

# Защита систем помола угля от пожаров и взрывов

## Часть I

**РЕФЕРАТ.** Несмотря на тренд декарбонизации в цементной промышленности, предполагающий замену природных видов топлива альтернативными, установки измельчения угля широко используются, и задачи обеспечения их взрыво- и пожаробезопасности вряд ли утратят значение в обозримом будущем. При этом поставляемые на предприятия отрасли защитные системы не всегда позволяют успешно решить такие задачи. В настоящей статье описаны средства защиты установок помола угля от пожаров и взрывов, факторы, от которых зависит эффективность таких средств, и способы ее повышения.

**Ключевые слова:** помол угля, взрывозащита, защита от пожаров.  
**Keywords:** coal grinding, explosion protection, fire protection.

В тексте настоящей статьи словом «уголь» обозначаются каменный уголь, лигнит (бурый уголь) и нефтяной кокс. Вопросы защиты от пожаров и взрывов рассматриваются прежде всего применительно к современным системам помола, например, к системам с вертикальной валковой мельницей (ВВМ) и встроенным сепаратором.

### Введение

В европейских странах и в США, где ведется или велась в прошлом добыча угля в глубоких шахтах, промышленная взрывозащита разрабатывалась на основе исследований в области взрывобезопасности таких шахт. В них время от времени происходили так называемые гибридные взрывы, при которых взрывается смесь горючего газа и горючей пыли — обычно метана и пылевидного угля. В разных странах проводятся научные исследования в области промышлен-

ленной противопожарной защиты и взрывозащиты, и поставщики систем измельчения угля основываются на их результатах. Однако исследователи не проявляют особого интереса к взрывозащите систем не прямой подачи угля на сжигание, используемых сегодня в цементной промышленности. В итоге наличие основополагающей информации не стало залогом правильной пожаро- и взрывозащиты систем измельчения угля, поставляемых на предприятия этой отрасли.

Можно было бы ожидать, что имеет значение, приобретает ли система измельчения угля отдельно, например, для замены существующей установки, или в рамках более масштабного проекта, например, при строительстве комплектной технологической линии производства клинкера. Когда система приобретает отдельно, вопросам дизайна можно уделять больше внимания.

Однако на практике это не приносит положительных эффектов в области пожаро- и взрывозащиты.

В состав систем помола угля с его не прямой подачей на сжигание (называемых также системами помола угля с хранением измельченного продукта) включают мельницы с аэрацией — вертикальные валковые либо горизонтальные шаровые. Сегодня в такие системы, как правило, подают технологические газы с гарантированно низким содержанием  $O_2$ . Вместе с тем существуют системы, в которых используется воздух из клинкерного холодильника, содержащий 21 %  $O_2$ . Для таких систем необходимость надлежащей противопожарной защиты и взрывозащиты еще более актуальна.

Непрямая подача на сжигание означает, что измельченный уголь хранится в силосах, из которых дозированно выгружается в пневмотранспортные системы, подающие топливо в горелку. Чтобы молотый уголь попал в силосы, в фильтре его отделяют от технологических газов. Когда по такой схеме работают с газами, содержащими более 12 %  $O_2$ , а также угольную пыль в определенных концентрациях, в системе есть места, в которых временно или постоянно существует взрывоопасная атмосфера.

К сожалению, взрывозащита и противопожарная защита для систем помола угля (и для многих других областей техники) никогда не разрабатывались согласованно. Стандарты взрывозащиты во многом полностью игнорируют тот факт, что хорошая защита от взрывов не обязательно защитит

и от пожара, который может начаться после взрыва.

Отметим также, что взрывозащиту и противопожарную защиту систем измельчения угля нельзя полностью изучить путем ознакомления с открытыми литературными источниками и стандартами. Некоторые положения стандартов трудны для понимания. Кроме того, эти документы не могут учитывать все особенности промышленных установок, в которых могут развиваться самые разнообразные сценарии. В лучшем случае стандарты укажут на определенные опасности, требующие внимания, но не дадут всех ответов на вопросы, которые могут возникнуть.

Результатом описанной выше ситуации стало то, что поставщики систем измельчения угля, имеющие разный опыт работы, не в одинаковой степени понимают, что такое хорошая промышленная защита от пожаров и взрывов и насколько она важна. В итоге далеко не на всех цементных предприятиях во всем мире такая защита находится на должном уровне независимо от наличия на них сертифицированной системы менеджмента безопасности (сертифицирующие органы также не всегда достаточно осведомлены). Несмотря на предпринимаемые усилия, направленные на улучшение ситуации, по ряду причин существенного прогресса в решении этой задачи пока нет.

