



## ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЗРЫВОВ МЕТАНА И ПЫЛИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

ЛИЛИАНА МЕДИЧ ПЕЙЧ<sup>1</sup>, ХАВЬЕР ГАРСИЯ ТОРРЕНТ<sup>1,2</sup>, НИЕВЕЗ ФЕРНАНДЕЗ АНЬЕЗ<sup>1</sup>,  
ХОРЗЕ МАРТИН МОЛИНА ЭСКОБАР<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Технический университет Мадрида, Мадрид, Испания

<sup>2</sup> Лаборатория Дж.М.Мадариага, Мадрид, Испания

<sup>3</sup> Национальный университет Колумбии, Богота, Колумбия

За прошедший век в угольной промышленности произошло большое количество взрывов с многочисленными жертвами. Целью данного исследования является изучение методов предотвращения распространения взрывов метана и угольной пыли при помощи пассивных водных заслонов и возможность их применения на угольных шахтах Испании. Описаны физические и химические свойства, а также условия воспламеняемости и взрываемости пыли угольных пластов Испании. Статья написана на основе стандарта EN-14591-2:2007, содержит требования к поперечному сечению горизонтальных выработок, параметрам крутопадающих пластов, особенности применения ВВ.

Показана целесообразность требований стандарта для большинства штреков шахт Испании с учетом их длины и площади поперечного сечения, а также наличия различных препятствий в виде электровозов, конвейерных лент, вентиляционных сооружений и т.д.

**Ключевые слова:** пассивные водные заслоны, угольные шахты Испании, взрыв метана, взрыв угольной пыли, удаление пыли

**Как цитировать эту статью:** Медич Пейч Лилиана. Предотвращение распространения взрывов метана и пыли в угольных шахтах / Лилиана Медич Пейч, Хавьер Гарсия Торрент, Ниевез Фернандез Аньез, Хорзе Мартин Молина Эскобар // Записки Горного института. 2017. Т. 225. С. 307-312. DOI: 10.18454/PMI.2017.3.307

**Введение.** Взрыв угольной пыли происходит в несколько этапов [1]:

- формирование взрывоопасной смеси метана/воздуха;
- воспламенение смеси;
- начало первичного взрыва газа;
- подъем угольной пыли из-за фронта ударной волны от взрыва газа и формирование смеси пыль-воздух;
- увеличение скорости распространения фронта пламени от возгорания пыли, взметывание еще большего количества пыли и формирование взрывоопасной зоны перед фронтом пламени;
- распространение взрыва пыли по цепи выработок шахты.

Первоначальные действия по предотвращению взрывов в шахтах должны быть направлены на превентивные меры против появления в выработках угольной пыли и метановоздушной смеси [2].

Основной мерой по предотвращению появления метановоздушной смеси взрывоопасной концентрации является наличие вентиляции, наиболее эффективной при низкой газообильности выработок. С ростом газообильности необходимо увеличивать величину подаваемого в выработку воздуха. В случае возможности интенсивных газовыделений необходимо рассмотреть другие превентивные меры, например, дегазацию или нагнетание воды в пласт.

В законодательстве Испании относительно мер борьбы с угольной пылью приводится требование о необходимости принимать меры для снижения отложений воспламеняющейся пыли и утилизации ее безопасным способом [3, 4].

Перечислим необходимые превентивные меры [5, 6, 7]:

- не допускается накопление пыли в выработках, в первую очередь мелких фракций, имеющую низкую влажность. Для этого требуется согласно разработанному графику мероприятий осуществлять удаление пыли в выработках участков для предотвращения формирования ее отложений. Наибольшее внимание следует уделять местам скопления пыли: в призабойном пространстве, внизу наклонных поверхностей, под конвейерными лентами в местах перегрузки, вблизи загрузочных бункеров и т.д.;
- нагнетание воды во вмещающую породу и в пласт осуществляется через скважины;
- связывание пыли производится путем орошения, которое является простым и дешевым способом, однако в ряде случаев недостаточно эффективно из-за испарения воды. Иногда для уменьшения количества пыли методом связывания используют соляной раствор. Самыми распро-



страненными являются водные растворы  $\text{CaCl}_2$  и  $\text{MgCl}_2$ , которые в сочетании с увлажняющими реагентами образуют корочку на осевшей пыли, предотвращая ее взметывание. Существуют три разных способа применения гигроскопических солей: в виде паст, порошков и хлопьев [8];

- нанесение пыли инертных материалов на угольную пыль применяется для предотвращения распространения ее взрывов в штреках. Доля инертной пыли в смеси с угольной может изменяться от 55 до 80 % по массе [9].

