

ВЗРЫВООПАСНОСТЬ ПЫЛЕГАЗОВЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

В работе установлена взрывоопасность пылегазовых аэрозолей, образующихся в угольных шахтах на больших глубинах и содержащих угольную пыль, метан и ацетилен. Установлен синергетический эффект снижения нижних концентрационных пределов взрываемости горючего газа и угольной пыли в системе «горючие газы - угольная пыль - воздух» относительно их нижних концентрационных пределов воспламенения по отдельности в воздухе. Разработаны рекомендации по обеспечению взрывобезопасности горного производства и сформулированы предложения и дополнения в пылегазовый режим для обеспечения взрывозащиты угольных шахт.

Ключевые слова: взрыв, воспламенение, горючие газы, ацетилен, угольная пыль, метан, концентрационные пределы взрываемости, взрывобезопасность, взрывозащита.

Проблема и ее связь с важнейшими научными и практическими задачами. Соблюдение требований взрывобезопасности в угольных шахтах, опасных по газу и пыли, является неотъемлемой частью системы охраны и безопасности труда на угледобывающих предприятиях. Для этого на шахтах введен специальный пылегазовый режим, соблюдение которого должно обеспечивать безопасность ведения горных работ. Однако взрывы метана и угольной пыли в угольных шахтах все-таки происходят и приводят к катастрофам с большим числом человеческих жертв, вызывающих социальные потрясения в обществе, к значительным разрушениям подземных и поверхностных сооружений и прямым и косвенным экономическим убыткам. В период с 2007 по 2011 годы в России, Украине и Казахстане произошли крупные катастрофы на шахтах «Ульяновская», «Юбилейная» и «Распадская» в Кузбассе, шахтах им. А.Ф. Засядько, им. Карла Маркса и «Суходольская» в Донбассе и шахтах им. Ленина и «Абайская» в Караганде, которые привели к гибели более 500 шахтеров. Эти аварии показали, что взрывозащита угольных шахт находится на низком уровне, так как не удается достоверно установить взрывобезопасные параметры пылегазовых аэрозольных смесей, образующихся в технологических процессах горного производства и управлять взрывобезопасностью атмосферы горных выработок, а недостоверные оценки взрывоопасности газо-пылевоздушной среды приводят к ее воспламенению и взрывам на угольных шахтах.

Анализ последних исследований и публикаций показал, что создание эффективной системы взрывозащиты угольных шахт, опасных по газу и угольной пыли, базируется на соблюдении определенных требований по концентрационным пределам для угольной пыли и горючим газам в воздухе, а также по 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 применения специальных заслонов, локализирующих взрыв.

Однако все эти мероприятия эффективны только в том случае, если дается достоверная оценка взрывоопасных свойств атмосферы горных выработок на основе учета состава горючих газов и размеров витающих в воздухе частиц угольной пыли, образующихся в горных выработках угольных шахт при разрушении угольных пластов.

Постановка задачи исследований. Целью работы является исследование взрывоопасности пылегазовых аэрозолей, образующихся при работе добычных и

проходческих комбайнов в забоях горных выработок и разработка рекомендаций по взрывозащите технологических процессов в угольных шахтах.

Результаты исследований. Генерация горючих газов углем и запыленность им воздуха в горных выработках угольных шахт определяется как горно-геологическими условиями, так и технологическими факторами горного производства. Особую роль газопылевые аэрозоли, образующиеся в горном производстве, играют в вопросе взрывобезопасности угольных шахт. Взрывоопасность атмосферы горных выработок зависит от концентрационных пределов взрываемости газопылевых аэрозолей и содержания кислорода в системе «горючие газы-угольная пыль-воздух». По установленным правилам в угольных шахтах для наиболее опасных условий подготовительных и очистных участков допустимая концентрация метана составляет не более 1% [3, 4]. Именно при такой концентрации происходит отключение электроэнергии на технологическом участке шахты системой 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. С другой стороны одновременное присутствие метана и других горючих газов снижают нижний концентрационный предел взрываемости угольной пыли. Это влияние достаточно полно изучено в институте МакНИИ, в результате чего получена эмпирическая зависимость нижнего концентрационного предела взрываемости угольной пыли с присутствием метана в пылегазовом аэрозоле [5]:

$$C_{yz}^{CH_4} = 53,3 \exp(-0,045V^2 - 0,69C_{CH_4}) + 1,4 \exp(-0,032V^2) A_c, \text{ г/м}^3, \quad (1)$$

где $C_{yz}^{CH_4}$ - нижний концентрационный предел взрываемости угольной пыли в присутствии метана, г/м³;

C_{CH_4} - концентрация метана в пылегазовой смеси, % об.;

V^2 - выход летучих и газов из угля, %;

A_c - зольность угля, %.

