

УДК 535.345.1, 622.23.05

***Р. І. СОЛОМІЧЕВ***, аспірант ДВНЗ ДонНТУ, Донецьк;  
***О. В. ВОВНА***, канд. техн. наук, доц. ДВНЗ ДонНТУ, Донецьк;  
***А. А. ЗОРІ***, д-р. техн. наук, проф. ДВНЗ ДонНТУ, Донецьк

### **РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПИЛО-ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ В ШАХТНОМУ ВИРОБІТКУ**

На основі проведених досліджень отримано багатопараметричний функціонал, який визначає імовірнісні характеристики критичних меж вибуховості пило-газової суміші в шахтному повітрі. Завдяки даному функціоналу розроблено структуру комп'ютеризованої ІВС контролю концентрацій вибухонебезпечних компонент рудничної атмосфери, що включає автоматичний канал вимірювання концентрації  $(0\pm 3) \text{ г/м}^3$  та

© Р. І. Соломічев, О. В. Вовна, А. А. Зорі, 2014

дисперсності ( $1 \div 10$ ) мкм вугільного пилу, концентрації метану ( $0 \div 4$ ) об%, температури (від +5 до +34) °С та вологості повітря ( $0 \div 10$ ) г/м<sup>3</sup>.

**Ключові слова:** вимірювач, вугільний пил, оптико-абсорбційний, концентрація, алгоритм, вибуховість.

**Вступ.** Безпечний видобуток вугілля в шахті зазвичай залежить від оперативності контролю концентрації пило-газових компонент рудничної атмосфери. Відсутність автоматичних швидкодіючих вимірювачів заповнення рудничної атмосфери для системи аерогазового захисту вугільних шахт УТАС, що випускається Державним підприємством «Петровським заводом вугільного машинобудування» (м. Донецьк), визначає її недоліки при експлуатації та визначенні імовірнісних характеристик вибуховості метано-пилоповітряних сумішей рудничної атмосфери. Проте, розроблений двопробеневий оптико-абсорбційний вимірювач концентрації пилу [1] позбавлений вказаних недоліків, має високу швидкодію, точність та роздільну здатність, які дозволяють вести безперервний автоматичний контроль концентрації та дисперсності зваженого вугільного пилу в системі аерогазового захисту.

**Постановка цілі та задач дослідження.** Метою роботи є розробка, дослідження структури та алгоритму роботи інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) контролю концентрації, визначити її імовірнісні характеристики критичних меж вибухонебезпечних компонент пило-газової суміші в рудничній атмосфері вугільних шахт. Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі: – встановити взаємозв'язок концентраційних параметрів окремих компонент на вибуховість пило-газової суміші вибуховості ;

– виконати структурний синтез ІВС контролю вибухонебезпечних концентрацій компонент пило-газової суміші в шахтному видобутку, з урахуванням основних дестабілізуючих факторів рудничної атмосфери;

– скласти алгоритм роботи ІВС, який на основі вимірюваних даних та визначених імовірнісних характеристик буде оцінювати поточну ситуацію у шахтному виробленні та прогнозуватиме настання вибухонебезпечних ситуацій.

**Вирішення задач та результати дослідження.** Проведений аналіз параметрів рудничної атмосфери дає основу вважати, що на вибуховість пило-газової суміші в умовах вугільних шахт впливає така невід'ємна складова як вугільний пил, який в суміші з метаном, що у відповідній кількості істотно знижує поріг вибуховості всієї суміші, з певною концентрацією ( $C_{п}$ , г/м<sup>3</sup>), дисперсністю ( $D$ , мкм), зольністю ( $A^s$ , %), виходом летючих ( $V_c^{daf}$ , %) становить суттєву загрозу вибуху. Крім

цього, на вибух впливає вологість повітря ( $\gamma_{\text{пов}}$ , г/м<sup>3</sup>), його швидкість та температура.

З проведених досліджень Макіївським науково-дослідним інститутом, встановлено що найбільш вибухова дисперсність пилу лежить у межах від 1 до 10 мкм – це пил, який практично не осідає за всю довжиною шахтного виробітку. На основі існуючої моделі [2] отримано характеристики розподілення відносних концентрацій рудничного пилу від довжини виробки  $l$ , м для різної дисперсності та швидкості повітря, які зображено на рис. 1, де позначено: 1 – концентрація вугільного пилу з радіусом частинок  $r=0.5$  мкм при швидкості повітря  $u=0,7$  м/с; 2 –  $r=0.5$  мкм,  $u=1,3$  м/с; 3 –  $r=2.5$  мкм,  $u=1,3$  м/с; 4 –  $r=2.5$  мкм,  $u=6$  м/с.

