

source of silicosis risk.

It was found that use of tamping material consisting of sand and clay mixtures, dolomite dust lignosulfonates, potassium alum and water reduced total concentration of the fine dust by 40-50%. Processing of strong sandstone with 10 %-sodium Na_2CO_3 increases average diameter of the fine particles in the products of the destruction with fraction 0-100 microns from 10.30 microns to 19.25 microns. In the products of destruction, round debris particles dominate being represented exclusively by quartz grains (90-99%) in contrast to the degradation products of sandstone in untreated surfactant, in which fine particles are mainly represented by V-angled debris.

Keywords: coal-rock massif, tamping, surfactants, explosive destruction, particle size, dispersion.

Статья поступила в редакцию 28.09.2014

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.Г.Шевченко

УДК 622.814

Новикова Е.А., канд. техн. наук, доцент
(Государственный ВУЗ «НГУ»)

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПЫЛЕОТЛОЖЕНИЯ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ УГЛЯ КОНВЕЙЕРОМ

Новікова О.О., канд. техн. наук, доцент
(Державний ВНЗ «НГУ»)

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПИЛОВІДКЛАДЕННЯ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ ВУГІЛЛЯ КОНВЕЄРОМ

Novikova Ye.A., Ph.D. (Tech.), Associate Professor
(State H E I «NMU»)

ANALYSIS OF DUST DEPOSIT AT TRANSPORTING COAL BY CONVEYOR

Аннотация. Одним из самых проблемных вопросов в области взрывобезопасности угольных шахт остается отложение угольной пыли в горных выработках. Поэтому проблема защиты горных выработок от взрывов осевшей угольной пыли при ее взметывании весьма актуальна. Основная трудность, возникающая при теоретическом исследовании процесса распространения пыли в горных выработках, состоит в учете ее осаждения и взметывания, главным образом на почве выработки. Слишком упрощенные предположения о характере и механизме этих процессов приводят к качественному расхождению теоретических результатов с наблюдениями. В статье рассмотрены особенности формирования пылеотложений по длине конвейерной выработки. Предложены выражения, которые позволяют рассчитать концентрацию и дисперсный состав рудничных аэрозолей по длине и высоте горных выработок в условиях гравитационного и инерционного осаждения частиц.

Ключевые слова: пылеотложения, взрывобезопасность, конвейерные выработки.

Введение. Выработки, оборудованные конвейерным транспортом, особенно опасны в отношении возникновения и распространения по ним взрывов угольной пыли. Об этом свидетельствует самая крупная по катастрофическим последствиям авария в Донбассе, которая произошла на шахте им. Баракова (г. Краснодон) [1].

Исходя из “Рапорта исследования причин и последствий аварии” следует: “взрыв пылевоздушной смеси произошёл в 31-м западном штреке на сопряжении с магистральным штреком и распространился навстречу свежей струе вдоль этого штрека (длина 650 м), воздухоподающему ходку (700 м), по полю 27-й лавы (250 м) и центральному вентиляционному ходку (1300 м) вплоть до загрузочного бункера скипового ствола.

На пути распространения взрыва сработало шесть сланцевых заслонов, в том числе два в 31-м западном штреке и четыре в центральном вентиляционном ходке. Тем не менее, пламя взрыва распространялось по сети выработок так, как будто этих заслонов не было. Хотя при отсутствии загазирования выработок и слоевых скоплений метана (в выработках аварийного участка были взрывоопасные отложения угольной пыли, но метан не обнаружен) достаточно сработать заслону, ближайшему к центру взрыва, чтобы его локализовать, т. е. погасить пламя.

Единственным объяснением такого характера развития аварии является то, что взрывное горение распространялось в изолированном от выработки пространстве. Учитывая то, что пыль пласта с выходом летучих веществ 29,9% является весьма взрывчатой, можно предположить, что взрыв пылевоздушной смеси беспрепятственно распространялся по стационарной конвейерной линии, подконвейерное пространство в данном случае выполняло функцию проводника. Этот вывод подтверждается и состоянием аварийных выработок после взрыва.

