

УДК 622.235.3:622.814



С. А. КАЛЯКИН,
доктор техн. наук
(ДонНТУ)



Н. Р. ШЕВЦОВ,
доктор техн. наук
(ДонНТУ)



И. В. КУПЕНКО,
канд. техн. наук
(ДонНТУ)

Создание эффективной системы взрывозащиты угольных шахт

Рассмотрены причины взрывов и аварий на шахтах. Исследованы существующие способы взрывозащиты. Обоснована концепция локализации взрыва по сети горных выработок. Освещены перспективные направления создания новой, эффективной системы обеспечения безопасности труда на угольных шахтах.

Угольные шахты Донбасса разрабатывают газонасыщенные и выбросоопасные пласты. Средняя глубина разработки превышает 725 м, а 30 шахт работают на глубине 1000 – 1400 м. Около 90 % шахт являются газовыми, 60 % – разрабатывают пласты, опасные по взрывам пыли, 45 % – опасные по внезапным выбросам, а 25 % – опасные по самовозгоранию угля.

Взрывобезопасность производственных процессов – неотъемлемая часть системы охраны и безопасности труда на технологических выемочных и подготовительных участках угольных шахт. На этих участках происходит наибольшее количество воспламенений метановоздушной и пылевоздушной смесей, которые часто заканчиваются катастрофами. В течение последних пяти лет в России, Украине и Казахстане произошли крупные катастрофы на шахтах «Ульяновская», «Юби-

лейная» и «Распадская» в Кузбассе, ПАО «Шахта имени А. Ф. Засядько», им. К. Маркса и «Суходольская» в Донбассе и на шахтах им. В. И. Ленина и «Абайская» в Караганде, которые стали причиной гибели более 500 шахтеров.

В ночь с 8 на 9 мая 2010 г. произошли два последовательных взрыва на самой крупной, наиболее оснащенной новейшим импортным оборудованием, шахте России – «Распадская». Погибло 90 шахтеров и горноспасателей. Продукты взрыва и ударная волна вырвались на поверхность и разрушили надшахтные здания обоих вертикальных стволов (аналогичные последствия имели место при взрыве на шахте им. К. Маркса в Украине).

Масштаб этих аварий вызвал большой общественный резонанс, а у специалистов горного дела – множество проблемных вопросов о перспективах дальнейшего развития угольной промышленности.

Современная система взрывозащиты угольных шахт включает технические, технологические и организационные мероприятия, выполняемые при ведении горных работ в целях полного исключения возможности возникновения воспламенения метана и угольной пыли или

сведения к минимуму разрушений и материальных потерь от вредных последствий взрывов. Эта система многоступенчата. Она предусматривает выполнение следующих мероприятий по предотвращению взрывов и взрывозащите шахт [1]:

- предупреждение образования и скопления взрывчатых газопылевоздушных смесей;
- предотвращение воспламенения горючих газов, угольной пыли и распространения взрывов по горным выработкам;
- гашение пламени взрыва и локализацию действия ударной волны как наиболее опасного фактора взрыва при поражении людей и разрушении горношахтного оборудования.

Действующая концепция предупреждения аварий и воспламенения взрывоопасной среды базируется на применении средств взрывоподавления и способов взрывозащиты в выработках, надежность которых основана на профессионализме и исполнительском мастерстве человека.

Основным недостатком принятой концепции является невозможность прогноза человеком опасных ситуаций в забое выработки и зависимость надежности средств, обеспечивающих взрывобезопасность в шахтах, от человеческого фактора в процессе ведения горных работ.

В результате анализа последних исследований и публикаций стало известно, что возникновение аварий и взрывов на шахтах связано с нарушением человеком комплекса мероприятий по обеспечению взрывобезопасности, в результате чего образуется взрывоопасная среда, возникает источник ее воспламенения, а система взрывозащиты не способна подавить и локализовать взрыв. Во многом это связано с производственной деятельностью человека как следствие его ошибочных и непрофессиональных действий при высоком ритме работы в сложных условиях на большой глубине и с ненадежностью средств взрывозащиты, не обеспечивающих эффективный контроль за состоянием горного массива и газового состава воздуха в выработках. При групповых несчастных случаях, связанных с гибелью людей в шахтах, удельный вес ошибочных действий человека, приводящих к катастрофам, составляет более 90 % по сравнению с другими факторами.