Проведем анализ уравнения (1) на примере мелкодисперсной пыли угольного пласта l_1 ПАТ «Шахта им. А.Ф.Засядько. Уголь имеет марку Ж, выход летучих $V^2=34\%$, зольность $A_c=7,0\%$. Подставляем в уравнение (1) ряд концентраций метана и получаем соответствующие значения нижнего концентрационного предела взрываемости угольной пыли в присутствии метана в системе «метан-угольная пыль-воздух». Далее решаем обратную задачу: определяем нижний концентрационный предел взрываемости метана C_{CH_4} от концентрации угольной пыли и ее нижнего концентрационного предела взрываемости C_{yz} . Результаты расчетов взаимного влияния концентраций метана и угольной пыли на взрывчатость пылегазового аэрозоля приведены на рис. 1 в виде графика, который описывается эмпирической зависимостью:

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

где C_{CH_4} в % об., а C_{yz} в г/м³ - концентрации соответственно метана и угольной пыли.

Анализ полученных результатов показывает, что с помощью зависимости (2) 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 уже соотношением между концентрациями метана и угольной пыли. Критическое значение этого соотношения можно получить из уравнения (2):

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

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

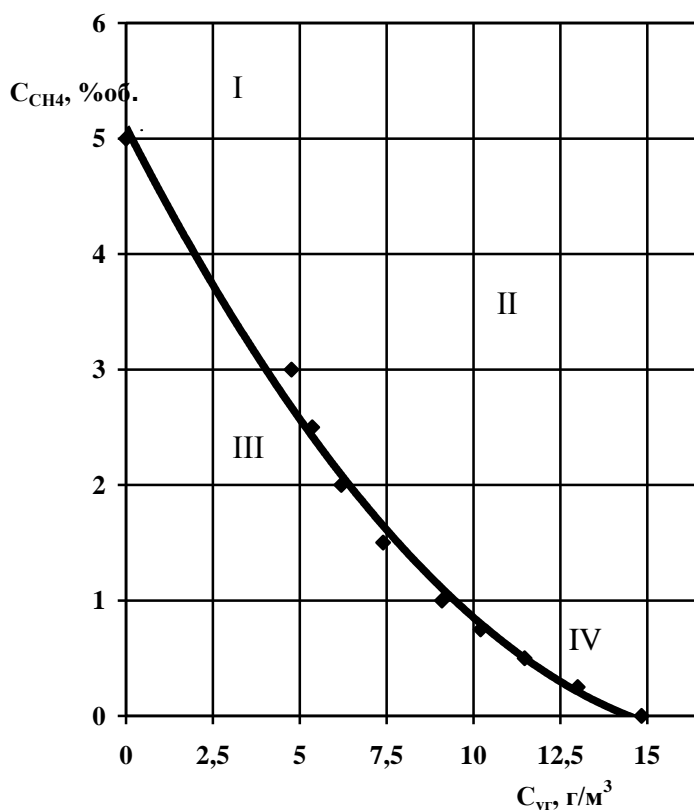


Рис.1. График зависимости нижнего концентрационного предела взрываемости метана в присутствии угольной пыли в системе «метан-угольная пыль-воздух».

И третья область (III) соответствует соотношениям концентраций метана и угольной пыли, при которых данная система не является взрывчатой. Однако существует и четвертая область (IV) взрывчатых концентраций в системе «метан - угольная пыль-воздух», которая характеризуется тем, что в этой области концентраций метана и угольной пыли концентрация метана удовлетворяет требованиям пылегазового режима ($C_{CH_4} \leq 1\%$), а концентрация пыли в ней может быть даже ниже ее нижнего концентрационного предела взрываемости в воздухе. Этот факт говорит о том, что в атмосфере выработок технологических участков угольных шахт может образовываться взрывоопасная пылегазовая среда в виде аэрозоля, которая, тем не менее, имеет приемлемые по принятым требованиям пылегазового режима параметры безопасности как для газовой защиты, так и по взрывчатости витающей 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 в воздухе расширяет пределы взрываемости в системе «горючие газы-угольная пыль-воздух» по сравнению с метано-воздушной смесью.