Поставка каждой системы измельчения угля начинается с переговоров между покупателями и продавцами. Представители покупателей склонны возлагать ответственность за ее правильный дизайн на продавцов. Зачастую поставщики систем измельчения угля, которые, как и их заказчики, не являются (и не обязаны быть) экспертами в области их противопожарной и взрывозащиты, предлагают дизайн, ранее разработанный их компанией для аналогичного случая. Поскольку такой подход повторяется снова и снова, сегодня в проектах используются конструкции систем с угольными мельницами, разработанные несколько десятилетий назад. Речь не о конструкции самих мельниц или фильтров — это основное оборудование постоянно развивается, — а о дизайне системы в целом. Во многих ситуациях дизайн новой системы позволил бы сократить не только производственные площади, но также затраты на строительные материалы (сталь и бетон) и стоимость работ. Однако затраты на изменение конструкции системы, которое требует подготовки новых чертежей, велики, и они перевешивают возможную экономию для поставщика.

Новый дизайн должен гарантировать, что:

- газы и уголь движутся в системе по кратчайшим возможным путям;
- занимаемое системой пространство невелико, не требует большого количества лестниц и проходов, и его легко содержать в чистоте;

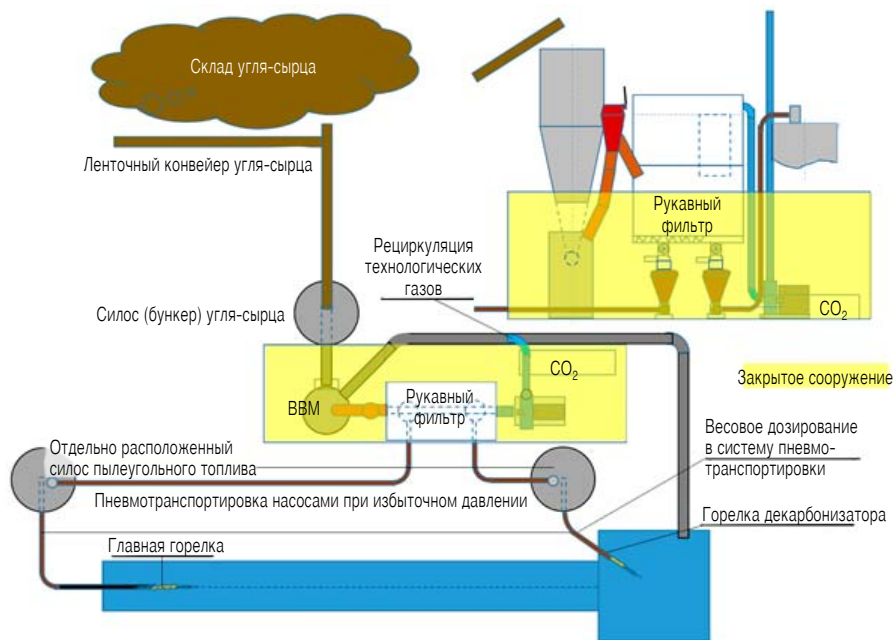


Рис. 1. Система помола угля

- внутри сооружения устанавливается только то оборудование, для которого необходимо такое размещение. Силосы не следует устанавливать внутри сооружения;
- обеспечивается удобный доступ для технического обслуживания оборудования;
- предусмотрена надежная превентивная и конструкционная защита от пожара и взрыва.

Упрощенная схема компактной системы измельчения угля с короткими путями перемещения технологических газов и угля, небольшим объемом закрытого строения и с расположенными вне этого строения силосом угля-сырца, верхней частью главного рукавного фильтра и силосом пылеугольного топлива приведена на рисунке.

Подчеркнем еще раз, что в общении с поставщиками покупатели должны настаивать на правильном дизайне систем помола угля. Требования необходимо четко сформулировать, для чего недостаточно перечислить стандарты или иные нормативные документы, которым нужно следовать. Для ясности формулировок нужно понимать, что именно может оказаться неправильным, и в результате это понимание должно предотвратить ошибки дизайна.

### Способы защиты от пожаров и взрывов

В противопожарной и взрывозащите следует различать превентивную и конструкционную взрывозащиту, при проектировании которых всегда необходимо рассматривать наихудшие возможные сценарии развития событий.

**Превентивная защита от пожаров и взрывов** включает в себя следующее:

- организацию работы склада, позволяющую гарантировать, что тот уголь, кото-

рый может интенсивно окисляться, не попадает в силосы угля-сырца;

- надежную сепарацию черных и цветных металлов из потока угля-сырца, транспортируемого в силос (силосы);
- ограничение содержания  $O_2$  в технологических газах (в зависимости от процесса) — оно не должно превышать 12 %;
- управление технологическим процессом, при котором исключено превышение заданных предельных значений температуры, а также содержания  $CO$  и  $O_2$ ;
- аварийные меры и процедуры (например, заполнение объема газообразным  $CO_2$  — аварийную инертзацию). Порядок их использования должен быть известен операторам и другому обученному персоналу.

Хороший пример темы, по поводу которой существует путаница в понятиях, — аварийная инертзация. Соответствующие технические решения нередко продаются поставщиками под самыми разными названиями, например, «система противопожарной защиты» и, кроме того, не всегда обеспечивают требуемый результат.