В связи с интенсификацией добычи угля в шахтах на большой глубине возникают сложные, нередко непригодные для нормального функциони-

рования человека условия труда, увеличивается природная и техногенная опасность горного производства, что приводит к ошибочным и непрофессиональным действиям шахтеров. На больших глубинах при разрушении угля интенсифицируются процессы генерации метана и других горючих газов. Эти процессы связаны с механохимическим разложением органического углеводородного угольного вещества, состоящего из макромолекул. Макромолекулы углей могут легко разрушаться и генерировать предельные и непредельные углеводороды (CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2), водород, оксид углерода и наночастицы угольной пыли. В продуктах разложения угольного вещества образуются радикалы, которые вызывают цепные реакции, в результате которых образуется метилен $\dot{\text{C}}\text{H}_2$, представляющий собой активный радикал двухвалентного углерода [2].

Этот радикал образует ацетилен – одно из самых мощных химических взрывчатых соединений, отличающихся от других крайней неустойчивостью и нестабильностью. Ацетилен вызывает спонтанные взрывы ацетиленметанводородных смесей без участия в этом процессе каких-либо источников инициирования (воспламенения) и даже кислорода воздуха [3].

Образование в макромолекулах угольного вещества метильных групп $-\text{CH}_3$ приводит к тому, что при разрушении угольного вещества происходит генерация продуктов его полураспада и наночастиц угольной пыли с адсорбированными на поверхности частиц метилрадикалами $\dot{\text{C}}\text{H}_3$. Они легко вступают в цепные реакции с кислородом воздуха; при этом выделяется тепло и происходит самовоспламенение пылевоздушной смеси. Поэтому наночастицы угольной пыли обладают пирофорностью. Наличие ацетилена в продуктах распада угольного вещества и пирофорность угольной нанопыли снимает вопрос об источниках воспламенения. Очевидно, что в определенных условиях выполнения горных работ горючие газы, генерируемые углем при его разрушении, могут самовоспламеняться, а наночастицы угольной пыли при движении в потоке воздуха – самовозгораться. К этому следует добавить, что содержание кислорода в атмосфере Земли, а следовательно, и в шахте изменяется от 18,9 % летом до 21,1 % во время года с отрицательными температурами. Это приводит к увеличению содержания

кислорода в метановоздушной смеси, повышается ее верхний концентрационный предел взрываемости и возрастает чувствительность смеси вплоть до ее самовоспламенения. Поэтому не случайно, что взрывы-катастрофы в угольных шахтах возникают наиболее часто в межсезонье и зимой [1].

Следовательно, необходимо создавать новые и совершенствовать имеющиеся способы взрывозащиты горных выработок в угольных шахтах [4].

Цель статьи – исследование и обоснование эффективных способов предотвращения взрывов и создания системы взрывозащиты в угольных шахтах.

Долгое время во всех угледобывающих странах мира в качестве основных средств взрывозащиты горных выработок применяли сланцевые и водяные заслоны. По принципу действия это пассивные заслоны, которые представляют собой стационарное сооружение, состоящее из легко разрушаемых емкостей с водой или инертной пылью, устанавливаемых под кровлей поперек выработки. Принцип их действия основан на том, что ударная волна, распространяющаяся впереди продуктов взрыва, разрушает заслон, создавая тем самым в выработке предохранительную дисперсную среду, состоящую из инертной пыли или капель воды. Эффективные параметры взрывозащиты заслонами в горных выработках обоснованы согласно принятой теории.

Основы теории взрывозащиты горных выработок с помощью дисперсной предохранительной среды рассмотрены в работах [3, 4]. Основные положения теории взрывозащиты сводятся к необходимости охлаждения продуктов горения взорвавшейся смеси до температуры, которая ниже минимально необходимой для инициирования реакции окисления метана и угольной пыли в невзорвавшейся среде, а также к выполнению условия по предотвращению взрыва смеси от действия на нее ударной волны.