В работе [6] проведен анализ результатов лабораторных исследований взрывчатых свойств воздушно-ацетилено-угольных аэрозолей, который позволяет достаточно точно ответить на вопрос о влиянии ацетилена на взрывчатые свойства системы «горючие газы-угольная пыль-воздух». В соответствии с этими данными от источника, выделяющего при взрыве энергию 2кДж, воспламенялась смесь воздуха, ацетилена (концентрация $C_{ac} = 0 \dots 2\%$ 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 $C_{уг} = 0...125 \text{ г/м}^3$). В опытах регистрировали скорость нарастания давления dP/dt в автоклаве, заполненном воспламеняемой смесью. Результаты опытов представлены в табл.1.

Согласно данным табл. 1 установили, что имеется определенная критическая скорость нарастания давления в автоклаве, при которой пылеацетиленовоздушная смесь взрывается от импульса, создаваемого источником с теплотой взрыва 2 кДж. Критическая скорость нарастания давления в автоклаве равна $(dP/dt)_{кр}=14 \text{ бар/с}$. При меньшей скорости развития очага воспламенения оно затухает и взрыва не происходит. Статистическая обработка результатов экспериментов позволила установить эмпирическую зависимость скорости нарастания давления в автоклаве при воспламенении ацетиленугольновооздушной смеси от концентрации в ней ацетилена и угольной пыли:

$$dP/dt = \frac{0,82745 + 1,015X}{1 - 0,6097X + 0,093745X^2}, \text{ бар/с, } /r/=0,997, \quad (4)$$

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

График этой зависимости представлен на рис.2.

Подставим в уравнение (4) критическое значение скорости нарастания давления в автоклаве $(dP/dt)_{кр}=14 \text{ бар/с}$ и решим его относительно X. В результате получим уравнение, показывающее как изменяется взрывчатость пылегазовой системы «ацетилен-угольная пыль-воздух» от концентрации в ней ацетилена:

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

Таблица 1 - Оценка взрывчатых свойств пылеацетиленовоздушных смесей (детонатор с энергией взрыва 2кДж)

№ п/п	Концентрация пыли, г/м ³	Концентрация C ₂ H ₂ , % об.	Рез-т	dP/dt, bar/s	t ₁ , с
1	125	-	воспл.	60	160
	30	-	н/в	12	165
	20	-	то же	9	80
	10	-	->-	7	76
	5	-	->-	7	71
2	50	0,5	воспл.	17	334
	30	0,5	н/в	10	137
	10	0,5	то же	10	79
	0	0,5	->-	7	63
3	50	1	воспл.	36	190
	30	1	н/в	10	580
	10	1	то же	12	108
4	30	1,5	воспл.	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

По аналогии с исследованиями взрывоопасности метанопылевоздушных смесей (уравнение (1)) проделаем те же действия для ацетиленугольновооздушных смесей (уравнение (5)). Нижний предел взрываемости для чешского угля составляет $C_{уг} = 71 \text{ г/м}^3$,

так как выход у него летучих гораздо меньше, чем для угля пласта l_1 ПАТ «Шахта им. А.Ф.Засядько». Аналитические исследования уравнения (5) позволили установить зависи-