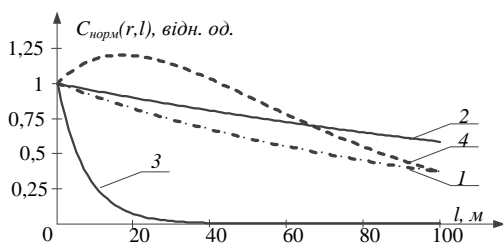


Рис. 1 – Характеристика розподілення концентрації пилу за довжиною вироблення

При швидкості повітря від 0,7 до 1,3 м/с (менш ніж критична) концентрація пилу з дисперсністю часток до 3 мкм залишається практично незмінною від джерела пилоутворення та по всій довжині виробки (залежності 1, 2). Крупні фракції пилу (більш ніж 3 мкм) осідають на відстані близько 20 метрів від початкового перетину при швидкості повітря менш ніж критична (залежність 3). Зі збільшенням швидкості вище критичної (більше 5 м/с) спостерігається ефект вторинного пилоутворення за рахунок пилу, який здимається з ґрунту та поверхонь виробки, що фактично підвищує її концентрацію в повітрі та відстань розповсюдження (залежність 4).

Отримала подальший розвиток математична модель [2, 3], яка дає змогу встановити вибухонебезпечну концентрацію зваженого у повітрі вугільного пилу в залежності від зольності, виходу летючих, вологості повітря та концентрації метану при дисперсності часток (1÷10) мкм, на основі наступного рівняння:

$$C_n(V_c^{daf}, A^d, \gamma_{нов}, C_{CH_4}) = (\delta_{зв}(V_c^{daf}, A^d) + \zeta \cdot \gamma_{нов}^\beta) \cdot \left( 1 - \left( \frac{C_{CH_4}}{C_{CH_4,НПВ} + \mathcal{G} \cdot \gamma_{нов}^\alpha} \right)^m \right)^{1/m}, \quad (1)$$

де  $C_{CH_4,НМВ}$  – нижня межа вибуховості (НМВ) метану в сухому повітрі, %;

$\mathcal{G}$  – коефіцієнт підвищення НМВ метану, рівний  $\mathcal{G} = 0,009$ , %/(г/м<sup>3</sup>);

$\alpha = 2,34$  – показник степені, підбирається експериментальним шляхом;

$\delta_{зв}(V_c^{daf}, A^d)$  – НМВ зваженого вугільного пилу в сухому повітрі, г/м<sup>3</sup>;

$\zeta$  – коефіцієнт підвищення НМВ, в залежності від властивостей вугілля змінюється в діапазоні від 0,357 до 0,755;

$\beta = 1,65$  – показник степені, підбирається експериментальним шляхом;

$m = 0,66512 - 0,12818(C_{CH_4}/(C_{CH_4,НПВ} + \mathcal{G} \cdot \gamma_{нов}^\alpha))$ .

Графік поверхні вибухової концентрації пилу  $C_{П}$  г/м<sup>3</sup>, побудований за вираженням (1) від концентрації метану  $C_{CH_4}$  (0÷4) 0<sup>б</sup>.% та вологості повітря  $\gamma_{нов}$  від 0 до 3 г/м<sup>3</sup> має вигляд, як показано на рис. 2, при середніх параметрах зольності вугілля марки  $l_1 A^S = 6,3$  % та виході летючих  $V_c^{daf} = 41$  %. Отримана теоретична модель на основі емпіричних даних погоджується з експериментальними дослідями МакНДІ [4] для багатьох пластів шахт і марок вугілля.

