

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

УДК 622.412.13

DOI <https://doi.org/10.32782/EIS/2024-105-7>

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВИБУХОЗАХИСТУ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК ШАХТ

Голінько Василь Іванович,

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0001-6069-0515

Голінько Олександр Васильович,

аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-1980-3017

Муха Олег Анатолійович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-1311-8708

Метою цієї публікації є проведення досліджень щодо виявлення випадків несанкціонованого втручання в роботу засобів вибухозахисту гірничих виробок шахт. Для досягнення поставленої мети проведено дослідження особливостей роботи стаціонарних аналізаторів метану за несанкціонованого обмеження доступу контрольованої атмосфери до датчика. Отримані експериментальні дані та їх статистичний аналіз апробованими методами дали змогу обґрунтувати алгоритм обробки сигналу про вміст метану й автоматично, дистанційно виявляти факт несанкціонованого втручання в роботу апаратури газового захисту, чим підвищити надійність контролю вибухонебезпечності гірничих виробок шахт.

Ключові слова: рудникова атмосфера, датчик, метан, газовий захист.

Holinko Vasyi, Holinko Oleksandr, Mukha Oleh. Improving the reliability of explosion protection of mine workings

The purpose of this publication is to conduct research on the detection of cases of unauthorized interference in the operation of the explosion protection equipment of the mine workings. In order to achieve the goal, a study of the peculiarities of the operation of stationary methanometers in the event of unauthorized restriction of access of the controlled atmosphere to the sensor. The obtained experimental data and their statistical analysis using proven methods made it possible to justify the methane content signal processing algorithm and to automatically and remotely detect the fact of unauthorized interference in the operation of gas protection equipment, thereby increasing the reliability of monitoring the explosiveness of mine workings.

Key words: mine atmosphere, sensor, methane, gas protection.

Вступ. Гірничо-геологічні умови вугільних родовищ України характеризуються великою складністю, видобуток вугілля на деяких вугільних родовищах здійснюється на глибині понад тисячу метрів. Це зумовлює наявність великої кількості небезпечних і шкідливих виробничих чинників, що призводять до високого рівня травматизму, профзахворювань та аварійності. Серед підземних аварій особливої небезпеку становлять вибухи метаноповітряних сумішей. За частотою прояву ці аварії становлять у середньому 4%, а збитки від них перевищують

10%. Тому проблема підвищення надійності вибухозахисту гірничих виробок шахт, особливо за аерогазовим фактором, є однією з найбільш актуальних для вугледобувної галузі [1].

Постановка задачі. Наявні методи контролю вмісту метану в рудниковій атмосфері [2] засновані на відмінності фізико-хімічних властивостей метану та неконтрольованих компонентів рудникової атмосфери (табл. 1).

Найбільшого поширення у вугільній промисловості набули оптичні, термокаталітичні та термомоніторингові методи контролю вмісту

Фізико-хімічні властивості метану та неконтрольованих компонентів рудникової атмосфери

Назва величини	Одиниці вимірювання	Значення величин для газів					
		Повітря	CH ₄	C ₂ H ₆	H ₂	CO	CO ₂
Густина	кг/м ³	1,293	0,717	1,357	0,0899	1,25	1,977
Питома теплота згорання	Дж/Кмоль	-	8924	15624	2874	2834	-
Коефіцієнт дифузії	м ² /с	-	19,64	11,64	664	19,24	13,94
Коефіцієнт заломлення		1,000292	1,000441	1,000696	1,000138	1,000334	1,000450
Теплопровідність	Вт/(м К)	2,44	3,14	1,84	17,94	2,354	1,44
Теплоємність	КДж/(Кмоль К)	29,15	39,82	51,9	28,76	28,47	45,2
Температура самозагорання	°С	-	645	472	510	610	-
Нижча межа вибуховості	об. %	-	5	3,2	4	12,5	-
Верхня межа вибуховості	об. %	-	15	12,5	75,2	74,2	-
Довжини хвиль максимального поглинання	мкм	-	3,31; 7,7	-	25	2,37; 4,65	2,7; 4,2; 15