Для взрыва необходимо наличие пяти факторов одновременно, т.е. так называемый «пятиугольник взрывчатости»: легко воспламеняющееся вещество, окислитель, условия для смешивания, условия для воспламенения и ограниченный объем [10].

Отсутствие одного из вышеприведенных факторов или нарушение связи между ними предотвращает возникновение взрыва. В условиях шахты мы можем говорить о следующем:

- существование легко воспламеняющегося взрывоопасных веществ – угольной пыли и метана; угольная пыль может взрываться сама по себе; метан играет существенную роль, но главным образом в качестве основной причины взрыва, составляющей взрывоопасной смеси;

- наличие окислителя – атмосферного воздуха;

- воздействие источников воспламенения – работы в шахте;

- работы в шахте ведутся в замкнутом пространстве, при взрыве характерной особенностью в подобных условиях является резкое возрастание давления в отличие от работ на открытом пространстве.

- смешение взрывчатых веществ и окислителя или взметывание пыли в воздухе происходит практически одновременно с воспламенением. В обычном состоянии пыль в выработке имеет концентрацию, недостаточную для возникновения взрыва в условиях шахтного воздуха. При взметывании пыли в воздух ее взрывоопасная концентрация настолько высока, что нахождение людей в такой атмосфере невозможно.

Мероприятия по защите от взрывов проводятся в несколько этапов. Целью начальных мер является удаление легко воспламеняющихся веществ и атмосферного кислорода или снижение их количества до концентрации, исключающей образование взрывоопасной смеси. Увеличение воздухообмена в выработках может быть обеспечено за счет вентиляции. В зонах работы людей не рекомендуется применение мер, приводящих к снижению количества атмосферного кислорода в атмосфере выработок.

В Европе было проведено большое количество исследований для разработки мер контроля и борьбы с существующими опасностями в шахтах, но тем не менее взрывы все еще происходят [11, 12, 13]. В условиях угольной шахты взрыв метана может повлечь за собой взрыв угольной пыли, который распространится по всем выработкам участка и будет продолжаться до того места, где горение пыли больше невозможно. Распространение взрывной волны способствует взметыванию угольной пыли, для предотвращения возгорания которой в шахтах применяют водяные заслоны, распыляющие воду.

Решением проблемы иногда становится уборка шахт, в частности, устранение скоплений угольной пыли, которые могут взметываться в воздух и приводить к вторичному взрыву. По этой причине существуют некоторые ограничения в использовании ряда мер: отсутствие или ограничение наличия веществ, которые могли бы стать причиной взрыва или создания взрывоопасной атмосферы и отсутствие или ограничение выброса легко воспламеняющихся веществ и формирования взрывоопасных смесей.

Вторая группа включает меры по предупреждению взрыва, направленные на предотвращение причин возгорания. Возгорание может возникнуть от работы электрического или механического оборудования, а иногда даже от присутствия людей. На практике защита от последующих взрывов осуществляется при помощи технических и организационных мероприятий. Варианты организационных мероприятий – инструктажа работников или надлежащая уборка территории предприятия и оборудования.

Третья группа мер направлена на преодоление воздействия взрывов и снижение рисков нанесения вреда здоровью работников, например:

- проектирование в выработках защитных сооружений от ударной волны;

- установка пассивных и активных заслонов от взрывов;

- наличие автоматических систем пожаротушения;

- организация эвакуационных путей.



Целью этих мер является предотвращение распространения и снижение энергии действия взрыва после момента его возникновения. Следует отметить, что вторичные взрывы угольной пыли случаются после первичного воспламенения и обладают максимальным разрушительным эффектом, поскольку в них задействуется большое количество взрывающегося вещества, высвобождается большее количество энергии, и распространяется он на несколько километров по штреку. Очевидно, чем раньше будет остановлен взрыв, тем меньше будет последствий.