Наиболее сложным вариантом предотвращения развития взрыва по выработке при его локализации в загазированной горной выработке являются условия, когда в качестве газовой фазы дисперсной системы выступает взрывчатая смесь метана. В работах [5, 6] выявлены закономерности взаимодействия защитных факторов предохранительной среды, имеющей определенную

длину для локализации взрыва во взрывоопасной среде. Доказано, что положительный результат может быть достигнут только при обязательном выполнении основного критического условия: в пределах предохранительной среды взрывчатая смесь должна быть превращена в невзрывчатую, при этом концентрация соли-ингибитора в ней на момент действия источника воспламенения должна быть не меньше концентрации, флегматизирующей метановоздушную смесь, т. е.

$$C_{и}(t) \geq C_{ф}, \quad (1)$$

где $C_{и}(t)$ – начальная концентрация ингибитора в предохранительной среде, г/м³;

$C_{ф}$ – концентрация соли-ингибитора, г/м³, флегматизирующая метановоздушную смесь.

В процессе перемещения в такой среде раскаленные продукты взрыва охлаждаются до безопасной температуры, а параметры ударной волны снижаются до безопасных значений. Длина предохранительной среды зависит от свойств солей-ингибиторов метана, а ее плотность – от расхода соли на 1 м выработки для гашения ударной волны [7].

Поэтому взрывозащитный заслон должен в первую очередь достаточно быстро обеспечить флегматизацию рудничной атмосферы по всей площади сечения выработки к моменту подхода к нему продуктов взрыва. Длина предохранительной среды при «слабых» взрывах и небольшой скорости продуктов взрыва успевает сформироваться в выработке, а при «сильных» взрывах и больших скоростях ударной волны не успевает, так как ударная волна самостоятельно воспламеняет взрывоопасную среду на большом расстоянии. Следовательно, при локализации взрыва с помощью пламегасящей среды с концентрацией, равной $C_{ф}$, длина пламегасящей среды должна иметь значительную протяженность вдоль выработки. Поэтому на практике для охлаждения продуктов взрыва и снижения параметров ударной волны требуется их обеспечение в пределах участка выработки ограниченной длины заслона. Для реализации этого требования необходимо сформировать пламегасящую предохранительную среду с концентрацией соли-ингибитора, равной $C_{и}$, т. е. преграждающей взрыв и гасящей ударную волну; она на порядок и даже больше может превышать флегматизирующую концентрацию в пре-

дохранительной среде. В противном случае продукты взрыва и ударная волна «прошьют» предохранительную среду и воспламят находящуюся за ней взрывчатую газопылевоздушную смесь.

Условие локализации взрыва в этом случае можно записать в виде

$$C_{\text{п}} \gg C_{\text{ф}}. \quad (2)$$

Таким образом, возможны два режима локализации взрыва:

- первый режим предполагает создание протяженной предохранительной среды с концентрацией, равной флегматизирующей ($C_{\text{ф}}$) к моменту появления источника воспламенения;
- второй режим предполагает искусственное ограничение участка выработки, на котором должна быть обеспечена локализация взрыва, за счет создания предохранительной пламегасящей среды с весьма высокой концентрацией солей-ингибиторов в ней ($C_{\text{п}}$).

Рассмотрим принципы построения технологических схем взрывозащитных устройств в зависимости от требуемого практикой режима локализации.

Наиболее эффективным режимом является первый, когда выполняются взрывоподавление и локализация взрыва с помощью ингибитора с концентрацией, равной $C_{\text{ф}}$. Однако реализовать его на практике, как следует из рассмотренной теории локализации взрыва, в полной мере невозможно, он может быть осуществлен только в начальной стадии развития взрыва. При сильных взрывах, характеризующихся высоким давлением во фронте ударной волны, необходимы локализирующие заслоны с большим расходом ингибитора для создания концентрации $C_{\text{п}}$ (второй режим). В этом случае они неэффективны, так как становятся громоздкими и теряют мобильность. Поэтому были разработаны автоматические заслоны взрывоподавления [8].

