ISSN 0135-3500. Записки Санкт-Петербургского государственного горного института. 1994. Том 139

УДК 622.331.4:807

Ю.В.ШУВАЛОВ, В.Н.БОБРОВНИКОВ
В.Л.БЕЛОЗЕРОВ, А.П.ВЕСЕЛОВ

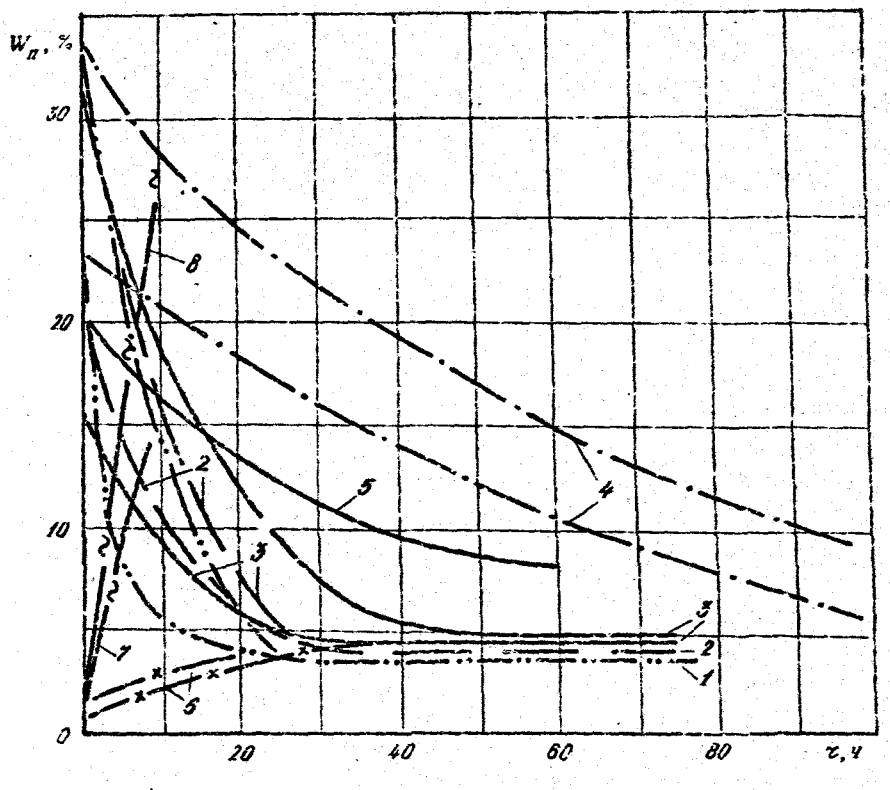
КОНДЕНСАЦИОННОЕ УВЛАЖНЕНИЕ АЭРОЗОЛЕЙ И АЭРОГЕЛЕЙ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

Проанализированы материалы аналитических, лабораторных и шахтных исследований процессов сушки и увлажнения аэрогелей угольной пыли, а также изучено влияние влажности на их взрываемость. Изложена методика выбора параметров средств генерации пара для конденсационного увлажнения отложений угольной пыли в выработках, которая обеспечивает защиту от взрывов и детонации.

Возгорание и взрывы угольной пыли и газа являются наиболее опасными и частыми явлениями в горных выработках угольных шахт. На ликвидацию их последствий затрачивается до 90 % средств, расходуемых на аварии. Разработанные и широко используемые средства и способы предотвращения и сокращения вероятности взрывов угольной пыли [2,4,6] базируются на прямом контакте защитного средства с угольной пылью при постоянном или периодическом действии (вода, инертные и химические добавки, связывающие вещества и т.д.). В протяженной сети выработок и выработанного пространства сохраняются более (выработанное пространство) или менее (выработки) протяженные участки и объемы, не подвергающиеся действию защитных средств. В выработках это полости и щели, закрытые породой, элементами крепи и конструкциями от прямого контакта с профилактическим веществом, в выработанном пространстве – практически весь его свободный объем.