метану [2]. Історично одним із перших методів контролю вмісту метану в рудничній атмосфері, який знайшов широке застосування, став рефрактометричний метод [2]. Він заснований на відмінності коефіцієнтів заломлення світла метаном і повітрям. Цей метод вимірювання широко використовується в шахтних інтерферометрах і значно рідше – у стаціонарних рефрактометричних газоаналізаторах [3]. Одним із недоліків рефрактометричного методу є вплив на зміщення інтерференційної картини таких змінних компонентів рудничної атмосфери, як діоксид вуглецю та пари води. У шахтних інтерферометрах цей вплив усувається шляхом попереднього осушення аналізованого повітря та поглинання CO₂ хімічним вапняним поглиначом. До переваг методу належить мала інерційність. Однак реалізувати цю перевагу методу в стаціонарних газоаналізаторах надзвичайно складно через необхідність захисту оптичних елементів від пилу й вологи.

Іншим різновидом оптичного методу, на основі якого в минулому неодноразово робилися спроби створення засобів контролю метану для швидкодіючого газового захисту (що володіють малою інерційністю), є оптичний абсорбційний метод. Метод заснований на вибірковому поглинанні променистої енергії газами в інфрачервоній частині спектра. Для метану характерними довжинами хвиль максимального поглинання є випромінювання з довжиною хвиль 3,31 та 7,7 мкм. Роботи у сфері створення засобів контролю метану,

заснованих на абсорбційному методі, здійснювалися у двох напрямках [2, 4].

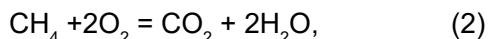
Перший напрям полягає у створенні бездисперсійних аналізаторів із вибірковим оптико-акустичним приймачем [5], а другий – у розробці і використанні вузькосмугових або монохроматичних джерел випромінювання з довжиною хвилі, що відповідає максимуму поглинання метану, і в застосуванні широкосмугових оптичних приймачів [4]. Перевагою абсорбційного методу є його вибірковість, мала інерційність і можливість вимірювання концентрації метану безпосередньо в потоці рудникового повітря. Однак необхідність застосування складних оптико-акустичних приймачів, труднощі захисту оптичних елементів від пилу та вологи, а також відносно висока енергоємність практично унеможливають застосування абсорбційного методу в широких масштабах. Застосування оптичних датчиків доцільне у швидкодіючих аналізаторах метану як додаткових для виявлення раптових викидів метану [6].

Контроль високих концентрацій метану найчастіше здійснюється термокондуктометричним методом. Цей метод заснований на відмінності теплопровідності метану й інших компонентів рудничної атмосфери. Вважають, що теплопровідність суміші газів має адитивні властивості й однозначно залежить від концентрації газів в атмосфері. У такому разі теплопровідність бінарної метаноповітряної суміші можна визначити з виразу [2]

$$\lambda_{cm} = C_M \lambda_M + (1 - C_M) \lambda_B, \quad (1)$$

де λ_{cm} , λ_m , λ_g – коефіцієнти теплопровідності відповідно газової суміші, метану та повітря, Вт/м·К; C_m – молярна частка метану в суміші.

Найбільш вивченим методом контролю вмісту метану в рудниковій атмосфері, який знайшов найширше застосування у створенні стаціонарних засобів автоматичного газового контролю (АГК) та переносних сигналізаторів метану є термokatалітичний. Він полягає в безполум'яному окисненні метану на поверхні каталізатора, яке відбувається за відомою реакцією [2]



і контролі зміни опору чутливого елемента пропорційного кількості тепла, що виділився при цьому, яка пропорційна (до деяких меж) концентрації метану. Системи АГК, побудовані за таким принципом, у 70–80-ті роки минулого століття дали змогу знизити рівень смертельного травматизму гірників більш ніж удвічі.

Відмінною особливістю термokatалітичного методу є те, що в процесі роботи датчика відбувається спалювання метану і за відсутності припливу аналізованої суміші до датчика його показання в міру згоряння метану знижуються. З порушенням правила безпеки ця особливість роботи метанометрів використовується персоналом шахт для відключення засобів вибухозахисту шляхом обмеження доступу контрольованого середовища до датчика. Такі дії, об'єднані терміном «несанкціонований доступ» до датчиків систем АГК, ведуть до зниження надійності вибухозахисту гірничих виробок шахт, істотно підвищують імовірність аварій із катастрофічними наслідками.