Таким образом, система взрывозащиты конвейерных выработок требует принципиального совершенствования. Существующие устройства, как видно, не позволяют полностью локализовать последствия взрыва.

Известно также, что в горные выработки угольной шахты поступает 40% метана за счет газовыделений из отбитого угля транспортируемого от очистного забоя до поверхности. В связи с этим, в реальных условиях в рудничной атмосфере горных выработок угольных шахт, как правило, образуются тройные смеси (угольная пыль + метан + воздух) с тем или иным соотношением горючих компонентов.

Главной особенностью тройных смесей является то, что взятые в отдельности невзрывчатые концентрации метана и угольной пыли в смеси с воздухом приобретают взрывчатые свойства [3]. Присутствие метана даже в небольших количествах заметно снижает нижний предел взрываемости угольной пыли.

Теоретическая часть. Один из основных факторов, обуславливающих пылевзрывоопасность горных выработок, является пылеотложение. Особенно интенсивное пылеотложение наблюдается в конвейерных выработках. Это связано с

тем, что конвейерные выработки, в связи с загромождением их конвейером, имеют большую площадь соприкосновения с пылью при ее распространении с воздушным потоком по длине выработки, а, следовательно, и процессы адгезии в конвейерной выработке происходят более интенсивно. Кроме того, отложение угольной пыли по длине конвейерной линии происходит по всей поверхности выработки за счет осаждения пыли из проходящего воздуха, под роликами холостой ветви, на роликкоопорах, на предохранительных полках, а также на почве выработки за счет просыпания транспортируемого угля [5].

Полное пылеотложение в конвейерных выработках, оборудованных скребковыми конвейерами, достигает 1500, ленточными – 8000 г/(м³·сут) и более.

Потери угля по длине конвейерных выработок зависят от состояния конвейерных линий, нарушений режима эксплуатации конвейерных установок, качества стыковки секций скребковых конвейеров и достигают в отдельных случаях 3% от общего количества транспортируемого угля.

Таким образом, основными процессами пылеобразования в конвейерных выработках являются:

- сдувание пыли с грузовой ветви конвейерной ленты;
- накапливание просыпей в подконвейерном пространстве, содержащих до 40% пыли с последующим сдуванием ее;
- пылеобразование на перегрузе с конвейера на конвейер.

Экспериментальная часть. Общее количество пыли, осажденное в конвейерной выработке, складывается из количества пыли осажденной из движущегося потока воздуха на стенки выработки и на элементы конвейера, а также количества пыли, осажденной в подконвейерном пространстве в результате работы конвейера.

Пылеотложение на участке между начальным и i -м сечениями горной выработки определяется по формуле

$$P = Sv(C_0 - C_i)t, \quad (1)$$

где C_i – концентрация пыли в потоке в i -м сечении горной выработки, мг/м³; v – скорость воздуха в горной выработке, м/с; t – время, с.

С учетом выражений для определения концентрации аэрозолей [4], (1) и того, что для пылеотложения существует функция $P = f(L)$, отражающая его зависимость от удаленности исследуемого сечения, интенсивность пылеотложения по длине горной выработки за 1с можно описать следующим выражением

$$P = SvC_0 - \frac{SvC_0}{1 + \frac{B_2L}{v}}. \quad (2)$$

В (2) не учтено влияние работы конвейера, как рассредоточенного по длине выработки источника пылеобразования.

Более полно интенсивность пылеотложения по длине конвейерной выработки отражает зависимость вида

$$P_k = SvC_0 \left(1 - \frac{1}{1 + B_2 L / v} \right) + P_{o.k.}, \quad (3)$$

где $P_{o.k.}$ – интенсивность отложений пыли образованной конвейером. В горной выработке, вмещающей линейный источник пылеобразования, масса пыли, осевшей на бесконечно малом отрезке участка горной выработки, определяется зависимостью

$$P_L = - \frac{dC}{dL} Q_e, \quad (4)$$

где P_L – масса пыли, осевшей на бесконечно малом участке горной выработки, г/м; dC – изменение концентрации пыли на границах этого бесконечно малого участка, г/м³; dL – длина бесконечно малого участка горной выработки, м; Q_e – количество прошедшего воздуха, м³.

