Станислав КАЛЯКИН, Виктор КОСТЕНКО, Елена ЗАВЬЯЛОВА
Донецкий национальный технический университет, Украина
Либор ШТРОХ
ВВУУ Острава-Радванице. Чешская республика

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ ШАХТНЫХ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ НА ВЗРЫВООПАСНОСТЬ УГОЛЬНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

Выполнена оценка взрывоопасности угольных аэрозолей, находящихся в воздушной атмосфере с добавками горючих газов (метан, ацетилен). Экспериментально установлен синергетический эффект существенного снижения нижних концентрационных пределов взрываемости композиции «угольная пыль – воздух - горючие газы», относительно нижнего предела воспламенения в воздухе отдельных ее компонентов. Сформулирована синергетическая парадигма обеспечения взрывозащиты угольных шахт, предложены рекомендации по обеспечению взрывобезопасности технологических процессов горного производства.
Ключевые слова: взрыв, воспламенение, горючие газы, ацетилен, угольная пыль, метан, концентрационные пределы взрываемости, взрывобезопасность, взрывозащита.

EFFECT OF IMPURITIES MINE COMBUSTIBLE GASES ON EXPLOSION DANGERIN OF COAL AEROSOL

The estimation of explosive coal aerosols that are in air with the addition of combustible gases (methane, acetylene). Experimentally established synergistic effect a substantial reduction of the concentration of the lower explosion limits song "coal dust - air - combustible gases," relative to the lower explosive limit in air of its individual components. Formulated synergetic paradigm of explosion protection of coal mines, the recommendations for ensuring explosion process of mining.
Tags: explosion, ignition, fuel gas, acetylene, carbon dust, methane concentration limits explosion, explosion risk, explosion protection

Проблема и ее связь с важнейшими научными и практическими задачами. Соблюдение требований взрывобезопасности в угольных шахтах, опасных по газу и пыли, – неотъемлемая часть системы охраны и безопасности труда на угледобывающих предприятиях. Для этого необходимо достоверно знать параметры пылегазовых аэрозольных смесей, образующихся в технологических процессах горного производства и управлять взрывобезопасностью атмосферы горных выработок. Недостоверные оценки параметров взрывобезопасности приводят к воспламенению взрывоопасной среды и взрывам на угольных шахтах.

Только за последние пять лет (2006 - 2010 годы) возник 21 взрыв газа и угольной пыли, что составило 8% от всех видов аварий, произошедших на угольных шахтах Украины. Взрывы смесей горючих шахтных газов и аэрозолей на угольных шахтах приводят к травматизму горнорабочих, часто смертельному, значительным разрушениям подземных и поверхностных сооружений, сопровождаются значительными прямыми и косвенными экономическими убытками.

Результаты анализа последних исследований и публикаций показали, что создание эффективной системы взрывозащиты угольных шахт, опасных по газу и угольной пыли, базируется на соблюдении определенных требований по концентрационным пределам для угольной пыли в воздухе и отложениям пыли в

горных выработках [1]. Для этого необходимо выполнение следующих мероприятий по предотвращению взрывов в угольных шахтах [2]:

- предупреждение образования и скопления взрывоопасных пылегазовых смесей в горных выработках с помощью вентиляции;

- предотвращение воспламенения возможных пылегазовых смесей путем создания предохранительной среды и специальных заслонов, локализирующих взрыв;

- удаление пылевых отложений, осланцевание или обмывка стенок и подошвы горных выработок.

Ситуация осложнена выделением в горные выработки значительных количеств горючих газов, а именно: метана, водорода, ацетилена, оксида углерода и некоторых других [3]. Которые по некоторым оценкам могут существенно влиять на параметры инициирования и развития взрывов. Метан является наиболее распространенным из них, ацетилен – наиболее химически активный из-за наличия весьма слабой тройной углеродной связи. В полостях горных выработок образуются пылегазовые композиции - искусственно созданный неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов с чёткой границей раздела между ними.