Метою цієї публікації є проведення досліджень щодо виявлення випадків несанкціонованого втручання в роботу засобів вибухозахисту гірничих виробок шахт.

Результати роботи. Для досягнення поставленої мети проведено дослідження особливостей роботи стаціонарних метанометрів за несанкціонованого обмеження доступу контрольованої атмосфери до датчика через його часткову ізоляцію від середовища чутливого елемента шляхом обгортання його поліетиленовим пакетом, мокрою тканиною, заливкою фільтр-елемента датчика водою та ін. Особливості роботи в штатному режимі і за обмеження доступу метану до виносного датчика шляхом його обгортання поліетиленовим пакетом зображено на графіках на рис. 1.

Як видно з графіків 1 і 2, після обмеження доступу контрольованої атмосфери до датчика метану за 12–18 хв у 3–5 разів знижується рівень вихідного сигналу датчика, змінюється характер мікро- і макрофлуктуацій сигналу та зміщення частотної характеристики вихідного сигналу в область нижчих частот.

Тому за зміною величини вихідного сигналу й середньоквадратичного відхилення результатів вимірювань від середнього за попередній і поточний проміжок часу можна виявити факт несанкціонованого обмеження доступу контрольованої атмосфери до датчика. Цей факт може бути визначено також щодо зміни частоти, яка відповідає максимуму спектральної характеристики вихідного сигналу аналізатора, для чого можна скористатися апробованими методами статистичного аналізу [7, 8].

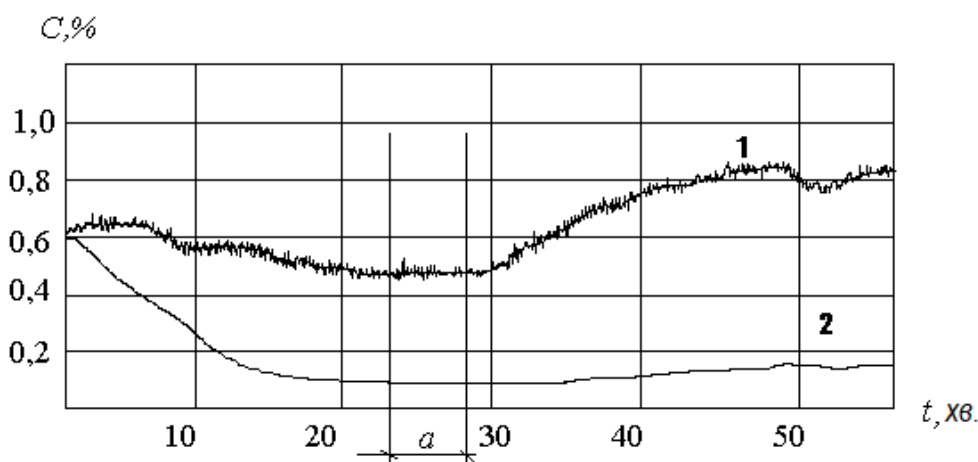


Рис. 1. Фрагменти графіків вихідного сигналу газоаналізаторів:

1 – вихідний сигнал контрольного газоаналізатора; 2 – вихідний сигнал газоаналізатора після обмеження подачі контрольованої атмосфери шляхом обгортання датчика

Відповідно до першого методу автоматичного виявлення примусового обмеження доступу контрольованого середовища до датчика здійснюють у такій послідовності:

1. Визначають середні значення концентрації метану за поточний m -ий, наприклад п'ятихвилинний інтервал:

$$\bar{C}_m = \frac{C_{1m} + C_{2m} + \dots + C_{nm}}{n} = \frac{\sum_{n=1}^n C_{nm}}{n}, \quad (4)$$

де $C_{1m}, C_{2m}, \dots, C_{nm}$ – поточні значення вмісту метану в m -му, наприклад, п'ятихвилинному інтервалі; n – число дискретних значень вмісту метану в m -му п'ятихвилинному інтервалі, розбитому, наприклад, на $n = 10$ підінтервалів;

