

УДК 622.8

Є.С. РУДНЄВ, канд. техн. наук, доц., В.А. ГАЛЬЧЕНКО, аспір.,  
 Е.М. ФІЛАТЬЄВА, д-р філос. наук, ст. викл., М.І. АНТОЩЕНКО, д-р техн. наук, проф.  
 Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

## СІРКА У ВИКОПНОМУ ВУГІЛЛІ ЯК ФАКТОР ПРОЯВУ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШАХТОПЛАСТІВ

**Мета.** Розробити спосіб визначення сукупностей шахтопластів, що відрізняються між собою вмістом сірки в органічній та мінеральних частинах вугілля та довести можливість та необхідність використання результатів цих досліджень для прогнозу небезпечних властивостей шахтопластів.

**Методи дослідження.** Методика заснована на попередньому розгляді співвідношення вмісту загальної сірки та сірки в горючій масі, а потім їх перерахунку із сухого стану на стан, близький до умов ведення гірничих робіт із залученням вологості вугілля та виходу золи для пластових (незбагачених) та збагачених проб. Такий підхід дозволив отримати додаткову інформацію щодо впливу процесів підготовки проб вугілля для їх аналізу на сухий беззолний стан палива та встановити вплив цих процесів на вміст сірки в органічній масі та мінеральних домішках, що необхідно для достовірного прогнозу небезпечних властивостей шахтопластів.

**Наукова новизна.** Вміст загальної сірки в органічній масі та мінеральних домішках, не дорівнює в загальному випадку, сумі її вмісту в горючій та негорючій частинах. Згідно з експериментальними даними, можливе будь-яке співвідношення між цими показниками для окремих шахтопластів.

**Практичне значення.** Різні співвідношення між вмістом сірки в органічній масі та мінеральних домішках у порівнянні з її вмістом у горючій та негорючій частинах дозволяють за цими ознаками проводити градацію шахтопластів за ступенем можливого прояву ними небезпечних властивостей, що необхідно для вдосконалення нормативної бази щодо безпечного ведення гірничих робіт.

**Результати.** Випадковий вміст сірки в органічній масі та мінеральних домішках вугілля окремого шахтопласту є однією з причин фактичного співвідношення між основними компонентами органічної маси та мінеральних домішок, що визначають значною мірою прояв небезпечних властивостей шахтопластів під час гірничих робіт. Наведені в нормативно-довідкових документах з якості палива значення основних компонентів на горючий стан адекватно відображають споживчі властивості вугілля, але не відповідають їх стану в зоні ведення гірничих робіт через наявність мінеральних домішок і вологості. У сучасних нормативних документах щодо безпечного ведення гірничих робіт не розглядаються показники стану вугілля, наведеного до його вихідного (робочого) стану.

**Ключові слова:** вугілля, стан, сірка, небезпечні властивості, нормативна база, удосконалення.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-53-21-28

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Сірка міститься у всіх видах твердого палива в якості різних сполук, що входять до органічної та мінеральної частини палива. У мінеральній масі вугілля зустрічається, головним чином, у вигляді сульфатів (в основному кальцію та заліза) та дисульфідів заліза, в органічній масі - у вигляді органічних сполук.

Сумарний вміст в органічній та мінеральній масах вугілля називають загальною ( $S_t$ ). Розрізняють три основні різновиди (форми) сірки вугілля: сірка сульфатна  $S_{SO_4}$  - частина загальної сірки вугілля, що входить до складу неорганічної маси вугілля у вигляді сульфатів металів; сірка піритна  $S_p$  - частина загальної сірки, що входить до складу неорганічної маси вугілля у вигляді дисульфідів металів (піриту та марказиту); сірка органічна  $S_o$  - частина загальної сірки, що входить до складу органічних сполук. Відомий четвертий різновид сірки у вугіллі - сірка елементарна, але її зазвичай не визначають через незначний вміст [1]. Загальну сірку та її різновиди умовно перераховують на елементну сірку

