

УДК 622.813+622.817

В.К. Костенко, С.А. Калякін, О.Л. Зав'ялова

ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНІСТЬ ПИЛОГАЗОВИХ АЕРОЗОЛІВ У ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ

В роботі дана оцінка вибухонебезпечності пилогазових композицій, 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. Обґрунтовано 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.

V. Kostenko, Dr. of Sc. (Eng.), Prof., S. Kaliakin, O. Zavalova

EXPLOSION HAZARD OF DUST AND GAS AEROSOLS IN COAL MINES

The paper contains an estimation of the explosion hazard of some dust and gas compositions containing coal dust and combustible gases (methane and acetylene). A synergetic effect of reducing the lower concentration limits of combustible gas and coal dust explosiveness in the "combustible gases, coal dust-air" system in which combustible content less than their lower ignition limit in the air. Guidelines for explosion safety at mining production were substantiated and a new synergistic paradigm of explosion protection of coal mines was formulated.

Keywords: explosion, ignition, combustible gases, acetylene, coal dust, methane, explosiveness concentration limits, explosion hazard, and explosion protection.

Дотримання вимог вибухобезпеки у вугільних шахтах, небезпечних по газу і пилу, - невід'ємна частина системи охорони і безпеки праці на вугледобувних підприємствах. Для цього необхідно достовірно знати параметри пилогазових аерозольних сумішей, що утворюються в технологічних процесах гірничого виробництва та управляти вибухобезпекою атмосфери гірничих виробок. Недостовірні оцінки параметрів вибухобезпеки призводять до займання вибухонебезпечного середовища та вибухів на вугільних шахтах.

Тільки за останні п'ять років (2006 - 2010 роки) виник 21 вибух газу та вугільного пилу, що склало 8% від усіх видів аварій, що сталися на вугільних шахтах України. Вибухи сумішей горючих шахтних газів і аерозолів на вугільних шахтах призводять до травматизму гірників, часто смертельного, значних руйнувань підземних і поверхневих споруд, супроводжуються значними прямими і непрямими економічними збитками.

Результати аналізу останніх досліджень і публікацій показали, що створення ефективної системи вибухозахисту вугільних шахт, небезпечних по газу та вугільного пилу, базується на дотриманні певних вимог по концентраційним межах для горючих газів, вугільного пилу в повітрі і відкладенням пилу в гірничих виробках [1]. Для цього необхідно виконання наступних заходів по запобіганню вибухів у вугільних шахтах [2]:

- попередження утворення і скупчення вибухонебезпечних пилогазових сумішей в гірничих виробках за допомогою вентиляції;

- запобігання займання можливих пилогазових сумішей шляхом створення запобіжного середовища і застосування спеціальних заслонів, які локалізують вибух;

- видалення пилових відкладень, а також осланцювання, зрошення стінок і підшви гірничих виробок.

Ситуація в глибоких шахтах ускладнена виділенням в гірничі виробки значних кількостей горючих газів, а саме: метану, водню, ацетилену, оксиду вуглецю і деяких інших вуглеводнів [3]. Ці гази за деякими оцінками можуть істотно впливати на параметри ініціювання та розвитку вибухів в горючих пилогазових середовищах. Метан є найбільш поширеним з них, ацетилен - найбільш хімічно активний газ через наявність в молекулі дуже слабкого потрійного вуглецевого зв'язку. У порожнинах гірничих виробок утворюються пилогазові композиції - штучно створена неоднорідна суцільна середа, що складається з двох або більше твердих і газових компонентів з чіткою межею розділу між ними.

Всі противибухові заходи при вибухозахисту ефективні тільки в тому випадку, якщо може бути отримана правильна оцінка вибухонебезпечних властивостей атмосфери гірничих виробок на основі її контролю і аналізу складу горючих газів, розмірів і концентрації частинок вугільного пилу, що утворюються в гірничих виробках вугільних шахт.

Метою роботи є обґрунтування рекомендацій щодо забезпечення вибухозахисту технологічних процесів у вугільних шахтах на основі дослідження закономірностей займання та вибуху пилогазових композицій, що утворюються при роботі видобувних, прохідницьких комбайнів і транспортних машин та механізмів в гірничих виробках, особливо в привибійних просторах.