Идея предлагаемого способа профилактики взрывов угольной пыли заключается в создании условий контакта защитного вещества (воды или ее растворов) с отложившейся пылью (аэрогель), аналогичных условиям самого формирования аэрогеля. Это обеспечивается созданием водного аэрозоля [3], соответствующего основной характеристике пылевого аэрозоля, т.е. минимальному размеру частиц пыли, и превышающего последний по концентрации частиц воды в единице объема или массы воздуха (влагосодержание d и содержание пыли $П$).

Экспериментальные исследования в климатической камере и горных выработках (см. рисунок) изменения влажности отложений пыли $W_п$ в зависимости от условий тепломассообмена в выработке свидетельствуют о возможности поддержания длительное время высоких уровней $W_п$ при сохранении в выработке относительной влажности воздуха, близкой к насыщению ($\varphi \approx$ $\approx$ 95÷100 %).



Динамика сушки и увлажнения угольной пыли при контакте с воздухом (температура $t_в$, относительная влажность φ, время массообмена τ).

Параметры кривых следующие:

Кривая	1	2	3	4	5	6	7 (почва камеры)	8 (середина камеры)
φ, %	42	57	77	86	93	88	100	100
$t_в$, °С	27,5	23	24	21,5	13,5	20,5	29,5	29,5

Теоретические представления о процессе воспламенения, детонации и взрыва угольной пыли на основе химической кинетики воспламенения и развития горения газовых углеводородных смесей с воздухом академика Н.Н.Семенова позволяют составить уравнение теплового баланса пылевого аэрогеля с источником теплоты.

Вероятностный характер формирования условий возгорания и взрыва пыли и газа при установившемся процессе [5] делает достаточно сложным определение и учет составляющих процесса. Число их может быть сокращено при рассмотрении начала процесса и воздействии теплового импульса мощностью q на единичные микрообъекты (пылинки). В этом случае можно рассматривать удельное содержание горючих газов $V_{г.г}$ и твердого вещества $V_т$ как массу горючего материала в смеси с золой $A_з$ и водой

W, а приращение температуры ΔT – лишь для основного объекта нагревания. При близкой плотности угля ($\rho_г \approx 1300$ кг/м^3) и воды ($\rho_{вд}$ = = 1000 кг/м^3), примерно в 2 раза большей плотности золы и инертных добавок, удельной теплоемкости угля и пород (золы), близкой к 1000 Дж/(кг·°С) и в 4 раза большей для воды, без учета теплоты ее фазового перехода можно оценить приближенно роль наиболее важных компонентов в формировании условий взрыва:

$$\Delta T \approx \frac{q}{1000(V_г + V_{г.г} + 2A_з + 4W)}. \qquad (1)$$

В этом уравнении удельное тепловыделение источника отнесено к 1 м^3 массы нагретого и нагреваемого материалов.

Знание конкретных величин, определяющих процесс, также позволяет оценить вероятность возникновения взрыва. Например, при подводе тепла металлическими искрами (раскаленный до 800 °С металл, плотность 3000 кг/м^3 и удельная теплоемкость 0,5 кДж/(кг·°С)) удельное тепловыделение 1 м^3 массы достигает 900000 кДж/с. При выходе летучих $V_{г.г}$ = 0,4 и горючей массе $V_г$ = 0,4, зольности $A_з$ = 0,1 и влажности W = 0,1 приращение температуры ΔT составит около 650 °С, что достаточно для интенсивного выхода летучих и их воспламенения (взрыва).

Из зависимости (1) следует также, что влага, даже при отсутствии затрат тепла на фазовый переход, оказывает в 2 раза больший профилактический эффект, чем увеличение инертных добавок.

В общем виде принятое суммарное значение затрат теплоты на этот процесс, связанное с нагревом жидкой фазы на величину ΔT, достаточно близко к сумме трех указанных составляющих:

$$4W\Delta T \approx 4W(T_{исп} - T_0) + q_{исп}W\Delta T/(T_0 + \Delta T - T_{исп}) + C_п W(T_0 + \Delta T - T_{исп}), \qquad (2)$$

где T_0 и $T_{исп}$ – начальная температура аэрозоля и температура испарения воды, °С; $q_{исп}$ – скрытая теплота испарения воды, кДж/кг; $C_п$ – удельная теплоемкость пара, кДж/(кг·°С).