Все противовзрывные мероприятия эффективны только в том случае, если может быть получена правильная оценка взрывоопасных свойств атмосферы горных выработок на основе контроля и анализа состава горючих газов, размеров и концентрации частиц угольной пыли, образующихся в горных выработках угольных шахт.

Постановка задачи исследований. Целью работы является обоснование рекомендаций по обеспечению взрывозащиты технологических процессов в угольных шахтах на основе исследования закономерностей воспламенения и взрывания пылегазовых композиций, образующихся при работе добычных, проходческих и транспортных машин и механизмов в горных выработках, особенно в призабойных пространствах.

Результаты исследований. Миграция горючих газов из угля и запыленность воздуха в горных выработках угольных шахт определяется как горно-геологическими, так и технологическими факторами горного производства. Особую роль газопылевые композиции, образующиеся в горном производстве, играют в вопросе взрывобезопасности угольных шахт. Взрывоопасность атмосферы горных выработок зависит от концентрационных пределов взрываемости газов и пылевых аэрозолей и содержания кислорода в системе «угольная пыль - воздух - горючие газы». По установленным правилам в угольных шахтах для наиболее опасных условий подготовительных и очистных участков допустимая концентрация метана составляет не более 1% [4,5]. Именно при такой концентрации производит отключение электроэнергии на технологическом участке шахты система автоматической газовой защиты. Однако, при этом не учитывается факт наличия в горной выработке других горючих газов и взвешенной в воздухе угольной пыли, горючесть и каталитические свойства которой снижают нижний концентрационный предел взрываемости метана и других горючих газов.

Одновременное присутствие метана и других горючих газов снижают нижний концентрационный предел взрываемости угольной пыли. Это влияние достаточно полно изучено в МакНИИ, в результате чего получена эмпирическая зависимость [6]:

$$C_{уп}^{CH_4} = 53{,}3\exp(-0{,}045V^{г} - 0{,}69C_{CH_4}) + 1{,}4\exp(-0{,}032V^{г})A_c, \text{ г/м}^3 \qquad (1)$$

где $C_{уп}^{CH_4}$ - нижний концентрационный предел взрываемости угольной пыли в присутствии метана, г/м^3; C_{CH_4} - концентрация метана в пылегазовой смеси, % об.;

$V^{г}$ - выход летучих и газов из угля,%; A_c - зольность угля,%.

Для (1) мелкодисперсной пыли угольного пласта l_1 акционерного общества «Шахта им. А.Ф.Засядько (марка угля - Ж, выход летучих $V^{г}$=34%, зольность A_c=7,0 %) получены значения нижнего концентрационного предела взрываемости композиции «метан - угольная пыль - воздух». Затем определена зависимость нижнего концентрационного предела взрываемости метана C_{CH_4} от нижнего предела взрываемости угольной пыли $C_{уг}$. Результаты расчетов приведены на рис. 1 в виде графика, который описывается эмпирической зависимостью:

$$C_{CH_4}(1 - 0{,}06285\,C_{уг} + 0{,}02284\,C_{уг}) = 5{,}004 - 0{,}03068\,C_{уг}, \qquad (2)$$

где C_{CH_4} в %об., а $C_{уг}$ в г/м^3.

Анализ полученных результатов показывает, что условно можно очертить три характерные области взрывчатости метанопылевоздушных смесей.

Первая – область (I), в которой концентрация метана C_{CH_4} больше его нижнего концентрационного предела взрываемости. В этой области ведущую роль в воспламенении взрывоопасной смеси играет метан. Вторая область (II) характеризует взрывчатость метанопылевоздушных смесей, причем их взрывчатость определяется соотношением концентраций метана и угольной пыли. Критическое значение этого соотношения можно получить из уравнения (2):

$$0{,}02284\,C_{уг}^2 - 0{,}06285\,C_{уг} + 0{,}3068\,C_{уг}/C_{CH_4} - 5{,}004/C_{CH_4} + 1 = 0. \qquad (3)$$

Используя критическое отношение (3) можно установить при каких концентрациях метана и угольной пыли композиция«метан-угольная пыль-воздух» становится взрывчатой.