Генерація та міграція горючих газів з вугілля і запиленість повітря в гірничих виробках вугільних шахт визначається як гірничо-геологічними, так і технологічними факторами гірничого виробництва. Особливу роль газопилові композиції, що утворюються в гірничому виробництві, грають в питанні вибухобезпеки вугільних шахт. Вибухонебезпечність атмосфери гірничих виробок залежить від концентраційних меж вибуховості газів і пилових аерозолів і вмісту кисню в системі «вугільний пил - повітря - горючі гази». За встановленими правилами у вугільних шахтах для найбільш небезпечних умов підготовчих і очисних ділянок допустима концентрація метану становить не більше 1% [4,5]. Саме при такій концентрації виробляє відключення електроенергії на технологічній ділянці шахти система автоматичного газового захисту. Однак, при цьому не враховується факт наявності в гірничій виробці інших горючих газів і зваженого в повітрі вугільного пилу, горючість та каталітичні властивості якого знижують нижню концентраційну межу вибуховості метану та інших горючих газів.

Одночасна присутність метану та інших горючих газів знижують нижню концентраційну межу вибуховості вугільного пилу. Цей вплив досить повно вивчено в МакНДІ, в результаті чого отримана емпірична залежність [6]:

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

де $C_{ен}^{CH_4}$ - нижня концентраційна межа вибуховості вугільного пилу в присутності метану, г/м^3 ;

C_{CH_4} - концентрація метану в пилогазовій суміші, % об.;

V^2 - вихід летких і газів з вугілля, %;

A_c - зольність вугілля, %.

Для дрібнодисперсного пилу вугільного пласта l_1 ПАТ «Шахта ім. О.Ф.Засядька» (марка вугілля - Ж, вихід летких = 34%, зольність = 7,0%) по рівнянню (1) отримано значення нижньої концентраційної межі вибуховості композиції «метан - вугільний пил - повітря». Потім визначена залежність нижньої концентраційної межі вибуховості метану від нижньої межі вибуховості вугільного пилу. Результати розрахунків наведено на рисунку 1 у вигляді графіка, який описується емпіричною залежністю:

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

де $C_{\text{вуг}}$ - концентрація вугільного пилу, г/м³.

Аналіз отриманих результатів показує, що умовно можна окреслити три характерні області вибуховості метанопилоповітряних сумішей.

Перша - область (I), в якій концентрація метану більше його нижньої концентраційної межі вибуховості. У цій області провідну роль у займанні вибухонебезпечної суміші відіграє метан. Друга область (II) характеризує вибуховість метанопилоповітряних сумішей, причому їх вибуховість визначається вже співвідношенням концентрацій метану і вугільного пилу. Критичне значення цього співвідношення можна отримати з рівняння (2):

$$0,02284 C_{\text{вуг}}^2 - 0,06285 C_{\text{вуг}} + 0,3068 C_{\text{вуг}} / C_{\text{CH}_4} - 5,004 / C_{\text{CH}_4} + 1 = 0. \quad (3)$$

