

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВЗРЫВОВ МЕТАНА И УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ НА ВЫБРОСООПАСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ

Охрана труда в угольных шахтах есть комплексная система законодательных актов, социально-экономических, организационных, технических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда. Вместе с тем, технически неконтролируемое образование взрывоопасной смеси в горных выработках, и ее взрывы поставили под сомнение целесообразность подземной добычи угля на выбросоопасных пластах ценной жизни шахтеров.

Взрывобезопасность производственных процессов является неотъемлемой частью системы охраны и безопасности труда на технологических выемочных и подготовительных участках угольных шахт. Вместе с тем, на этих участках угольных шахт происходит основная часть воспламенений метановоздушной смеси (МВС) и пылевоздушной смеси (ПВС), которые часто заканчиваются катастрофами. Только в течение одного 2007 года в России, Украине и Казахстане произошли крупные катастрофы на шахтах «Ульяновская» и «Юбилейная» в Кузбассе, шахте им. А.Ф. Засядько в Донбассе и шахте им. Ленина в Караганде, в результате которых погибло 296 шахтеров. Масштабы этих аварий вызвали большой социальный резонанс в обществе, а у специалистов горного дела множество проблемных вопросов о перспективах дальнейшего развития угольной промышленности.

Расследование причин и обстоятельств возникновения этих аварий показало, что существующие средства предотвращения взрывов в горных выработках (взрывопреграждающие заслоны) неэффективны и не обеспечивают их взрывозащиту. Поэтому развитие и совершенствование средств и способов борьбы с взрывами метана и угольной пыли в горных выработках является актуальной научно-технической проблемой, связанной с повышением техники безопасности и охраны труда в угольных шахтах.

Анализ последних исследований и публикаций, посвященных данной проблеме показал, что создание систем предотвращения и локализации взрывов взрывоопасной среды должно базироваться на автоматическом создании в выработке взрывопреграждающей предохранительной среды. Для этого на участке горной выработки, еще не затронутом взрывом, принудительно распыляют жидкие или порошкообразные ингибиторы реакции окисления метана кислородом воздуха. Назначение такой непрерывной газодисперсной предохранительной среды – предотвратить воспламенение взрывоопасной среды, снизить параметры опасных факторов взрыва до безопасных значений и оказать локализирующее действие на распространение пламени и ударной волны в горной выра-

ботке. В связи с этим необходимо знать эффективные параметры предохранительной среды и критические условия для предотвращения в выработке воспламенения взрывоопасной среды при ее взаимодействии с продуктами детонации метано-пылевоздушной смеси. Решение этих задач имеет важное научное значение при разработке взрывоподавляющих заслонов.

Исследование условий воспламенения взрывоопасной среды, образования ударных волн, взаимодействия их и продуктов детонации метановоздушной смеси с предохранительной средой должно дать необходимые параметры для взрывоподавляющих заслонов, обеспечивающих взрывозащиту в горных выработках. Однако в настоящее время данные исследования проводятся не достаточно фундаментально. Более того, наука в решении проблемы борьбы с взрывами метана и угольной пыли на больших глубинах шахт, разрабатывающих выбросоопасные пласты, зашла в тупик. В этом вопросе остается неопределенным механизм образования и воспламенения взрывоопасной среды. Результаты же последних исследований указывают на то, что решение этой проблемы вполне осуществимо.

Целью статьи является рассмотрение механизма образования взрывоопасной среды и ее детонации в зонах метастабильного состояния угля на выбросоопасных пластах.

