

УДК 622.411:658.011.56

О.В. Вовна (канд. техн. наук, доц.), А.А. Зорі (д-р техн. наук, проф.), Р.І. Соломічев (асп.)
Донецький національний технічний університет, м. Донецьк
кафедра електронної техніки
E-mail: romasolomichev@mail.ru

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ КОНЦЕНТРАЦІЇ КОМПОНЕНТ ПИЛОГАЗОВОЇ СУМІШІ НА ПОРІГ ВИБУХОВОСТІ В УМОВАХ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

Розглянуто та проаналізовано вплив вугільного пилу та метану на загальний поріг вибуховості пило-газової суміші, встановлені граничні значення концентрацій компонентів пило-газової суміші в атмосфері вугільних шахт. Складено структурну схему комп'ютеризованої системи вимірювання концентрації пило-газових сумішей в шахті.

Ключові слова: вугільний пил, метан, концентрація, дисперсність, вибуховість, канал вимірювання.

Загальна постановка проблеми. За останні роки в наслідок інтенсифікації технологічного процесу видобутку вугілля, а також підчас очисних та підготовчих робіт в гірничих виробках все більш глибоких горизонтів спостерігається різке зростання пилоутворення і газоносності шахт, що сприяє підвищенню небезпеки вибухів. Для забезпечення безпеки умов праці робітників на вугільних шахтах необхідно ефективно робити вимірювання концентрації вугільного пилу, тому що пил, знаходячись у зваженому стані, у суміші з метаном, утворює вибухову систему. Вибух зваженого в повітрі вугільного пилу може відбутися від електричної іскри, від розпечених часток вибухових речовин, що вилітають зі шпuru та від інших джерел займання.

Постановка задач дослідження

Для створення ефективної комп'ютеризованої системи оперативного контролю та вимірювання концентрації складових пило-газової суміші атмосфери вугільних шахт необхідно вирішити наступні задачі:

- дослідити та проаналізувати вплив дестабілізуючих чинників рудничної атмосфери на результати вимірювань концентрації пилу;
- врахувати вплив метану на загальний поріг вибуховості пило-газової суміші;
- дослідити динаміку розповсюдження та розподілення концентрації пилу по довжині виробки.

Рішення задач і результати досліджень. Вибуховість вугільного пилу визначається фізико-хімічними властивостями шахтного пласта, що розробляється і гірничими технічними умовами, при яких можливо протікання вибуху. До фізико-хімічних властивостей відносяться: стадія метаморфізму вугілля, яку кількісно можна виразити виходом летючих речовин, вміст золи і вологи у вугіллі, дисперсність вугільного пилу, що витає та відклався.

До гірничих технічних умов відносяться: концентрація зваженого вугільного пилу та що відклався в гірничій виробці, джерело запалювання, вміст метану в атмосфері вугільної шахти. Вплив цих чинників на ступінь вибуховості вугільного пилу різний, проте відомо, що із зростанням летючих речовин вибуховість пилу зростає. Існують також граничні значення виходу летючих, при яких пил перестає вибухати. Граничні межі вибуховості вугільного пилу в окремих шахтах України та інших країн приймаються різними, в залежності від вмісту інертних речовин у вугільно-пиловій суміші.

В Україні згідно діючим у вугільних і сланцевих шахтах Правилам безпеки до небезпечних за вибухом пилу відносяться пласти вугілля з виходом летючих речовин 15 % і більш, а також пласти вугілля (окрім антрацитів) з меншим виходом летючих, вибуховість пилу яких встановлена лабораторними випробуваннями. Це обґрунтовано систематичним аналізом даних випробувань вугільного пилу на вибуховість [1–3], результати якого показані на рисунку 1. З графіка випливає, що при $V_c^{daf} \leq 6\%$ всі випробувані проби вугільного пилу невибухові. При збільшенні виходу летючих речовин частота появи невибухових проб знижується, а при $V_c^{daf} = 15\%$ і більш всі проби пилу виявлялися вибуховими.