Принципиальным отличием автоматических заслонов от пассивных является то, что участок взрывоподавления и локализации взрыва задается расстоянием приближения продуктов взрыва к заслону с помощью специального датчика. Этот датчик формирует сигнал после того как зафиксировал взрыв на нужном расстоянии и выдает его на быстродействующий взрывоподавитель, который создает в выработке предохранительную за-

весу из порошка-ингибитора с нужной концентрацией. Эффективность таких заслонов может быть чрезвычайно высокой при условии надежной работы датчиков, фиксирующих момент возникновения взрыва, и правильного выбора расстояния от датчика до заслона. Опыт применения автоматических заслонов АВП-1, СЛВА-1, ВВС, АСВП-ЛВ показал, что они могут быть эффективны, если находятся на расстоянии не более 60 м от забоя, где образуется взрывоопасная смесь. Поэтому заслоны необходимо постоянно передвигать вслед за продвижением забоя или устанавливать дублирующие комплекты заслонов по мере развития горных работ, что вызывает определенные трудности организационного и технического порядка. Передвижение автоматических заслонов трудоемко, а дублирование очень дорого, так как требует десятков подобных заслонов в выработках. Поэтому используется, как правило, несколько заслонов, которых явно недостаточно для эффективной и надежной взрывозащиты шахт.

Установлено, что системы взрывозащиты в угольных шахтах могут быть зависимы от человеческого фактора (воздействия на психофизиологическое состояние человека большой глубины), крайне тяжелых условий труда, а также от экономического состояния шахты (экономия на обеспечении безопасного выполнения работ). Из-за необходимости применения определенного количества взрывоподавляющих заслонов и больших затрат на их приобретение и обслуживание повышается себестоимость угля, что делает добычу нерентабельной.

Таким образом, налицо системный кризис идеологии взрывобезопасности угольных шахт. Он связан с тем, что во время проведения горных работ системы взрывозащиты органически не вписываются в технологию рабочего процесса и не являются неотъемлемой частью механизмов, его осуществляющих. Для задействования систем защиты необходимо затрачивать много средств и времени на выполнение рабочего процесса, что связано с потерями добычи угля. Еще одна причина кризиса: системы взрывозащиты не задействованы в постоянном мониторинге взрывоопасности рудничной атмосферы, состояния горного массива в рабочей зоне и не могут способствовать принятию превентивных мер по борьбе со взрывами горючих газов на стадии их выделе-

ния (обеспечивать взрывопреупреждение). Системы взрывозащиты начинают действовать только в сложившейся аварийной ситуации и когда в выработке произошел взрыв. Задача сводится только к локализации последствий взрыва, а не к его предотвращению.

Последние исследования [9, 10] показали, что при разрушении угольного пласта происходит разложение угольного вещества на продукты распада, которые создают с воздухом взрывоопасные, порой самовоспламеняющиеся смеси. Эти смеси горючих газов заполняют поры и локальные трещины горного массива. Вокруг контура выработка вследствие геотектонической активности горного массива и неблагоприятной техногенной ситуации возникает зональная дезинтеграция горных пород, характеризующаяся появлением систем трещин, которые начинают преобразовываться под действием деформаций генетического возврата и сложных взаимодействующих растягивающих и сжимающих напряжений из локальных в фильтрующие и сквозные.

Заполненные взрывоопасной средой трещины представляют собой большую опасность. Образование ацетилена, ацетиленидов тяжелых металлов в угле и породах может вызвать воспламенение горючих газов и распространение пламени по трещинам. Устойчивое распространение пламени на десятки метров наблюдается в трещинах размером более 2,6 – 3 мм. Мелкодисперсная угольная пыль в виде наночастиц способна самовоспламениться в потоке проходящего свежего воздуха и воздуха на исходящей струе. Ее кислородный индекс – 12,9 %, т. е. она способна самовоспламениться в выработках и выработанном пространстве шахт при наличии кислорода в воздухе более 12,9 %.

Неустойчивость горного массива, внезапные выбросы приводят к динамическим нагрузкам на породы. Возникающие возмущения в горных породах распространяются со скоростью звука, или 4000 – 6000 м/с. Это приводит к тому, что осевшая пыль на боках и кровле выработки мгновенно переходит во взвешенное состояние, так как период действия возмущения достаточен для смещения наночастиц пыли с поверхности пород. В микропорах и трещинах массива начинается их эволюция, характеризующаяся схлопыванием и проращением трещин в сквозные каналы. В этих

каналах взрывоопасная среда самовоспламеняется и движется с огромной скоростью (около 2000 м/с) в полость выработки. При наличии в ней слоевых скоплений метана, предварительно взвешенной угольной пыли в смеси с воздухом происходит их воспламенение и взрыв. В этом случае необходимо, чтобы заслон находился в выработке в рабочем состоянии и нужном месте.