Современная техника взрывобезопасности в угольных шахтах основывается на трех принципах предотвращения взрывов газопылевоздушных смесей. Первый заключается в исключении образования взрывоопасной среды путем интенсивной вентиляции горных выработок, осланцевания отложений из пыли, смыва угольной пыли и т.д. Практика ведения горных работ показала, что динамика выделения метана из разрабатываемых пластов угля в выработки может быть спокойной, в виде суфляра из закрытых полостей или внезапной. При внезапных выбросах угля и газа количество выделившегося метана может на порядок превышать величину природной метаноносности угольного пласта. В этом случае возникает заведомо взрывоопасная среда. Поэтому необходимо использовать комплекс мероприятий для обеспечения взрывобезопасности на основе второго принципа: предотвращения возникновения источников, инициирующих взрыв образованной взрывоопасной газопылевоздушной среды. К таким источникам можно отнести открытое пламя пожара или пламя при дефлаграции ВВ, ударные волны, продукты взрыва детонирующего заряда или взрывчатой смеси, электрические разряды, нагретые твердые тела, пирофорное искрение [1].

В тех случаях, когда нельзя исключить возможность возникновения опасных для взрывоопасной среды источников, способных вызвать ее воспламенение, реализуют третий принцип обеспечения взрывобезопасности за счет выполнения взрывозащиты, при которой возможный очаг горения или взрыва был бы локализован и ликвидирован без катастрофических последствий [2].

Таким образом, возникновение аварии на угольной шахте потенциально связано с нарушением всего комплекса мероприятий по обеспечению взрывобезопасности, в результате чего происходит образование взрывоопасной среды, возникает источник для ее воспламенения и система взрывозащиты по какой-то

причине не способна локализовать и ликвидировать очаг воспламенения. Такая ситуация может возникнуть, если работниками шахт полностью игнорируются «Правила безопасности в угольных шахтах», нормативно-техническая документация по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по выбросам угля (породы) и газа, «Единые правила безопасности при взрывных работах», а технические средства контроля параметров безопасности работ не совершенны. Подобная ситуация может быть и в результате возникновения аварийно-опасных режимов работы шахты, связанных с проявлением неизвестного фактора, влияющего на поведение угольного пласта в процессе изменения геомеханического состояния пород и органического угольного вещества. Последнее высказывание сделано не случайно, так как ряд ответственных лиц, специалистов и ученых в объяснении причин последних катастроф на угольных шахтах склоняются именно к такой позиции, то есть проявления на угольных пластах неизвестных науке природных явлений, подчеркивая тем самым «слабость» горной науки и отсутствие в ней должного фундаментализма. С этим нельзя согласиться, так как на угольных шахтах очень часто пренебрегают известными основными принципами безопасности при чрезмерной интенсификации производства добычи угля. Тем не менее, этот вопрос требует должного исследования.

В горной выработке развитие взрыва метано-пылевоздушной смеси начинается с ее воспламенения. При воспламенении взрывоопасной среды создаются условия, которые приводят или к горению метана, или к детонации МВС. Вне всякого сомнения, можно утверждать, что процесс детонации МВС в горной выработке приводит к крайне тяжелым последствиям, так как характеризуется большой скоростью распространения детонационной волны и образованием мощных ударных волн, которые способны сами вызывать воспламенение МВС на больших расстояниях от источника их возникновения.

В последние годы в ИГТМ НАН Украины [3] и в ИПКОН РАН России [4] проводятся исследования, посвященные изучению особенностей атомной структуры ископаемых углей и изменения микроструктуры деформируемого угля выбросоопасных пластов. Анализ результатов этих работ позволил уточнить механизм выхода растворенного метана из твердого угольного вещества и условия перехода стабильной системы «угольное вещество – метан» в метастабильное состояние. В зонах метастабильного состояния образуется высокодисперсный крайне реакционный уголь и происходит изменение его физико-химического состояния и состава. В результате высокодисперсные фазы разрушаемого угля, включая наночастицы, могут образовываться в угольном пласте при изменении его напряженно-деформированного состояния в процессе разработки. Зоны высокодисперсного угля являются зонами нестабильности, в которых происходит переход метана из связанного в свободное состояние при разгрузке или разрушении угольного пласта. На выбросоопасных пластах высокодисперсный уголь, содержащий наночастицы, по объему может составлять десятую часть от общей добычи массы угля. Возможно, последний вывод с учетом высокой проникающей и реакционной способности наночастиц усилит осознание большого влияния высокодисперсных фракций разрушаемого угля

на безопасность труда рабочих и взрывоопасность горных выработок. Действительно, при суточной добыче из очистного забоя 2000 т/сут. образуется около 200 т высокодисперсной пыли, из которой примерно половина оседает в горных выработках. При норме осланцевания 50% для перевода угольной пыли в невзрывчатое состояние потребуется ежесуточно около 100 т инертной сланцевой пыли только для осланцевания выработок одного добычного участка. Масштаб этих работ по осланцеванию выработок всей шахты трудно представить.