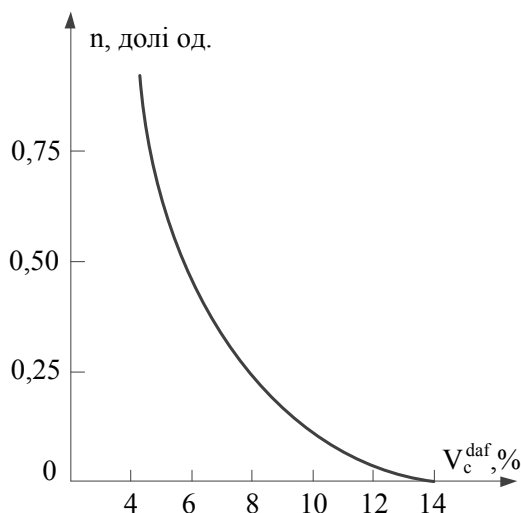


Рисунок 1 — Залежність частоти n появи невибухового вугільного пилу від виходу летючих речовин V_c^{daf}

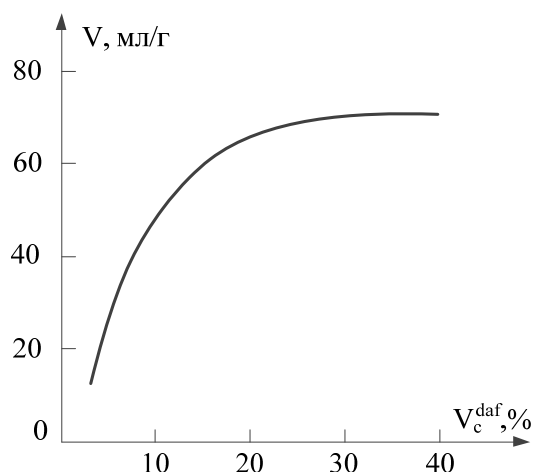


Рисунок 2 — Залежність вмісту метану в газоподібних продуктах піролізу вугілля V , мл/г, від виходу летючих речовин V_c^{daf}

Значні відхилення в граничних межах вибуховості вугільного пилу в Україні та закордоном пояснюються відмінністю методик визначення виходу летючих речовин і вибуховості пилу. Разом з тим слід зазначити, що вугільний пил шахтних пластів з виходом летючих речовин 6 % і менш згідно прийнятим як у нас, так і закордонним методикам випробувань є невибуховою. При зміні летучих більш 15 % вибуховість пилу швидко зростає. Найбільш небезпечним вважається вугільний пил з виходом летучих речовин від 27 до 35 %.

Враховуючи те, що процес вибуху вугільного пилу протікає швидко, за час підготовки до нього частки пилової хмари прогріваються до температури значно меншій, ніж температура джерела запалювання. Піроліз пилу відбувається в низькотемпературному режимі, а газоподібні продукти характеризуються високим змістом метану, його гомологів і неграничних вуглеводнів. Останнє дає можливість вважати, що основний компонент газоподібних продуктів піролізу, що визначає вибуховість вугільного пилу — метан. Це підтверджується і тим, що із збільшенням виходу летючих речовин вміст CH_4 в продуктах піролізу росте (див. рис. 2).

Збільшення вибухового тиску може продовжуватися теоретично до стехіометричної суміші. У дійсності найбільший тиск при вибуху виходить у суміші з концентрацією трохи вище стехіометричної, тому що її швидкість горіння вище швидкості горіння стехіометричної суміші (найбільш палаюча суміш містить близько 10,5% метану). Це порозумівається тим, що при цій концентрації метано-повітряної суміші вона має максимальну нормальну швидкість горіння. При збільшенні концентрації вище стехіометричної виходять вибухові концентрації, але сила вибуху їх буде поступово

зменшуватися в результаті недостачі повітря. Недостачі повітря в сумішах, ще більш багатих паливом, веде до того, що суміш утрачає здатність запалюватися.