$$S_t = S_{SO_4} + S_p + S_o. \quad (1)$$

Сірка небажана та шкідлива частина палива. При спалюванні вугілля вона виділяється у вигляді  $SO_2$ , забруднюючи та отруюючи навколишнє середовище та викликаючи корозію металевих поверхонь, зменшує теплоту згоряння палива, а при коксуванні переходить у кокс, погіршуючи його властивості. Вибір шляхів використання вугілля багато в чому залежить від вмісту в них загальної сірки та її різновидів. Форми знаходження сірки визначають для повної характеристики високосірчистих та високозолевих палив.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Вміст сірки у вугіллі визначає як якість його споживчих властивостей, а й істотно впливає на безпеку ведення гірничих робіт. Прояв небезпечних властивостей вугільних шахтопластів полягають у виділенні вибухонебезпечних газів, раптових

викидів вугілля та газу, виникненні самозаймання вугілля, вибуховості вугільного пилу та деяких інших негативних явищ, які у багатьох випадках закінчуються аваріями з тяжкими наслідками для працюючих [2-4]. Зокрема при збільшенні вмісту у вугіллі загальної сірки від 1 до 6% зростає ймовірність виникнення ендегенної пожежі більш ніж утричі [5]. Вплив видів та форм знаходження сірки у вкопному вугіллі на прояв небезпечних властивостей шахтопластів, на відміну від їх впливу на споживчі якості вугілля, в даний час залишаються практично не вивченими. Деякі винятки з цього правила є використання показника загальної сірки для прогнозу ймовірності виникнення ендегенних пожеж у вугільних шахтах [6]. З цієї причини дослідження, пов'язані із встановленням впливу вмісту сірки в органічній та мінеральній частинах вкопного вугілля на прояв небезпечних властивостей шахтопластів під час гірничих робіт відносяться до актуальної проблеми вугільної промисловості.

**Постановка задачі.** Розробити спосіб визначення сукупностей шахтопластів, що відрізняються між собою вмістом сірки в органічній та мінеральних частинах вугілля та довести можливість та необхідність використання результатів цих досліджень для прогнозу небезпечних властивостей шахтопластів.

**Викладення матеріалу та результати.** Ідея полягає у використанні та науковому обґрунтуванні застосування експериментальних даних для прогнозу небезпечних властивостей шахтопластів, накопичених протягом кількох десятиліть для оцінки споживчих якостей вугілля та наведених у нормативно-довідкових документах [7, 8].

Методика заснована на попередньому розгляді співвідношення вмісту загальної сірки та сірки в горючій масі, а потім їх перерахунку із сухого стану на стан, близький до умов ведення гірничих робіт із залученням вологості вугілля та виходу золи для пластових (незбагачених) та збагачених проб. Такий підхід дозволив отримати додаткову інформацію щодо впливу процесів підготовки проб вугілля для їх аналізу на сухий беззольний стан палива та встановити вплив цих процесів на вміст сірки в органічній масі та мінеральних домішках, що необхідно для достовірного прогнозу небезпечних властивостей шахтопластів.

Методика проведення досліджень обумовлена способами визначення значень сірки в органічних та мінеральних складових вугілля. Відомі кілька методів визначення загальної сірки – від класичного гравіметричного методу Ешка до сучасних інструментальних методів аналізу. В основі цих методів лежить реакція окиснення всіх форм сірки до оксидів з подальшим визначенням їх різними способами [1].

Метод Ешка заснований на спалюванні навіски вугілля шляхом спікання із сумішшю оксиду магнію та безводного вуглекислого натрію в окислювальній атмосфері при  $(800 \pm 25)^\circ\text{C}$ . У цих умовах відбувається згоряння органічної маси палива і перетворення сірки на сульфати натрію і магнію. Сульфати переводять у розчин із наступним осадженням. По масі осаду розраховують вміст сірки у навісці вугілля.

Стандартні методи визначення форм сірки засновані на різній розчинності сполук сірки в розчинах соляної та азотної кислот у певних умовах: сульфати розчиняються в соляній та азотній кислотах, пірити не розчиняються в соляній кислоті, але розчиняються в азотній, а органічні сполуки сірки не розчиняються ні в соляній, ні в азотній кислотах. Вміст сульфатної сірки у вугіллі невеликий й зазвичай становить 0,1-0,2% [1].