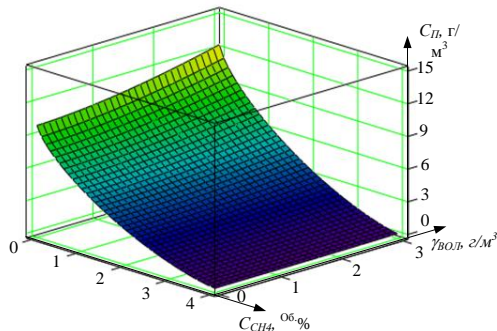


Рис. 2 – Графік зміння вибухової концентрації вугільного пилу від концентрації метану та вологості повітря

З аналізу рис. 2 випливає, що при сухому повітрі та відсутності метану – вугільний пил вибухає при концентрації 12 г/м<sup>3</sup>, а при концентрації

метану  $1^{об.}\%$  – вибухова концентрація пилу знижується у два рази. Вибухова концентрація пилу знов збільшується при підвищенні вологості в шахтному вироблені, яка виступає в ролі природного флегматизатора.

Для визначення імовірності створення вибухонебезпечної ситуації в умовах шахтного виробітку потрібно мати необхідну експериментальну інформацію про стан атмосферного повітря, а саме – кількісне співвідношення концентрації окремих компонентів пило-газоповітряної суміші за якими можна знайти її НМВ. Наприклад, маючи дані про концентрацію метану і вологість повітря, можна розрахувати теоретичну НМВ вугільного пилу з концентрацією  $C_{нНМВ}$ . При порівнянні її з експериментально виміряною концентрацією  $C_{П}$  легко визначити імовірність настання вибухонебезпечної ситуації. Отже, на основі запропонованої математичної моделі, що базується на багато параметричному функціоналі (1) та розробленого автоматичного вимірювача концентрації вугільного пилу, синтезовано структуру ІВС контролю концентрації вибухонебезпечних пило-газових компонент (див. рис. 3).

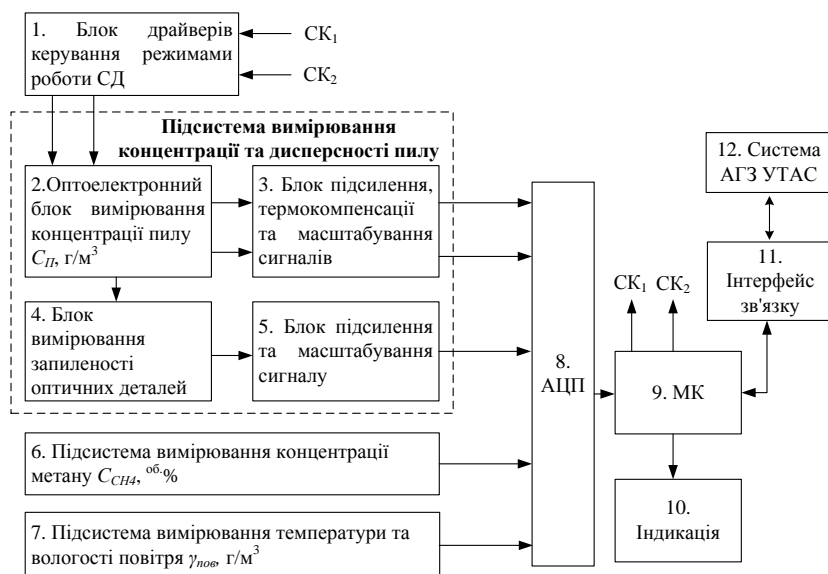


Рис. 3 – Структурна схема комп'ютеризованої ІВС контролю концентрації вибухонебезпечних пило-газових компонент