И третья область (III) соответствует соотношениям метана и угольной пыли, при которых данная композиция не является взрывчатой. Однако существует и четвертая область (IV) взрывчатых концентраций в системе «метан-угольная пыль-воздух», в которой концентрация метана удовлетворяет требованиям «Правил безопасности…» ($C_{CH_4} \le 1\%$ об.), а концентрация пыли - ниже ее предела взрываемости в воздухе. Этот факт говорит о том, что в атмосфере технологических участков угольных шахт может образоваться взрывоопасная пылегазовая среда, которая, тем не менее, имеет приемлемые по условиям безопасности параметры как для газовой защиты, так и по взрываемости угольной пыли.

В вопросе взрывобезопасности угольных шахт такое положение дел неприемлемо, тем более что на больших глубинах разработки выбросоопасных угольных пластов в пробах газового анализа установлено содержание ацетилена до 2% об. и водорода до 8% об. Наличие этих газов расширяет пределы взрываемости в

системе «горючие газы-угольная пыль-воздух» по сравнению с метановоздушной смесью.

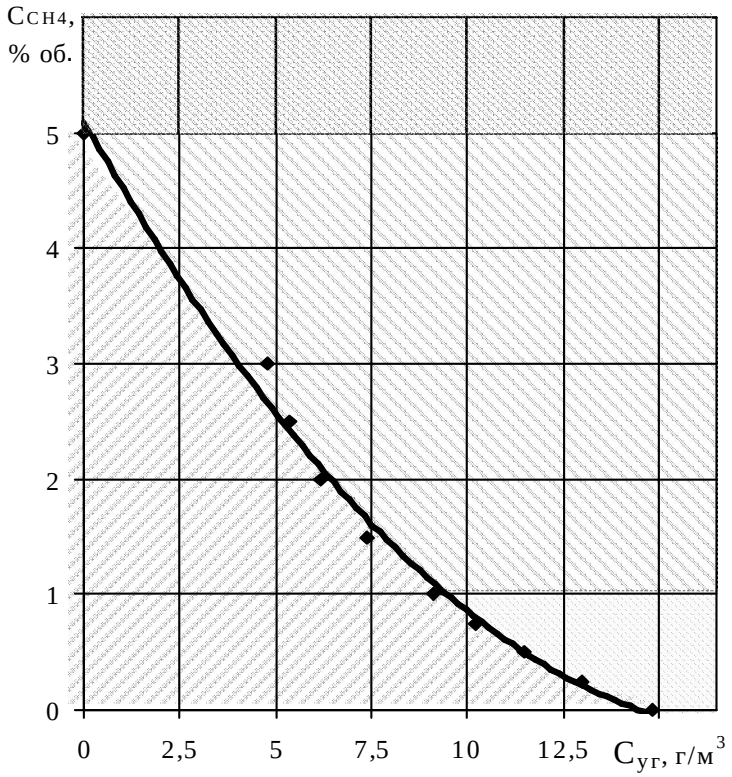

Рис.1. Нижний концентрационный предел взрываемости композиции «метан-угольная пыль-воздух» (сплошная линия) при изменении содержания в ней угольной пыли ($C_{уг}$) и метана (C_{CH_4})

Fig.1. The lower explosive limit concentration composition "methane-coal dust-air" (solid line) when the content of her coal ($C_{уг}$) and methane (C_{CH_4})

Из совместных исследований специалистов ДонНТУ (Донецк, Украина) и ВВУУ (Радванице, Чешская республика) [7] известны результаты лабораторных исследований взрывчатых свойств воздушно-ацетилено-угольных аэрозолей, который позволяет достаточно точно ответить на вопрос о влиянии ацетилена на взрывчатые свойства композиции «горючие газы -угольная пыль- воздух». В соответствие с этими данными от источника, выделяющего при взрыве энергию 2кДж, воспламенялась смесь воздуха, ацетилена (концентрация $C_{ац}$=0…2 % об.), угольной пыли пласта шахты «Дарков» (Чешская республика) с влажностью 0,63%, зольностью 4,96 % и выходом летучих 21,86 % (размер частиц 0,004…0,25 мм, концентрация $C_{уг}$ = 0…125 г/м^3). В опытах регистрировали скорость нарастания давления dP/dt в автоклаве, заполненном воспламеняемой смесью. Результаты опытов представлены в табл.1.