Если такие превентивные меры, как уменьшение количества угольной пыли или возможности ее образования и выделения время работ или снижение взрывчатости осевшей пыли путем добавления инертных веществ, неэффективны, то для защиты всей шахты от распространения взрыва используют пассивные заслоны.

**Предотвращение взрывов при помощи снижения взрывчатых свойств пыли.** Снижение взрывчатых свойств пыли – это метод предотвращения распространения первичного взрыва. Он состоит в добавлении инертных веществ (стерильный или разбавляющий порошок) к угольной пыли для формирования смеси с меньшими показателями воспламеняемости.

Применение инертной пыли предотвращает участие угольной пыли в реакции после первичного взрыва. Это обусловлено тем, что инертная пыль действует как теплопоглотитель (абсорбируя энергию), изолирует фронт пламени и снижает кинетику реакции взрыва. Инертная пыль снижает концентрацию угольной пыли и препятствует участию кислорода и других газов в реакции взрыва.

Законодательство Испании не устанавливает минимальный уровень концентрации инертной добавки в смеси. Однако зарубежные стандарты и правила указывают данный параметр (процент содержания инертной пыли) в зависимости от свойств угля или характеристик шахты.

Один из авторов данной статьи разработал метод для подсчета минимального содержания инертной пыли в смеси [14, 15]. Метод позволяет при отсутствии метана теоретически подсчитать с учетом влажности и зольности долю инертной пыли, которую необходимо добавлять к угольной пыли.

Расчеты основаны на зависимости между химическим составом и взрывоопасностью углей. В результате экспериментов были получены две канонические переменные: во-первых, набор данных, определяемых в лаборатории для получения химических свойств угля, во-вторых, набор данных для определения взрывоопасности угля:

$$VC_{12} = f(C, H, S, M, Cs, V);$$

$$VC_{11} = f(T_{\min}, LIE, EMI, P_{\max}, K_{\max}).$$

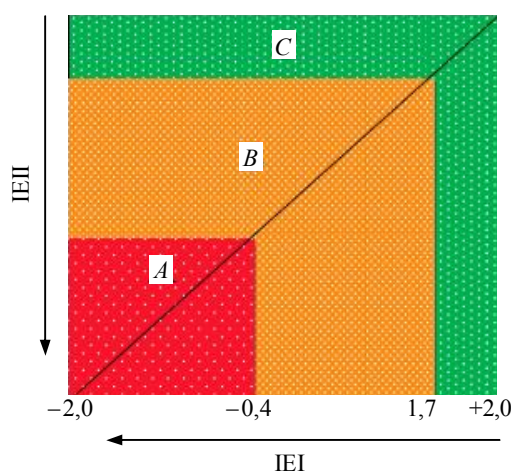
Первый набор данных – это линейная комбинация переменных, связанных с химическим анализом, где  $C$  – это содержание углерода;  $H$  – содержание водорода;  $S$  – содержание серы,  $H$  – влажность;  $Cs$  – зольность;  $V$  – выход летучих веществ.

Каноническая переменная  $VC_{12}$  содержит все характеристики угля, полученные при помощи частного и полного химического анализа. Очевидно, что выход летучих веществ является самым значимым параметром  $VC_{12}$  по сравнению с прочими характеристиками угля, но преимущество метода состоит в рассмотрении особенностей влияния всех параметров,

$$VC_{12} = -3,05 + 0,052C - 0,039H + 0,041S - 0,012W + 0,064A - 0,057V.$$

Второй набор данных  $VC_{11}$  относится к линейной комбинации переменных, связанных с характеристиками взрывоопасности угля, где  $T_{\min}$  – минимальная температура возгорания;  $LIE$  – нижний предел взрываемости;  $EMI$  – минимальная энергия возгорания;  $P_{\max}$  – максимальное давление;  $K_{\max}$  – постоянная повышения давления.

Каноническая переменная  $VC_{11}$  учитывает характеристики чувствительности к возгоранию и взрывоопасность. В зависимости от значений  $VC_{12}$  и  $VC_{11}$ , которые обычно очень близки друг к другу количественно, оценивается степень опасности угольной пыли. Метод канонических переменных позволяет получить графическое представление свойств углей. Может быть получена каноническая диаграмма с соответствующими переменными для каждого образца углей. В результате статистической обработки данных углей разного класса и происхождения было ус-



Каноническая диаграмма для углей [14, 15]

тановлено, что при значениях  $VC_{12} = VC_{11} = -0,4$  и  $VC_{12} = 1,7$  можно обозначить границу между тремя типами угольной пыли (см. рисунок).