Підсистема вимірювання концентрації та дисперсності вугільного пилу [5] складається з драйверів керування (1) світлодіодами оптоелектронного блоку (2) та блоку підсилення, термостабілізації і масштабування інформативних сигналів (3), блоку вимірювання запиленості оптичних деталей (4) з відповідним блоком перетворення сигналу (5). Оптоелектронний блок вимірювача складається з відкритого оптичного каналу (ВОК), де відбувається часткове поглинання частками пилу з концентрацією  $C_{II}$  зонduючих випромінювань, та закритого оптичного каналу (ЗОК) термокомпенсації світлових потоків випромінювань від світлодіодів ( $CD_1$  та  $CD_2$ ) з різними довжинами хвиль  $\lambda_1=470$  нм (C503-BAN) та  $\lambda_2=624$  нм (C503-RAN) [5]. Відношення коефіцієнтів спектральної прозорості двох довжин хвиль дає експериментальну інформацію про дисперсність пилового аерозолу, – на основі цього, завдяки розробленому алгоритму програми [5], знаходяться коефіцієнти функції розподілення часток за розмірами та корегуються значення вимірюваної концентрації пилу. На виходах ВОК та ЗОК розміщуються однакові високочутливі фотодіоди ( $FD_1$  та  $FD_2$ ) BPW21R [5], які працюють у фотогальванічному режимі. Вони узгоджені із спектром випромінювання світлодіодів, режими роботи яких забезпечуються відповідними драйверами керування (1) та сигналами керування  $СК_1$ ,  $СК_2$  від мікроконтролера (МК) (9). Сигнал струму з виходу  $FD_1$  ЗОК містить інформацію тільки про змінення інтенсивності випромінювання внаслідок температурного дрейфу  $CD$ , а вихідний сигнал з  $FD_2$  – інформацію про концентрацію вугільного пилу у ВОК в діапазоні від 0 до 3 г/м<sup>3</sup> та температурний зсув. Інформаційні сигнали струму з виходів  $FD_1$  та  $FD_2$  перетворюються в напругу, підсилюються (3), та за диференційною схемою віднімаються, у результаті чого усувається похибка від температурного дрейфу в діапазоні температур від +5 до +35 °С. Скомпенсований вихідний сигнал масштабується для подальшого перетворення в цифровий формат аналого-цифровим перетворювачем (8).

Підсистема вимірювання концентрації та дисперсності пилу оснащена блоком вимірювання запиленості оглядових стекол (4) [7] та відповідним блоком перетворення інформативного сигналу (5) до уніфікованого виду для подальшої обробки в цифровому форматі в МК.

Підсистема вимірювання концентрації метану  $C_{CH_4}$  (6) в діапазоні від 0 до 4<sup>об.</sup>% [6] складається з оптоелектронного блоку з ВОК, де відбувається часткове поглинання молекулами метану зонduючого випромінювання від  $CD_3$  з довжиною хвилі  $\lambda_1=3,6$  мкм. Вихідний потік випромінювання від  $CD_3$  надходить до  $FD_3$ , спектральна чутливість якого узгоджена зі спектром випромінювання  $CD_3$ , перетворюється в сигнал

напруги та масштабується до уніфікованого виду для подальшої цифрової обробки.

Визначення температури і вологості повітря  $\gamma_{нов}$  рудничної атмосфери відбувається в підсистемі (7), діапазон вимірювання вологості – (0÷10) г/м<sup>3</sup>; температури – від +5 до +35 °С.

На основі виміряних концентрації метану і вологості повітря за виразом (1) визначається теоретична НМВ вугільного пилу  $C_{нМВ}$  в МК, яка порівнюється з експериментальним значенням поточної концентрації вугільного пилу  $C_{П}$  за певним алгоритмом та визначається імовірність настання вибухонебезпечної ситуації в шахтному виробітку. За допомогою МК також відбувається накопичення та передача інформації через інтерфейс зв'язку (11) до диспетчерської системи аерогазового (АГЗ) захисту УТАС (12). Алгоритм роботи комп'ютеризованої ІВС контролю концентрації вугільного пилу в шахтній атмосфері приведений на рис. 4.

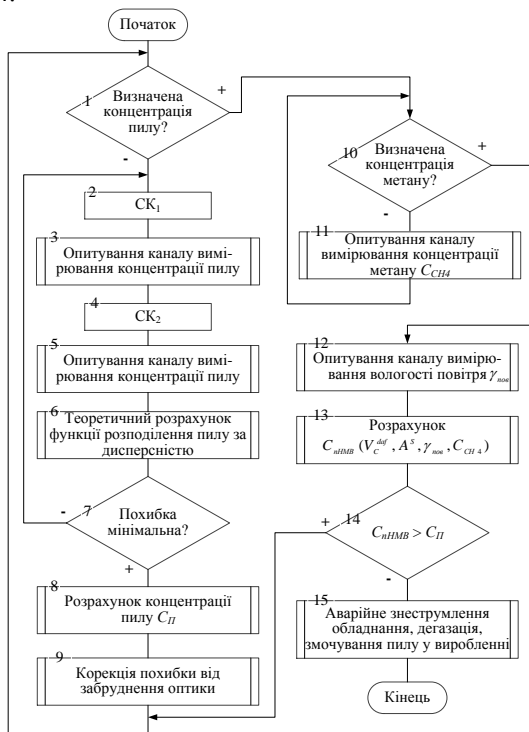


Рис. 4 – Блок-схема алгоритму роботи комп'ютеризованої ІВС контролю концентрації вибухонебезпечних пило-газових компонент