Таблица 1 - Оценка взрывчатых свойств пылеацетиленовоздушных смесей [7] (детонатор 2кДж)

Table 1 - Assessment of ineffective coal dust-air- acetylene mixtures [7] (detonator 2kJ)

№ п/п	Концентрация		Наличие взрыва	dP/dt, бар/с	t_1, с
	пыли, г/м^3	C_2H_2, % об.			
1	125	-	да	60	160
	30	-	нет	12	165
	20	-	то же	9	80
	10	-	-»-	7	76
	5	-	-»-	7	71
2	50	0,5	да	17	334
	30	0,5	нет	10	137
	10	0,5	то же	10	79
	0	0,5	-»-	7	63
3	50	1	да	36	190
	30	1	нет	10	580
	10	1	то же	12	108
4	30	1,5	да.	27	227
	10	1,5	то же	14	372
	5	1,5	-»-	14	380
5	30	2,5	-»-	363	57
	10	2,5	-»-	236	72
	5	2,5	-»-	232	66
	0	2,5	-»-	128	85

Исходя из экспериментальных данных установили, что взрыв пылеацетиленовоздушной смеси от импульса 2 кДж характеризует определенная (критическая) скорость нарастания давления в автоклаве $(dP/dt)_{кр}$=14бар/с. При меньшей скорости воспламенение затухает и взрывов не наблюдали Статистическая обработка результатов экспериментов позволила установить эмпирическую зависимость скорости нарастания давления в автоклаве при воспламенении ацетиленоугольновоздушной смеси от концентрации в ней ацетилена и угольной пыли (рис.2):

$$dP/dt = \frac{0{,}82745 + 1{,}015X}{1 - 0{,}6097X + 0{,}093745X^2}, \text{ бар/с,} \qquad (4)$$

где $X = \ln[1 + \sqrt{C_{уг}} + C_{ац}^3]$.

Решение уравнения (4) его относительно X при $(dP/dt)_{кр}$=14бар/с дает уравнение, показывающее как изменяется взрывчатость композиции «ацетилен - угольная пыль-воздух» от содержания в ней ацетилена:

$$C_{ац} = \left(5{,}3535 - \sqrt{C_{уг}}\right)^{0{,}333}. \qquad (5)$$

По аналогии с исследованиями метанопылевоздушных смесей (уравнение (1)) проделаем те же действия для ацетиленоугольновоздушных смесей (уравнение (5)).

Нижний предел взрываемости для чешского угля составляет $C_{уг}$ = 71 г/м^3, так как выход летучих для него гораздо меньше, чем для угля пласта l_1 шахты им. А.Ф.Засядько.

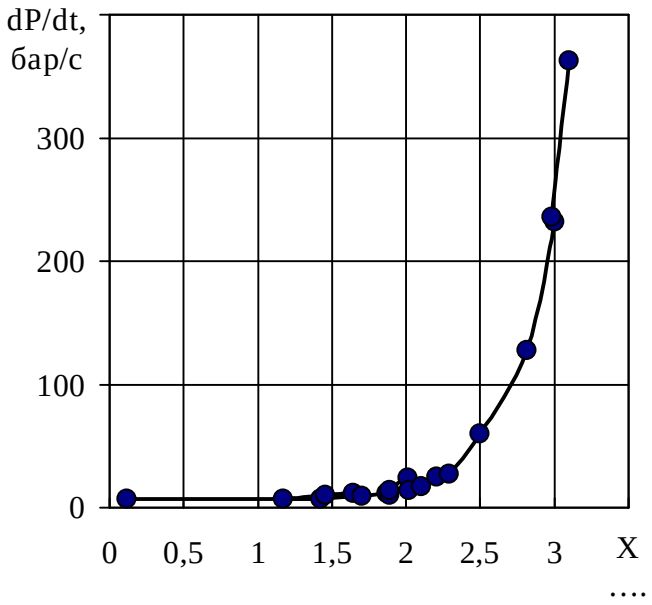

Рис.2. Зависимость давления (dP/dt) в автоклаве при воспламенении ацетиленуглевоздушной композиции от концентрации в ней смеси ацетилена и угольной пыли (X)

