

О. В. ВОВНА, канд. техн. наук, доц., ДонНТУ, Красноармійськ;
А. А. ЗОПІ, д-р. техн. наук, проф., ДонНТУ, Красноармійськ

ПІДСИСТЕМА КОНТРОЛЮ МЕЖ ВИБУХОВОСТІ РУДНИЧНОЇ АТМОСФЕРИ ДЛЯ СИСТЕМИ АЕРОГАЗОВОГО ЗАХИСТУ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

Отримала подальший розвиток математична модель визначення нижньої межі вибуховості системи «метан – вугільний пил – повітря» на основі результатів досліджень вибухонебезпеки пилогазової суміші. Модель враховує зміну вмісту вологи у повітрі, вихід лепючих та зольність вугілля, що дозволяє запобігати наближенню робочої точки системи аерогазового контролю до критичних меж вибуховості. Розроблені та досліджені експериментальні зразки вимірювачів концентрації метану та пилу, які входять до складу системи аерогазового захисту вугільних шахт

Ключові слова: підсистема, контроль, метан, вугільний пил, вологість, вибуховість, руднична атмосфера.

Вступ. Розробка та вдосконалення вимірювальних систем концентрації газів і пилу, які дозволяють отримати надійну метрологічну інформацію в режимі реального часу про фактичний та прогнозований стан аерогазової обстановки промислових підприємств, є одним з пріоритетних напрямів проблеми підвищення ефективності промислових систем комплексної аерогазової безпеки. Так, вимірювальний контроль концентрації токсичних і вибухонебезпечних пило-газових компонент рудничної атмосфери вугільних шахт в режимі on-line, дозволить знизити вірогідність виникнення вибухонебезпечних ситуацій та запобігти виникненню ендегенних й екзогенних пожеж.

У теперішній час розроблені та впроваджені швидкодіючі вимірювачі метану [1], в яких, згідно вимог [2], допустиме значення часу спрацьовування метанометрів стаціонарних (МС2), які використовуються в якості швидкодіючих, складає за швидкістю наростання об'ємної частки метану не більш 2,0 с. (при швидкості 0,5 % в 1 с.). Чутливим елементом розроблених швидкодіючих датчиків метану [1] є елемент, який засновано на термокаталітичному методі контролю концентрації газу. Постійна часу цих датчиків складає більш (3 – 4) с. Для забезпечення необхідної швидкості наростання об'ємної концентрації метану в швидкодіючих датчиках (не більш 2,0 с.) використані програмні методи цифрової обробки їх вихідних сигналів. Згідно ж вимог [2] метанометри стаціонарні, які використовуються в якості швидкодію-

чих, повинні також забезпечувати час спрацювання за об'ємною часткою метану не більш 0,8 с. Для використання у теперішній час вимірювальних перетворювачів на основі термокаталітичного методу контролю це значення практично не досягне у зв'язку фізико-технічними особливостями даної групи сенсорів.

Комплексне оснащення вугледобувних підприємств системою УТАС [1] не дає достатньої безпеки умов праці робітників, оскільки існуючими аспіраційними пробовідбірниками неможливо в автоматичному режимі з достатньою швидкістю виконувати безперервний контроль концентрації та дисперсності вугільного пилу, що вітає у повітрі, немає цілісного алгоритму визначення характеристик вірогідності вибуховості вугільного пилу і метану з урахуванням вологості та швидкості повітряного потоку.

В значній мірі цю проблему можливо вирішити з використанням новітніх систем оптичного контролю концентрації метану та пилу в рудничній атмосфері вугільних шахт [3], які засновані на практичних досягненнях сучасної вимірювальної техніці. Проте, недостатній розвиток теоретичної бази вимірювачів концентрації пилогазових компонент істотно перешкоджає створенню сучасних засобів аерогазового контролю у вугільних шахтах, які задовольняють зростаючим вимогам практики.

