

УДК 622.814

ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПРЕДЕЛОВ ВЗРЫВЧАТОСТИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

EVALUATION CONCENTRATION LIMITS EXPLOSIVE COAL DUST

**Портола Вячеслав Алексеевич,
докт. техн. наук, проф., E-mail: portola2@yandex.ru
Portola Vyacheslav A., Dr. Sc. (Engineering), Professor.**

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation.

Аннотация. Предложены формулы для расчета верхнего и нижнего концентрационных пределов взрывчатости угольной пыли в зависимости от выхода летучих веществ. Показано, что расчетные и экспериментальные значения нижнего концентрационного предела взрывчатости угольной пыли совпадают, если выходящие летучие компоненты заполняют не весь объем взвешенной пыли, а образуют вокруг пылинок локальные зоны. Предложено учитывать также выделение оксида углерода при окислении нелетучего углерода. Тепловое излучение от горящих частиц подогревает соседние частицы, что приводит к выделению и воспламенению летучих компонентов. При расчете верхнего концентрационного предела взрывчатости угольной пыли учтено неполное выделение летучих компонентов из частичек угля из-за прогрева только верхнего слоя частиц, а также выделение водорода, оксида углерода, повышающих верхний концентрационный предел воспламенения газовой смеси.

Abstract. The formulas for calculating upper and lower limits of concentration of coal dust explosiveness depending on the output of volatiles. It is shown that the calculated and experimental values of the former lower concentration limit of explosiveness of coal dust coincide-by, if volatile components exiting do not fill the entire volume of airborne dust, and dust forming around the local area. It is proposed to take into account also the evolution of carbon monoxide by the oxidation of the non-volatile carbon. Thermal radiation from the burning particles stirs neighboring particles, resulting in the release of volatiles and fire. When calculating the upper concentration limit of explosiveness of coal dust is considered incomplete release of volatile components of the coal particles due to warming only the top layer of particles and release of hydrogen, carbon monoxide, raising the upper explosion limit of the gas mixture.

Ключевые слова: угольная пыль, взрыв, концентрационные пределы взрывчатости угольной пыли, выход летучих компонентов, смесь горючих газов.

Keywords: Coal dust, explosion, concentration limits of explosiveness of coal dust, volatile components, a mixture of combustible gases.

Одной из наиболее опасных аварий на предприятиях по добыче, переработке и использованию угля являются взрывы угольной пыли. Поражающими факторами взрыва горючей пыли являются ударная волна, высокая температура, образующиеся токсичные газы, снижение концентрации кислорода в образующейся смеси газов. Ударная волна способна распространяться на большие расстояния, поэтому взрывы горючей пыли наносят огромный экономический ущерб предприятиям, приводят к групповому травматизму, в том числе с летальным исходом [1].

В наибольших количествах угольная пыль образуется при отработке угольных пластов, транспортировке и перегрузке угля. Однако для возникновения взрыва в воздухе должна образоваться определенная концентрация горючей пыли.

Физико-химические свойства угля могут меняться в широких пределах, поэтому и нижний концентрационный предел взрывчатости пыли различных марок угля находится в широком диапазоне. В литературных источниках содержатся различные данные о концентрационных пределах взрывчатости угольной пыли. Так, эксперименты показали, что большая часть пыли добываемых углей начинает взрываться при концентрации в воздухе 10-50 г/м³ [2]. В [3] утверждается, что угольная пыль с выходом летучих веществ 16 % взрывается при концентрации 125 г/м³, а при выходе летучих 25 % достаточно 100 г/м³.

Учитывая, что максимальная концентрация угольной пыли в атмосфере рабочих мест по санитарным нормам не должна превышать 10 мг/м³, то возможность взрыва взвешенной в воздухе пыли

маловероятна и может реализоваться только при грубом нарушении правил безопасности и рабочих процессов. При образовании опасной концентрации горючей пыли в воздухе причиной взрыва может быть любой источник воспламенения, создающий необходимую температуру в течение определенного периода времени. В большинстве случаев во взрыве участвует ранее отложившая пыль. Поэтому инициировать взрыв отложенной горючей пыли может только взрыв, ударная волна которого переводит осевшую пыль во взвешенное состояние, а фронт пламени воспламеняет частицы пыли. Обычно взрыв отложенной угольной пыли происходит при взрыве горючего газа.