Масса пыли, осевшей в единицу времени в единице объема выработки P , г/(м³·с) связана с массой пыли, осевшей на единице поверхности выработки P_s , г/м², соотношением

$$P = \frac{P_V}{t} = \frac{P_L}{tS_B} = \frac{P_S P_B}{tS_B}, \quad (5)$$

где t – время пылеотложения, с; S_B – поперечное сечение выработки, м²; P_B – периметр выработки, м.

С учетом (5), где интенсивность пылеотложения P выражена через количество пыли, осевшей на единице длины горной выработки P_L , процесс вторичного пылеотложения можно описать выражением

$$P_{o,k.} = \frac{P_{o,k.L}}{S_B t}. \quad (6)$$

где $P_{o.k.L}$ – отложение пыли образованной конвейером, осевшей на бесконечно малом участке горной выработки, г/м;

Процесс перехода пыли, образованной в результате работы конвейера, во взвешенное состояние можно сравнить с процессом взметывания вторичной пыли [6]. Пыль, образованная конвейером, осаждается. Таким образом, имеет место процесс массопереноса, который описывается общим уравнением следующего вида

$$\frac{dC}{dt} + D \frac{d^2 C}{dL^2} + \bar{U} \frac{dC}{dL} + \Delta C = f(t). \quad (7)$$

Так как процесс стационарный во времени, принимаем $dC/dt = 0$. В связи с установившимся режимом, пылеобразование от конвейера в каждом сечении постоянно и не зависит от расстояния, на котором находится это сечение от начала выработки. При этом пыль, образовавшаяся в результате работы конвейера на участке между рассматриваемым сечением и началом выработки, зависит от длины этого участка. Следовательно, распределенный источник пылеобразования от конвейера определяется не временным, а линейным показателем. Значит $f(t)=f(L)$.

Применительно к горным выработкам, где однонаправленный конвективный перенос пыли с потоком значительно превышает диффузию, вторым членом левой части уравнения (7) можно пренебречь.

Известно что, коэффициент Δ является параметром экспоненты. Он определяет скорость оседания пыли аналогично коэффициенту снижения концентрации пыли в зависимости от расстояния до источника b_1 , который имеет ту же природу и может выражаться в следующих видах [10]

$$b_1 = D \frac{u_B}{hu_{cp}} = m_0^4 \sqrt{\frac{S}{Q^3}} = \frac{\beta}{Q}$$

или

$$b_1 = \frac{\ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right)}{l_2 - l_1}, \quad (8)$$

где D – коэффициент турбулентной диффузии; h – средняя высота выработки, м; S – сечение выработки, м²; Q – количество воздуха, проходящее по выработке м³/с; β – коэффициент, характеризующий выпадение пылевых частиц из потока, м²/с; C_1, C_2, l_1, l_2 – граничные концентрации и координаты зоны активного осаждения пыли по длине выработки.

Параметр Δ определяется из выражения

$$\Delta = U_{cp} \frac{\ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right)}{l_2 - l_1} \quad (9)$$

На основании сопоставления (8) и (9), в работе [6] получена формула для замещения параметра Δ

$$\Delta = U_{cp} b_1. \quad (10)$$

Подставив в (7) принятую функцию источника, пренебрегая турбулентной диффузией и замещая параметр Δ согласно (10), получим уравнение массопереноса пыли образованной в результате работы конвейера

$$\frac{dC}{dL} + b_1 C = \frac{f(L)}{U_{cp}} \quad (11)$$

Общее решение линейного дифференциального уравнения (10) [2]

$$C(L) = -C_{\kappa 0} \exp(-b_1 L), \quad (12)$$

где $C_{\kappa 0}$ – функция, определяемая распределенным источником пыли, который характеризуется интегральной суммой концентраций пыли, образованной конвейером на интервале от начала выработки (лавы очистного забоя) до исследуемого сечения.