Fig.2. Dependence of pressure (dP / dt) in an autoclave in the ignition coal dust-air-acetylene composition of concentration of the mixture of acetylene and coal dust (X)

Аналитические исследования уравнения (5) позволили установить зависимость взрывчатости пылегазовой композиции от содержания в ней ацетилена и угольной пыли (рис.3):

$$C_{ац}\left(1-0{,}001207C_{уг}+0{,}0009643C_{уг}^{2}\right)=1{,}7005-0{,}02633C_{уг}. \qquad (6)$$

Критические условия, определяющие взрывчатость композиции «ацетилен-угольная пыль-воздух» зависят от концентрации в ней ацетилена и угольной пыли:

$$0{,}0009643C_{уг}^{2}-0{,}001207C_{уг}+0{,}02633C_{уг}/C_{ац}-\frac{1{,}7005}{C_{ац}}+1=0. \qquad (7)$$

Анализ критических условий (3) и (7), характеризующих взрывчатость, соответственно, метанопылевоздушных и ацетиленопылевоздушных композиций, показал, что коэффициенты 5,004 и 1,7005 соответствуют нижним

концентрационным пределам (НКП) взрывчатости смесей с воздухом, соответственно, метана и ацетилена.

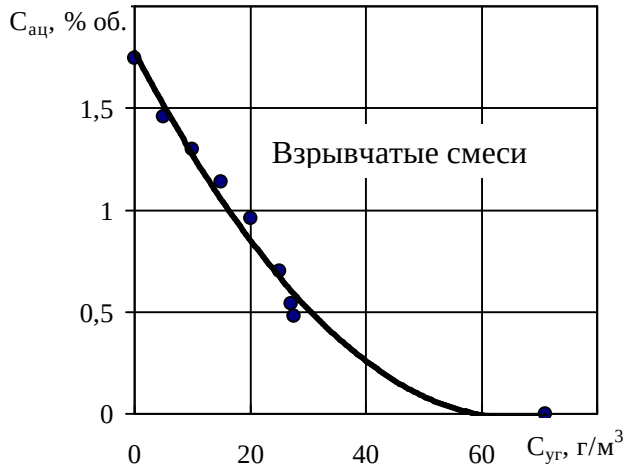

Рис.3. Зависимость нижнего предела взрывчатости пылегазовой композиции от содержания в ней ацетилена ($C_{ац}$) и угольной пыли ($C_{уг}$)

Fig.3. Dependence of the lower limit of explosiveness dust-gas composition on its content of acetylene ($C_{ац}$) and coal dust ($C_{уг}$)

По мере нарастания концентрации угольной пыли в горючих композициях наблюдается резкое снижение нижних концентрационных пределов взрываемости как горючего газа, так и угольной пыли. Например, для метанопылевоздушных композиций. содержащих уголь марки Ж пласта l_1 шахты им. А.Ф.Засядько для метана $НКП_{сн4}$ равен 0,9% об., для угольной пыли $НКП_{уг}$ - 9,29 г/м^3, что менее чем для их метановоздушных и пылевоздушных, соответственно, в 5,55 и 1,6 раза. Аналогичная картина для ацетиленопылевоздушного аэрозоля: если $НКП_{ац}$ составлял 0,05 % об., то $НКП_{уг}$ равен 56,9 г/м^3, что менее их нижних концентрационных пределов взрываемости соответственно, в 34,01 и 1,25 раза.