Горению и взрывам газо- и пылевоздушных составов посвящен ряд фундаментальных работ [4-7]. Согласно тепловой теории воспламенения академика Н.Н. Семенова, взрыв горючей пыли происходит благодаря выделению горючих газов из взвешенной пыли при нагревании. Источник воспламенения вызывает термодеструкцию нагретых горючих частиц, что приводит к образованию горючих газов. Выделившиеся горючие газы создают вокруг частиц пыли взрывоопасную газо-воздушную смесь. Газы загораются от источника воспламенения, и образующаяся энергия передается соседним частицам пыли, приводя к их нагреву, выделению горючих газов и их воспламенению.

Принимая во внимание предложенную теорию, важнейшим параметром, влияющим на взрывчатые свойства горючей пыли, является выход летучих веществ при нагреве. В соответствии с ГОСТ Р 55660-13, введенным в действие с 01.01.2015 г., определение выхода летучих веществ из твердого минерального топлива осуществляется при нагреве пробы до температуры 900 ± 5 °С в течение 7 мин без доступа воздуха. Выход летучих веществ зависит от степени метаморфизма топлива. Так, для торфа выход летучих на сухую бессольную массу составляет около 70 %, бурых углей 33-60 %, каменного угля от 8 до 50 %. Период индукции воспламенения угольной пыли от источника тепла также зависит от выхода летучих веществ и может быть рассчитан по формуле [8]

$$\tau_I = 0,51 / [\ln(0,83V^{\Gamma})], \quad (1)$$

где τ_I - период индукции, с; V^{Γ} - выход летучих, %.

Опасность взрыва угольной пыли определяется экспериментальным путем. Для теоретического нахождения верхнего и нижнего концентрационных пределов взрывчатости угольной пыли целесообразно использовать тепловую теорию воспламенения пыли. Оценим нижний концентрационный предел взрывчатости угольной пыли из условия, что выделяемый при нагреве газ состоит в основном из метана, нижний концентра-

ционный предел воспламенения которого равен 5 %. Содержание выделившихся при нагревании угольной пыли горючих газов в запыленной атмосфере можно подсчитать по формуле

$$C_{\Gamma} = \frac{C_{\Pi} V^{\Gamma}}{100}, \quad (2)$$

где C_{Γ} – концентрация горючих газов, выделившихся при нагревании угольной пыли, г/м³; C_{Π} – концентрация угольной пыли, г/м³.

Содержание угольной пыли, обеспечивающее при нагревании взрывоопасную концентрацию выделившихся горючих газов, можно определить по формуле, полученной из выражения (2)

$$C_{\Pi} = \frac{C_{\Gamma} \rho}{V^{\Gamma}}, \quad (3)$$

где C_{Γ} – концентрация выделившегося при нагреве пыли горючего газа, %; ρ – плотность горючего газа, г/м³.

На рис.1 приведены нижний и верхний концентрационные пределы взрывчатости угольной пыли в зависимости от выхода летучих веществ, рассчитанные по формуле (3). В качестве выделившегося горючего газа рассматривался метан, верхний и нижний концентрационные пределы воспламенения которого равняются соответственно 5 и 15 %. В расчетах принято, что плотность выделившегося метана при нормальных условиях равна 710 г/м³.