По методу вариации произвольной постоянной [2] функцию $C_{\kappa 0}$ можно определить как

$$C_{\kappa 0} = -\frac{f(L)}{U_{cp}} \quad (13)$$

Пусть на некотором элементарном участке выработки dL в единицу времени выделилось пыли $q(L)$, причем эта функция постоянна и не зависит от расстояния до начала выработки. Тогда от начала до анализируемого сечения выработки выделилось угольной пыли (интегральное произведение)

$$C_{\kappa \Sigma \max}(L) = q(L)L \quad (14)$$

Очевидно, что чем меньше площадь поверхности, на которой образуется пыль, тем меньше пыли перейдет во взвешенное состояние. Поэтому на бесконечно малом участке исследуемого сечения функция $q(L)$ стремится к нулю. Тогда для сечения выработки, удаленного от ее начала на расстояние L , функция источника $f(L)$ представляет собой интеграл (13).

Функция $C_{\kappa 0}$ согласно (13)

$$C_{\kappa 0} = -q(L) \frac{L}{U_{cp}} \quad (15)$$

С учетом (12) и (15), получено решение неоднородного линейного диффе-

ренциального уравнения (11) [2], которое описывает динамику концентрации пыли образованной в результате работы конвейера

$$C_{\kappa}(L) = q(L) \frac{L}{U_{cp}} \exp(-b_1 L). \quad (16)$$

Уравнение (16) позволяет установить концентрацию пыли, которая поступила в сечение за период L/U_{cp} , определяемый как среднее время движения частицы воздуха по участку выработки длиной L . Это означает, что в условиях стационарного процесса, за время появления и перехода во взвешенное состояние частиц пыли в результате работы конвейера, они пройдут расстояние L , определяемое скоростью воздуха U_{cp} в конечном участке сечения L , и в это время должно перейти во взвешенное состояние $q(L) \frac{L}{U_{cp}}$ пыли.

В качестве функции, задающей концентрацию пыли на участке dL примем формулу (16) концентрации пыли, образованной в результате работы конвейера. Так как образовавшаяся в результате работы конвейера пыль, через некоторое время, оседает и снова переходит во взвешенное состояние, тогда убывание отложившейся пыли в процессе перехода ее во взвешенное состояние на бесконечно малом участке горной выработки можно описать выражением

$$-P_{o.k.L} = -\frac{dC_{\kappa}(L)}{dL} Q, \quad (17)$$

где Q – количество воздуха проходящее через выработку, $\text{м}^3/\text{с}$

$$Q = U_{cp} S_B. \quad (18)$$

Производная функции $C_{\kappa}(L)$ с учетом того, что в установившемся режиме ее составляющая $q(L)$ постоянна [2] имеет следующий вид

$$\frac{dC_{\kappa}(L)}{dL} = q(L) \frac{b_1 L - 1}{U_{cp}} \exp(-b_1 L). \quad (19)$$

Подставив (18) и (19) в (17), получим отложение пыли образовавшейся в результате работы конвейера $P_{o.k.L}$ для бесконечно малого участка выработки:

$$P_{o.k.L} = K_i U_{cp} S_B \cdot q(L) \frac{b_1 L - 1}{U_{cp}} \exp(-b_1 L). \quad (20)$$

Подставив (20) в (5), получим интенсивность отложения пыли образованной конвейером

$$P_{o.k.}(L) = q(L)(b_1L - 1)\exp(-b_1L), \text{ мг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}). \quad (21)$$

С учетом того, что

$$b_1 = m_0 \sqrt[4]{\frac{S}{Q^3}}$$

выражение (21) имеет вид

$$P_{o.k.} = q(L) \left(Lm_0 \sqrt[4]{\frac{S}{Q^3}} - 1 \right) \exp \left(-Lm_0 \sqrt[4]{\frac{S}{Q^3}} \right), \text{ мг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}) \quad (22)$$

С учетом полученного выражения (22) модель интенсивности пылеотложений (3) примет вид

$$P_{\kappa} = S\nu C_0 \left(1 - \frac{1}{1 + B_2 L / \nu} \right) + q(L) \left(Lm_0 \sqrt[4]{\frac{S}{Q^3}} - 1 \right) \exp \left(-Lm_0 \sqrt[4]{\frac{S}{Q^3}} \right). \quad (23)$$