Для CH_4 найвищою концентрацією, здатної запалюватися в суміші з повітрям, є 15% CH_4 . Вище цієї концентрації ніякі суміші CH_4 з повітрям запалюватися не можуть, хоча в них є присутня деяка кількість повітря. З ростом кількості метану в повітрі від 5 до 15 % сила вибуху спочатку зростає, досягаючи максимуму при концентрації трохи більшої 9,5 %, а потім при подальшому підвищенні змісту метану зменшується. При дуже великій мірі запиленості відстань між окремими пилинками дуже мала, і тому така пилова хмара не вибухонебезпечна. Збільшуючи відстань між пилинками, ми досягаємо такого моменту, коли займання і вибух можливі. Ця концентрація називається верхньою межею вибуховості пилоповітряної суміші [1].

Подальше збільшення відстані між частинками до тих пір, поки вибух стає неможливим, призводить до так званої нижньої межі вибуховості. Значення нижньої та верхньої меж вибуховості залежать від хімічних та фізичних властивостей пилу. Для найнебезпечнішою вугільного пилу нижня концентраційна межа вибуховості дорівнює 10 г/м^3 , а верхня — 2500 г/м^3 . Для сухого пилу жирного вугілля з частинками розміром близько 60 мкм концентраційна межа становить від 37 (нижня) до 1700 г/м^3 (верхня).

Залежність нижньої межі вибуховості пилу від виходу в ній летучих речовин з достатньою для практики точністю виражається емпіричним співвідношенням [3]:

$$\delta_{\text{відкл}} = 133,2 \cdot e^{-0,045 \cdot V_c^{\text{daf}}} + 3,5 \cdot e^{-0,032 \cdot V_c^{\text{daf}}} \cdot A_\phi^s, \text{ г/м}^3, \quad (1)$$

де $\delta_{\text{відкл}}$ — нижня концентраційна межа вибуховості вугільного пилу шахтного пласта, г/м^3 ; V_c^{daf} — вихід летучих речовин, %; A_ϕ^s — вміст негорючих речовин у пластовій пробі вугілля (зольність вугілля), %.

Характеристика $\delta_{\text{відкл}}(V_c^{\text{daf}})$ при фіксованих значеннях A_ϕ^s показана на рисунку 3, з якого випливає, що при збільшенні негорючих речовин у суміші з пилом, концентраційна межа вибуховості зменшується. Найбільш руйнівним є вибух пило-повітряної суміші, що містить 300 г пилу в 1 м^3 повітря.

Експериментом ВостНІІ встановлено, що концентрація пилу в призабійному просторі при роботі прохідницького комбайна сягає $20 \dots 25 \text{ г/м}^3$, очисного — $50 \dots 70 \text{ г/м}^3$. При наявності у виробці метану нижня концентраційна межа вибуховості вугільного пилу знижується і визначається за наступною емпіричною формулою:

$$\delta_{\text{ММВ}} = \delta_{\text{відкл}} \cdot e^{-0,69 \cdot C_{\text{CH}_4}}, \text{ г/м}^3, \quad (2)$$

де $\delta_{\text{відкл}}$ — нижня концентраційна межа вибуховості пиловугільної суміші, г/м^3 ; C_{CH_4} — концентрація метану в суміші, причому $C_{\text{CH}_4} \leq 2\%$.

На рисунку 4 показані залежності, які демонструють вплив наявності метану в атмосфері вугільної шахти на концентраційну межу вибуховості: навіть при незначній концентрації метану (1%) вибуховість пило-повітряної суміші збільшується вдвічі, при 2% — у чотири рази. Отже, при наявності у виробці метану вугільний пил може вибухнути при концентрації $4 \dots 5 \text{ г/м}^3$, тобто такої концентрації, яка може бути на робочому місці в процесі виконання прохідницького циклу. Тому, згідно з Правилами безпеки, концентрація метану на робочому місці не повинна перевищувати 2%, а вибухові роботи забороняється виконувати, згідно ЕПБ, при концентрації метану 1% і більше [3].

Таким чином, при фіксованому вмісті в потрійній суміші метану остання буде мати найбільшу займістість при певному вмісті в ній пилу. Називають цю потрійну суміш квазістехіометричною — найбільш вибухова потрійна суміш. Для рішення проблем безпеки

гірських підприємств також необхідно визначення розподілу концентрації пилу уздовж виробки та за його перетином в статиці й у динаміці.