Очевидно, что в этих экстремальных условиях горных работ горючие газы, генерируемые углем, могут самовоспламеняться, а наночастицы пыли при движении в потоке воздуха – самовозгораться. При такой опасности горных работ трудно требовать от людей каких-либо превентивных мер борьбы с механохимической активацией угольного вещества и обеспечения безопасного выполнения работ путем контроля взрывчатой смеси и обслуживания заслонов. На больших глубинах при высокой температуре и интенсивной технологии работ состояние человека не адекватно его поведению на поверхности. Создающееся психофизиологическое состояние человека настолько отличается от нормального, что требовать от него выполнения каких-либо сложных, четко продуманных действий по взрывозащите невозможно. Поэтому необходима совершенно новая система обеспечения безопасности труда в угольных шахтах, опасных по газу или угольной пыли. Ее составляют:

1. Мониторинг взрыво- и пожароопасной ситуации при горных технологических процессах:

- использование предупредительной сигнализации о наличии горючих газов;
- контроль за составом горючих газов в горной выработке и выработанном пространстве;
- предупреждение появления условий самовоспламенения горючих газов и угольной пыли в выработке и выработанном пространстве – по динамике роста концентрации непредельных углеводородов, водорода, оксида углерода и наночастиц угольной пыли;
- контроль за содержанием кислорода в шахте;
- контроль за напряженным состоянием горного массива и предупредительная сигнализация о вероятности наличия газодинамических явлений (ГДЯ) и внезапных выбросов газа.

2. Взрывопреупреждение горючих газов, борьба с самовозгоранием угля и пирофорностью наночастиц угольной пыли:

- создание многофункциональной ингибиторной предохранительной среды в горных выработках в отношении горючих газов и наночастиц угольной пыли, в том числе принудительная инертизация и флегматизация рабочей зоны и выработанного пространства в течение всего технологического процесса;

- автоматическое превентивное экстренное создание предохранительной среды в сети горных выработок и выработанном пространстве по данным телеметрического контроля;

- разработка мероприятий, исключающих увеличение концентрации кислорода в рудничном воздухе и повышение степени взрывчатости газопылевоздушных смесей.

3. Взрывозащита технологических процессов:

- применение высокопредохранительных взрывчатых веществ как средства создания предохранительной среды при взрывных работах и экстренной взрывозащите;

- утилизация угольной пыли в выработках, ее смыв или перевод в невзрывчатое состояние;

- автоматические взрывоподавляющие заслоны в рабочих зонах, на комбайнах и другом горношахтном оборудовании при добыче угля и проведении выработок;

- ингибирование процесса самовоспламенения угля в пластах, целиках, выработанном пространстве.

4. Локализация поражающего действия взрыва и процесса горения угля:

- ловушки для ударных и детонационных волн в выработках;

- противопожарное экранирование выработок и участков выработанного пространства;

- противовыбросные экраны при газодинамических явлениях.

Новые подходы к обеспечению взрыво- и пожаробезопасности в выработках угольных шахт состоят в том, что они должны формировать систему, в которой средства взрывозащиты взаимосвязаны, а действие их строго синхронизировано во времени и пространстве. Это необходимо по двум причинам. Первая – надо организовать полноценный рабочий процесс, который бы прерывался только в случае реальной опасности взрыва или пожара; вторая – обеспечить эффективность предотвращения взрыва и пожара, спасения людей на опасном участке шахты. Для этого нужно,

чтобы мониторинг взрыво- и пожароопасности был взаимосвязан с взрывопредупреждением при технологическом процессе. Это достигается обработкой телеметрических данных датчиков и при необходимости – выдачей сигнала на включение систем, обеспечивающих ингибирование и флегматизацию среды в выработках и выработанном пространстве.

Аналогично должны быть связаны взрывозащита в выработках и локализация в них действия опасных факторов взрыва и пожара. Погасить пожар и предотвратить распространение взрыва горючих газов – это только часть ликвидации опасной ситуации, другая заключается в необходимости спасения людей, их защиты от действия ударных волн, высокой температуры и токсичных газов – продуктов взрыва.