Постановка задачі дослідження. Мета роботи – розробити підсистему контролю концентрації метану та пилу, що вітає у повітрі, для визначення порогу вибуховості пило-повітряної суміші в рудничній атмосфері вугільних шахт. Для досягнення мети поставлені та вирішені наступні задачі:

- розробити та провести дослідження математичної моделі визначення імовірнісних характеристик критичних меж вибуховості пилоповітряної суміші рудничній атмосфері вугільних шахт;
- поставити вимоги до вимірювальних каналів підсистеми контролю порогу вибуховості атмосфери вугільних шахт;
- розробити та дослідити експериментальні зразки швидкодіючих вимірювачів концентрації метану та пилу, що вітає у повітрі, для системи аерогазового захисту вугільних шахт.

Викладення основного матеріалу. Для вирішення поставлених задачотримала подальший розвиток математична модель визначення імовірнісних характеристик критичних меж вибуховості пилоповітряної суміші. В основу розробки математичної моделі покладений закон Ле-Шательє, який має лінійну залежність між запиленістю повітря вугільним пилом та концентрацією метану:

$$\left(\frac{C_{CH_4(C)}}{C_{CH_4\ HMB}} \right) + \left(\frac{C_{C(CH_4)}}{C_{C\ HMB}} \right) = 1, \quad (1)$$

де $C_{CH_4(C)}$ – фактична концентрація метану при запиленому повітрі, об.%;

$C_{CH_4\ HMB}$ – нижня межа вибухонебезпеки концентрації метану в сухому повітрі без пилу, величина якої складає 5 об.%;

$C_{C(CH_4)}$ – фактична концентрація вугільного пилу при наявності у повітрі метану, г/м³;

$C_{C\ HMB}$ – нижня межа вибухонебезпеки концентрації пилу в сухому повітрі, функціональний опис якої з достатньою практичною точністю при виході летючих речовин від 15 до 30 % дає емпірична залежність, що ґрунтується на результатах чисельних досліджень МакНДІ (м. Макіївка, Україна) [4, 5]:

$$C_{C\ HMB} (C_{CH_4(C)}, V_C^{daf}, A^d) = 53,3 \cdot e^{-0,045 \cdot V_C^{daf} - 0,69 \cdot C_{CH_4(C)}} + 1,4 \cdot e^{-0,032 \cdot V_C^{daf}} \cdot A^d, \quad (2)$$

де V_C^{daf} – вихід летючих речовин і газів із вугілля, %;

A^d – зольність вугільного пилу на суху вагу, %.

За результатами експериментальних досліджень, які виконані МакНДІ, встановлено залежність нижньої межі вибуховості вугільного пилу від насичення вологою повітря [6]:

$$C_{C\ HMB\ \gamma} (C_{CH_4(C)}, V_C^{daf}, A^d, \gamma, P) = C_{C\ HMB} (C_{CH_4(C)}, V_C^{daf}, A^d) + \xi \cdot \gamma^{\alpha(P)}, \quad (3)$$

де $C_{C\ HMB\ \gamma}$ – НМВ пилоповітряної суміші в насиченому вологою повітрі, г/м³;

γ – вміст води в пилоповітряній суміші рудничної атмосфери, г/м³;

ξ – значення коефіцієнту підвищення НМВ, який змінюється в залежності від властивостей вугілля в межах від 0,375 до 0,755;

α – показник ступеня, значення якого залежить від атмосферного тиску P , Па, та визначається за співвідношенням:

$$\alpha(P) = \Phi \cdot \sqrt{2} \cdot (P \cdot 10^{-5})^2, \quad (4)$$

де Φ – число, значення якого дорівнює 1,6180399.

При нормальному атмосферному тиску значення показника ступеня (4) дорівнює $\alpha(P=101325\text{ Па})=2,35$. Залежність нижньої межі

вибуховості концентрації метану від насичення вологою повітря має наступний вигляд [6]:

$$C_{CH_4 HMB\gamma}(\gamma, P) = C_{CH_4 HMB} + \nu \cdot \gamma^{\beta(P)}, \quad (5)$$

де $C_{CH_4 HMB\gamma}$ – НМВ концентрації метану в насиченому вологою повітрі, об.%;

ν – коефіцієнт, який узгоджує підвищення НМВ концентрації метану з вмістом вологою в метаноповітряній суміші, значення якого дорівнює 0,009 (%/Г/м³);

β – показник ступеня, значення якого залежить від атмосферного тиску P , Па, та визначається за співвідношенням:

$$\beta(P) = \Phi \cdot (P \cdot 10^{-5})^2. \quad (6)$$

При нормальному атмосферному тиску значення показника ступеня (6) дорівнює $\beta(P = 101325 \text{ Па}) = 1,66$.