Как видно из рисунка, можно выделить три зоны: *A* – высокая чувствительность и опасность, *B* – средняя, *C* – низкая.

Также можно теоретически рассчитать процент содержания невоспламеняющегося вещества (воды или инертной пыли), которое необходимо добавлять в каждый тип углей из зоны *A* или *B*, чтобы перевести их в «безопасную категорию» *C*.

При определении добавляемой доли инертного порошка для каждого типа углей с целью перемещения в «безопасную зону» *C* рекомендуется использовать уравнение  $Z = (VC_{12} 100 - 170) / (VC_{12} - 3,35)$ , где  $Z = X + Y$ ;  $Z$  – процент добавленного инертного порошка;  $X$  –

процент добавленного стерильного порошка;  $Y$  – процент добавленной воды.

Опыт показал хорошую сходимость расчетных и лабораторных данных, полученных при проведении полномасштабных тестов в экспериментальных штреках [16].

Канонические переменные обычно варьируют в диапазоне между  $-2,0$  и  $+2,0$ . Для более полной оценки их значения часто используют два индекса взрывоопасности: химический индекс  $IEI$  и физический индекс  $IEП$ . Их можно получить непосредственно из канонических переменных:

$$IEI = 2 - VC_{12};$$

$$IEП = 2 - VC_{11}.$$

В качестве примера расчета канонической переменной можно привести данные химического анализа различных образцов углей и требуемого процентного содержания инертного порошка [17]:

Уголь	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>S</i>	<i>W</i>	<i>A</i>	<i>V</i>	$VC_{12}$	$Z = X + Y, \%$
Теруэль	58,9	3,7	6,8	2,8	13,8	33	-0,88	61,0
Питсбург	77,1	5	1	1,75	6,5	35,9	-0,85	60,7
Астурия	70,1	4,7	1,7	0	9,7	37,6	-1,04	62,4

**Защита от взрывов.** Европейский комитет по стандартизации (ЕКС) опубликовал стандарт EN 14591-2:2007 «Предотвращение взрывов и защита шахт – Системы защиты – часть 2: Пассивные водные заслоны траншейного типа» [18], описывающий использование водных заслонов, их создание, компоненты, размещение, способы применения и т.д. Основными элементами являются контейнеры с водой (называемые траншеей), расположенные в выработке. Согласно стандарту EN14591-2 «водные траншейные заслоны создаются и располагаются таким образом, чтобы предотвратить распространение взрывов за счет цепной реакции и их последующего детонирования». Заслоны располагаются на определенном расстоянии от предполагаемого места воспламенения, т.е. не защищают пространство между ним и местом воспламенения. Данный стандарт успешно применяется в протяженных выработках, типичных для Германии и Польши. Он известен в угольной промышленности Испании, его применение к локальным особенностям шахт возможно при гибком использовании [19].

После тщательного изучения данного стандарта и других соответствующих документов Лаборатория Дж.М.Мадариага (Испания) и Лаборатория экспериментальной шахты «Барбара» (Польша) провели исследование параметров самых распространенных шахт Испании и их забоев из числа основных компаний по добыче угля [20].

Заслоны от взрывов делятся на две группы в зависимости от применяемого огнегасящего агента: заслоны из каменной пыли, где используется инертный порошок (в основном карбонат кальция), и водные заслоны (вода как огнегасящий агент).

В зависимости от режима использования заслоны делятся на:





- концентрированные заслоны (защита некоторого рабочего пространства, в котором присутствуют источники возгорания);
- распределенные заслоны (защита всех забоев, предназначены для снижения энергии взрыва, количество огнегасящего агента устанавливается на  $1 \text{ кг/м}^3$  пространства).

Около 70 % угольных шахт Польши используют данные типы заслонов, в Великобритании применяют заслоны из каменной пыли, в Германии, Чехии и других странах Европы популярны водные заслоны.