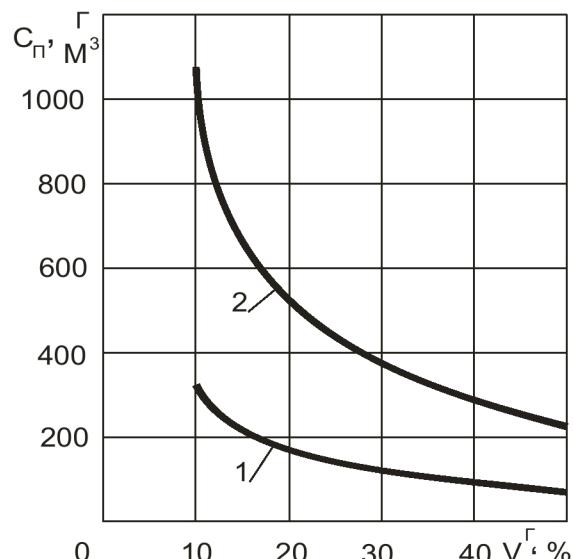


Рис. 1. Зависимость взрывчатой концентрации угольной пыли от выхода летучих: 1 – нижний концентрационный предел взрывчатости; 2 – верхний концентрационный предел взрывчатости

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что теоретически определенный нижний концентрационный предел взрывчатости угольной пыли превышает экспериментальные

Таблица 1. Нижний концентрационный предел взрывчатости угольной пыли ($\text{г}/\text{м}^3$) в зависимости от выхода летучих и доли объема, заполненного взрывоопасной концентрацией выделившихся газов

Доля объема, заполненного взрывоопасной концентрацией газа, %	Выход летучих, %				
	10	20	30	40	50
100	135,8	97,4	74,9	62,2	52,6
80	108,7	77,9	60,7	49,1	42,1
60	81,5	58,4	45,5	37,3	31,5
40	54,3	38,9	30,4	24,9	21,0

значения, приведенные в [2,3]. Возможно несколько причин возникшего отклонения расчетных данных от экспериментов. Первая причина заключается в том, что кроме метана, основными компонентами выделяющихся при нагревании угля летучих газов являются водород, оксид углерода, предельные и непредельные углеводороды. Эксперименты показали, что нижний концентрационный предел воспламенения (НКПВ) образовавшихся при разложении угольной пыли газов практически постоянен и равен 4,2 % [9]. Более низкий по сравнению с метаном нижний концентрационный предел воспламенения свидетельствует о высоком содержании в газовой смеси водорода (воспламеняется при концентрации от 4,0 %). Снижает НКПВ смеси горючих газов присутствие этана (воспламеняется от 3,2 %), пропана (от 2,1 %), ацетилена (от 2,0 %).

Второй причиной отклонения полученных результатов от экспериментальных значений является то, что в расчетах не учтено образование горючего газа при взаимодействии кислорода непосредственно с оставшимися нелетучими атомами углерода угольных частиц. Проведенные исследования показали, что с уменьшением размера угольных частиц резко возрастает количество поглощаемого ими кислорода [10]. Повышение температуры угля резко активизирует этот процесс [11]. Так, при недостатке кислорода происходит следующая реакция взаимодействия углерода с кислородом с образованием горючего оксида углерода



Согласно экспериментальным данным [12], наблюдается существенная убыль углерода в частицах пыли после взрыва.

Так, для углей марки Г уменьшение содержания нелетучего углерода находится в диапазоне 1,5–3,1 %; марки ГЖ – до 13,8 %; марки КО – до 9,1 %. Согласно реакции (4), 1 кг углерода за счет окисления при нормальных условиях образует 1,87 m^3 оксида углерода. Концентрацию оксида углерода, образовавшегося в результате окисления оставшегося нелетучего углерода, можно определить из уравнения

$$C_{\Gamma}^{OK} = (C_{\Pi} - \frac{C_{\Pi}V\Gamma}{100}) \frac{qm}{100}, \quad (5)$$

где C_{Γ}^{OK} – концентрация оксида углерода, выделившегося при окислении нелетучего углерода, %; q – интенсивность выделения оксида углерода при окислении углерода, $\text{м}^3/\text{г}$; m – количество нелетучего углерода, прореагировавшего с кислородом, %;

Складывая объемы горючих газов, выделившихся при нагревании угля (2) и образующихся при окислении нелетучего углерода (5), после преобразования получим следующую формулу для расчета концентрации угольной пыли, обеспечивающую определенную концентрации горючих газов

$$C_{\Pi} = \frac{C_{\Gamma}^0}{\frac{V\Gamma}{\rho} + (1 - \frac{V\Gamma}{100})qm}, \quad (6)$$

где C_{Γ}^0 – суммарная концентрация горючих газов, выделившихся при нагревании и окислении угольной пыли, %.