В роботі [6] зазначається невідповідність лінійності закону (1) фактичному стану НМВ метано-пилі повітряної суміші. Дослідженнями [6] встановлено, що залежність (1) має вид експоненти з показником ступеня m , значення якого встановлюються експериментальним шляхом:

$$\left(\frac{C_{CH_4(C)}}{C_{CH_4 HMB\gamma}(\gamma, P)} \right)^{m(C_{CH_4(C)}, \gamma, P)} + \left(\frac{C_{C(CH_4)}}{C_{CH_4 HMB\gamma}(C_{CH_4}, V_C^{daf}, A^d, \gamma, P)} \right)^{m(C_{CH_4(C)}, \gamma, P)} = 1, \quad (7)$$

де $m(C_{CH_4(C)}, \gamma, P) = m_1 + m_2 \cdot \frac{C_{CH_4(C)}}{C_{CH_4 HMB\gamma}(\gamma, P)}$;

m_1, m_2 – коефіцієнти, які визначаються експериментальним шляхом.

Після перетворення рівняння (7) залежність НМВ вугільного пилу від концентрації метану в рудничній атмосфері має наступний вигляд:

$$C_{C(CH_4)}(C_{CH_4(C)}, V_C^{daf}, A^d, \gamma, P) = C_{CH_4 HMB\gamma}(C_{CH_4(C)}, V_C^{daf}, A^d, \gamma, P) \times \left[1 - \left(\frac{C_{CH_4(C)}}{C_{CH_4 HMB\gamma}(\gamma, P)} \right)^{m(C_{CH_4(C)}, \gamma, P)} \right]^{\frac{1}{m(C_{CH_4(C)}, \gamma, P)}} \quad (8)$$

Для дрібнодисперсного пилу викидонебезпечного вугільного пласту l_1 ПАТ «Шахта ім. О.Ф. Засядько» (марка вугілля – Ж, вихід летю-

чих $V_C^{daf} = 34\%$, зольність $A^d = 7,0\%$) в роботі [7] наведено результати дослідження зміни НМВ метану при зміні концентрації пилу (див. рис. 1). Результати досліджень вибухонебезпеки пилегазової системи «метан – вугільний пил – повітря» апроксимовані емпіричною залежністю вигляду [7]:

$$C_{CH_4}(C_C) = \frac{5,004 - 0,3068 \cdot C_C}{1 - 0,06285 \cdot C_C + 0,02284 \cdot C_C^2}. \quad (9)$$

Для зіставлення результатів досліджень в роботі [7], які апроксимовані емпіричною залежністю (9), з результатами математичного моделювання НМВ вугільного пилу від концентрації метану, що визначені за формулою (7), авторами отримані коефіцієнти m_1 та m_2 , значення яких становлять 0,66512 та 0,32818. При цьому відносно значення похибки апроксимації результатів експериментальних досліджень за формулою (9) від результатів розрахунку, які отримані за залежністю (7) складає не більш 5 %, що підтверджує адекватність запропонованого математичного опису НМВ метану при зміні комплексу дестабілізуючих факторів рудничної атмосфери вугільної шахти, а саме: вміст вологи у повітряній суміші, вихід летючих, зольність вугілля та тиск рудничної атмосфери.