Основным преимуществом водных заслонов является надежная защита пространства позади заслона; существует большое количество примеров их эффективного применения в шахтах.

Водные заслоны имеют следующие недостатки:

- большие размеры, до 50 м в длину;
- уменьшение поперечного сечения выработки;
- изменение положения заслона при продвижении забоя.

При использовании заслонов в забоях необходимо учитывать наличие вероятных источников возгорания и характеристики угольной пыли.

На шахтах Испании данные параметры очень часто варьируются от шахты к шахте в отличие от других стран Европы, что означает, что установка водных заслонов должна производиться несколько иначе по сравнению с тем, как это описано в стандарте EN 14591-2:2007.

Для проведения анализа влияния конкретных характеристик угля шахт Испании были рассмотрены данные, полученные из различных образцов. На основе существующей взаимосвязи между характеристиками углей и воспламеняемостью пыли мы изучили некоторые параметры составов углей. Итак, влажность углей изменялась от 2 до 20 %, зольность – от 5 до 50 %, летучесть – от 6 до 35 %. Результаты говорят о том, что взрывоопасность угольной пыли в шахтах Испании можно отнести к среднему уровню опасности, они имеют низкий показатель по выходу летучих веществ и высокую зольность. Принимая во внимание полученные данные, можно сделать вывод, что необходимость применения водных заслонов в соответствии с требованиями стандарта EN 14591-2:2007 на шахтах Испании очень ограничена. Стандарт предписывает размещение концентрированных и распределенных водных заслонов по всей шахте, что не имеет большого значения для шахт Испании при текущих характеристиках взрывоопасности угольной пыли.

В качестве решения последней задачи данной работы мы предлагаем выборочное использование заслонов, например:

- в забоях, где ведутся взрывные работы;
- в местах возможных скоплений метана;
- в зонах извлечения угля.

Несколько водных заслонов можно установить в штреке по всей ширине сечения (с учетом ширины по уровню почвы и между стенками штрека). В результате можно говорить о площади следующего размера:

- не менее 35 % штрека с сечением до  $10 \text{ м}^2$ ;
- не менее 50 % штрека с сечением до  $15 \text{ м}^2$ ;
- не менее 60 % штрека с сечением более  $15 \text{ м}^2$ .

## Выводы

Водные заслоны защищают от распространения пламени за ними, но не защищают пространство между ними и источником возгорания. Водный заслон эффективно подавляет распространение пламени, но не взрывной волны, которая распространяется по выработке, пока ее энергия не будет погашена за счет аэродинамического сопротивления выработки. Водные или пассивные заслоны обычно являются последним звеном в цепи создания системы защиты. Можно сделать важный вывод – необходимо использовать инертные порошки.

Основные результаты данной работы:

- Необходимо проводить и документировать оценку существующих опасностей прежде, чем принимать какие-то меры по защите или предотвращению распространения взрывов. Анализ должен включать оценку свойств углей, оказывающих влияние на степень их взрывоопасности.



• Испытания необходимо проводить с учетом параметров тестов на взрывоопасность, описанных в стандарте EN 14591-2:2007, особенно в отношении показаний избыточного давления взрывной волны. Тестировать можно концентрированные и распределенные заслоны. В настоящее время данные виды испытываемых барьеров были протестированы не до конца.

• Сначала можно применять первичные меры по предотвращению распространения взрывов, а потом меры по защите от последующих взрывов. До изучения надежности устанавливаемых заслонов необходимо рассмотреть возможность применения инертных порошков.