Згідно алгоритму роботи ІВС спочатку визначається в режимі реального часу поточна масова концентрація зваженого вугільного пилу  $C_{П}$  у виробітку за допомогою розробленого [5] двопроменевого оптико-абсорбційного вимірювача з урахуванням дестабілізуючих факторів рудничної атмосфери (змінення температури повітря, дисперсності часток пилу та запиленості оптики). Далі визначаються об'ємна концентрація метану, температура та вологість повітря, за результатами яких оцінюється теоретична концентраційна НМВ пилу  $C_{нНМВ}$  на основі запропонованої моделі (1). При порівнянні теоретичного значення концентрації з експериментальним, враховуючи динаміку їх зміни на основі попередніх даних, встановлюється імовірність настання вибухової ситуації або запас часу роботи гірничих машин і комплексів та приймається рішення про подальші дії.

Таким чином, на основі функціоналу (1), запропонованої структури та алгоритму роботи комп'ютеризованої ІВС можна зробити прогноз щодо настання вибухонебезпечної ситуації у виробітку, передчасно вжити відповідні заходи, такі як знеструмлення, дегазація та змочування пилу шахтної виробки.

## **Висновки.**

1. Отримала подальший розвиток математична модель на основі емпіричних даних МакНДІ, що дала змогу провести дослідження і встановити вибухонебезпечні концентраційні межі складових пило-газової суміші: зваженого вугільного пилу (діапазон контролю від 0 до 3 г/м<sup>3</sup>) в залежності від зольності (до 15 %), виходу летючих (40÷47 %), вологості повітря (від 0 до 10 г/м<sup>3</sup>) та концентрації метану (0÷4<sup>об.</sup>%) при дисперсності часток (1÷10) мкм. В моделі на основі комплексного показника-функціоналу визначено імовірнісні характеристики вибуховості пило-газової суміші: при наявності 1<sup>об.</sup>% метану концентраційна нижня межа вибуховості вугільного пилу знижується в два рази, а при 2<sup>об.</sup>% – в чотири.

2. Розроблено структуру комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи контролю вибухонебезпечних пило-газових сумішей на основі запропонованого багато параметричного функціоналу, яка в своєму складі передбачає наявність оптико-абсорбційних каналів вимірювання концентрації (від 0 до 3 г/м<sup>3</sup>) та дисперсності вугільного пилу (1÷10 мкм) на основі двопроменевого методу, концентрації метану (від 0 до 4<sup>об.</sup>%) та канал вимірювання температури (від +5 до +35 °С) і вологості повітря (0÷10 г/м<sup>3</sup>).

3. Розроблений вимірювач концентрації зваженого вугільного пилу на основі двопроменевого оптико-абсорбційного методу працює в авто-



матичному безперервному режимі з урахуванням таких основних дестабілізуючих факторів рудничної атмосфери, як змінення температури повітря, дисперсності часток вимірюного пилового аерозолі, запиленості оптичних деталей вимірювача.

4. Розроблено алгоритм роботи комп'ютеризованої ІВС, в якому закладено принцип вимірювання параметрів пило-газових компонент з урахуванням дестабілізуючих факторів рудничної атмосфери, оцінювання поточної ситуації у шахтному виробленні та з урахуванням динаміки змінення цих параметрів передбачено прогнозування настання вибухо-небезпечної ситуації в шахті.