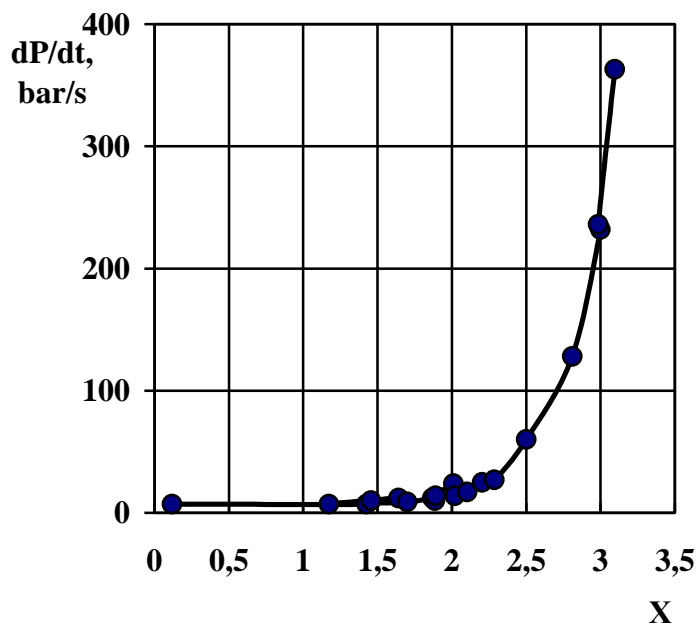


Рис.2. График зависимости скорости нарастания давления в автоклаве при воспламенении ацетилено-угольновоздушной смеси от концентрации в ней ацетилена и угольной пыли.

мость взрывчатости пылегазовой системы от содержания в ней ацетилена и угольной пыли:

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

График этой зависимости представлен на рис.3, $r=0,9925$.

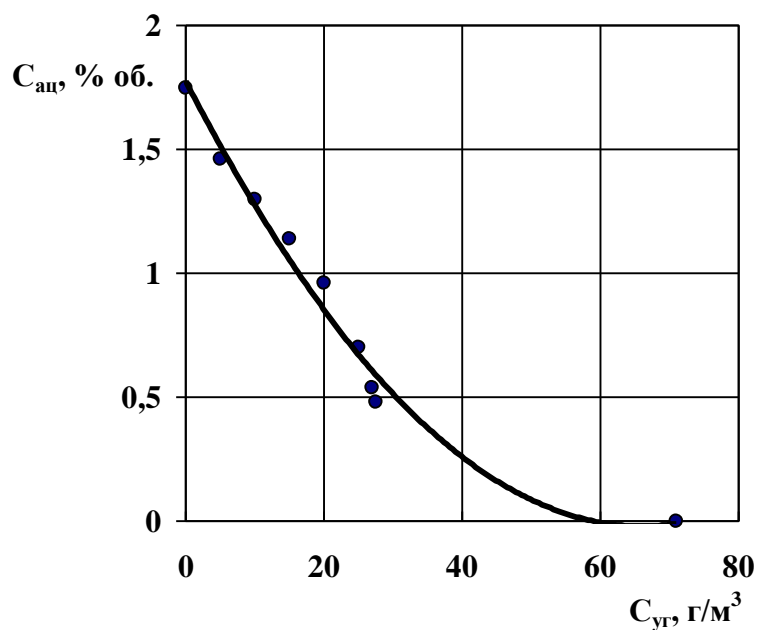


Рис.3. График зависимости взрывчатости пылегазовой системы от содержания в ней ацетилена и угольной пыли.

Критические условия, определяющие взрывчатость системы «ацетилен-угольная пыль-воздух» характеризуются концентрациями в ней ацетилена и угольной пыли:

$$0,0009643C_{yz}^2 - 0,001207C_{yz} + 0,02633C_{yz} / C_{ac} - \frac{1,7005}{C_{ac}} + 1 = 0. \quad (7)$$

Проведем анализ критических условий (3) и (7), отвечающих за взрывчатость, соответственно, метанопылевоздушной и ацетиленопылевоздушной смесей. Коэффициенты 5,004 и 1,7005 соответствуют нижним концентрационным пределам взрывчатости чистых, соответственно, метановоздушной и ацетиленовоздушной смесей. По мере нарастания концентрации угольной пыли в горючих пылегазовых аэрозолях наблюдается резкое снижение нижних концентрационных пределов взрываемости как горючего газа, так и угольной пыли. Например, для метанового пылегазового аэрозоля с углем марки Ж пласта I₁ ПАТ «Шахта им. А.Ф.Засядько» для метана $C_{нkn}=0,9\%$ об., для угольной пыли $C_{yz}=9,29$ г/м³, что менее их нижних концентрационных пределов взрываемости в воздухе, соответственно, в 5,55 и 1,6 раза. Аналогичная картина для ацетиленопылевоздушного аэрозоля: если $C_{ac}=0,05$ % об., то для пыли $C_{yz}=56,9$ г/м³, что менее их нижних концентрационных пределов взрываемости в воздухе соответственно, в 34,01 и 1,25 раза.