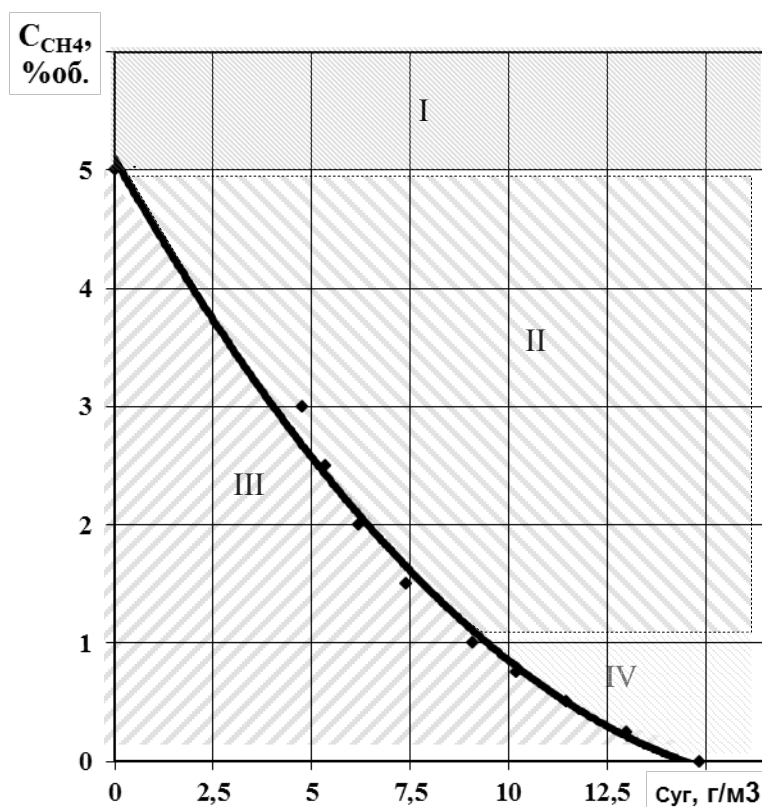


Рисунок 1 – Нижня концентраційна межа вибуховості метану в композиції «метан-вугільний пил-повітря» (суцільна лінія) при зміні вмісту в ній вугільного пилу ($C_{\text{вуг}}$)

Використовуючи критичне ставлення (3) можна встановити при яких концентраціях метану і вугільного пилу композиція «метан-вугільний пил-повітря» стає вибуховою.

Третя область (III) відповідає співвідношенням метану і вугільного пилу, при яких дана композиція не є вибуховою. Однак існує і четверта область (IV) вибухових концентрацій в системі «метан-вугільний пил-повітря», в якій концентрація метану задовольняє вимогам «Правил безпеки ...» ($\leq 1\%$ об.), а концентрація пилу - нижче її межі вибуховості в повітрі. Цей факт говорить про те, що в атмосфері технологічних ділянок вугільних шахт може утворитися вибухонебезпечна пилогазова середа, яка, тим не менш, має прийнятні за прийнятими умовами безпеки параметри як для газового захисту, так і по вибуховості вугільного пилу.

У питанні вибухобезпеки вугільних шахт такий стан справ неприйнятно, тим більше що на великих глибинах розробки викиднебезпечних вугільних пластів в пробах газового

аналізу шахтного повітря встановлено зміст ацетилену до 2% об. і водню до 8% об. Наявність цих газів розширює межі вибуховості в системі «горючі гази-вугільний пил-повітря» у порівнянні з метаноповітряною сумішшю.

З спільних досліджень фахівців ДонНТУ (Донецьк, Україна) і ВВУУ (Радваніце, Чеська республіка) [7] відомі результати лабораторних досліджень вибухових властивостей повітряно-ацетилено-вугільних аерозолів, які дозволяють досить точно відповісти на питання про вплив ацетилену на вибухові властивості композиції «горючі гази-вугільний пил-повітря». Дані дослідження проведені із застосуванням джерела ініціювання, що виділяє при вибуху енергію 2кДж, та воспламеняє суміш повітря, ацетилену (концентрація $C_{ac} = 0 \dots 2\%$ об.), вугільного пилу пласта шахти «Дарков» (Чеська республіка) з вологістю 0,63 %, зольністю 4,96 % і виходом летких 21,86 % (розмір часток 0,004 ... 0,25 мм, концентрація $C_{вуг} = 0 \dots 125 \text{ г/м}^3$). У дослідях реєстрували швидкість наростання тиску dP / dt в автоклаві, заповненому займистою сумішшю. Результати дослідів представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Оцінка вибухових властивостей пилоацетиленоповітряних сумішей [7]
(детонатор 2кДж)

Концентрація пилу, г/м^3	Концентрація C_2H_2 , % об.	Наявність вибуху	dP/dt , бар/с	t_1 , с
125	-	да	60	160
30	-	немає	12	165
20	-	то ж	9	80
10	-	->-	7	76
5	-	->-	7	71
50	0,5	да	17	334
30	0,5	немає	10	137
10	0,5	то ж	10	79
0	0,5	->-	7	63
50	1	да	36	190
30	1	немає	10	580
10	1	то ж	12	108
30	1,5	да	27	227
10	1,5	то ж	14	372
5	1,5	->-	14	380
30	2,5	->-	363	57
10	2,5	->-	236	72
5	2,5	->-	232	66
0	2,5	->-	128	85

Виходячи з експериментальних даних встановили, що вибух пилоацетиленоповітряної суміші від імпульсу 2 кДж характеризує певна (критична) швидкість наростання тиску в автоклаві $(dP / dt)_{кр} = 14$ бар/с. При меншій швидкості наростання тиску займання загасає, і вибухів не спостерігали. Статистична обробка результатів експериментів дозволила встановити емпіричну залежність швидкості наростання тиску в автоклаві при займанні вибухонебезпечної суміші від концентрації в ній ацетилену і вугільного пилу (рисунок 2):

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

де $X = \ln[1 + \sqrt{C_{вуг} + C_{ac}^3}]$.