С учетом того, что
$$B_2 = \frac{\sigma_h^2 \gamma (g + K_T \pi)}{4,5 \pi \mu R} \quad (24)$$

$$P_{\kappa} = S_{\kappa} \nu C_0 \left(1 - \frac{4,5 \cdot \pi \mu R \nu}{4,5 \cdot \pi \mu R \nu + \sigma_h^2 \gamma (g + K_T \pi) L} \right) + q(L) \left(Lm_0 \sqrt[4]{\frac{S_{\kappa}}{Q^3}} - 1 \right) \exp \left(-Lm_0 \sqrt[4]{\frac{S_{\kappa}}{Q^3}} \right) \quad (25)$$

При работе конвейера появляется также дополнительное электростатическое осаждение частиц пыли в связи с трением ленты и, кроме того, имеет место эжектирующее действие конвейерной ленты на оседание пыли в подконвейерном пространстве [5].

Результаты работы. Теоретический анализ процессов образования аэрозолей при разрушении горных пород, выполненный с учетом вероятностного характера разрушения и шероховатости трущихся поверхностей, позволил получить математическое описание функций распределения. Сопоставление полученных выражений с существующими эмпирическими функциями показывает, что они совпадают с распределением Розина-Раммлера при значении показателей степени равным двум.

Получены выражения позволяющие рассчитать концентрацию и дисперсный состав рудничных аэрозолей по длине и высоте горных выработок при наличии гравитационного и инерционного осаждения частиц.

Полученная математическая модель изменения концентрации пыли по длине выработки при наличии в ней конвейера представляет собой экспоненту с асимптотой, параметры которой зависят от содержания пыли в вентиляционном

потоке, пылевыведения конвейера, параметров пыли, выработки и скорости воздушной струи.

Выводы. На основании выполненных исследований установлено, что:

- дисперсный состав пыли является наиболее изменчивым и трудно предсказуемым фактором, оказывающим решающее влияние на изменение концентрации пыли в горной выработке;

- логарифмически нормальное распределение, распределение по исправленной формуле Ромашова и другие теоретические законы распределения получены для условий не соответствующих механизму образования рудничных аэрозолей и являются неприемлемыми для их описания;

- при распространении аэрозолей в горных выработках, изменения его дисперсного состава не приводят к изменению закона распределения, если процессы осаждения или распределения пыли в выработке экспоненциально связаны со временем релаксации. Угол наклона прямой, характеризующей распределение в двойной логарифмической сетке, остается постоянным, а изменяется только начальное смещение прямой.

- влияние зоны подконвейерного пространства на уровень пылевзрывобезопасности конвейерной выработки обусловлено его изолированностью от общего пространства выработки и выполнением функции проводника взрывного горения в аварийной ситуации, что снижает эффективность противопылевых мероприятий и требует дополнительных способов и технических средств предупреждающих отложение пыли в подконвейерном пространстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Телятников, С.А. Автоматическая взрывозащита конвейерных выработок при авариях, связанных с воспламенениями метана и угольной пыли / С.А. Телятников, Н.Р. Шевцов // Сборник научных трудов. - Донецк: «Норд- пресс», 2005.-С. 90-91.
2. Ткаченко, С.Н. Пылеотложение в угольной шахте / С.Н. Ткаченко // Науковий вісник НГАУ. – Днепропетровск, 2001. - №1. – С. 98 -100.
3. Влияние ПАВ на дисперсность кварцевой пыли при взрывном разрушении углеродного массива / В.И. Голинько, Д.В. Савельев, Я.Я. Лебедев [и др.]//Розробка родовищ – 2014: Щорічний науково-технічний збірник Д.: ТОВ «Лізунов Прес». - С.431-435.
4. Новикова, Е.А. Динамика рудничных аэрозолей, образовавшихся при добыче и транспортировке полезных ископаемых / Е.А. Новикова // Збірник наукових праць НГУ. – 2010. – № 35, том 1. – С. 167-177.
5. Best Practices for Dust Control in Coal Mining/Jay F. Colinet, James P. Rider, Jeffrey M. Listak, John A. Organiscak, and Anita L. Wolfe//Information Circular 9517.-2010. - №110.-pp. 18-20.
6. Ткаченко, С.Н. Учет влияния взметывающейся пыли на общую динамику запыленности горной выработки / С.Н. Ткаченко// Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції Україна наукова, том 27: Гірнична справа. – Дніпропетровськ – Кривий Ріг: Наука і освіта, 2003. - С.32-33.