Результаты расчета концентрации взвешенной угольной пыли, обеспечивающей создание нижнего концентрационного предела воспламенения образующихся горючих газов, равного 4,2 % [9], приведены в табл. 1. В расчетах принято, что интенсивность выделения оксида углерода при окислении углерода равна 0,00187 $\text{м}^3/\text{г}$, а количество нелетучего углерода, окислившего до оксида углерода равна 10 %.

Оценивая полученные данные (при 100% заполнении объема пылевого облака выделившимися горючими газами) можно сделать вывод, что в экспериментах взрывы угольной пыли происходили при меньшей концентрации. Такая ситуация возможна, если допустить, что выделяющийся из угольной пыли горючий газ распространяется не равномерно в облаке взвешенной пыли, а создает локальные зоны с взрывоопасной концентрацией. Эти локальные зоны с взрывоопасной концентрацией вокруг пылинок угля не соединены между собой (рис. 2). Угольные пылинки 1, находящиеся в источнике воспламенения 3, формируют локальные зоны с взрывоопасной концентрацией выделившихся горючих газов 2. От источника воспламенения загораются газовые аномалии 2 прогретых угольных пылинок 1. Образующееся

Таблица 2. Верхний концентрационный предел взрывчатости угольной пыли ($\text{г}/\text{м}^3$) в зависимости от выхода летучих и доли летучих, выделившихся при нагревании частиц угля

Доля летучих, выделившихся при нагревании частиц угля, доли ед.	Выход летучих, %				
	10	20	30	40	50
0,2	4348	2703	1961	1538	1265
0,3	3333	1960	1379	1070	873
0,4	2703	1538	1070	823	669
0,5	2273	1266	873	670	540

тепловое излучение нагревает соседние частицы угля, вокруг которых также образуются и воспламеняются локальные скопления горючих газов 4. Более удаленные угольные частицы также начинают прогреваться тепловым излучением с образованием скоплений горючих газов 5.

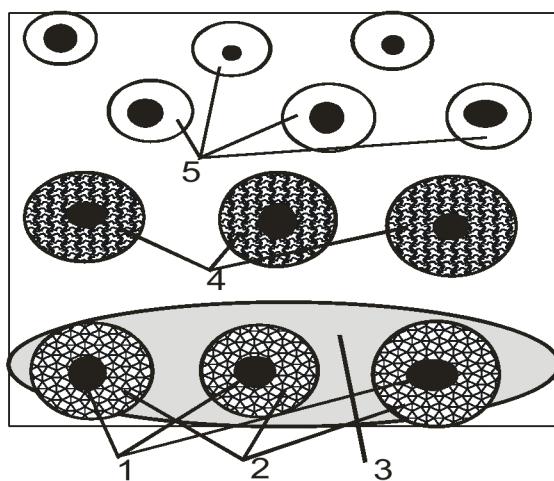


Рис. 2. Распространение горения во взвешенной угольной пыли: 1 – частицы пыли в источнике воспламенения; 2 – взрывоопасные скопления выделившихся газов, зажигаемые источником воспламенения; 3 – источник воспламенения; 4 – скопления горючих газов, образуемые и воспламеняемые тепловым излучением; 5 – формируемые скопления горючих газов вокруг нагреваемых пылинок

Результаты расчетов, приведенные в табл. 1, показывают, что экспериментальным данным соответствуют условия, при которых выделившиеся горючие газы заполняют 40–60 % объема, занимаемого взвешенной угольной пылью. Распространение пламени происходит не непрерывно, а дискретно за счет самовоспламенения горючих газов вокруг пылинок при передаче теплового излучения от ранее воспламенившихся частиц. Нижний концентрационный предел взрывчатости угольной пыли будет также зависеть от размера угольных частиц. С увеличением размера частиц будет снижаться доля выделившегося горючего газа за счет неполного прогрева угля, что приведет к увеличению нижнего концентрационного предела взрыв-

чатости пыли.