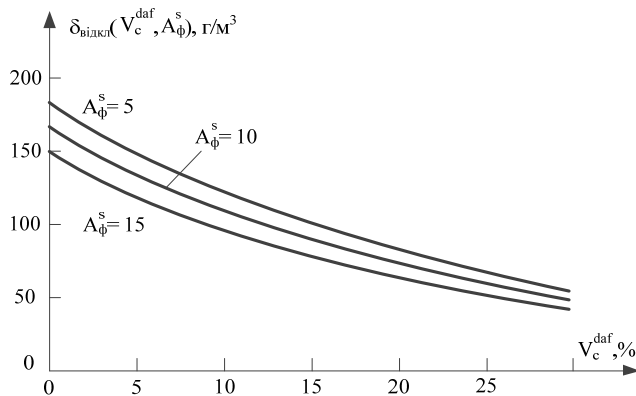


Рисунок 3 — Залежність концентраційної межі вибуховості вугільного пилу від виходу летючих речовин V_c^{daf}

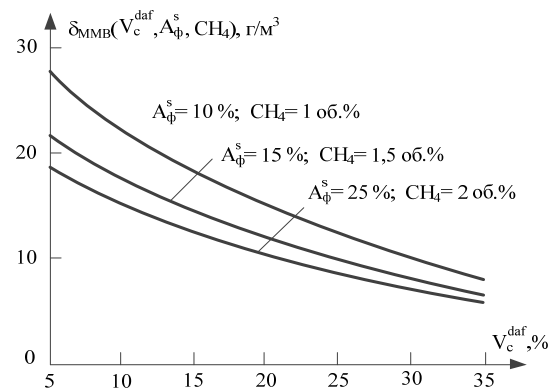


Рисунок 4 — Залежність концентраційної межі вибуховості вугільного пилу від виходу летючих речовин V_c^{daf} при наявності метану у виробці

Стационарні поля концентрації пилу є однією з форм ідеалізації реальних процесів. При швидкостях руху повітря, менших деякого критичного значення ($u < u_{кр}$) коли зрив потоком часток пилу, що осіли на стінках виробок і ґрунту ще не відбувається, рух часток визначає взаємодією сили ваги та поля концентрації пилу, яка турбулентно дифундує у потоці. Розподіл концентрації пилу по довжині виробки також може бути описано наступною моделлю [4]. При русі газозвісі по виробці, найбільш великі частки випадають з потоку; на одиниці її довжини осяде $\mathcal{G}_s dC = g\tau_1 dC$ часток пилу за 1 секунду (\mathcal{G}_s — швидкість витання). На шляху dx або за час dx/u з потоку випаде $g\tau_1 dC x/u$ часток. З балансу кількості часток в об'ємі виробки $V = (\pi d_E^2 / 4) \times l$ впливає [4]:

$$\frac{dC}{dx} = -\left(\frac{4g\tau_1}{\pi d_E u}\right)C, \quad C(x) = C_0 \exp\left(-\frac{4\rho g r^2}{9\pi\mu d_E u}x\right), \quad (3)$$

де x — відстань, що проходять частки пилу, m ; d_E — еквівалентний діаметр виробки, m ; u — середня швидкість потоку, m/s ; $C_0 = C(0)$ — концентрація часток радіуса r у початковому перетині ($x=0$) виробки, mg/m^3 ; ρ — щільність повітря, kg/m^3 ; μ — коефіцієнт динамічної в'язкості повітря при н.у., $kg/(m \cdot s)$.

Залежність концентрації вугільного пилу (3) від зміни відстані від місця утворення пилу при варіації швидкості потоку та розміру часток показана на рисунках 5 та 6 відповідно. З графіків видно, що дрібнодисперсний пил поширюється виробкою на більш дальній відстані, ніж крупніший за розміром.