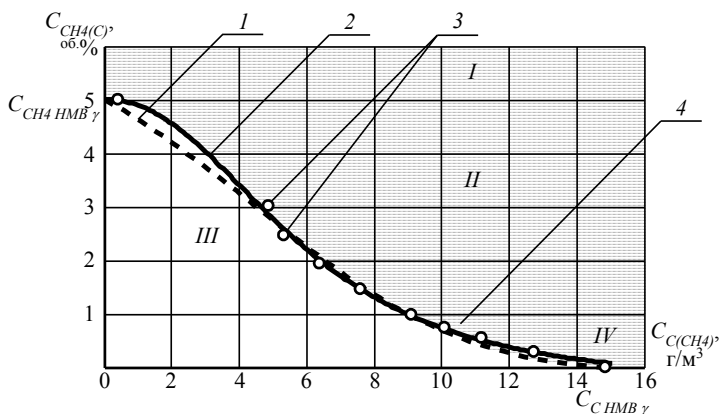


Рис. 1 – Залежність НМВ метану при зміні концентрації пилу:

1 – залежність вугільного пилу від концентрації метану, з визначеними коефіцієнтах $m_1=0,66512$ та $m_2=0,32818$ функції (7); 2 – функція, яка апроксимована емпіричною залежністю (9); 3 – результати досліджень НМВ метану від зміни концентрації вугільного пилу, які наведено в роботі [9]; 4 – область вибухових концентрацій системи «метан – вугільний пил – повітря»

Аналіз даних на рис. 1 показує, що виділяються чотири області, три з яких характеризуються вибуховістю метанопилоповітряної суміші: в I області концентрація метану перевищує НМВ, в цій області в займанні суміші основну роль відіграє метан; в II області займання пилогазової суміші визначається співвідношенням концентрації метану та вугільного пилу, що вітає у повітрі, III область відповідає співвідношенням концентраційних меж метану та пилу, при яких газова суміш не є вибуховою, а в IV області концентрація метану складає менш 1^{об.%}, що повністю задовольняє вимогам аерогазового захисту шахт, а концентрація пилу наближається до НМВ, що створює передумови для виникнення на виробничих ділянках шахт пилогазового середовища у вигляді аерозолі, який має здатність до вибуху.

З аналізу результатів досліджень розробленої математичної моделі можна зробити висновок, що при зміні вмісту вологи у повітряній суміші змінюються межі IV області, тим самим змінюється поріг вибуховості метанопилоповітряної суміші. Так на рис. 2 наведено залежність НМВ метану при зміні концентрації вугільного пилу в діапазоні від 0 до 50 г/м³ при фіксованих значеннях насичення вологою повітря рудничної атмосфери вугільної шахти 3; 9 та 12 г/м³.

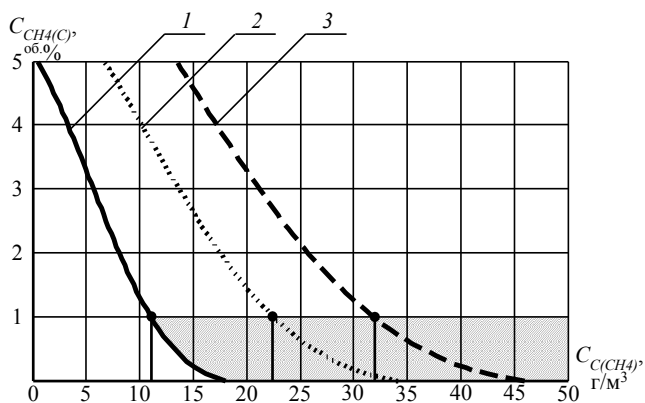


Рис. 2 – Залежність НМВ метану при зміні концентрації вугільного пилу:

1 – насиченість вологою повітря $\gamma = 3$ г/м³; 2 – $\gamma = 9$ г/м³; 3 – $\gamma = 12$ г/м³

Аналіз даних на рис. 2 показує, що при підвищенні насичення вологою повітря рудничної атмосфери в 3 рази від 3 до 9 г/м³ нижня межа вибуховості збільшується в 2 рази, тобто від 10,9 г/м³ до 22,4 г/м³, а при збільшенні вмісту вологи у повітрі до 12 г/м³ НМВ вугільного пилу

складає $31,7 \text{ г/м}^3$. Тому без виміривального контролю вмісту вологи у повітрі в діапазоні від 3 до 9 г/м^3 в реальному масштабі часу не можливо врахувати вибухонебезпечність вугільного пилу, що вітає у повітрі, для запобігання виникнення вибухонебезпечного аерозолі в рудничній атмосфері вугільних шахт.