Более противоречивые данные имеются о верхнем концентрационном пределе взрывчатости угольной пыли. Например, в [9] утверждается, что верхний предел взрывчатости угольной пыли составляет 300–400 $\text{г}/\text{м}^3$. Однако в [2, 3] верхний предел взрывчатости угольной пыли достигает 2000–3000 $\text{г}/\text{м}^3$. Приведенные на рис. 1 значения верхнего предела взрывчатости существенно меньше. Увеличить верхний предел взрывчатости пыли можно в случае повышения верхнего концентрационного предела воспламенения (ВКПВ) образуемых газов. Так, у водорода ВКПВ равен 75 %, оксида углерода – 75 %, ацетилена – 82 %.

Нижний и верхний концентрационные пределы воспламеняемости смеси горючих газов (в об. %) определяются по формуле, предложенной Ле Шателье

$$\tilde{\sigma} = \frac{100}{\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_i}{N_i}}, \quad (7)$$

где n_1, n_2, \dots, n_i – объемное содержание каждого горючего компонента в смеси горючих газов, %; N_1, N_2, \dots, N_i – нижний или верхний концентрационные пределы воспламеняемости каждого из этих компонентов, %.

Расчет по формуле показывает, что ВКПВ смеси выделившихся при нагреве и окислении частиц угольной пыли может составлять 18–28 % в зависимости от доли водорода, оксида углерода. Увеличению верхнего концентрационного предела взрывчатости угольной пыли способствует и неполное выделение летучих из-за прогрева только верхнего слоя частиц пыли. Согласно экспериментальным данным средняя убыль летучих компонентов при взрывах угольной пыли составляла 34,4 % [13]. С учетом неполного выделения летучих компонентов из угольных частиц получена следующая формула для расчета верхнего концентрационного предела взрывчатости угольной пыли

$$C_{II}^0 = \frac{C_{IB}^0}{\frac{V^F K}{\rho} + (1 - \frac{V^F K}{100})q}, \quad (8)$$

где C_{IB}^0 – верхний концентрационный предел воспламенения газовой смеси, %; K – доля выде-

лившихся летучих компонентов, доли ед.

Расчет верхнего концентрационного предела взрывчатости угольной пыли производился для ВКПВ смеси горючих газов, равной 20 % за счет содержания водорода, оксида углерода, ацетилена. Доля летучих, выделившихся при нагревании частиц угля, изменялась от 0,2 до 0,5. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Приведенные в табл. 2 результаты показывают, что верхний концентрационный предел взрывчатости угольной пыли может изменяться в