Позначимо у залежності (3) через $b = \frac{4\rho g r^2}{9\pi\mu d_E u}$ — коефіцієнт зниження концентрації пилу

при віддаленні від первинного джерела пилу (початкового перетину виробки), m^{-1} . Враховуючи концентрацію пилу $\Theta(x)$, обумовлену присутністю вторинного розподіленого за всією довжиною виробки джерела пилу, який під дією повітряного потоку переходить з відкладеного до завислого стану, залежність (3) буде мати вид [4]:

$$C(x) = C_0 \exp(-b \cdot x) + \Theta(x). \quad (4)$$

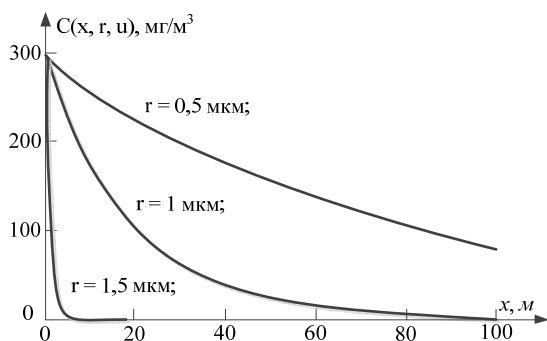


Рисунок 5 — Зміна концентрації вугільного пилу у виробці при швидкості потоку повітря $u=0,5$ м/с

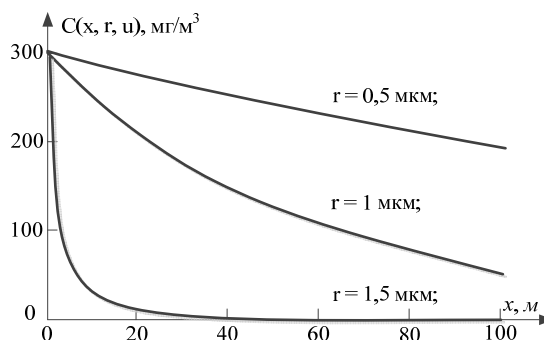


Рисунок 6 — Зміна концентрації вугільного пилу у виробці при швидкості потоку повітря $u=1,5$ м/с

Концентрація пилу $\Theta(x)$, що здимається, визначається при вирішенні диференційного рівняння масопереносу в умовах ступінчатого вхідного впливу як [5]:

$$\Theta(x) = \gamma(x) \frac{x}{u} \exp(-b \cdot x), \tag{5}$$

де $\gamma(x)$ — здіймання пилу з одиниці об'єму на досліджуваному перетині гірничої виробки, $\text{мг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$, визначається як [5]:

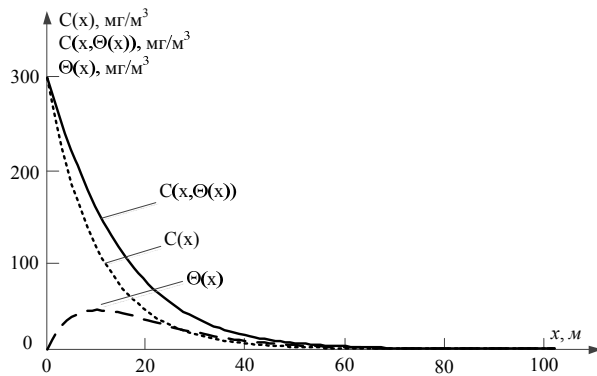
$$\gamma(x) = \begin{cases} 0 & , \text{ якщо } u < u_{кр} \\ \frac{P_B}{S_B} \cdot a \cdot (u - u_{кр})^2 & , \text{ якщо } u_{кр} \leq u \\ k_t \cdot b \cdot u \cdot C_0 \cdot \exp(-b \cdot x) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{u}{u_{хар}}\right) \right) & , \text{ якщо } P_V \leq P_{кр} \end{cases} \tag{6}$$

де P_B — периметр досліджуваного перетину, м; $u_{кр}$ — швидкість повітряного струменя, при якій пил починає здигатись, 1,8...2 м/с; $u_{хар}$ — характерна швидкість повітря, коли основна маса пилу, який знаходиться під дією струменя, здимається, м/с; k_t — час, за який пил осідав у досліджуваному перетині, с; a — емпіричний коефіцієнт $\text{мг} \cdot \text{с}/\text{м}^4$; P_V — пиловідкладення в одиниці об'єму у досліджуваному перетині виробки за проміжок часу k_t , $\text{мг}/\text{м}^3$; $P_{кр}$ — критична кількість відкладеного пилу, при якій починається злежування і вся маса пилу не може знаходитись під дією повітряного струменя, $\text{мг}/\text{м}^3$.