2. Визначають середні значення вмісту метану, наприклад у кожному з п'яти п'ятихвилинних інтервалів, що передують m -му інтервалу C_{m-i}

$$\bar{C}_{m-i} = \frac{C_{1(m-i)} + C_{2(m-i)} + \dots + C_{n(m-i)}}{n} = \frac{\sum_{n=1}^n C_{n(m-i)}}{n}, \quad (5)$$

де $i = 1, 2, \dots, 5$ – номер, наприклад, п'ятихвилинного інтервалу вимірювання концентрації метану, що передує m -му інтервалу; $C_1(t-i), C_2(t-i), C_n(t-i)$ поточні значення вмісту метану в $(m-i)$ -му інтервалі, передуючому m -му інтервалу;

3. Визначають середнє значення вмісту метану за п'ятихвилинних інтервалів вимірювання, що передують m -му;

$$\bar{C}_5 = \frac{\bar{C}_{m-1} + \bar{C}_{m-2} + \dots + \bar{C}_{m-5}}{n}. \quad (6)$$

4. Визначають середньоквадратичне відхилення поточних значень від середнього вмісту метану в m -му інтервалі вимірювання;

$$Z_1 = \left[\frac{(\bar{C}_m - C_{1(m-i)})^2 + (\bar{C}_m + C_{2(m-i)})^2 + \dots + \left(\frac{\bar{C}_5 \bar{C}_5}{\bar{C}_m} - C_{n(m-i)} \right)^2}{n} \right]. \quad (7)$$

5. Визначають середньоквадратичне відхилення Z_2 від середнього значення C_5 вмісту метану в попередніх m -му інтервалу вимірів:

$$Z_2 = \left[\frac{(\bar{C}_5 - \bar{C}_{m-1})^2 + (\bar{C}_m + \bar{C}_{m-2})^2 + \dots + (\bar{C}_m - \bar{C}_{m-5})^2}{5} \right]. \quad (8)$$

Визначають відносини: $\frac{\bar{C}_5}{\bar{C}_m}$; $\frac{Z_2}{Z_1}$, якщо $\frac{Z_2}{Z_1} \geq 2$ і $\frac{\bar{C}_5}{\bar{C}_m} \geq 3$, роблять висновок про наявність несанкціонованого обмеження доступу

контрольованого середовища до датчика.

Такий же висновок робиться, якщо $\frac{Z_2}{Z_1} \geq 4$.

За другим способом наявність несанкціонованого обмеження доступу контрольованої атмосфери до датчика визначають у такій послідовності.

1. Функцію зміни вихідного електричного сигналу, пропорційного концентрації метану представляють у вигляді ряду гармонійних функцій із кратними частотами основної частоти.

$$f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos k\omega t. \quad (9)$$

де C_k – амплітуда гармонійної функції; k – номер гармоніки; t – час;

2. Визначають середні значення частот, відповідні максимуму спектральної характеристики вихідного сигналу аналізатора в кожному з п'ятихвилинних інтервалів вимірювання метану, що передує m -му:

$$\bar{f}_{m-i} = \frac{f_{1(m-i)} + f_{2(m-i)} + \dots + f_{n(m-i)}}{n} = \frac{\sum_{n=1}^n f_{n(m-i)}}{n}, \quad (10)$$

де $f_{1(m-i)}, f_{2(m-i)}, f_{n(m-i)}$ – частоти, які відповідають максимуму спектральної характеристики вихідного сигналу в i -му п'ятихвилинному інтервалі вимірювання, розбитому, наприклад, на $n = 10$ підінтервалів і попередньому m -му.

3. Визначають середнє значення частоти, відповідне максимуму спектральної характеристики вихідного сигналу аналізатора за п'ять хвилинних інтервалів вимірювання, що передують m -му:

$$\bar{f}_5 = \frac{\bar{f}_{m-1} + \bar{f}_{m-2} + \dots + \bar{f}_{m-5}}{5}. \quad (11)$$

4. Визначають середнє значення частоти, що відповідає максимуму спектральної характеристики вихідного сигналу аналізатора за поточний m -ий інтервал вимірювань:

де f_{1m}, f_{2m}, f_{nm} – частоти, які відповідають максимуму спектральної характеристики вихідного сигналу в m -му п'ятихвилинному інтервалі вимірювання, розбитому, наприклад, на $n = 10$ підінтервалів.