Следовательно, наблюдается выраженный синергетический эффект снижения нижних концентрационных пределов взрываемости горючего газа и угольной пыли в пылегазовых аэрозолях. Это приводит к повышению их взрывоопасности и 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. В связи с этим степень опасности взрыва в горной выработке нельзя рассматривают как сопоставление допустимого количества отложившейся угольной пыли, отнесенное к единице объема выработки при которой невозможно распространение взрыва по запыленному участку с фактической величиной пылеотложения за анализируемый период. В соответствии с действующими правилами безопасности в угольных шахтах пылевзрывозащита угольных шахт включает в себя комплекс мер, которые не учитывают взрывоопасность витающей в воздухе угольной пыли при наличии в нем метана, водорода и ацетилена. Эти газы, образующиеся при работе горновыемочных комбайнов, создают стойкие аэрозоли из их смеси с тонкодисперсной угольной пылью и соответственно представляют собой среду способную воспламениться под действием соответствующего источника. Фактическая опасность взрыва в горной выработке при образовании в ней аэрозолей «метан - угольная пыль - воздух» весьма большая и это можно показать на примерах.

Рассмотрим возможность образования аэрозолей «метан - угольная пыль - воздух» в очистных забоях горных выработок при работе очистных комбайнов механизированных комплексов. При нагрузках на лаву более 1000...1500 т/сут. интенсивность отбойки угля очистным комбайном составляет 2,5 т/мин. Принимаем во внимание, что при разрушении угольного пласта рабочим органом комбайна примерно 0,5% от общей массы разрушенного угля превращается в пыль. Следовательно, получается, что удельное пылевыделение мелких фракций пыли (C_y) в зоне рабочего органа может составлять примерно 12,5 кг/т. мин. На выбросоопасных пластах, склонных к выбросам угля и газа, запыленность воздуха в забоях лав и в подготовительных выработках может быть еще более высокой за счет микро выбросов угля и газа.

Эти значения пылевыделения при работе комбайна в очистном забое можно перевести в концентрацию пыли, образующуюся в зоне работы комбайна. Для угольного пласта мощностью 1,5 м, поперечное сечение лавы составляет около 4 м², а скорость воздуха, обтекающего работающий комбайн согласно правил безопасности не может быть более 4 м/с. Тогда в зоне работы комбайна каждую секунду образуется концентрация угольной пыли равная:

$$C_n = \frac{C_y}{60 \cdot 4 \cdot 4} = \frac{C_y}{960} = 13,0, \text{ г/м}^3.$$

Таким образом, расчет дает концентрацию угольной пыли в зоне работы комбайна менее ее нижнего концентрационного предела взрываемости – $C_{н.к.п}$ в воздухе. При разрушении угля рабочим органом комбайна наряду с образованием мелкой пыли идет генерация метана из разрушаемых макромолекул угольного вещества. Выделение метана из разрушенного угля составляет примерно $3...4 \text{ м}^3/\text{т}$, а его ежесекундное среднее выделение составит $3,5 \cdot 2,5/60 = 0,146 \text{ м}^3/\text{с}$. Одновременно в лаву подается воздух, который поступает к рабочему органу комбайна в количестве не менее $4 \cdot 4 = 16 \text{ м}^3/\text{с}$. Тогда концентрация метана при разрушении угольного пласта в зоне работы комбайна составит:

$$C_{CH_4} = \frac{0,146}{16} = 0,92 \%$$

В зоне разрушения угля комбайном получается концентрация метана допустимая правилами безопасности, то есть менее 1,0 %. При наличии в воздухе угольной пыли с концентрацией $13 \text{ г}/\text{м}^3$ и метана с концентрацией 0,92%, образуется метано-пылевоздушный аэрозоль, который имеет параметры концентраций для каждого в отдельности компонента смеси, относящиеся к невзрывчатым. Однако при их совместном действии получается противоположный результат, так если нанести эти концентрации на график, представленный на рис. 1, то можно увидеть, что они попадают в область IV, которая является взрывоопасной и при наличии источника воспламенения данный метанугольный аэрозоль может взрываться.