широких пределах в зависимости от выхода летучих и реальной доли выделившихся летучих компонентов при нагреве. Доля выделившихся летучих компонентов будет зависеть от размера угольных частиц, начальной температуры частиц и от мощности источника зажигания. С уменьшением размера угольных пылинок и увеличением начальной температуры верхний концентрационный предел взрывчатости угольной пыли будет снижаться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ударные волны при взрывах в угольных шахтах / Д.Ю. Палеев [и др.]. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 312 с. – (Библиотека горного инженера. Т. 6 «Промышленная безопасность». Кн. 3).
2. Справочник по рудничной аэробологии / Под ред. К.З. Ушакова. – М., «Недра», 1977. – 328 с.
3. Соболев Г.Г. Горноспасательное дело. Изд. 2, перераб. и доп. – М., Недра, 1979. – 432 с.
4. Семенов Н.Н. Теория горения. Наука и жизнь. – 1940. – № 8-9. – С. 3-12.
5. Зельдович Я.Б. Теория ударных волн и введение в газодинамику. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1946. – 187 с.
6. Зельдович Я.Б., Компанеец А.С. Теория детонации. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1955. – 268 с.
7. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах: Пер. с англ. – М.: Мир, 1968. – 592 с.
8. Мясников А.А., Старков С.П., Чикунов В.И. Предупреждение взрывов газа и пыли в угольных шахтах. – М.: Недра 1985. – 205 с.
9. Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Медведев И.И. Рудничная аэробология. – М., Недра, 1978. – 440 с.
10. Портола В.А. Опасность самовозгорания угольной пыли. Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 6. – С. 36–39.
11. Портола В.А., Торосян Е.С. Интенсификация процесса самовозгорания угля при перевозке автомобильным транспортом. Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 1. – С. 46–49.
12. Хлудов Д.С., Оленников С.В., Мусинов С.Н., Неведров А.В., Субботин С.П. К вопросу о методике определения участия угольной пыли во взрыве метановоздушной смеси. – С.П. Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. – № 2. – С. 150–155.
13. Петрухин, П. М. Предупреждение взрывов пыли в угольных и сланцевых шахтах / П. М. Петрухин, М. И. Нецепляев, В. Н. Качан, В. С. Сергеев. – М. : Недра, 1974. – 304 с.

REFERENCES

1. Udarnye volny pri vzryvah v ugor'nyh shahtah / D.YU. Paleev [i dr.]. – M.: Izdatel'stvo «Gornoe delo» ООО «Kimmerijskij centr», 2011. – 312 s. – (Biblio-teka gornogo inzhenera. T. 6 «Promyshlennaya bezopasnost'». Kn. 3).
2. Spravochnik po rudnichnoj aehrologii / Pod red. K.Z. Ushakova. – M., «Nedra», 1977. – 328 s.
3. Sobolev G.G. Gornospasatel'noe delo. Izd. 2, pererab. i dop. – M., Nedra, 1979. – 432 s.
4. Semenov N.N. Teoriya goreniya. Nauka i zhizn'. – 1940. – № 8-9. – S. 3-12.
5. Zel'dovich YA.B. Teoriya udarnyh voln i vvedenie v gazodinamiku. – M.-L.: Izd-vo AN SSSR, 1946. – 187 s.
6. Zel'dovich YA.B., Kompaneec A.S. Teoriya detonacii. – M.: Gos. izd-vo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1955. – 268 s.
7. L'yuis B., EHL'be G. Gorenje, plamya i vzryvy v gazah: Per. s angl. – M.: Mir, 1968. – 592 s.
8. Myasnikov A.A., Starkov S.P., CHikunov V.I. Preduprezhdenie vzryvov gaza i pyli v ugor'nyh shahtah. – M.: Nedra 1985. – 205 s.
9. Ushakov K.Z., Burchakov A.S., Medvedev I.I. Rudnichnaya aehrologiya. – M., Ne-dra, 1978. – 440 s.
10. Portola V.A. Opasnost' samovozgoraniya ugor'noj pyli. Bezopasnost' truda v promyshlennosti. – 2015. – № 6. – S. 36–39.
11. Portola V.A., Torosyan E.S. Intensifikasiya processa samovozgoraniya ugoriya pri perevozke avtomoto-

bil'nym transportom. Bezopasnost' truda v promyshlennosti. – 2015. – № 1. – S. 46-49.

12. Hludov D.S., Olennikov S.V., Musinov S.N., Nevedrov A.V., Subbotin S.P. K voprosu o metodike opredeleniya uchastiya ugol'noj pyli vo vzryve metanovozdushnoj smesi. S.P. Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti. – 2014. – № 2. – S. 150-155.

13. Petruhin, P. M. Preduprezhdenie vzryvov pyli v ugol'nyh i slancevyh shahtah / P. M. Petruhin, M. I. Neceplyaev, V. N. Kachan, V. S. Sergeev. – M. : Nedra, 1974. – 304 s.

Поступило в редакцию 30 сентября 2016/

Received 30 September 2016