5. Визначаємо відносини $\frac{\bar{f}_m}{\bar{f}_5}$, і якщо $\frac{\bar{f}_m}{\bar{f}_5} \geq 5$, робиться висновок про несанкціоноване обмеження доступу контрольованої атмосфери до датчиків.

У разі zalivanja датчика водою аналізатор найчастіше на тривалий час повністю втрачає чутливість. Однак за обмеженого короточасного впливу води фільтроелемент

не повністю просочується водою. Характер кривих вихідного сигналу для такого випадку наведено на рис. 2. Як бачимо, у початковий момент з постійної часу (менше за 1 хвилину) показання аналізатора 2 знизилися більш ніж у 6 разів. Надалі вихідний сигнал аналізатора 2 без суттєвої затримки в часі практично повторює вихідний сигнал контрольного аналізатора 1. Характерним для останнього випадку є також те, що відносна величина флуктуацій сигналу 2 в часі є практично аналогічною флуктуаціям контрольного сигналу 1, що, на відміну від першого випадку, пояснюється відсутністю проміжної газової ємності. Відносна величина мікрофлуктуацій вихідного сигналу випробуваного аналізатора в цьому випадку також дещо зменшується, проте не настільки суттєво, як у попередньому.

Для виявлення випадку заливки фільтрелемента термокаталітичного датчика водою можуть бути використані такі ознаки:

- характерне різке зниження показань аналізатора за час менше ніж 1 хвилина, а потім встановлення значно меншого рівня вихідного сигналу;

- зниження відносної величини мікрофлуктуацій вихідного сигналу газоаналізатора.

Оскільки різке зниження показань аналізатора з постійною часу менше ніж 1 хвилина може виникнути і за нормальної роботи газоаналізатора, а зниження відносної величини мікрофлуктуацій вихідного сигналу газоаналізатора не настільки суттєве, як у попередньому випадку втручання, для підвищення достовірності виявлення заливки фільтрелемента термокаталітичного датчика водою потрібний

пошук додаткових ознак, що дадуть змогу виявити випадки втручання.

Можливим шляхом виявлення випадків заливання фільтрелемента водою є аналіз перехідних процесів, що виникають у датчиках зі зміною режиму живлення термоелементів [9]. Процес контролю стану газодифузійного фільтра аналізатора в цьому випадку може бути суміщений із процесом діагностики нульових показань [10], за якого величина струму через термоелементи знижується на 20% відносно номінального, і на каталітично активному робочому елементі протягом паузи, потрібної для завершення перехідних теплових процесів, припиняється окислення метану.

Обговорення результатів дослідження. Конструктивне виконання та технологія виготовлення чутливих елементів для термокаталітичних і термокондуктометричних датчиків, що випускаються багатьма підприємствами України, схожі і мають порівняно однакові переваги і недоліки. Чутливі елементи – найбільш уразливий елемент апаратури газового контролю [2]. Тому один із шляхів підвищення надійності АГК полягає в поліпшенні експлуатаційних характеристик датчиків. Досягнення цієї мети здійснювалося завдяки розробці методів коригування нульових показань і чутливості метанометра в атмосфері, що містить метан [2], запобіганню заливанню чутливих елементів датчика водою та підвищенню їх механічної стійкості [11], зниженню похибки вимірювань від впливу зміни умов експлуатації [10] та ін., що дало змогу істотно підвищити технічний рівень і надійність засобів контролю вибухонебезпечності гірничих виробок шахт.