**Конструкционная противопожарная и взрывозащита** систем помола угля с его непрямой подачей на сжигание при использовании технологических газов обычно обеспечивается:

- устойчивостью оборудования и сооружений к давлению взрыва и ударным нагрузкам (explosion pressure shock resistance, EPSR), позволяющей им выдерживать неослабленное давление взрыва;
- сбросом давления при помощи встроенных самостоятельно закрывающихся взрыворазрядных устройств, обеспечи-

вающих необходимую степень EPSR защищаемого оборудования;

- встроенным устройством ослабления взрывной волны, обеспечивающим необходимую степень EPSR;
- встроенным устройством локализации области взрыва, обеспечивающим необходимую степень EPSR.

**Взрыворазрядное устройство** обеспечивает сброс давления в той полости оборудования, где горение взрывчатого вещества вызывает риски и при этом давление растет с высокой скоростью. Такие устройства никогда не снижают давление взрывной волны до нуля.

Для систем помола твердого топлива с его непрямой подачей на сжигание (и для многих других систем) необходимо использовать самостоятельно закрывающиеся взрыворазрядные устройства.

Если после сброса давления отверстия взрыворазрядных устройств останутся открытыми, то последующее горение угля будет поддерживаться за счет притока окружающего воздуха, а инертизация с использованием  $\text{CO}_2$  или  $\text{N}_2$  окажется неэффективной, поскольку этот газ рассеется в атмосфере.

Конструкционная противопожарная и взрывозащита не предотвращает пожары и взрывы. Чтобы их не допустить, следует предусмотреть превентивную защиту — безопасные методы эксплуатации и аварийные технические решения. Конструкционная взрывозащита — это защита «последнего рубежа», которая ограничивает опасности и ущерб до заранее определенного низкого уровня или до нуля, когда превентивная защита терпит неудачу.

**Устройство ослабления взрывной волны** гарантирует, что последствия взрыва, обусловленного возгоранием в одном компоненте системы, проявляются в связанных с ним компонентах лишь в существенно меньшей степени.

**Устройство локализации области взрыва** гарантирует, что последствия взрыва в одном компоненте системы не ощущаются в других ее компонентах.

Взаимосвязанными емкостями обычно являются ВВМ (либо ШМ и сепаратор), главный рукавный фильтр и силос (силосы) пылеугольного топлива, а в каких-то случаях также система (системы) питания горелки или насос (насосы). Согласно правилам конструкционной взрывозащиты, связанные между собой емкости должны быть взрывозащищенными или взаимно изолированными в зависимости от места их расположения, формы и возможного взрывного воздействия.

### Пожаро- и взрывозащита частей системы помола угля

В этом разделе описаны ситуации, в которых проявляются типичные недочеты в конструкции и эксплуатации установок из-

мельчения угля (причем многие из недочетов типичны), и способы действий, позволяющие избежать проблем.

**Хранение угля-сырца.** Если интенсивное окисление угля-сырца исключено, руководству завода не о чем беспокоиться. Но на заводах, где такой процесс время от времени возможен, их руководство и персонал должны предотвратить попадание угля, окисляющегося с любой непрерывно возрастающей скоростью, на ленточные конвейеры угля-сырца.

Персонал, обслуживающий хранилище угля-сырца, должен быть тщательно обучен правилам работы в критических ситуациях и соответствующим образом натренирован.

**Ленточные конвейеры угля-сырца** должны оснащаться металлосепараторами. Как черные, так и цветные металлы должны автоматически удаляться из транспортируемого потока. Зачастую металлосепаратор обнаруживает и отделяет только черные, но не цветные металлы.

Дробилки предварительного измельчения и подключенное к ним оборудование (например, фильтры) в большинстве случаев не обладают достаточной устойчивостью к давлению взрывной волны и ударным нагрузкам, которой они должны обладать. Поэтому взрыв в таком оборудовании может вызвать разрушение дробилок и, возможно, их частей, которые затем могут разлетаться с большой скоростью. В конструкции большинства дробилок предварительного измельчения отсутствуют продуманные средства защиты от пожаров и взрывов.

За дробилкой в технологической цепочке должны быть установлены дополнительные устройства для обнаружения и отделения черных металлов.

Узлы пересыпки ленточного конвейера часто оснащают пылеулавливающим фильтром. Но фильтр теряет мелкую пыль, находящуюся в верхней части материала на ленте, и часто она попадает в окружающую среду за узлом пересыпки на расстоянии нескольких метров. Такой фильтр представляет собой замкнутое пространство, в котором может начаться тление угольной пыли с ее последующим взрывом, поэтому хорошо, если удастся этого избежать.