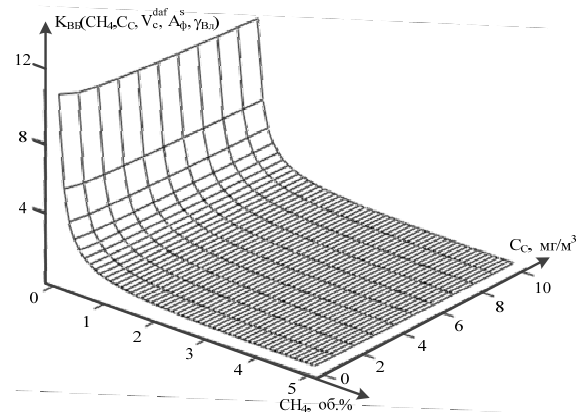
При швидкості потоку $u = 4$ м/с залежності концентрацій (3), (4) та (5) вугільного пилу в повітрі від довжини виробки будуть мати такий вигляд як показано на рисунку 7.

При аналізі функцій розподілу концентрацій пилу, наведених на рисунку 8 встановлено, що максимальна концентрація пилу в повітрі виробки буде на відстані близько 10–15 метрів від початку перетину виробки (залежність $\Theta(x)$). Беручи до уваги відкладений пил, що здимається, при потоці повітря у виробці (залежність $C(x, \Theta(x))$) певної швидкості маємо тенденцію до підвищення концентрації пилу в повітрі пропорційно швидкості пило-

повітряного потоку в порівнянні із залежністю $C(x)$, без здимання пилу, що відклався. При наявності метану, поріг вибуховості буде знижено.



Рисунки 7 — Залежності концентрацій вугільного пилу в повітрі від довжини виробки



Рисунки 8 — Об'ємна залежність коефіцієнта вибухобезпеки від концентрацій метану та вугільного пилу

Інтенсивність відкладення пилу P по мережі гірничих виробок змінюється в широких межах: від часток грама до декількох кілограм на 1 м^3 обсягу видобутку на добу. Інтенсифікація і концентрація гірських робіт сполучена з різкою зміною факторів, що визначають інтенсивність відкладення пилу (швидкість руху повітря, концентрація пилу, збільшення машинного часу тощо).

При основному технологічному процесі тривалістю (2–3) години у зміну і комплексному гідрообезпилюванню запиленості повітря в робочій зоні складе (250–1100) мг/м^3 , а у вихідному вентиляційному потоці (100–370) мг/м^3 [5]. При такій запиленості та витраті повітря через очисний забій (1500 – 2000) $\text{м}^3/\text{хв}$ інтенсивність відкладення пилу у виробках, що примикають, складе (800 – 1500) мг/м^3 на добу [6]. Для більшості гірничотехнічних умов шахт Донбасу при такій інтенсивності відкладення пилу періодичність виконання робіт з попередження вибухів вугільного пилу складе від 0,010 до 0,025 доб., тобто через кожні (15 – 30) хв. роботи машин і механізмів необхідно проводити профілактичні вибухозахисні заходи.

Підбиваючи підсумки проведених досліджень, була побудована залежність коефіцієнта вибухобезпеки $K_{ВВ}$ виробки [7] від концентрацій метану та вугільного пилу при рівнях виходу летучих $V_c^{daf} = 15 \%$; зольності $A_\phi^s = 10 \%$ та вологонасиченості $\gamma_{Вл} = 3 \text{ г/м}^3$ (рис. 8). З рисунку випливає, що при вагомій запиленості (більш 10 мг/м^3) та концентрації метану 2 % і більше виникає реальна загроза вибуху пило-газової суміші у шахтній виробці, чому свідчить зниження коефіцієнта вибухобезпеки нижче рівня $K_{ВВ} = 2$.