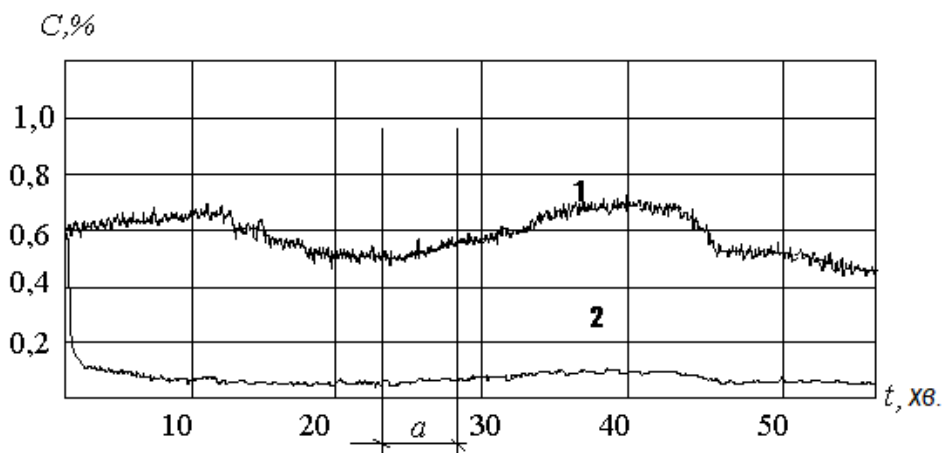


Рис. 2. Фрагменти графіків вихідного сигналу газоаналізаторів:

1 – вихідний сигнал контрольного газоаналізатора; 2 – вихідний сигнал газоаналізатора після заливання фільтрелемента водою

Висновки.

1. Проведено дослідження особливостей роботи стаціонарних аналізаторів метану за несанкціонованого обмеження доступу контрольованої атмосфери до датчика шляхом обгортання виносного датчика газонепроникним матеріалом та заливання фільтрелемента датчика водою.

2. Обґрунтовано алгоритм обробки сигналу про вміст метану, що дає можливість автоматично, дистанційно виявляти факт несанкціонованого втручання в роботу апаратури газового захисту, чим підвищити надійність контролю вибухонебезпечності гірничих виробок шахт.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Безпека та гігієна праці у гірничодобувній галузі та вугільній промисловості в Україні / Міжнародна організація праці. Група технічної підтримки з питань гідної праці та Бюро МОП для країн Центральної та Східної Європи. Київ : МОП, 2018. 36 с.
2. Голинько В. И., Котляров А. К. Контроль взрывоопасности среды в горных выработках и оборудовании угольных шахт : монография / В. И. Голинько, А. К. Котляров. Днепропетровск : Лира, 2010. 368 с.
3. Tahani Aldhafeeri. A Review of Methane Gas Detection Sensors: Recent Developments and Future Perspectives / Tahani Aldhafeeri, Manh-Kien Tran, Reid Vrolyk, Michael Pope, Michael Fowler / *Inventions* 2020, 5, 28.
4. Вовна О. В. Підвищення точності оптоелектронного вимірювача концентрації метану вугільних шахт / О. В. Вовна, А. А. Зорі, Р. М. Ахмедов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Збірник наукових праць. «Електроенергетика та перетворювальна техніка». Харків : НТУ «ХПІ», 2017. № 4 (1226). С. 19–24.
5. Triki M., Nguyen B.T., Vicet, A. Compact sensor for methane detection in the mid infrared region based on quartz enhanced photoacoustic spectroscopy. *Infrared Phys. Technol.* 2015, 69, 74–80.
6. Голинько В. І., Голинько О. В. Методи та алгоритми підвищення швидкодії систем автоматичного газового захисту. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Проблеми моделювання та автоматизації проектування»*. 2021. № 1 (17). С. 79–87.
7. Теорія статистика : навчальний посібник / М. К. Шапочка, О. М. Маценко. Суми : Університетська книга, 2014. 312 с.
8. Сеньо П. С. Теорія ймовірностей та математична статистика : підручник / С. П. Сеньо ; Мін-во освіти і науки України, ЛНУ. Київ : Центр навчальної літератури, 2004. 448 с.
9. Голинько В. І., Голинько О. В. Методи та алгоритми контролю стану газодифузійного фільтра аналізаторів метану. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»*. № 2–35, 2022, № 1–36, 2023. С. 22–29.
10. Алексеев М. О., Голинько О. В. Автоматична діагностика стану стаціонарних термодифузійних газоаналізаторів. *Збірник наукових праць НГУ*. Дніпро : ДВНЗ «НГУ», 2018. № 53. С. 223–229.
11. Пат. 76648 Україна, МПК E21F 17/18, G01F 15/00. Спосіб підвищення механічної стійкості термодифузійного датчика горючих газів / О. К. Котляров, В. І. Голинько, О. В. Білоножко, В. В. Білоножко. Опубл. 15.08.06. Бюл. № 8.