Рішення рівняння (4), щодо X при $(dP / dt)_{кр} = 14 \text{ бар / с}$, дає рівняння, яке показує, як змінюється вибуховість композиції «ацетилен - вугільний пил-повітря» від вмісту в ній ацетилену:

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

За аналогією з дослідженнями метанопилоповітряних сумішей (рівняння 1) проробимо ті ж дії для аналізу ацетиленвугілляповітряних сумішей (рівняння 5).

Нижня межа вибуховості для чеського вугілля становить $C_{вуг} = 71 \text{ г/м}^3$, так як вихід летких для нього значно менше, ніж для вугілля пласта l_1 ПАТ «Шахта ім. О.Ф.Засядька».

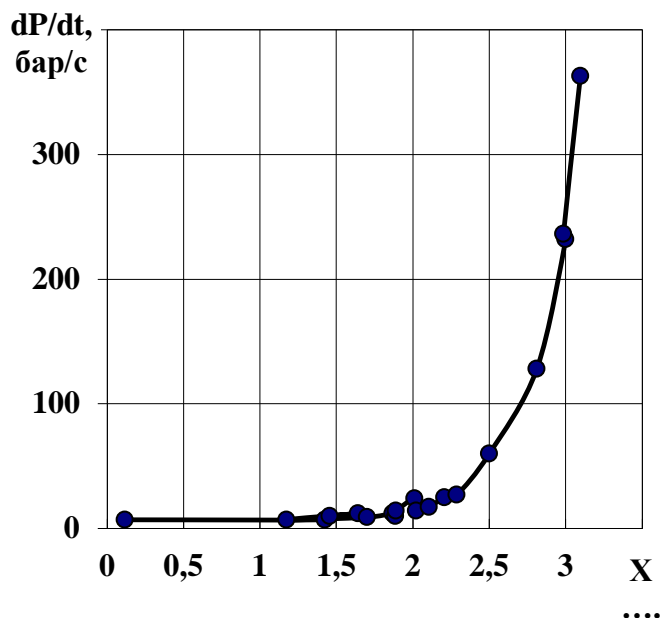


Рисунок 2 – Залежність швидкості наростання тиску (dP/dt) в автоклаві при займанні ацетиленвугілляповітряної композиції від параметра (X)

Аналітичні дослідження рівняння (5) дозволили встановити залежність вибуховості пилогазової композиції від вмісту в ній ацетилену і вугільного пилу (рисунок 3):

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

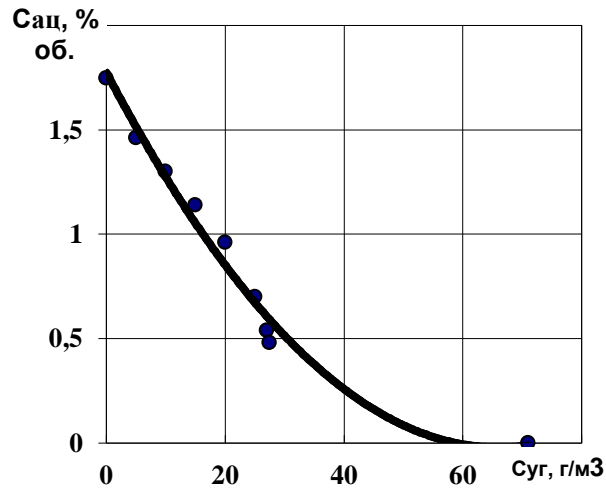


Рисунок 3 – Залежність нижньої межі вибуховості ацетилену в пилогазовій композиції (суцільна лінія) від вмісту в ній вугільного пилу ($C_{\text{суг}}$)