Таким образом, экспериментально установлена эволюция, казалось бы, невзрывчатой системы «горючий газ-угольная пыль-воздух» во взрывоопасную. Происходит это за счет нарушения линейного аддитивного взаимодействия горючих компонентов в системе с кислородом воздуха. В результате чего происходит переход к нелинейным взаимодействиям, связанным с бифуркационными механизмами развития сложных цепных реакций окисления газовых молекул и радикалов угольных молекул на поверхности твердых частиц угольной пыли. Это неизвестное ранее явление полностью объясняет возможность катастрофических взрывов в угольных шахтах и позволяет сформулировать новую систему научных взглядов (парадигму) обеспечения взрывозащиты в горных выработках. В основу этой парадигмы могут быть положены следующие рекомендации по обеспечению взрывозащиты в угольных шахтах:

1. Необходим непрерывный мониторинг газового состава атмосферы в горных выработках на наличие в ней метана, водорода, ацетилена, оксида углерода, кислорода и витающей в воздухе угольной пыли.
2. При работе очистных и проходческих комбайнов необходимо осуществлять комплексный мониторинг газового состава атмосферы на наличие в ней метана, других горючих газов, кислорода и витающей угольной пыли непосредственно у рабочего органа комбайна.
3. Разработать технические средства, которые позволяют оперативно оценивать интегральную взрывоопасную концентрацию пылегазовых аэрозолей с учетом всех горючих компонентов, образующих аэрозоль.
4. Горная техника для угольных шахт, должна быть оснащена непрерывно действующими генераторами, создающими в призабойных пространствах локальные объемы инертной газовой среды, способной ингибировать окислительные реакции во взрывоопасных пылегазовых аэрозолях. Их работа должна быть неотделима от технологического цикла и увязана с техническими средствами автоматики контроля и мониторинга шахтной атмосферы в зонах работы очистных и проходческих комбайнов.

Выводы. Проведены исследования, которые позволили установить взрывчатость метано-пылеугольного аэрозоля в зависимости от его состава и концентрационных пределов взрываемости метана, ацетилена и угольной пыли. Установлено ранее неизвестное явление

снижения нижних концентрационных пределов взрываемости метана, ацетилена и угольной пыли в их аэрозолях, образующихся в горных выработках при работе очистных и проходческих комбайнов. Этим можно объяснить взрывы, которые произошли в угольных шахтах при наличии системы газовой защиты и выполнения требований пылегазового режима. Для успешной борьбы со взрывами метано - пылевоздушных аэрозолей необходимо уточнить требования пылегазового режима для угольных шахт. Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение механизма воспламенения и ингибирования реакций горючих компонентов при взрыве пылегазовых аэрозолей.

Список литературы

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. 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.
4. Медведев В.Н. Повышение достоверности информации при многокомпонентном контроле шахтной атмосферы/ В.Н. Медведев, Е.В. Беляева, А.Л. Складаров, 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.
5. Петрухин М.П. Борьба с угольной пылью в шахтах/ М.П. Петрухин, Г.С. Гродель, Н.И. Шеляев. – М.: Недра, 1981. – 271 с.
6. 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.

Калякін С.А., Булгаков Ю.Ф., Костенко В.К., Kalyakin S., Bulgakov Y., Kostenko V., Zavyalova H.
Зав'ялова О.Л.

ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНІСТЬ ПИЛОГАЗОВИХ АЕРОЗОЛІВ У ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ

В роботі дана оцінка вибухонебезпечності пилогазових аерозолів, що містять вугільний пил, горючі гази (метан, ацетилен). Встановлено синергетичний ефект зниження нижніх концентраційних меж вибуховості горючого газу та вугільного пилу в системі «горючі гази-вугільний пил-повітря», вміст горючих у яких менше їх нижньої межі займання в повітрі. Розроблені рекомендації щодо забезпечення вибухобезпеки гірничого виробництва та сформульовано нову синергетичну парадигму забезпечення вибухозахисту вугільних шахт.

Ключові слова: вибух, займання, горючі гази, ацетилен, вугільний пил, метан, концентраційні межі вибуховості, вибухонебезпечність, вибухозахист.

EXPLOSION-HAZARD AEROSOL DUST PARTICLE IN A COAL MINE

In the estimation of explosive dust and gas aerosols containing coal dust, combustible gases (methane, acetylene). Set synergistic effect of reducing the concentration of the lower explosion limits of flammable gas and coal dust in the "combustible gases, coal dust-air", the content of which is less flammable in their lower flammable limit in air. Recommendations to ensure the explosion of mining and formulated a new synergetic paradigm of explosion protection of coal mines.

Keywords: explosion, ignition, fuel gas, acetylene, carbon dust, methane concentration limits explosion, explosion, explosion.