Не менее важные исследования проведены ИФГП НАН Украины [5] и ВостНИИ [6]. Угলেখимическими исследованиями установлено, что мостиковые связи между атомами в составе органической массы углей представляют собой связи пониженной прочности. При разрушении пласта происходит повышение дефектности углеродо-кислородных и углеродо-водородных мостиков, которое приводит к образованию активных фрагментов структуры угля, отличающихся нестабильностью. При их разрушении относительное выделение метана из угля возрастает в 1,5–3 раза. Это приводит к резкому увеличению выделения метана при разрушении угля, которое в несколько раз превышает его природную метаносность. Так как возможности вентиляции выемочных участков при высоких нагрузках ограничены, то выделения метана в таком количестве приведет к образованию взрывоопасных концентраций МВС при работе очистного комбайна. Возникает дилемма: работать с «белой шкалой», «загрубив» датчики метана или покинуть участок до полного его проветривания. В данной ситуации многие специалисты, считая себя «академиками» горного дела, в силу меркантильного интереса и консервативного мышления дают команду продолжать работу, преступно полагая, что для воспламенения взрывоопасной МВС необходимы источник с высокой температурой и время индукции, в течение которого он должен существовать. Это заблуждение дорого обходится шахтерам.

Так как все последние взрывы МВС при авариях в шахтах носили детонационный характер, то рассмотрим процесс воспламенения МВС, при котором возникает ее детонация. Необходимо также обратить внимание и на тот факт, что наиболее легко детонационный режим у МВС возникает при внезапных выбросах угля и газа в выработки на угольных выбросоопасных пластах. Яркий пример этого – крупнейший взрыв при выбросе метана на шахте им. Карла Маркса в г. Енакиево в июне этого года. Это указывает на то, что в выбросоопасных зонах система «угольное вещество – метан» образуется в метастабильном состоянии. Эта система может легко разрушаться и образовывать крайне реакционный уголь в виде наночастиц с большой поверхностной энергией, способной активировать как само углеводородное угольное вещество, так и выделившийся метан.

Коварство органического углеводородного угольного вещества заключается в существовании в нем промежуточных продуктов, содержащих углерод с координационным числом (валентностью) от одного до пяти. До недавнего времени наши классические представления о промежуточных соединениях углеводородов ограничивались лишь знаниями о радикалах, катионах и анионах [7]:

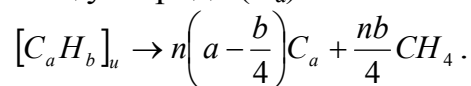
CH_4 ,	$\dot{C}H_3$,	CH_3^+ ,	CH_3^- ,	CH_5^+ ,	$\ddot{C}H_2$.
метан	метил радикал	метил катион	метил анион	метоний катион	метилен карбен

Молекулы, содержащие двухвалентный углерод, считались слишком нестабильными и редко встречающимися на практике. Однако в последние годы положение изменилось, и радикалы двухвалентного углерода стали хорошо известны, они были обнаружены и в самой структуре угля, и в продуктах его распада. Карбеновый углеродный атом имеет два несвязанных электрона и представляет собой очень активный радикал. Оценить термодинамическую устойчивость карбена по отношению к другим промежуточным продуктам можно, последовательно отрывая атомы водорода от метана и сопоставляя тепловые эффекты разных стадий этого процесса (см. таблицу).