Розробка комп'ютеризованої системи вимірювання концентрації пило-газових сумішей є актуальною задачею забезпечення безпеки працівників вугільної промисловості. З огляду на те, які фактори впливають на критерій вибуховості газових сумішей, запропонований алгоритм роботи приладу (рис. 9), що повинен забезпечити контроль та прогнозування небезпечних ситуацій у виробці вугільних шахт. З алгоритму випливає те, що система повинна мати такі функціональні блоки, з огляду на те, які параметри потрібно вимірювати для ефективної роботи системи, а саме: канали вимірювання вологості, температури, канали вимірювання концентрації метану, пилу, аналого-цифровий перетворювач, мікропроцесорний блок аналізу та управління, блок очистки оптичних вузлів.

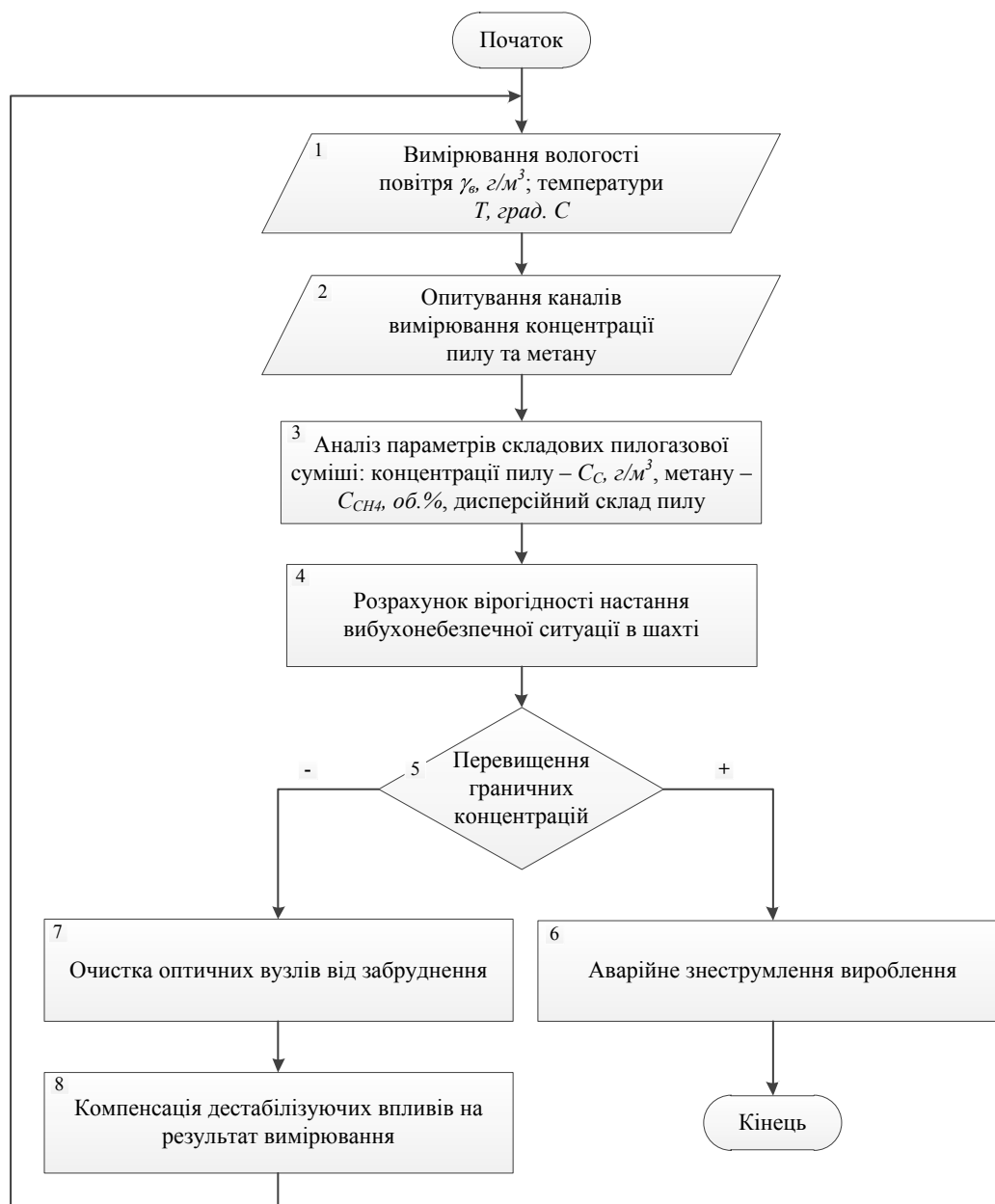


Рисунок 9 — Алгоритм роботи комп'ютеризованої системи вимірювання концентрації газових сумішей

Подальше детальне вивчення та дослідження впливу дестабілізуючих факторів атмосфери вугільної шахти допоможе максимально точно корегувати похибки, що виникають при вимірюванні концентрації пило-газової суміші.