Таким образом, обнаружен синергетический эффект снижения нижних концентрационных пределов взрываемости горючих газов и угольной пыли в пылегазовых композициях, что приводит к увеличению вероятности воспламенения и взрыва, несмотря на то, что в системе «горючий газ-угольная пыль-воздух» содержание каждого из горючих компонентов гораздо меньше их нижних концентрационных пределов взрываемости в воздухе. Экспериментально установлена эволюция, казалось бы, невзрывчатой системы во взрывоопасную, что можно объяснить переходом аддитивного линейного взаимодействия горючих компонентов в композиции к нелинейным, связанным с бифуркационными механизмами развития окислительных цепных реакций на поверхности частиц угольной пыли, газовых молекул и радикалов угольных молекул. Это малоизученное явление объясняет условия возникновения катастрофических взрывов в угольных шахтах и позволяет обосновать новую систему научных взглядов (парадигму)

обеспечения взрывозащиты в горных выработках. В основу этой парадигмы могут быть положены следующие направления обеспечения взрывозащиты в угольных шахтах:

1. Необходимо осуществлять оперативный мониторинг комплексного газового состава атмосферы в горных выработках на наличие в ней метана, водорода, ацетилена, оксида углерода, кислорода и витающей угольной пыли.

2. Применять технические средства, которые позволяют оценивать интегральную взрывоопасную концентрацию с учетом горючих компонентов в пылегазовых композициях, образующихся в горных выработках.

3. Горная техника для угольных шахт, должна быть оснащена генераторами для создания в призабойных пространствах локальных объемов газовой среды, ингибирующей окислительные реакции. Их работа должна быть неотделима от технологического цикла и увязана с техническими средствами автоматики и мониторинга шахтной атмосферы.

4. Разработать технологию горного производства в долгодействующей предохранительной среде, предотвращающей воспламенение и взрывы горючих пылегазовых композиций в забоях горных выработок.

Выводы. В результате анализа экспериментальных данных установлено ранее неизвестное явление снижения нижних концентрационных пределов взрываемости композиций горючих газов и угольной пыли. Этим можно объяснить взрывы, которые произошли в, казалось бы, невзрывоопасной среде. Обоснованы рекомендации по обеспечению взрывобезопасности горного производства и сформулирована новая синергетическая парадигма обеспечения взрывозащиты угольных шахт. Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение особенностей и параметров механизма воспламенения и взрыва горючих пылегазовых композиций.

LITERATURA

[1] Мамаев В.И. Предупреждение взрывов пылеметановоздушных смесей/ [В.И.Мамаев, Ж.А. Ибраев, Д.М. Шередекин, И.С.Яценко и др.] –М.:Недра, 1990. – 159 с.

[2] Калякин С.А. Создание эффективной системы взрывозащиты угольных шахт/ С.А. Калякин, Н.Р. Шевцов, И.В. Купенко//Уголь Украины. – 2012. – № 2. – С. 24-30.

[3] Звягильский Е.Л. Опыт исследования низкоуглеродистой газовой составляющей шахтопластов шахты им. А. Ф. Засядько с целью безопасной добычи угля/Е.Л. Звягильский, А.Н. Сукачев, Б.В. Бокий. – Севастополь:«Вебер», 2004. – 40 с.

[4] Каледина Н.О. О мерах радикального повышения взрывобезопасности при современной технологии подземной добычи угля/ Н.О. Каледина, Б.Н. Кутузов, В.В. Мельник, С.А. Горинов// Горный журнал. – 2010. – №7. – С. 88-92.

[5] Медведев В.Н. Повышение достоверности информации при многокомпонентном контроле шахтной атмосферы/ В.Н. Медведев, Е.В. Беляева, А.Л. Скляров, С.Ф. Типоченков//Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 2009. – С. 81-89.

[6] Петрухин М.П. Борьба с угольной пылью в шахтах/ М.П. Петрухин, Г.С. Гродель, Н.И. Шеляев. – М.: Недра, 1981. – 271 с.

[7] Костенко В.К. Лабораторные исследования взрывчатых свойств воздушно-ацетилено-угольных аэрозолей/ [Костенко В.К., Калякин С.А, Завьялова Е.Л., Мороз О.К. и др.]// «Прогрессивные технологии и системы машиностроения»: сб. науч. тр. ДонНТУ.– Донецк, 2012. — С.172 – 180.