Таблица – Тепловые эффекты разных стадий реакции образования промежуточных продуктов углеводорода

№	Реакция	Тепловой эффект реакции ΔH , кДж/моль
1	$CH_4 \rightarrow \dot{C}H_3 + \dot{H}$	431,6
2	$\dot{C}H_3 \rightarrow \ddot{C}H_2 + \dot{H}$	364,18
3	$\ddot{C}H_2 \rightarrow \overset{\cdot\cdot}{C}H + \dot{H}$	523,25
4	$\overset{\cdot\cdot}{C}H \rightarrow C_a + \dot{H}$	339,1

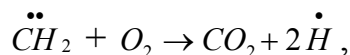
Как видно из приведенных реакций, процесс образования метилена из метильного радикала требует на 66,98 кДж/моль меньше энергии, чем образование метильного радикала из метана. Напротив, на отрыв водорода от метилена, приводящий к метиновой молекуле (CH), затрачивается на 92,1 кДж/моль больше энергии. Следовательно, метилен в сравнении с метильным или метиновым радикалом легче образуется и труднее разрушается, то есть относительно стабилен. Устойчивость метилена позволяет ему накапливаться при реакции разложения твердого раствора метастабильной системы из органического вещества угля и метана. Разложение этой системы идет с образованием химически активных наночастиц углерода (C_a) и метана:



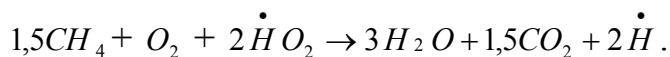
Они в дальнейшем образуют метилен по следующей реакции:



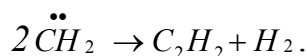
Радикал $\ddot{C}H_2$ при наличии воздуха мгновенно реагирует с молекулой кислорода и вызывает цепное самовоспламенение имеющейся МВС по следующей схеме реакций:



Общая реакция цепного взрыва при самовоспламенении МВС имеет вид:



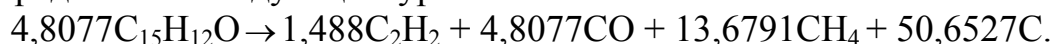
Возможен и иной сценарий развития взрыва продуктов разложения метастабильного раствора метана в угле через реакцию образования взрывоопасного ацетилена:



Ацетилен $H-C\equiv C-H$ самовоспламеняется без кислорода при температуре $T = 330^{\circ}C$ или давлении $P = 0,2$ МПа и концентрации чуть выше 2,0%.

В результате проведенных исследований [8] установлены ранее не известные источники цепного самовоспламенения МВС и инициирования в ней процесса детонации с помощью детонационного распада ацетиленоводородной смеси. При детонации этой смеси образуется детонационная волна, которая образует ударную волну в горной выработке с параметрами, достаточными для воспламенения вновь образованной МВС.

Рассмотрим механизм образования взрывоопасной среды на примере выбросоопасного пласта ℓ_1 шахты им. А.Ф. Засядько. Процесс разложения угля марки Ж из этого пласта в зоне метастабильного состояния во время выброса можно представить следующим уравнением:



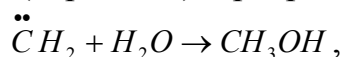
При разложении угля в зоне выброса выделяется 447,4 л/кг газа, в котором содержится 33,331 л/кг ацетилена (7,45%). Его концентрация в газовой фазе выше критической ($7,45 > 2,1\%$), поэтому ацетилен может самовоспламениться и детонировать, образуя при этом ударную волну, которая способна вызвать детонацию МВС в выработке.

Инерционные пассивные полочные заслоны просто не успевают срабатывать при высокой скорости ударной волны в горной выработке и локализовать взрыв в начальной стадии его развития. Автоматические заслоны типа СЛВА-1 не способны локализовать и предотвратить крупномасштабный детонационный процесс во взрывоопасной смеси в горной выработке, так как каждый из них содержит всего 40 кг пламегасящего порошка и имеет узконаправленное действие. Ситуацию в горной выработке в еще большей степени осложняет присутствие горношахтного оборудования (комбайн, крепь, конвейер), имеющего силовой электропривод, при разрушении которого ударной волной критическая ситуация только усугубляется. В результате имеем то, что имеем – катастрофы в угольных шахтах с огромными жертвами. Возникают вопросы: а как же быть дальше и где выход из сложившейся ситуации?