**Список літератури:** 1. Соломічев Р.І. Разработка математической модели измерителя концентрации угольной пыли в шахте / Р.І. Соломічев // Сборник научных трудов технологического института южного федерального университета. – Таганрог – 2013. Выпуск № 5. – с. 75 – 80. 2. Соломічев Р.І. Дослідження впливу зміни концентрації компоненту пило газовой суміші на поріг вибуховості в умовах вугільних шахт / А.В. Вовна, А.А. Зорі, Р.І. Соломічев // Наукові праці донецького національного технічного університету. Серія: "Обчислювальна техніка та автоматизація". Донецьк – 2012. – Випуск № 23(201)2012. – с. 145 – 152. 3. Соломічев Р.І. Комплексне врахування впливу компоненту рудничної атмосфери при розрахунку нижньої концентраційної межі вибуховості вугільного пилу. / О.В. Вовна, А.А. Зорі, Р.І. Соломічев // Сборник тезисов докладов первой всеукраинской научно-технической конференции «Современные тенденции развития приборостроения», 19-20 ноября 2012 г., г. Луганск, кафедра «Приборы», ВНУ им. В.Далы. – 2012. – с. 272 – 273. 4. Збірник інструкцій до правил безпеки у вугільних шахтах / [відп. за випуск Г.М. Суслов, С.О. Крутенко]. – К.: Мінпаливенерго, 2003. – 480 с. 5. Соломічев Р.І. Двопроменевий спосіб вимірювання концентрації і дисперсності пилового аерозолі у вугільних шахтах / Р.І. Соломічев // Збірник тез доповідей другої наукової міжнародної конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС–2013). Вінниця: ПП «Едельвейс і К», 2013. – с. 111–113. 6. Вовна О.В. Розробка та дослідження швидкодіючого вимірювача концентрації метану інваріантного до запилення рудничної атмосфери / О.В. Вовна, А.А. Зорі // Наукові праці ДонНТУ. Серія : "Обчислювальна техніка та автоматизація". Донецьк – 2012. – Випуск № 22 (200). – с. 143–150. 7. Вовна А.В. Методы и средства аналитического измерения концентрации газовых компонент и пыли в рудничной атмосфере угольных шахт / А.В. Вовна, А.А. Зорі, В.Д. Корнев, М.Г. Хламов // Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 260 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Solomichev, R.I. "Razrabotka matematicheskoy modeli izmeritel'ya koncentracii ugol'noj pyli v shahte." *Sbornik nauchnykh trudov tehnologicheskogo instituta juzhnogo federal'nogo universiteta*. Taganrog. № 5. 2013. 75–80. Print. 2. Solomichev, R.I., Vovna, A.V. and Zori, A.A. "Doslidzhennya vplyvu zminy kontsentratsiyi komponenty pylo hazovoyi sumishi na porih vybukhovosti v umovakh vuhil'nykh shakht". *Naukovi pratsi donets'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu*. Seriya: "Obchyslyval'na tekhnika ta avtomatyzatsiya". № 23(201). Donetsk, 2012. 145–152. Print. 3. Solomichev, R.I., Vovna, A.V. and Zori A.A. "Kompleksne vrakhuvannya vplyvu komponent rudnychnoyi atmosfery pry rozrakhunku nizhn'oyi kontsentratsiyanoi mezhi vybukhovosti vuhil'noho pyly". *Sbornyk tezysov dokladov pervoy vseukraynskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsyy «Sovremennyye tendentsyy razvityya przyborostroenyuya»*. Luhansk, kafedra «Prybory», VNU im. V.Dalya. 2013. 273–273. Print. 4. Suslov, G.M. and Krutenko, S.O. Zbirnyk instruktсий do

pravyl bezpeky u vuhil'nykh shakhtakh. Kyiv, Minpalivenergo, 2003. 480 pp. Print. **5.** Solomich, R.I. "Dvopromenevyi sposib vymiryuvannya konsentratsiyi i dyspersnosti pylovoho aerolyu u vuhil'nykh shakhtakh". *Zbirnyk tez dopovidey druhoi naukoyi mizhmarodnoyi konferentsiyi «Vymiryuvannya, kontrol' ta diahnozyka v tekhnichnykh systemakh» (VKDT-S-2013)*. Vinnytsya: PP «Edeľ'veys i K», 2013.111–113. Print. **6.** Vovna, A.V. and Zori A.A. "Rozrobka ta doslidzhennya shvydkodiyuchoho vymiryuvacha konsentratsiyi metanu invariantnoho do zaplyennya rudnychnoyi atmosfery". *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya : "Obchyslyval'na tekhnika ta avtomatyzatsiya"*. № 22(200). Donets'k, 2012. 143–150. Print. **7.** Vovna, A.V., Zori, A.A., Korenev, V.D. and Hlamov, M.G. "Metody i sredstva analiticheskogo izmernenija koncentracij gazovykh komponent i pyli v rudnichnoy atmosfere uhol'nykh shaht". Doneck: GVUZ «DonNTU», 2012. 260 pp. Print

*Надійшла (received) 05.05.2014*