Большинство поставщиков таких фильтров понимают, что в них возможна взрывоопасная атмосфера. Но в этих случаях поставщики часто не продумывают до конца, как предотвратить взрыв, и лишь устанавливают на фильтре взрыворазрядное устройство. Помимо того, что взрывозащитный клапан (клапаны) во многих случаях не соответствует требуемой устойчивости фильтра к давлению взрывной волны и ударным нагрузкам, он является лишь одним из трех необходимых встроенных элементов конструкционной взрывозащиты.

Важно убедиться не только в том, что взрыворазрядное устройство обеспечивает

защиту от взрыва в фильтре, но и в том, что факторы взрыва (пламя и давление) не воздействуют на всасывающую сторону фильтра, где находится вентилятор, и не влияют на ситуацию под выпускным отверстием фильтра, где обычно устанавливается поворотный клапан. Последний обычно не предназначен для локализации области взрыва и служит только в качестве шлюза.

И последнее, но не менее важное: риск пожара в таком фильтре больше, чем риск взрыва пыли, поэтому необходимо установить детектор дыма, подключенный к диспетчерской. Важно, чтобы выгрузка угольной пыли из фильтра на конвейерную ленту прекращалась автоматически, когда детектор подает аварийный сигнал.

**Силосы (бункеры) угля-сырца.** Во многих ситуациях силосы угля-сырца вообще не оснащены средствами защиты от пожара и взрыва. Это может быть оправданным, а может и нет.

Когда в силосе находится уголь с высоким содержанием (например, 35 %) летучих веществ (ЛВ), может реализоваться постоянно существующая возможность его самопроизвольного возгорания, даже если при хранении угля в штабеле на открытом воздухе какие-либо заметные признаки возгорания отсутствуют. В условиях постоянно меняющейся рыночной ситуации часто оказывается важным, чтобы предприятие было готово к использованию угля с высоким содержанием ЛВ. Если есть признаки того, что в месте расположения силоса при данных климатических условиях для определенных типов угля следует ожидать самовозгорания, необходимо будет включить хранение угля-сырца в силосах в концепцию мониторинга и аварийной инертизации установки помола угля. Это означает, что необходим мониторинг концентрации  $\text{CO}$  и  $\text{O}_2$  в газах и что система аварийного инертирования должна обеспечивать наряду с прочим заполнение газами-инертами объема силоса (силосов) угля-сырца. Имеет смысл объединить мониторинг  $\text{CO}$  и  $\text{O}_2$ . Оба газоанализатора могут быть подключены к одной системе подготовки пробы анализируемого газа, а индикация  $\text{O}_2$  позволяет получать в режиме реального времени информацию о ходе аварийного инертирования, которое должно привести к быстрому снижению содержания  $\text{O}_2$  в атмосфере там, где это требуется.

**Устройства подачи угля в мельницу.** Как ВВМ, так и ШМ представляют собой оборудование с внутренней полостью, в которой может произойти взрыв угольной пыли. При этом все, что имеет открытое соединение с камерой измельчения, будет подвержено воздействию давления взрывной волны и пламени.

В случаях, когда используется ШМ, помимо подачи технологического воздуха предусмотрены две точки подачи угля. В отличие от систем с ВВМ, где сепаратор

обычно встроен в корпус мельницы, сепаратор в системе с ШМ расположен отдельно. Второй входной поток — это поток крупки, поступающей из сепаратора.

Зачастую отсутствует или спроектированное неправильно устройство, предназначенное для локализации области взрыва или, по крайней мере, для разъединения частей агрегата, которое должно быть установлено в загрузочной части мельницы.

ВВМ и ШМ должны быть спроектированы с учетом требований EPSR. Относительно необходимой степени EPSR существует путаница. Некоторые поставщики мельниц говорят о том, что EPSR нужно определять исходя из того, что избыточное давление может достигать 6–8 бар, что явно нереалистично.

Свод правил Национальной ассоциации противопожарной защиты США (National Fire Protection Association, NFPA) — NFPA 85 — требует, чтобы EPSR соответствовала избыточному давлению 3,45 бар, но внутреннее расследование о происхождении этого требования, проведенное несколько лет назад, завершилось безрезультатно.

Тщательные расчеты показали, что избыточное давление взрывной волны в камере мельницы как для типичных ВВМ, так и для ШМ не превышает 2 бар. Одна из причин заключается в том, что у мельниц с воздушной сепарацией относительно велика площадь поперечного сечения и входного патрубка для воздуха, и выходного патрубка для воздуха с измельченным топливом, благодаря чему давление взрыва рассеивается в большом объеме системы.

**Патрубок для подачи воздуха в мельницу.** Иногда во входной части мельницы устанавливают взрыворазрядное устройство. Это имеет смысл только в том случае, когда расстояние между мельницей и расположенным выше в технологической цепочке нагнетательным вентилятором или воздухонагревателем настолько мало, что такое оборудование может быть повреждено при возможном воздействии давления из-за взрыва в мельнице. Обычно не представляет проблемы обеспечить необходимую EPSR в газоходе.