При проведенні досліджень розробленої математичної моделі виявлено, що для контролю порогу вибуховості метанопилоповітряної суміші необхідно враховувати характеристики марки вугілля, так для марки вугілля Ж при виході летючих компонент $V_C^{daf} = 34 \%$ та зольності $A^d = 7,0 \%$ нижня межа вибуховості вугільного пилу складає $10,9 \text{ г/м}^3$ при насиченні вологою повітря 3 г/м^3 та концентрації метану $1^{об.}\%$. Так при збільшенні виходу летючих компонент до 41% , що складає не більш 20% від номінального значення, нижня межа вибуховості вугільного пилу зменшується на 21% та складає $8,6 \text{ г/м}^3$. Тобто чутливість НМВ вугільного пилу при зміні виходу летючих компонент V_C^{daf} в межах від 34 до 41% становить:

$$S_{V_C^{daf}} = \frac{\Delta C_{C(CH_4)}(C_{CH_4(C)}, \Delta V_C^{daf}, A^d, \gamma, P)}{\Delta V_C^{daf}} = \frac{10,9 - 8,6}{34 - 41} = -0,329 \frac{об.\%}{\%}.$$

Чутливість НМВ вугільного пилу при зміні зольності вугільного пилу A^d від 7 до 14% складає:

$$S_{A^d} = \frac{\Delta C_{C(CH_4)}(C_{CH_4(C)}, V_C^{daf}, \Delta A^d, \gamma, P)}{\Delta A^d} = \frac{12,9 - 10,9}{14 - 7} = 0,286 \frac{об.\%}{\%}.$$

З аналізу отриманих величини чутливості НМВ вугільного пилу при зміні характеристик марки вугілля можна зробити висновок, що підвищення виходу летючих компонент знижує практично пропорційно межу вибуховості метанопилоповітряної суміші, а збільшення практично в два рази зольності вугільного пилу підвищують межу вибуховості на 18% . Тому при контролі НМВ системи «метан – вугільний пил – повітря» необхідно виконувати періодичний контроль параметрів марки вугілля, щоб запобігти наближенню робочої точки режиму роботи системи аерогазового контролю у виробленнях вугільної шахти до критичних меж вибуховості метанопилоповітряної суміші. Зміна в робочих межах тиску рудничної атмосфери практично не впливає на НМВ системи «метан – вугільний пил – повітря», тому впливом цього дестабілізуючого фактору можна знехтувати.

При виконанні дослідно-конструкторської роботи «Розробка вимірювача із застосуванням оптико-абсорбційного методу оптико-абсорбції контролю концентрації метану в рудничній атмосфері вугільних шахт» Державним вищим навчальним закладом «Донецький національний технічний університет» спільно з Приватною компанією «Дейта Експрес» розроблено та створено експериментальні зразки оптичного вимірювача концентрації метану [8, 9]. На етапі підписання договір з Державним підприємством «Петровський завод вугільного машинобудування» на виконання науково-дослідно-конструкторської роботи «Розробка оптичного вимірювача концентрації пилу в рудничній атмосфері вугільних шахт» [10].

При проведенні лабораторних досліджень експериментального зразка оптичного вимірювача концентрації метану у виробничих умовах лабораторії аерогазового захисту шахти ім. М.І. Калініна (м. Донецьк, Україна) та Держаному підприємстві «Петровський завод вугільного машинобудування» (м. Донецьк, Україна) встановлено:

– швидкодія розробленого вимірювача складає не більш 0,2 с. при необхідному значенні 0,8 с., яке визначене згідно ДСТУ ГОСТ 24032:2009 [2].

– основна абсолютна похибка вимірювання концентрації метану не більш $\pm 0,07^{06}\%$, яке в 3 рази менше значення, що вимагається за [2] ($\pm 0,2^{06}\%$), у діапазоні вимірювань від 0 до $4,0^{06}\%$.

– додаткова похибка вимірювання концентрації метану в діапазоні температур від $+5$ до $+35^{\circ}\text{C}$, значення якої складає $\pm 0,15^{06}\%$, що в 2,7 рази менше необхідного значення додаткової абсолютної похибки вимірювання концентрації метану (не більш $\pm 0,4^{06}\%$).