REFERENCES

1. Telyatnikov, S.A. and Shevstov, N.R. (2005), “Automatic conveyor workings explosion accidents involving ignition of methane and coal dust”, *Zbornik nauchnykh trudov, Donetsk "Nord-press"*, pp. 90-91.
2. Tkachenko, S.N. (2001), “Deposition of dust in the coal mine”, *Naukoviy visnik Natsionalnoi girnychoi akademii Ukrainy*, no.1, pp. 98-100.
3. Holinko, V.I., Savelev, D.V., Lebedev, Ya.Ya., Ishenko, K.S. and Kratkovskiy, I.L. (2014), “Effect of surfactants on the dispersion of silica dust during the explosive destruction of coal rock mass”, *Mining, the annual scientific - technical collection*, pp.431-435.

4. Novikova, E.A. (2010), "Dynamics of mine aerosols produced during production and transportation of minerals", *Zbirnik naukovih prast NMU*, no. 35, pp. 167-177.

5. Colinet, J.F., Rider, J.P., Listak, J.M., Organiscak, J.A., and Wolfe Colinet, A.L. (2010), "Best Practices for Dust Control in Coal Mining", *Information Circular 9517*, no.110, pp. 18-20.

6. Tkachenko, S.N. (2003), "Accounting for the effects of dust that lifting overall dynamics of dust excavation", *Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Ukraina naukova"* [International scientific and practical conference "Scientific Ukraine"], Dnipropetrovsk-Kryvyu Rig, pp. 32-33.

Об авторе

Новикова Елена Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры управления на транспорте, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГБУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина, novikova@mail.ru.

About the author

Novikova Yelena Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor of Department of Transport Management, State Higher Education Institution «National Mining University» (SHEI «NMU»), Dnepropetrovsk, Ukraine, novikova@mail.ru.

Анотація. Одним з найбільш проблемних питань у галузі вибухобезпеки вугільних шахт залишається відкладення вугільного пилу в гірничих виробках. Тому проблема захисту гірничих виробок від вибухів осілої вугільного пилу при її здійманні досить актуальна. Основна складність, яка виникає при теоретичному дослідженні процесу поширення пилу в гірничих виробках, полягає в обліку її осідання та здіймання, головним чином на ґрунті виробки. Занадто спрощені припущення про характер і механізм цих процесів призводять до значної розбіжності теоретичних результатів із спостереженнями. В статті розглянуто особливості формування пиловідкладень по довжині конвеєрної виробки. Запропоновано вирази, які дозволяють розрахувати концентрацію і дисперсний склад рудникових аерозолів по довжині і висоті гірничих виробок в умовах гравітаційного і інерційного осідання частинок пилу.

Ключові слова: відкладення пилу, конвеєрні виробки, вибухобезпечність.

Abstract. One of the most problematic issues in the field of explosion risk in the coal mines is coal dust deposits in the tunnels. Therefore, a problem of protecting tunnels against coal dust explosions when dust shoots up is a question of the day. Main problem of any theoretical study on the dust propagation in mines is how to calculate its shooting up and deposition, mainly on the bottom of tunnels. As a rule, too free assumptions on nature and mechanism of these processes lead to a qualitative discrepancy between theoretical results and results of observations. This article describes specifics of formation of the dust deposit along the length of the belt roadway. Proposed formulas allow calculating concentration and composition of the underground aerosols in the length and height of the mine tunnels in terms of gravitational and inertial particle deposition.

Keywords: dust deposits, explosive risk, belt roadway.

Стаття поступила в редакцію 29.09.2014

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.Г. Шевченко