В отличие от газохода воздуха с измельченным топливом за мельницей, в газоходе перед ней могут ощущаться только давление взрывной волны и, возможно, вспышка пламени. При кратковременной вспышке пламя не сможет воспламенить топливо и быстро погаснет, так как во входной части мельницы недостаточно мелких частиц угля. Помимо защиты нагнетательного вентилятора или воздухонагревателя, установленные здесь взрыворазрядные устройства не выполняют каких-либо функций взрыво- и пожарозащиты помольной системы.

Если взрыворазрядное устройство не является самозакрывающимся (пример — разрывные мембраны), то оно будет контр-

продуктивным для безопасности системы. После разрыва мембраны поступление атмосферного воздуха и потеря аварийного газа-инерта через открывшееся отверстие (отверстия) могут поставить под угрозу защиту системы.

Большинство систем измельчения угля оснащены клапаном дистанционного управления в газоходе воздуха, поступающего в мельницу. Такой клапан, часто называемый демпфером (хотя это не очень подходящий термин), играет важную роль в концепции аварийного инертирования системы, препятствуя рассеянию CO<sub>2</sub> или N<sub>2</sub> в рамках более крупной системы, где газ-инерт был бы бесполезен. Эта роль клапана должна быть хорошо понятна при программировании контроллеров процесса, и необходимо установить такие средства управления, которые позволили бы клапану эффективно выполнять свою функцию.

Иногда возникает недопонимание в следующем: неверно утверждать, что клапан может служить в качестве устройства, блокирующего связанные с взрывом эффекты, даже если он спроектирован как быстродействующий. Существуют специальные противовзрывные обратные клапаны, обеспечивающие EPSR, но они недоступны в тех количествах, которые были бы необходимы. Они являются частями систем локализации области взрыва, которые реагируют на сигнал датчика, реагирующего на начало взрыва, и должны закрываться очень быстро. Газоходы систем угольных мельниц с воздушной сепарацией имеют большой диаметр, поэтому будет слишком большой масса подвижной части запорного механизма клапанов, из-за чего ее движение не удалось бы ускорить и замедлять настолько быстро, чтобы это приносило пользу.

Быстродействующие клапаны, которыми оснащены системы помола угля в цементной промышленности, срабатывают слишком медленно, чтобы их можно было когда-либо использовать в качестве системы взрывозащиты. Они выполняют свою функцию при аварийной инертизации, и в дальнейшем повышении их быстродействия нет необходимости.

**EPSR мельницы.** Необходимость EPSR корпуса ВВМ или уплотнений впускного и выпускного патрубков ШМ, предназначенных для их герметизации при вращении корпуса, не всегда осознается операторами и персоналом, выполняющим техническое обслуживание. Это типично для помольных систем более ранних конструкций. В их случае склонность сокращать время открытия и закрытия смотровых отверстий, не обращая внимания на болты или гайки, может привести к опасному нарушению EPSR мельницы.

Система удаления крупной фракции в ВВМ также очень часто бывает неправильно спроектирована или установлена.

Такая система должна иметь два взаимосвязанных клапана с необходимой EPSR, из которых в любой момент времени может быть открытым только один. Если удаляемый уголь транспортируется конвейером, необходимо убедиться, что в случае взрыва в ВВМ распространение взрывной волны и пожара этим путем не может причинить вреда. Конвейер устраняет необходимость того, чтобы персонал удалял отходы с места, где они выбрасываются из мельницы, иначе люди должны были бы работать возле нее. Но переход от выпускного патрубка ВВМ к конвейеру, а также сам конвейер должны быть защищены от последствий взрыва, которые могут нанести вред находящимся рядом людям.

### **Вертикальный газоход от ВВМ к главному рукавному фильтру или от ШМ к сепаратору.**

В современных конструкциях систем за ВВМ следует в технологической цепочке главный рукавный фильтр системы, а за ШМ — сепаратор. Из-за того, что технологические емкости соединены между собой, конструкционная взрывозащита является непростой задачей. Когда взрыв в одной емкости затрагивает одну или несколько соединенных с ней емкостей, развитие опасных факторов зависит от различных условий, и возможная разница в объеме емкостей — только одно из них.

Наиболее важными и опасными применительно к вертикальным газоходам ВВМ — главному рукавному фильтру и ШМ — сепаратор являются следующие обстоятельства:

- взрыв в мельнице приводит к росту давления и появлению пламени в мельнице;
  - если в мельнице произошел взрыв, то в момент воспламенения содержание O<sub>2</sub> в технологическом воздухе в системе должно было превышать 13 %.
- Приблизительно таким же будет этот показатель в вертикальном газоходе, что позволит поддерживать в нем горение;
- концентрация угольной пыли в воздухе, находящемся в газоходе, будет составлять примерно 500 г/м<sup>3</sup>, что соответствует наиболее благоприятной для взрыва части диапазона взрывоопасных концентраций пыли в воздухе (примерно 50–2000 г/м<sup>3</sup>).