– додаткова похибка вимірювання концентрації метану від зміни концентрації пилу в діапазоні від 0 до $3,5 \text{ г/м}^3$ складає не більш $\pm 0,20^{06}\%$, що в 2 рази менше необхідного значення.

При проведенні лабораторних досліджень макетного зразка вимірювача концентрації вугільного пилу в умовах лабораторії вимірювальної техніки кафедри електронної техніки ДВНЗ «ДонНТУ» встановлено:

– швидкодія розробленого макетного зразка вимірювача складає не більш 0,2 с. при максимальному значенні часу вимірювань для аспіраційних вимірювачів концентрації вугільного пилу не менше 3 хв.;

– значення основної абсолютної похибки вимірювання концентрації вугільного пилу в діапазоні від 0 до 3 г/м^3 не перевищують допустимого значення похибки $\pm 50 \text{ мг/м}^3$ та складає не більше $\pm 14 \text{ мг/м}^3$ для двох каналів з різними довжинами хвиль оптичного випромінювання. Це значно менше величини абсолютної похибки визначення концент-

рації пилу аспіраційними вимірювачами у даному діапазоні (більш $\pm 200 \text{ мг/м}^3$);

– величини додаткових абсолютних похибок, які обумовлені температурним дрейфом з урахуванням компенсації дорівнюють $\pm 2,7 \text{ мг/м}^3$ та $\pm 3,6 \text{ мг/м}^3$, що складає 20 % та 30 % величин основних похибок вимірювальних каналів і не перевищують вимог ДСТУ (не більше 35 % від основної).

Проведені експериментальні дослідження показують, що отримані метрологічні характеристики розроблених вимірювачів концентрації метану та вугільного пилу задовольняють поставленим вимогам до системи аерогазового контролю УТАС у виробленнях вугільних шахт.

Висновки.

1. Отримала подальший розвиток математична модель визначення нижньої межі вибуховості системи «метан – вугільний пил – повітря» на основі результатів досліджень вибухонебезпеки пилогазової суміші. Модель враховує зміну вмісту вологи у повітрі, вихід летючих та зольність вугілля, що дозволяє запобігати наближенню робочої точки системи аерогазового контролю до критичних меж вибуховості.

2. При дослідженні математичної моделі встановлено, що при підвищенні насичення вологою повітря рудничної атмосфери в 3 рази від 3 до 9 г/м^3 нижня межа вибуховості збільшується в 2 рази, тобто від $10,9 \text{ г/м}^3$ до $22,4 \text{ г/м}^3$, а при збільшенні вологості повітря до 12 г/м^3 складає $31,7 \text{ г/м}^3$. Також виявлено, що для контролю порогу вибуховості метанопилоповітряної суміші необхідно враховувати характеристики марки вугілля, так підвищення виходу летючих компонент знижує практично пропорційно межу вибуховості, а збільшення практично в два рази зольності вугільного пилу підвищую її на 18 %.

3. Результати теоретичних та практичних досліджень, а також розроблені експериментальні зразки оптичних вимірювачів концентрації метану та вугільного пилу планується впровадити в комплексі аерогазового контролю УТАС (Державне підприємство «Петровській завод вугільного машинобудування») та САТ (Приватна компанія «Дейта Експрес»).

Список літератури: 1. Державне підприємство “Петровський завод вугільного машинобудування” “Системи комплексної безпеки”, 1897, Web. 2 April 2015 <<http://itras.com.ua>>.

2. Приборы шахтные газоаналитические. Общие требования, методы испытания: ДСТУ ГОСТ 24032:2009. – [Действующий от 2009-02-01]. – К.: Держспоживстандарт, 2009. – 24 с. 3. *Вовна А.В.* Методы и средства аналитического измерения концентрации газовых компонент и пыли в рудничной атмосфере угольных шахт / *А.В. Вовна* [идр.]. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 260 с. 4. Сборник инструкций к правилам безопасности в угольных шахтах. Том 1. – К.: Мінпаливенерго, 2003.– 480 с. 5. *Петрухин П.М.* Борьба с угольной и породной пылью в шахтах / *П.М. Петрухин, Г.С. Гродель, Н.И. Жилиев* [и др.]