Ответы на эти вопросы, как ни странно, всем известны [9]. Путь достижения эффективности и безопасности горного производства лежит только через внедрение передовых новейших технологий. Речь идет о способе, связанном с обработкой угольного массива водными растворами поверхностно и химически активных веществ (ПАВ и ХАВ). В результате этого изменяется физико-химическое состояние угля, снижается выбросоопасность угольных пластов, стабилизируется динамика газовыделения. Однако новейшие передовые разработки должны вписываться в технологию горного производства. Одним из наиболее важных составляющих процесса добычи угля является способ разруше-

ния горного массива. Учитывая перспективность взрывного способа разрушения угля, его превосходство перед механическим и необходимость воздействия на уголь водных растворов поверхностно и химически активных веществ с целью перевода его в состояние, позволяющее контролировать выбросоопасность угля и газовыделение из пласта, была предложена технология гидровзрывания зарядов ВВ в горных породах. Согласно этой технологии заряд со всех сторон должен быть окружен водой или водным раствором соответствующей соли. При гидровзрывании заряда ВВ наряду с разрушением пород происходит импульсная закачка воды или водного раствора в пласт, его предварительное рыхление и дегазация. Одновременно в призабойной части выработки идет распыление воды, снижение пылеобразования и интенсивности ударных волн и создается предохранительная среда из тумана и пара с параметрами, обеспечивающими взрывозащиту в горной выработке.

Столь замечательные результаты гидровзрывания получаются за счет того, что вода заполняет все свободное от заряда ВВ пространство шпура (скважины), проникает в трещины и микротрещины по его боковой поверхности и повышает волновой импеданс среды вокруг заряда. При гидровзрывании заряда энергия продуктов детонации ВВ идет на ударное сжатие воды и образование ударных волн в среде, окружающей заряд. За счет энергии, передаваемой в массив ударными волнами, в нем образуется система трещин, которые заполняет и расширяет движущаяся потоком ударно-сжатая вода как рабочее тело процесса разрушения. При взрывании в угле образование в нем трещин и разрушение структурных атомных связей ведут к его дегазации и снятию напряженного состояния. Роль воды существенно возрастает при гидровзрывании на опасных угольных пластах в зонах метастабильного состояния, так как вода активно взаимодействует с метиленом (карбеном), превращая его в простейший спирт:



что полностью исключает вероятность возникновения процессов самовоспламенения МВС и образования взрывоопасного ацетилена. Таким образом, безопасность горных работ резко возрастает, а способ гидровзрывания при разрушении угля и горного массива обеспечивает необходимые условия по охране труда шахтеров. Однако в настоящее время этот способ борьбы с взрывами метана и угольной пыли, к сожалению, не применяется.

Проанализируем действие существующих систем взрывозащиты горной выработки при взрывоподавлении МВС на примере взрыва, происшедшего 18.11.2007 г. на участке 13-й восточной лавы пласта ℓ_1 шахты им. А.Ф. Засядько. Предложим следующий сценарий развития взрыва и его локализации.

На момент взрыва забой 13-го восточного конвейерного штрека пласта ℓ_1 опережал лаву примерно на 150 м. Предположим, что в забое данной выработки произошел внезапный выброс угля и газа и объем тупиковой части выработки оказался загазирован до ее сопряжения с лавой. В этот момент детонация ацетиленоводородной смеси в забое вызывает воспламенение и распространение детонации МВС на расстояние не менее 150 м. Для этого случая необходимо

определить параметры взрывозащиты, которые обеспечат локализацию взрыва на участке штрека длиной 150 м и сечением 18 м².