Выводы. В глубоких шахтах первопричиной воспламенений газопылевоздушной смеси является не метан (согласно классическим представлениям), а взрывчатая угольная пыль и непредельные углеводороды.

Применяемые пассивные водяные и сланцевые заслоны обладают большой инерционностью при развитии в выработках процесса детонации взрывоопасной среды. Поэтому они не во всех условиях могут обеспечить взрывозащиту горных выработок.

Автоматические заслоны обладают высокой эффективностью подавления взрывов взрывоопасной среды, но требуют постоянного переноса вслед за движением забоя или постоянного дублирования через каждые 60 м, что крайне неудобно и требует затрат средств на их приобретение и времени на установку.

Наметился системный кризис идеологии взрывобезопасности угольных шахт, так как системы взрывозащиты органически не вписываются в технологию рабочего процесса и не являются неотъемлемой частью осуществляющих его механизмов.

На глубоких горизонтах угольных шахт в результате проявления геотектонической активности массива и неблагоприятной техногенной ситуации происходит неконтролируемая генерация углем горючих газов и наночастиц пыли, которые могут образовывать взрывчатые самовоспламеняющиеся смеси с воздухом.

Основу новой системы обеспечения взрывозащиты угольных шахт, опасных по газу или пыли, составляют: мониторинг взрыво- и пожароопасной ситуации во время технологических процессов; взрывопредупреждение горючих газов и взрывоподавление.

Система взрывобезопасности угольных шахт требует взаимосвязи во времени и пространстве средств мониторинга взрыво- и пожароопасности и систем взрывопредупреждения и взрывозащиты технологических процессов.

До разработки и внедрения принципиально новых технологий взрывозащиты угольных шахт следует исключить влияние человеческого фактора в процессе практического применения допущенных способов и средств предотвращения и локализации взрывов пылегазовоздушных смесей.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Шевцов Н. Р. Взрывозащита горных выработок / Н. Р. Шевцов: учебн. пособие для вузов. – Донецк: Норд-Пресс, 2002. – 280 с.
2. Костиков Р. Р. Двухвалентный углерод / Р. Р. Костиков // Соровский образовательный журнал. – 1995. – № 1. – С. 67 – 73.
3. Шевцов Н. Р. Теория локализации взрыва, способы и средства взрывозащиты горных выработок при взрывных работах: автореф. дис. на соиск. науч. степени доктора техн. наук: спец. 05.26.01 «Охрана труда и пожарная безопасность» / Н. Р. Шевцов. – Донецк, 1992. – 45 с.
4. Шевцов Н. Р. Развитие теории локализации взрывов газопылевоздушных смесей дисперсными системами в угольных шахтах / Н. Р. Шевцов, С. А. Калякин // Форум горняков – 2005: международ. конф., 12–14 октября 2005 г.: материалы. – Днепропетровск: НГУ, 2005. – Т. 4. – С. 245 – 250.
5. Шевцов Н. Р. К теории локализации взрыва в загазованных выработках / Н. Р. Шевцов // Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: сб. науч. тр. МакНИИ. – Макеевка: Макеевка-Донбасс, 1990. – С. 27 – 35.
6. Калякин С. А. Предотвращение взрывов метана и угольной пыли в горных выработках шахт / С. А. Калякин // Взрывное дело. – 2008. – № 99/56. – С. 271 – 284.
7. Калякин С. А. Развитие научных основ безопасного производства взрывных работ в газоносных массивах угольных шахт: дис. ... доктора техн. наук: 05.26.01 / Калякин Станислав Александрович. – Донецк, 2010. – 508 с.
8. Предупреждение и локализация взрывов в подземных условиях / [А. Е. Умнов, А. С. Голик, Д. Ю. Палеев, Н. Р. Шевцов]. – М.: Недра, 1990. – 286 с.
9. Калякин С. А. Механизмы образования взрывоопасной среды и ее детонации в зонах метастабильного состояния угольного вещества / С. А. Калякин // Вести Горного института. – 2008. – Ч. 2. – С. 27 – 34.
10. Калякин С. А. Идеология взрывобезопасности угольных шахт, опасных по газу и угольной пыли / С. А. Калякин // Безопасность труда в промышленности. – 2010. – № 11. – С. 38 – 43.