др./]. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра, 1981. – 271 с. **6.** Сенкус В.В. Коэффициент взрывобезопасности угольной шахты / В.В. Сенкус, Б.М. Стефанюк, К.Д. Лукин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2010. – № 10. – С. 23–27. **7.** Калякин С.А. Взрывоопасность метанугольных аэрозолей в горных выработках и пылегазовый режим угольных шахт / С.А. Калякин // Безопасность труда в промышленности, 2013. – № 6. – С. 73–76. **8.** Вовна А.В. Разработка и исследование экспериментального образца измерителя концентрации метана для угольных шахт / А.В. Вовна, А.А. Зори // Известия ЮФУ. Технические науки. Выпуск «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении». – Таганрог, 2014. – № 4 (153). – С. 171–177. **9.** Вовна А.В. Оптический измеритель концентрации метана с аппаратно-программной компенсацией температурного дрейфа / А.В. Вовна, А.А. Зори // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Донецьк, 2014. – Випуск 1 (26). – С. 178–188. **10.** Соломічев Р.І. Розробка та обґрунтування структури вимірювальної системи контролю вибухонебезпечних пило-газових сумішей в шахтному виробітку / Р.І. Соломічев, О.В. Вовна, А.А. Зори // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць «Електроенергетика та перетворювальна техніка». – Харків, 2014. – № 19 (1062). – С. 154–163.

Bibliography (transliterated): 1. Derzhavne pidprijemstvo "Petrovs'kyj zavod vugil'nogo mashynobuduvannya". "Systemy kompleksnoi bezpeky", 1897. Web. 2 April 2015 < <http://itras.com.ua>>. 2. Ukraine Ministry of Coal Industry (2009), 24032:2009. *Pribory shahthnye gazoanaliticheskie. Obshhie trebovaniya, metody ispytaniya* [24032:2009 Minegas analysisinstruments. General requirements, test methods.], Ukraine Ministry of Coal Industry, Kiev, Ukraine. 3. Vovna, A.V. et al. *Metody i sredstva analiticheskogo izmereniya koncentracii gazovyh komponent i pyli v rudnichnoj atmosfere ugol'nyh shaht.* Donetsk: GVUZ «DonNTU», 2012. 4. *Sbornik instrukcij k pravilam bezopasnosti v ugol'nyh shahtah*, Vol. 1. Kiev: Minpalivenergo, 2003. 5. Petruhin, P.M. et al. *Bor'ba s ugol'noj i porodnoj pyl'ju v shahtah.* Moscow: Nedra, 1981. 6. Senkus, V.V. Stefanjuk, B.M. and Lukin, K.D. "Koefficient vzryvobezopasnosti ugol'noj shahty." *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*, No. 10. 2010. 23–27. Print. 7. Kaljakin, S.A. "Vzryvoopasnost' metanougol'nyh ajerozolej v gornyh vyrabotkah i pylegazovoj rezhim ugol'nyh shaht." *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, No. 6. 2013. 73–76. Print. 8. Vovna A.V. and Zori A.A. "Razrabotka i issledovanie jeksperimental'nogo obrazca izmeritelja koncentracii metana dlja ugol'nyh shaht." *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. Vypusk «Komp'juternye i informacionnye tehnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii»*, No. 4 (153). 2014. 171–177. Print. 9. Vovna, A.V. and Zori, A.A. "Opticheskij izmeritel' koncentracii metana s apparatno-programmnoj kompensaciej temperaturunogo drejfa." *Naukovi pracj Donec'kogo nacional'nogo tehnicnogo universitetu. Serija: «Obchisljuval'na tehnika ta avtomatizacija»*, No. 1 (26). 2014. 178–188. Print. 10. Solomichev, R.I., Vovna, A.V. and Zori, A.A. "Rozrobka ta obgruntuvannja struktury vymirjuval'noi systemy kontrolju vybuhonebezpečnyh pylo-gazovyh sumishej v shahtnomu vyrobittku." *Visnyk NTU «KhPI». Zbirnyk naukovykh prac' «Elektroenergetyka ta peretvorjuval'na tehnika»*, No. 19 (1062). 2014. 154–163. Print.

Надійшла (received) 21 .05 .2015