Критичні умови, що визначають вибуховість композиції «ацетилен-вугільний пил-повітря» залежать від концентрації в ній ацетилену і вугільного пилу:

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

Аналіз критичних умов (3) і (7), що характеризують вибуховість, відповідно, метанопилоповітряних і ацетиленпилоповітряних композицій, показав, що коефіцієнти 5,004 і 1,7005 відповідають нижнім концентраційним межам (НКМ) вибуховості сумішей з повітрям, відповідно, метану та ацетилену. У міру наростання концентрації вугільного пилу в горючих композиціях спостерігається різке зниження нижніх концентраційних меж вибуховості як горючого газу, так і вугільного пилу. Наприклад, для метанопилоповітряних композицій, які містять вугілля марки Ж пласта I₁ шахти ім. О.Ф.Засядька, для метану НКМ_{СН₄} дорівнює 0,9% об., для вугільного пилу НКМ_{вуг} - 9,29 г/м³, що менше ніж для їх метаноповітряної і пилоповітряних сумішей, відповідно, в 5,55 і 1,6 рази. Аналогічна картина для ацетиленпилоповітряного аерозолу: якщо у ацетилену НКМ_{сац} становила 0,05% об., то у вугільного пилу НКМ_{вуг} дорівнює 56,9 г/м³, що менше їх нижніх концентраційних меж вибуховості в повітрі відповідно, в 34,01 і 1,25 рази.

Таким чином, виявлений синергетичний ефект зниження нижніх концентраційних меж вибуховості горючих газів і вугільного пилу в пилогазових композиціях, що призводить до збільшення ймовірності займання та їх вибуху, незважаючи на те, що в системі «горючий газ-вугільний пил-повітря» зміст кожного з горючих компонентів значно менше їх нижніх концентраційних меж вибуховості в повітрі. Таким чином, експериментально встановлена раніше невідома еволюція, здавалося б, невибухових системи «горючий газ - вугільний пил - повітря» у вибухонебезпечну. Гіпотетично це відбувається за рахунок порушення лінійного адитивної взаємодії горючих компонентів в системі та переходу до нелінійних взаємодій, пов'язаних з біфуркаційними механізмами розвитку ланцюгових реакцій окислення газових молекул і радикалів вугільних молекул на поверхні частинок вугільного пилу. Це невідоме раніше явище, відкриття якого дозволяє пояснити можливість катастрофічних вибухів у вугільних шахтах і сформулювати нову систему наукових поглядів (парадигму) забезпечення

вибухозахисту в гірничих виробках. В основу цієї парадигми можуть бути покладені наступні рекомендації щодо забезпечення вибухозахисту у вугільних шахтах:

1. Необхідно здійснювати оперативний моніторинг комплексного газового складу атмосфери в гірничих виробках на наявність в ній метану, водню, ацетилену, оксиду вуглецю, кисню і вугільного пилу, що витає.

2. Застосовувати технічні засоби, які дозволяють оцінювати інтегральну вибухонебезпечну концентрацію з урахуванням горючих компонентів у пилогазових композиціях, що утворюються в гірничих виробках.

3. Гірська техніка для вугільних шахт, повинна бути оснащена безперервно діючими генераторами для створення в привибійних просторах локальних обсягів газового середовища, здатного інгібувати окислювальні реакції у вибухонебезпечному середовищі. Їх робота повинна бути невіддільна від технологічного циклу і ув'язана з технічними засобами автоматики, контролю і моніторингу шахтної атмосфери.

4. Розробити технологію гірничого виробництва в довго діючому запобіжному середовищі та її склад, що запобігає заpalення і вибухи горючих пилогазових композицій в забоях гірничих виробок.

Висновки. В результаті аналізу експериментальних даних встановлено раніше невідоме явище зниження нижніх концентраційних меж вибуховості композицій горючих газів і вугільного пилу. Цим можна пояснити вибухи, які сталися в, здавалося б, вибухобезпечні середовища. Обґрунтовано рекомендації щодо забезпечення вибухобезпеки гірничого виробництва та сформульовано нову синергетичну парадигму забезпечення вибухозахисту вугільних шахт. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на вивчення особливостей і параметрів механізму займання та вибуху горючих пилогазових композицій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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.