REFERENCES:

1. Bezpeka ta hihiiena pratsi u hirnychodobuvnii haluzi ta vuhilnii promyslovosti v Ukraini [Occupational safety and hygiene in the mining and coal industry in Ukraine] / Mizhnarodna orhanizatsiia pratsi; Hrupa tekhnichnoi pidtrymky z pytan hidnoi pratsi ta Biuro MOP dlia krain Tsentralnoi ta Skhidnoi Yevropy. Kyiv: MOP, 2018. 36 p. [in Ukrainian].
2. Holynko, V.Y., Kotliarov, A.K. (2010). Kontrol vzryvoopasnosti sredy v hornykh vyrabotkakh y oborudovanyu uholnykh shakht : monohrafiya / V.Y. Holynko, A.K. Kotliarov. Dnepropetrovsk: Lyra. 368 p.
3. Tahani Aldhafeeri (2020). A Review of Methane Gas Detection Sensors: Recent Developments and Future Perspectives / Tahani Aldhafeeri, Manh-Kien Tran, Reid Vrolyk, Michael Pope, Michael Fowler / *Inventions*, 5, 28.
4. Vovna, O.V. (2017). Pidvyshchennia tochnosti optoelektronnoho vymiriuvacha kontsentratsii metanu vuhilnykh shakht [Increasing the accuracy of the optoelectronic meter of methane concentration in coal mines] / O.V. Vovna, A.A. Zori, R.M. Akhmedov. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Zbirnyk naukovykh prats. "Elektroenerhetyka ta peretvoriuvalna tekhnika". Kharkiv: NTU "KhPI". № 4 (1226). P. 19–24 [in Ukrainian].
5. Triki, M., Nguyen, B.T., Vicet, A. (2015). Compact sensor for methane detection in the mid infrared region based on quartz enhanced photoacoustic spectroscopy. *Infrared Phys. Technol.*, 69, 74–80.

6. Holinko, V.I., Holinko, O.V. (2021). Metody ta alhorytmy pidvyshchennia shvydkodii system avtomatychnoho hazovoho zakhystu [Methods and algorithms for increasing the speed of automatic gas protection systems]. Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Serii: "Problemy modeliuвання ta avtomatyzatsii proektuvannia". № 1 (17). P. 79–87 [in Ukrainian].
7. Teoriia statystyka [Theory of statistics]: navchalnyi posibnyk / M.K. Shapochka, O.M. Matsenko. Sumy: Universytetska knyha, 2014. 312 p. [in Ukrainian].
8. Seno, P.S. (2004). Teoriia ymovirnostei ta matematychna statystyka [Probability theory and mathematical statistics]: pidruchnyk / S.P. Seno; Min-vo osvity i nauky Ukrainy, LNU. Kyiv: Tsentr navchalnoi literatury, 2004. 448 p. [in Ukrainian].
9. Holinko, V.I., Holinko, O.V. (2023). Metody ta alhorytmy kontroliu stanu hazodyfuziinoho filtra analizatoriv metanu [Methods and algorithms for monitoring the state of the gas diffusion filter of methane analyzers]. Naukovi pratsi DonNTU. Serii: "Informatyka, kibernetyka ta obchysliuvalna tekhnika". № 2–35, № 1–36. P. 22–29 [in Ukrainian].
10. Alekseiev, M.O., Holinko, O.V. (2018). Avtomatychna diahnostyka stanu statsionarnykh termokatalitychnykh hazoanalizatoriv [Automatic diagnostics of the state of stationary thermocatalytic gas analyzers]. Zbirnyk naukovykh prats NHU. Dnipro: DVNZ "NHU". № 53. P. 223–229 [in Ukrainian].
11. Pat. 76648 Ukraina, MPK E21F 17/18, G01F 15/00. Sposib pidvyshchennia mekhanichnoi stiikosti termokatalitychnoho datchyka horiuchykh haziv [A method of increasing the mechanical stability of a thermocatalytic sensor of combustible gases] / O.K. Kotliarov, V.I. Holinko, O.V. Bilonozhko, V.V. Bilonozhko. Opubl. 15.08.06. Biul. № 8 [in Ukrainian].