В современных системах взрывозащиты горных выработок СЛВА-1 и АСВП-ЛВ для гашения взрывов МВС используются порошки-ингибиторы с флегматизирующей концентрацией (C_{ϕ}): ПСБ-ТМ ($C_{\phi} = 19,8 \text{ г/м}^3$) и ИСТО-1 ($C_{\phi} = 10 \text{ г/м}^3$). Согласно теории взрывозащиты, общая масса порошка ингибитора, который должен быть задействован при гашении продуктов детонации МВС в условиях шахты им. А.Ф. Засядько для системы СЛВА-1, использующей ПСБ-ТМ, будет равна 2798,1 кг, а для системы АСВП-ЛВ, использующей ИСТО-1 1413,2 кг.

Так как на этой шахте была использована система взрывозащиты АСВП-ЛВ, то локализацию взрыва можно будет осуществить, если ее устройства расположить в 3 ряда по 12 шт. через каждые 7 метров заслона. В этом случае длина заслона составит 21 м, а общая масса порошка-ингибитора для гашения взрыва 1440 кг. При условии одновременного срабатывания каждого устройства системы АСВП-ЛВ и эффективного распыления ими порошка-ингибитора должны быть созданы следующие параметры взрывозащиты:

1. Флегматизирующая концентрация порошка-ингибитора по всей длине предохранительной среды – $10,2 \text{ г/м}^3$, что достаточно для прекращения взрывной реакции в МВС.

2. Взрывопреграждающая концентрация порошка-ингибитора по длине заслона – $3,81 \text{ кг/м}^3$. При такой концентрации не возможна передача детонации от детонирующей метановоздушной или ацетиленоводородной смеси через инертный промежуток предохранительной среды заслона к взрывоопасной среде на противоположном конце заслона.

Таким образом, установлены необходимые для локализации взрыва МВС параметры предохранительной среды, позволяющие обеспечить взрывозащиту горных выработок на выбросоопасных пластах в случае детонации ацетиленоводородных и метановоздушных смесей. Данные параметры можно использовать при разработке заслонов нового поколения.

Необходимо также отметить, что наиболее вероятным механизмом воспламенения взрывоопасной среды в выработках на выбросоопасных пластах является цепной механизм, основанный на участии в реакции активных радикалов метилена. Метилен – это радикал, способный вызывать самовоспламенение МВС или образовывать взрывоопасный и нестойкий ацетилен. Поэтому наряду с эффективными и надежными взрывопреграждающими заслонами необходимо использовать интенсивное увлажнение пласта в зонах метастабильного состояния системы «уголь – метан» путем гидровзрывания зарядов ВВ, окруженных водными растворами поверхностно и химически активных веществ. В результате импульсного гидровоздействия в этих зонах происходит дегазация и связывание метилена водой, что исключает образование взрывоопасного ацетилена и цепное самовоспламенение МВС.

Литература

1. Розловский А.И. Научные основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. – М.: Химия, 1972. – 364 с.
2. Калякин С.А. Предотвращение воспламенения взрывоопасной смеси в горных выработках дисперсной средой // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах / Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс: МакНИИ, 2006. – С.88-98.
3. Булат А.Ф., Скипочка С.И., Куцева Н.А. О некоторых особенностях атомной структуры ископаемых углей // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Ун-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2005. – Вип. 61. – С. 3-11.
4. Трубецкой К.Н., Викторов С.Д., Галченко Ю.П., Одинцев В.Н. Техногенные минеральные наночастицы как проблема освоения недр // «Вестник Российской академии наук», т. 76, № 4, апрель, 2006.– С. 318-324.
5. Алексеев А.Д., Ревва В.Н., Рязанцев Н.А. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений. – Киев: Наукова думка. – 1989. – 167 с.
6. Фролков Г.Д., Фролков А.Г. Механохимическая концепция выбросоопасности угольных пластов // Уголь. – 2005. – №2. – С. 18-22.
7. Костиков Р.Р. Двухвалентный углерод // Соросовский образовательный журнал, 1995. – №1. – С. 67-73.
8. Калякин С.А. Предотвращение взрывов метана и угольной пыли в горных выработках шахт // Взрывное дело. Вып. № 99/56. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2008. – С. 245-255.
9. Алексеев А.Д. Новітні технології – надійний ключ до надр // Вісн. НАН України, 2005. – №1.- С. 24-31.