Все это будет способствовать переходу пламени в вертикальный газоход, где горение продолжится благодаря доступности частиц угля и O<sub>2</sub>. При этом будут повышаться тепловыделение, давление и скорость распространения пламени, рост которой зависит от длины пути распространения (точнее, от отношения длины газохода к его диаметру — L/D).

Скорость технологических газов в газоходе обычно близка к 19 м/с. При достаточном больших L и L/D распространение фронта пламени в газоходе вполне может ускориться приблизительно до 200 м/с и вызовет повреждение всего, что находится на пути го-

рящего пылегазового потока. Чтобы с этим бороться, нужно следующее:

- не допустить создания высокого давления там, где начинается распространение пламени;
- эффективно направить горящую пылегазовую смесь и фронт повышенного давления в атмосферу до того, как пламя начнет распространяться с ускорением. Для реализации этих мер в конструкцию следует установить взрывозащитный клапан, самостоятельно закрывающийся сразу после срабатывания. Эффективной защиты от взрыва и пожара не удастся достичь, установив произвольное взрыворазрядное устройство в произвольном месте. Устройство нужно расположить правильно, а геометрические характеристики газохода и этого устройства должны обеспечивать отвод излишнего давления и значительной части пламени в атмосферу. То есть требуется, чтобы взрывозащиту проектировали соответствующие специалисты.

Для эффективности защиты нужно, чтобы взрыворазрядное устройство срабатывало при очень низком давлении, что не должно стать проблемой ввиду разрежения, создающегося в газоходе во время работы помольной системы.

Приоритетом должна быть высокая эффективность переброски горячей пылегазовой смеси и зоны повышенного давления в атмосферу, обеспечивающая реальную защиту системы. Если созданию оптимальных условий для этого препятствует, например, желание упростить конструкцию установки, подобными соображениями следует поступиться. В расчетах прочности несущей конструкции необходимо учитывать силу отдачи, обусловленной выбросом газов в атмосферу при срабатывании взрыворазрядного устройства. Нельзя забывать и о необходимости регулярного технического обслуживания этого устройства.

**Сепаратор систем с ШМ.** Внутренняя полость сепаратора объемом несколько кубических метров соединена с вертикальными газоходами, ведущими от мельницы к сепаратору (снизу) и от сепаратора к главному рукавному фильтру системы (вверх), а также с загрузочной частью мельницы — для транспортировки отделенных крупных частиц угля (вниз и в сторону). Область взрывоопасного горения может достичь сепаратора при взрыве с воспламенением и в ШМ, и в фильтре. Нельзя исключить и возможность первоначального взрыва с воспламенением внутри самого сепаратора. Воздействия, связанные со взрывом, также могут передаваться от входной части мельницы к сепаратору в обход другого оборудования.

Если не перенаправить в атмосферу начавшееся распространение фронта пламени от ШМ или главного рукавного фильтра к сепаратору через газоход, в объеме сепара-

тора может произойти сильный вторичный взрыв, представляющий собой взрыв при так называемом состоянии повышенного начального давления (ПНД). Когда фронт пламени поступает в сепаратор снизу, он уже сжимает воздух в системе перед собой (эффект нагнетания). Фронт пламени является мощным источником воспламенения, и давление, возникающее во время взрыва при условии ПНД, возрастет до значения выше обычно достигаемого. Затем увеличится вероятность реализации такого механизма горения, который можно назвать горением с турбонаддувом. Входящий фронт пламени также вызовет турбулентность газового потока в сепараторе. Все эти эффекты наряду с тем, что объем сепаратора меньше объема ШМ, в которой произошел взрыв, приводят к возможности своего рода вторичного взрыва с наддувом в сепараторе.

Если горение началось в главном рукавном фильтре и его фронт распространяется вниз к сепаратору, факторы риска будут определяться теми же условиями, что и для предыдущего случая. Но поскольку большинство рукавных фильтров имеют прямоугольную форму и у них нет высокой степени EPSR, при правильном проектировании их взрыворазрядного устройства способность последнего снижать давление взрыва обеспечит гораздо меньшее давление взрывной волны в фильтре по сравнению с ее возможным максимальным давлением (2 бар) в ШМ.

В большинстве систем измельчения угля с ШМ сепаратор и входная часть мельницы соединены между собой без защиты от последствий взрыва, который возможен и в ШМ, и в сепараторе. Необходимо предусмотреть, чтобы средства локализации области взрыва были установлены в следующих частях конструкции:

- между входной частью ШМ и конвейером для крупных фракций угля, возвращаемых из сепаратора;
- между сепаратором и этим конвейером.