Висновки

1. Розглянуто та проаналізовано вплив вугільного пилу і метану на загальний поріг вибуховості пило-газової суміші, що дозволить підвищити вірогідність визначення вибуховості та забезпечити прогнозування вибухонебезпечної ситуації в умовах вугільних шахт.

2. Встановлені граничні значення концентрацій компонентів пило-газової суміші при яких може виникнути вибухонебезпечна ситуація у виробці шахти та доказано на прикладі побудованих характеристик, що при наявності незначної концентрації метану (до 2%) у суміші з пилом межа вибуховості істотно зростає.

3. Виведена залежність розподілення концентрації пилу за довжиною виробки вугільної шахти від початку перетину виробки при зміні швидкості потоку, розміру часток пилу, яка враховує здимання пилу, що відклалася на ґрунті виробки.

4. Складений алгоритм роботи комп'ютеризованої системи вимірювання концентрації складових газових сумішей відповідно до якого надалі треба ставити вимоги до окремих функціональних блоків приладу.

Список використаної літератури

1. Предупреждение и локализация взрывов в подземных условиях / А.Е. Умнов, А.С. Голик, Д.Ю. Палеев и др. — М.: Недра, 1990. — 286 с.
2. Качан В.Н. Предупреждение взрывов угольной пыли в глубоких шахтах / В.Н. Качан, В.И. Саранчук, А.Т. Данилов. — К.: Техника, 1990. — 120 с.
3. Збірник інструкцій до правил безпеки у вугільних шахтах: в т. — К.: Основа, 1996. — Т 1. — 425 с.
4. Венгеров И.Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели / И.Р. Венгеров. — Донецк.: Норд-Пресс, 2008. — 201с.
5. Трубицын А.А. Технологические основы системы управления пылевой обстановкой в угольных шахтах для обеспечения безопасности ведения горных работ: дис. д-ра. техн. наук. ННЦ ГП ИГД им. А.А.Скочинского / А.А. Трубицын. — Люберцы, 2002. — 216 с.
6. Предупреждение взрывов пылеметановоздушных смесей / Ж.А.Минаев, В.Н. Ибраев, В.И. Лигай и др. — М.: Недра, 1990. — 159 с.
7. Сенкус В.В. Коэффициент взрыбобезопасности угольных шахт / В.В. Сенкус, Б.М. Стефанюк, К.Д. Лукин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2008/9. — 26 с.

Надійшла до редакції:
12.03.2012 р.

Рецензент:
д-р техн. наук, проф.
О.Г. Воронцов

A.V. Vovna, A.A. Zori, R.I. Solomichev. The Variations Influence of Mixtures Individual Components Concentrations of Dust with Methane on the Explosion General Threshold in a Coal Mine. We reviewed and analyzed the influence on coal dust and methane gas explosion at a common threshold, limit components concentrations values of dust-gas mixture in the coal mines atmosphere..

Key words: coal dust, methane concentration, dispersion, explosiveness, a channel measurement.

A.B. Вовна, А.А. Зори, Р.И. Соломичев. Влияние вариации концентраций отдельных компонентов пылегазовоздушных смесей на общий порог взрываемости в условиях выработок угольных шахт. Рассмотрено и проанализировано влияние угольной пыли и метана на общий порог взрываемости, установлены предельные значения концентраций компонентов пыле-газовой смеси в атмосфере угольных шахт. Составлена структурная схема компьютеризированной системы измерения концентрации пыле-газовых смесей в шахте.

Ключевые слова: угольная пыль, метан, концентрация, дисперсность, взрывчатость, канал измерения.

© Вовна О.В., Зори А.А., Соломичев Р.И., 2012