В целом исследователями [1,2,4,6] признается факт превалирующего влияния влаги на предотвращение взрывчатости угольной пыли, например, предупреждение воспламенения пыли достигается при влажности ее 27 % или массовой доле золы 57 %. Эти результаты подтверждают расчетную зависимость, как и данные ВостНИИ при экспериментах на испытательной трубке по оценке влияния влажности на взрывчатость пыли 28 шахтопластов Кузбасса [5]. Результаты исследований показывают, что длина пламени зависит от разности выхода летучих и золы ($V^г - A^с$) и влажности угля W, что приближенно оценивается зависимостью

$$L_{пл} \approx 2(V^г - A^с)^2/(1 + 0{,}04W^2). \qquad (3)$$

При этом увеличение зольности на 15 % оказывает такое же сокращение длины пламени, как и повышение влажности на 8 %.

Подобные испытания были проведены нами с использованием прибора ПКО-1М, на котором производились визуальные наблюдения за длиной пламени при воспламенении пыли пластов Четвертый (выход летучих 31,6 %) и Тройной (выход летучих 236,65 %) [7].

Данные свидетельствуют о весьма сложной зависимости взрывчатых свойств пыли отдельных шахтопластов от ее химического и вещественного состава, что требует проведения более детальных и тщательных исследований для выбора степени увлажнения пыли, обеспечивающей безопасное поддержание выработок. Так, для пласта Четвертый полученные результаты идентичны данным для углей Кузбасса, в то время как для пласта Тройной влияние влажности сказалось в большей степени. При близком к линейному характеру зависимости длины пламени от влажности

$$L_{пл} = 300 - k_{пл} W \qquad (4)$$

угловой коэффициент $k_{пл}$ для угля пласта Четвертый равен 15, для Тройного – 6.

Система конденсационного увлажнения отложений пыли должна обеспечить безопасность всех участков выработки и предотвратить движение фронта взрыва пыли в результате перехода ее в невзрывчатое состояние.

В границах шахтного поля, где нижний предел взрывчатости в зависимости от содержания метана может изменяться не более чем в 3 раза, время накопления взрывоопасного количества пыли зависит в основном от интенсивности пылеотложения. Последняя для различных выработок изменяется следующим образом: околоствольные и основные откаточные выработки 0,04-0,4 г/(м^3·сут), конвейерные линии со скребковыми комбайнами 1000-1500 г/(м^3·сут), с ленточными конвейерами 4000-8000 г/(м^3·сут). Наибольшие колебания интенсивности пылеотложения отмечены на вентиляционных штреках и в других выработках с исходящей струей воздуха вблизи лав (до 200 м) – от 1,2 до 960 г/(м^3·сут), а также на призабойных участках подготовительных выработок – от 12 до 600 г/(м^3·сут).

Время накопления взрывоопасной концентрации отложений пыли в выработке

$$\tau_{отл}^{min} = \Pi_{отл}^{min} L / \left[3{,}6 V (\Pi_0 - \Pi_L)\right], \qquad (5)$$

где $\Pi_{отл}^{min}$ – нижний предел взрывчатости пылеотложений, г/м^3; L – длина участка, м; V – скорость движения воздуха, м/с; Π_0 и Π_L – концентрация пыли в воздухе в начале и конце участка, мг/м^3.

Масса аэрогеля, накопленного за время $\tau_{отл}^{min}$ на 1 м^2 поверхности выработки,

$$m_{отл}^{min} = \Pi_{отл}^{min} S / u, \qquad (6)$$

где S и u - соответственно сечение и периметр выработки, $м^2$ и м

Влажность пылеотложений принимается близкой к гигроскопической (2-6 %).

Безопасное состояние пылеотложений в доступных участках достигается традиционными способами (осланцевание, обмыв, связывание химическими реагентами и др.). Обработка труднодоступных отложений пыли и остальной поверхности тонкодиспергированной водой (туман) может обеспечить более высокий уровень безопасного состояния выработки при увлажнении аэрогеля до W^{min}, определяемого экспериментально для каждого из шахтопластов путем опытного взрывания проб пыли различной влажности.