Чаще всего для возврата крупных фракций угля из сепаратора в ШМ используют U-образные шнековые конвейеры. Их недостаток — плоские крышки, затрудняющие обеспечение EPSR. Кроме того, между шнеком и крышками имеется воздушный канал, через который могут распространяться воздействия, обусловленные взрывом. Поэтому существует риск того, что в случае взрыва в ШМ или сепараторе из-за воздействия давления взрывной волны крышки деформируются или откроются. Хотя шнековый транспортер предназначен для перемещения не угольной пыли, а крупных частиц угля, в нем находится и определенное количество пыли, которая может оказаться за его пределами в результате повреждения или открытия плоских крышек, а затем может переноситься потоком воздуха и создать взрывоопасную атмосферу вблизи конвейера.

Между сепаратором и шнековым транспортером установлен воздушный шлюз, который почти во всех случаях не соответствует требованиям, позволяющим использовать его в качестве системы взрывозащиты, хотя должен им соответствовать. Иногда между шнековым конвейером и входной частью ШМ устанавливается поворотный клапан, о котором можно сказать то же самое. Даже если он соответствует требованиям к системе взрывозащиты, при его эксплуатации необходимые для этого характеристики вскоре будут утрачены из-за износа. Поскольку ширина зазора между лопастями шнека и отверстием в корпусе поворотного клапана должна быть весьма малой (не более нескольких сотен миллиметров), износ приведет к утрате функции остановки распространения пламени и давления.

С точки зрения взрывозащиты эта ситуация не является проблемной. Распространение фронта пламени от входного отверстия ШМ в шнековый конвейер было бы крайне маловероятным из-за отсутствия угольной пыли. Но шнековый транспортер должен быть защищен от возможного давления взрывной волны, достигающего 2 бар в ШМ. Для этого необходимо установить поворотный клапан, не относящийся к системе взрывозащиты, но обладающий достаточным EPSR и некоторой защитой от износа (согласно терминологии конструктивной взрывозащиты, такие элементы оборудования относятся к «серой зоне»).

**Вертикальный газоход от сепаратора к главному рукавному фильтру в системах с ШМ.** Поскольку в сепараторе может произойти взрыв пыли, обусловленный распространением пламени снизу или сверху либо инициированный внутри самого сепаратора, фронт пламени после этого может распространяться как вверх (к главному рукавному фильтру), так и вниз (к ШМ). Из-за достаточно большого объема сепаратора (несколько кубических метров) взрыв в нем может стать основным фактором, влияющим на степень опасности взрыва в целом, что требует обеспечить соответствующую взрывозащиту. Вблизи места выхода из сепаратора смеси газов с угольной пылью необходимо установить взрыворазрядное устройство, которое также будет снижать давление взрывной волны в сепараторе и ослаблять рост давления в вертикальных газоходах выше и ниже сепаратора (в направлении, противоположном направлению распространения фронта пламени).

Нисходящее распространение фронта пламени в вертикальном газоходе также имеет тенденцию ускоряться, но степень опасности такого сценария значительно ниже, чем при первоначальном взрыве внутри ШМ. Причина в относительно низком давлении взрывной волны в прямоугольной (слабой) конструкции рукавного фильтра.

Конфигурации отводящих устройств на выходе ШМ и на выходе сепаратора должны быть оптимизированы в отношении отвода пламени и давления, распространяющихся снизу. Это означает, что их геометрические характеристики не будут оптимальными для отвода пламени и давления, которые распространяются в противоположном (нисходящем) направлении. Поскольку и вероятность, и степень опасности распространения фронта пламени вниз намного ниже таковых при его движении вверх, сброс давления даже при неоптимальной конфигурации взрыворазрядных и отводящих устройств на выходе из сепаратора и из ШМ является достаточным.

**Конечная (верхняя) секция вертикального газохода от мельницы к главному рукавному фильтру.** Выше взрыворазрядного устройства и устройства отвода пламени и давления, расположенных на выходе из ВВМ и из сепаратора системы с ШМ, последствия взрыва будут ощущаться или развиваться в аналогичных условиях. Существуют условия для распространения фронта пламени вверх, но с меньшей интенсивностью, чем в расположенных ниже (предшествующих в технологической цепочке) частях системы помола, где к тому же установлены защитные устройства. Меньше вероятность и возможная интенсивность распространения фронта пламени вниз. Тем не менее необходимо обеспечить полный отвод в атмосферу остаточной взрывной волны и пламени при их распространении к входу в фильтр. Предназначенное для этого устройство на входе в фильтр должно быть очень эффективным, а его выпускной механизм — самостоятельно закрывающимся.

На работу устройства может негативно влиять следующее:

- не самозакрывающийся выпускной механизм;
- неправильные геометрические характеристики той части системы, где расположено устройство, и особенно самого устройства;
- неправильная установка устройства, например, на слишком большом расстоянии от рукавного фильтра;
- неустойчивость устройства, обусловленная воздействием на его опору огромной силы отдачи;
- ненадлежащее техническое обслуживание;
- слишком высокое статическое давление активации устройства.