• Если установка пассивных водных заслонов в соответствии со стандартом EN 14591-2:2007 невозможна, следует разработать руководство по предотвращению взрывов и подавлению угольной пыли.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Cybulski W. Coal dust explosions and their suppression. National Science Foundation. 1975.
2. Lebecki K. et al. Specific conditions for the initiation of coal dust explosions. HSE (Przegląd Górniczy). 1981. № 7-8. P. 368-77.
3. García Torrent J. Seguridad Industrial en Atmósferas Explosivas. Laboratorio Oficial J.M. Madariaga. ISBN 84-607-7481-3. Madrid, 2003. P. 816.
4. Lebecki K. Developments of water barrier to stop coal dust explosion. Conference on Mining Environment and Ventilation. New Delhi and Calcutta. Oxford & IBH Publishing Company, 2000.
5. Lebecki K., Cybulski K., Dydyuch Z. Test results and practical use of water bags barriers; Proceedings of the 29th International Conference of safety in Mines Research Institutes. Katowice GIG, Poland, 2001.
6. Comisión de las Comunidades europeas. Órgano permanente para la seguridad y salubridad en las minas de hulla y otras industrias extractivas. «Medidas relativas a reducir los riesgos de explosión y de incendio en las labores mineras con ventilación secundaria y a mejorar la protección del personal en caso de explosión y de incendio en las minas de carbón». Informe y propuesta a los gobiernos de los estados miembros. Doc. № 5147/89 FR. Luxemburg, 1990.
7. García Torrent J., Querol Aragón E., Fernández Ramón C. Nuevas soluciones para atmósferas explosivas en minería. Canteras y Explotaciones, Enero, 2007. № 478. P. 30-47.
8. Aplicación de procedimientos de fijación de polvos mediante sales higroscópicas en el marco de la lucha contra las explosiones de polvo de carbón. 14 Informe del O.P., Anexo V. 1977.
9. Medic Pejic L., García Torrent J., Lebecki K., Querol Aragón E. Development of explosion prevention and protection in Spanish coal mining industry. 33rd Biennial International Conference of Safety in Mines Research Institutes. Jawornik (Polonia), 2009.
10. Szulik A., Lebecki K., Cybulski K. Chapter 18 Risk of Coal Dust Explosion and its Elimination. Proceedings of the Fifth International Mining Forum 2004. Cracow – Szczyrk – Wieliczka, Poland, 24-29 February, 2004.
11. Lunn G.A., Brookes D.E. «Explosion barriers and British mines», 1992. «The design and performance of underground explosion barriers – A review» by B Jensen and T O’Beirne, 1997.
12. Commission de communautés Europeennes. Organe Permanent pour la sécurité et la salubrité dans les mines de houille et les autres industries extractives. «Medidas relativas a reducir los riesgos de explosión y de incendio en las labores mineras con ventilación secundaria», 1989.
13. Mine Safety Operations Division New South Wales Department of Primary Industries «Guideline for coal dust explosion prevention and suppression», December 2001.
14. García Torrent J., S.Armas I., Alcántara Pedreira R. A correlation between composition and explosibility index for coal dust, FUEL. 1988. Vol. 67.
15. García Torrent J., Cantalapiedra Fuchs J., Montes Villalón J.M., Alcantara Pedreira R. Improvement in the correlation between the composition index and the explosibility index for coal dust. FUEL, 1991, Vol. 70.
16. García Torrent J. Proyecto de caracterización de la explosividad de las capas de carbón de la zona de Teruel. Instituto tecnológico Geominero, 1991.
17. Medic Pejic L. Análisis de la viabilidad de las barreras de explosión pasivas en galerías de sección reducida. Tesis doctoral. ETSI Minas y Energía. Universidad Politécnica de Madrid, 2012.
18. EN 14591-2:2007. Explosion prevention and protection in underground mines – Protective systems – Part 2: Passive water trough barriers, 2007.
19. Medic Pejic L., García Torrent J., Lebecki K., Querol Aragón E., Fernández Ramón C. Full scale tests for explosion water barriers in small cross-section galleries. 11th International Scientific Conference on Modern Management of Mine Producing. Geology and Environmental Protection Albena (Bulgaria), 2011.
20. Medic Pejic L., García Torrent J., Fernandez Añez N., Lebecki K. Experimental study for the application of water barriers to Spanish small cross section galleries. DYNA 82 (189). February, 2015. P. 142-148.

**Авторы:** Лилиана Медич Пейч доктор наук, профессор, liliana.medic@upm.es (Технический университет Мадрида, Мадрид, Испания), Хавьер Гарсия Торрент, доктор наук, профессор (Технический университет Мадрида, Мадрид, Испания, Лаборатория Дж.М.Мадариага, Мадрид, Испания), Ниевез Фернандез Аньез, научный сотрудник (Технический университет Мадрида, Мадрид, Испания), Хорзе Мартин Молина Эскобар, доцент, www.loom.upm.es (Национальный университет Колумбии, Богота, Колумбия).

Статья принята к публикации 3.04.2017.