Необходимое удельное (на 1 $м^2$ обрабатываемой поверхности) минимальное приращение влагосодержания пыли

$$\Delta d_{п}^{min} = 0.01\, m_{отл}^{min} (W^{min} - W_{п}), \qquad (7)$$

где $W_{п}$ - влажность пыли в труднодоступных местах, до увлажнения туманом составляет, как правило, 2-6 %.

Время увлажнения аэрогеля $\tau_{увл}$, т.е. время работы, например, парогенератора - ПГ, не должно превышать $\tau_{отл}^{min}$. Зависимость (7) справедлива, когда $\tau_{увл} << \tau_{отл}^{min}$. Если $\tau_{увл}$ соизмеримо с $\tau_{отл}^{min}$, то

$$\Delta d_{п}^{min} = 0.01\, m_{отл}^{min} (W^{min} - W_{п})(1+\tau_{увл}/\tau_{отл}^{min}). \qquad (8)$$

Показатель времени защитного действия увлажнения

$$k_{з}^{W} = \tau_{сух}/\tau_{увл}, \qquad (9)$$

где $\tau_{сух}$ - время высыхания пыли до минимального безопасного уровня влажности.

Причем

$$(\tau_{сух} + \tau_{увл}) << \tau_{отл}^{min}. \qquad (10)$$

Если $\tau_{увл} = \tau_{отл}^{min}$, то мероприятия по увлажнению пыли в труднодоступных местах должны проводиться непрерывно либо необходимо выбрать более мощный источник пара или влаги (то же самое при $\tau_{увл} > \tau_{отл}^{min}$). Таким образом, эффективным следует считать такое мероприятие, за время проведения которого не накапливается вновь взрывоопасное или даже большее количество пыли.

Необходимое переувлажнение воздуха, поступающего в защищаемую выработку, складывается из затрат влаги на повышение влажности аэрогеля до уровня W^{min} и поддержание ее до конца периода высыхания. Затраты влаги в период высыхания пыли (интервал между увлажнениями) $\tau_{сух}$ пропорциональны разности влагосодержаний воздуха в конце и начале защищаемого

участка выработки (длина участка), т.е. $d_2 - d_1$. Причем d_1 и d_2 определяются, например, с помощью термопылевой карты выработки до проведения мероприятий по конденсационному увлажнению и соответствует тепловому режиму (точнее, термопылевому режиму) в установившемся состоянии, т.е. до конца высыхания парогенератор или другое устройство по увлажнению воздуха не работает и не нарушает установившийся "естественный" для данных горно-геологических и горно-технических условий режим выработки.

Общее количество вырабатываемого пара на увлажнение аэрогеля до уровня W^{min} и дальнейшее его переувлажнение для восполнения потерь влаги в период высыхания в граммах

$$\Sigma g_{\text{п}} = \Delta d_{\text{п}}^{min} uL + G(d_2 - d_1)\tau_{\text{сух}}, \qquad (11)$$

где параметр $\Delta d_{\text{п}}^{min}$ определяется либо по зависимости (7), когда $\tau_{\text{увл}} \ll \tau_{\text{отл}}^{min}$, либо по зависимости (8), когда время увлажнения в аэрогеля соизмеримо со временем накопления взрывоопасной концентрации отложений пыли, определяемой через зависимость (6); u – периметр выработки; G – массовый расход воздуха на участке выработки, кг/ч; значения влагосодержаний воздуха измеряются в граммах на килограмм.

Производительность парогенератора в килограммах в час определяется временем его действия $\tau_{\text{увл}}$:

$$g_{\text{пг}} = 0{,}001\left[\Delta d_{\text{п}}^{min} uL/\tau_{\text{увл}} + G(d_2 - d_1)k_{\text{э}}^{W}\right]. \qquad (12)$$

Сокращение расхода пара может быть обеспечено увлажнением отложений пыли в доступных местах обычными способами (без перевода воды в пар), а также сокращением испарения влаги с поверхности защищаемой выработки. Оба указанных эффекта достигаются, например, подачей в струю воздуха тонкодиспергированной воды с помощью форсунок-туманообразователей. Действие форсунок, устанавливаемых в верхней части выработки по ее бортам в направлении струи воздуха, может распространяться на расстояние до 150 м (прямолинейные участки). Установлено, что максимальная эффективность пылеподавления достигается орошением водой при диаметре капель не более 0,2 мм и скорость истечения не менее 10 м/с. Такие параметры орошения достигаются при использовании конусных (КФ) и плоскоструйных (ПФ) форсунок с углом раствора факела 75° при давлении воды 700–800 кПа и при использовании зонтичных форсунок (ЗФ) с углом раствора факела 125° и более при давлении воды не менее 1000 кПа.