Даже идеально расположенные отводящие устройства с идеальными геометрическими характеристиками и низким давлением активации не позволят полностью выпустить пламя в атмосферу. Низкое давление активации необходимо, чтобы быстро открыть отверстие — это требуется для эффективного сброса давления. Фронт пламени всегда будет входить в рукавный фильтр, но при быстром срабатывании устройства позади фрон-

та пламени не возникнет область высокого давления. Кроме того, низкое давление активации препятствует повышению давления перед распространяющимся фронтом пламени.

Если все спроектировано и установлено правильно (но только в этом случае), взрыворазрядные устройства рукавного фильтра обычно выдерживают давление взрывной волны внутри фильтра, даже когда ситуация осложняется из-за приближающегося фронта пламени.

**Главный рукавный фильтр.** Как уже отмечено, большинство рукавных фильтров имеют прямоугольную конфигурацию. Существуют их различные версии. В некоторых из них есть две камеры для фильтрующих элементов. EPSR их конструкции должна соотноситься со следующим:

- проектными характеристиками взрыворазрядного устройства;
- параметрами взрывоопасности топлива в атмосфере с содержанием  $O_2$ , равным 21 %, —  $K_{St}$  и  $p_{max}$ ;
- геометрическими характеристиками рукавного фильтра.

$K_{St}$  — это скорость роста давления,  $p_{max}$  — максимальное давление взрыва. Оба параметра определяются при стандартных условиях испытания и характеризуют потенциальную силу взрыва.

Значения  $K_{St}$  и  $p_{max}$  определяют только в специализированных лабораториях. Как правило, они неизвестны поставщикам и потребителям угля. Значения, найденные в результате испытаний, можно использовать в качестве грубого приближения для углей с сопоставимыми характеристиками. Оба параметра специфичны для угольной пыли. Их значения зависят от содержания ЛВ в угле, гранулометрического состава пыли, ее концентрации в воздухе, влажности, энергии воспламенения, турбулентности пылегазового потока и геометрических характеристик емкости, в которой происходит горение со взрывом.

Уравнения для расчета необходимых характеристик (размеров и эффективности) взрыворазрядных устройств приведены в европейском стандарте EN 14491 и американском NFPA 68. Эти уравнения применимы при условии содержания  $O_2$  во взрывоопасной атмосфере, равного 21 %, для расчета по следующим исходным данным:

- объему и другим геометрическим характеристикам полости оборудования, подлежащего защите;
- $K_{St}$  и  $p_{max}$ ;
- EPSR, выраженной показателем  $p_{red}$  — прочностью конструкции оборудования или сооружений, достаточной для того, чтобы она выдержала максимальное ослабленное давление при срабатывании взрыворазрядного устройства.

Во многих случаях EPSR главного рукавного фильтра неизвестна из-за сложности расчета.

Часто встречаются следующие ошибки:

- используется рукавный фильтр стандартной конструкции (предназначенный для разделения воздуха и негорючей пыли), на котором устанавливают всего пару взрыворазрядных устройств;
- не учитываются негативные последствия того, что фильтровальные рукава затрудняют отвод воздуха при взрыве;
- не учитываются более сложные геометрические характеристики рукавных фильтров с несколькими воронкообразными бункерами;
- взрыворазрядные устройства не соответствуют требованиям (не прошли типовых испытаний) и не являются самозакрывающимися. Существует множество самодельных конструкций. Некоторые из них очень опасны, либо не будут эффективно работать, либо имеет место и то, и другое;
- взрыворазрядные устройства расположены неправильно и будут отводить пылегазовый поток в опасном направлении;
- при проектировании опоры фильтра не учитывается сила отдачи;
- надстройки фильтра не обладают EPSR или были неправильно установлены на место после его технического обслуживания;
- шнековый транспортер для транспортировки осажженной угольной пыли не имеет необходимой EPSR, например, в своем фланцевом соединении с корпусом фильтра. Если уплотнение фланца недостаточно прочное, оно может молниеносно раскрыться при воздействии взрывной волны;
- соединение шнекового транспортера рукавного фильтра с сооружениями, расположенными ниже в технологической цепочке, не оснащено системами взрывозащиты и/или не имеет EPSR.

Важно поддерживать чистоту надстройки главного рукавного фильтра. Повреждение рукавов приведет к скоплению в ней угольной пыли. В зависимости от толщины образовавшихся слоев пыли и характеристик угля может произойти самовозгорание, приводящее к пожару. И в случае взрыва в той части фильтра, где находятся рукава, отложения угольной пыли в надстройке могут стать причиной развития сценария, при котором принятые меры взрывозащиты недостаточны.

Контроль чистоты воздуха, выходящего из фильтра, необходим для того, чтобы вовремя узнать о повреждении рукава и принять необходимые меры.

Большинство систем помола угля оснащены клапаном дистанционного управления в газоходе очищенного воздуха, транспортируемого из главного рукавного фильтра в главный вентилятор. К этому клапану относится все, что сказано выше о клапане аналогичного назначения, который устанавливают в газоходе воздуха, поступающего в мельницу.