоспламенение сжимаемой горючей газовой смеси
6	– развитие зоны горения пиролизных газов и угольного вещества, генерация теплового потока в направлении распространения взрыва
7	– перемещение ударной волны, поднимающей новые облака пыли с последующей их компрессионной дегазацией и самовоспламенением

Выводы. 1. На основании ранее выполненных исследований динамики метана в разгруженном от горного давления угольном массиве, обоснована, продолжительная, от нескольких минут до нескольких суток, диффузия метана из пылевидного угля и формирования систем «угольная частица – газовая оболочка».

2. Теоретически, на основе теории потенциальной абсорбции Поляни, обоснована возможность компрессионной дегазации системы «угольная частица - газовая оболочка» с образованием локальных областей горючей газозвушной среды при скачкообразном изменении давления в горной выработке.

3. Экспериментально подтверждено, что развитие взрывов гибридных взрывозвесей по энергопотребности приближается к взрывам метановоздушных смесей, что существенно меньше, чем для взрыва пылевоздушных смесей.

4. Установлено, что механизм возникновения взрыва гибридной взрывозвеси и его распространения в выработке, зависит не только от таких природных факторов как: количество угольной пыли, осевшей в выработке; дисперсность пылевых частиц; содержание летучих веществ в угле, но также от степени дегазации частиц пыли газоносных угольных пластов. Это открывает возможность дальнейшего совершенствования взрывозащиты горных выработок.

Список литературы

1. Шевцов Н.Р. Взрывозащита горных выработок: Учебное пособие для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. – Донецк: «Норд-пресс», 2002. – 280 с.

2. Романченко С.Б. Пылевая динамика в угольных шахтах/ С.Б.Романченко, Ю.Ф. Руденко, В.Н. Костеренко. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 256 с.

3. Нецепляев М.И. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах/ М.И. Нецепляев, А.И. Любимова, П.М. Петрухин. – М.: Недра. 1992, – 298с.

4. Геомеханические и технологические условия газодинамических процессов в угольных шахтах: монография/Н.И.Антощенко, П.Е.Филимонов, Б.В.Бокий, В.К.Костенко, В.П.Коптиков, Е.Л.Завьялова, В.Н.Окалелов. – Алчевск: ДонГТУ, 2013. – 291с.

5. Предупреждение и тушение подземных эндогенных пожаров в труднодоступных местах/ [Костенко В.К., Булгаков Ю.Ф., Подкопаев С.В., Завьялова Е.Л., Костенко Т.В. и др.]; под общ. ред. В.К. Костенко. – Донецк: Изд-во «Ноулидж» (донецкое отделение), 2010. – 253 с.

6. Звягільський Ю.Л. Дослідження процесу перерозподілу метану навколо очисного вибою що рухається/ Ю.Л.Звягільський, Б.В.Бокій, В.В.Назимко – Донецьк. «Норд-Прес», 2005. – 195 с.

7. Карашкадзе Г.Г. Методика расчета дебита метана из зоны гидрообработки неразгруженного угольного пласта/ «Метан». Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня/ – М.: Изд-во «Мир горной книги», 2007. – С. 83-95.

8. Адсорбция и пористость: монография/под ред. М. М. Дубинина / – М.: Наука, 1976. – 307с.

9. Склонность к самовозгоранию углей, шахтных пород и отходов углеобогащения: КД 11.01.04.009- 2000: утв. Минтопэнерго Украины и введ. в действие 26.09.2000. – Донецк: НИИГД, 2000. – 28 с. – (Нормативный документ Минтопэнерго Украины. Методика определения).

10. Саранчук В.И. Физико-химические основы переработки горючих ископаемых / В.И.Саранчук, В.В. Ошовский, Г.А. Власов. – Донецьк: ДонГТУ "Східний видавничий дім", 2001. – 304 с.

References

1. Shevtsov N. *Vzryvozaschita gornyh vyrabotok: Uchebnoe posobie dlya vuzov*, (2002) [Explosion mining: A manual for schools. 2nd ed. Revised. and add.] Donetsk: "Nord-press"

2. Romanchenko S.B. Pylevaya dinamika v ugolnyh shahtah / S.B. Romanchenko, Yu.F. Rudenko, V.N. Kosterenko. – М.: Izdatelstvo "Gornoe delo" OOO "Kimmeriyskiy tsentr", 2011. – 256 p.

3. Netseplyaev M.I. Borba so vzryvami ugolnoy pyli v shahtah / M.I.Netseplyaev, A.I.Lyubimova, P.M.Petruhin. – М.: Nedra. 1992 – 298 p.

4. Geomechanicheskie i tehnologicheskie usloviya gazodinamicheskikh protsessov v ugolnyh shahtah: monografiya/ N.I.Antoschenko, P.E.Filimonov, B.V.Boky, V.K.Kostenko, V.P.Koptikov, E.L.Zavyalova, V. N.Okalelov. – Alchevsk: DonGTU, 2013. – 291p.

5. Preduprezhdenie i tushenie podzemnyh endogennh pozharov v trudnodostupnyh mestah / [Kostenko V.K. Bulgakov Y.F., Podkopaev S.V., Zavyalova E.L., Kostenko T.V. i dr.]; pod obshch. red. V.K. Kostenko. – Donetsk: Izd-vo "Noulidzh" (donetskoe otdelenie), 2010. – 253 p.

6. Zvyagilsky Y.L. Doslidzhennya protsesu pererозpodilu metanu navkolo ochisnogo viboyu scho ruhaetsya / Yu.L.Zvyagilsky, B.V.Bokiy, V.V.Nazimko - Donetsk. "Nord-Pres", 2005. – 195 p.

7. Karashkadze G.G. Metodika rascheta debita metana iz zony gidroobrabotki nerazgruzhennogo ugolnogo plasta / "Metan." Otdelnyy vypusk Gornogo informatsionno-analiticheskogo byulletenya / – М.: Izd-vo "Mir gornoy knigi", 2007. – pp 83-95.

8. Adsorbtsiya i poristost: monografiya / pod red. M.M. Dubinin / – М.: Nauka, 1976. – 307 p.

9. Sklonnost k samovozgoraniyu ugley, shahtnyh porod i othodov ugleobogascheniya: CD 11.01.04.009- 2000 utv. Mintopenergo Ukrainy i vved. v deystvie 26.09.2000. – Donetsk: NIIGD, 2000. – 28 p. – (Normativnyy dokument Mintopenergo Ukrainy. Metodika opredeleniya).

10. Saranchuk V.I. Fiziko-himicheskie osnovy pererabotki goryuchih iskopaemyh / V.I. Saranchuk, V.V.Oshovsky, G.A.Vlasov. – Donetsk: DonSTU "Shidniy vidavnichiy dim", 2001. – 304 p.