Приведение отложений пыли в доступных местах в невзрывоопасное состояние с помощью обычных способов (орошение, обмывка и др.) может сократить расход пара, необходимого для обработки отложений в труднодоступных местах. Тогда уточненная производительность парогенератора

$$g'_{\text{пг}} = k_{\text{отл}} g_{\text{пг}}, \qquad (12а)$$

где $k_{отл}$ – коэффициент, учитывающий долю пылеотложений в труднодоступных местах, для практических расчетов можно принять $k_{отл} = 0,5$; $q_{ПГ}$ – производительность парагенератора, определенная по формуле (I2).

Протяженность защищаемого участка выработки при работе единичного парогенератора на прямолинейном участке с изменением сечения не более ±10 на основании результатов шахтных исследований, рекомендуется принимать равной 400–500 м. На криволинейных участках, сопряжениях и при переменных сечениях выработки длина участка обработки $L = 250 \div 300$ м.

Мощность парогенератора в киловаттах пропорциональна его производительности и ориентировочно

$$N_{ПГ} = q'_{ПГ} q_{исп} k_N / 3600, \qquad (I3$$

где $q'_{ПГ}$ – уточненная производительность ПГ, определяемая по формуле (I2а), кг/ч; $q_{исп}$ – удельная теплота парообразования, кДж/кг; k_N – коэффициент, учитывающий потери мощности ПГ, $k_N = 1,2 \div 1,3$.

Показатель времени защитного действия увлажнения аэрогеля паром (9) по технологическим соображениям принимается равным пяти. Работа генератора целесообразна в перерывах между сменами или в нерабочие дни и смены (ремонтные, выходные и т.д.).

При увлажнении отложений пыли до 35 % значения времени высыхания пыли $\tau_{сух}$ [2] до уровня нижнего значения влажности пылеотложений во взрывобезопасном состоянии (принят равным 25–30 %) рекомендуется принимать следующими:

φ, %	< 80	80–90	> 90
$\tau_{сух}$, ч	12	18	24

Установка парогенератора рекомендуется в нишах с выпуском пара под кровлю выработки через гибкий шланг.

Испытания и отработка параметров элементов системы конденсационного увлажнения и связывания пыли в шахтных условиях были проведены в 1990 г. (шахта "Ленинградская" ПО "Ленинградсланец"), продолжены в 1991–1992 годах (шахта "Воркутинская") и планируются на шахте "Комсомольская" ПО "Воркутауголь".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мамаев В.И., Ибраев Ж.А., Лигай В.А. Предупреждение взрывов пылеметановоздушных смесей. М.: Недра, 1990.

2. Мясников А.А., Старков С.П., Чикунов В.И. Предупреждение взрывов газа и пыли в угольных шахтах. М.: Недра, 1985.

3. Петряно в-Соколов И.С., Сутугин А.Г. Аэрозоли. М.: Наука, 1989.

4. Предупреждение и локализация взрывов в подземных условиях / А.Е.Умнов, А.С.Юлик, Д.Ю.Палеев, Н.Р.Шевцов. М.: Недра, 1990.

5. Способы борьбы с пылью на угольных шахтах / А.М.Быков, Л.Я.Лиханов, Е.И.Онтин, Н.П.Петров. М.: Недра, 1968.

6. Физико-химические основы гидрообеспыливания и предупреждений взрывов угольной пыли. Киев: Наукова думка, 1984.

7. Шувалов Ю.В., Белозеров В.А. Термодинамические основы конденсационного увлажнения и подавления пыли // Физические процессы горного производства / Санкт-Петербург. горный ин-т. СПб, 1992.