Різновид органічної сірки вивчений недостатньо, тому що відсутні методи виділення органічних сполук із вугілля. Умовно за вміст органічної сірки приймають різницю між вмістом загальної сірки та сумою сульфатної та піритної на підставі рівняння 1. Органічну сірку зазвичай відносять до елементного складу органічної маси вугілля і розглядають спільно з вмістом кисню, водню, азоту та вуглецю. Слід мати на увазі, що азот, органічна сірка та пластометричні показники відносяться суто до органічної маси аналітичної проби. Аналітична проба зазвичай характеризується крупністю 0-0,2 мм (-212 мкм) та повітряно сухим станом [1].

У довідково-нормативних документах [4, 5] наведено відомості про загальну сірку та сірку в горючій масі вугілля. Основними елементами горючої маси є вуглець ( $C_r$ ), водень ( $H_r$ ), сірка ( $S_r$ ), азот ( $N_r$ ) та кисень ( $O_r$ ). Їхня сума, як правило, становить понад 98-99% горючої маси. З цієї причини дані у довідково-нормативних документах [7, 8] наведені за умови  $\Sigma C_r, H_r, S_r, N_r, O_r = 100\%$ .

Крім сірки ( $S_r$ ) у довідково-нормативних документах [7, 8] наведено також дані про вміст

загальної сірки у горючій масі ( $S_t^d$ ). В даному випадку представлені відомості [7, 8] про загальну сірку ( $S_t^d$ ) у паливі та в її горючій масі ( $S_r$ ). Отже, є негорюча частина сірки ( $S^H$ ), яка залишається в золі після згоряння палива. Загальну сірку в паливі можна уявити як її суму горючої та негорючої частин

$$S_t^d = S^r + S^H. \quad (2)$$

Паралельно з таким співвідношенням загальну сірку палива можна уявити також сіркою, що міститься відповідно в органічній масі ( $S_o$ ) та мінеральних домішок ( $S_{SO_4}, S_p$ ). На підставі залежностей 1 та 2 слід очікувати приблизну рівність між їхніми правими частинами

$$S_{SO_4} + S_p + S_o \approx S^r + S^H. \quad (3)$$

У першому приближенні в деяких випадках розглядають приблизну рівність  $S^r \approx S_o$ . Таке умовне припущення зроблено виходячи з того, що більшість органічної маси палива є горючою. Близькість значень між  $S_r$  та  $S_o$  визначається кількістю негорючих речовин в органічній масі та залежить від виходу золи ( $A^c$ ) при спалюванні палива. Чим менше значення  $A^c$ , тим меншою мірою відрізняються між собою значення  $S_r$  та  $S_o$ . Теоретично рівність між показниками на практиці досягти неможливо, оскільки при спалюванні твердого палива завжди є сухий залишок у вигляді золи.

Аналогічна ситуація спостерігається із горючістю мінеральних домішок. Якщо значення  $S_r$  та  $S_o$  близькі між собою, то вочевидь виходячи із рівності 3, та значення  $S^H$  мало буде відрізнятися від суми  $S_{SO_4}$  та  $S_p$ . У мінеральних домішках, крім негорючих речовин, завжди присутні горючі. Таким чином, при дотриманні приблизної рівності 3 для вугілля всіх шахтопластів, не завжди буде дотримуватися рівності  $S^r = S_o$  та  $S^H = S_{SO_4} + S_p$ . Приблизна рівність  $S^r \approx S_o$  для даних  $S_r$ , наведених у нормативно-довідкових документах [7, 8], забезпечується попереднім збагаченням проб до зольності ( $A^c$ ) менше 10% [1] і подальшим розглядом показників на сухий беззольний стан вугілля (daf). У цьому випадку ігнорується фактична присутність мінеральних домішок у паливі, а отже, не розглядається фактичний вміст сірки у природних умовах. Знаходження сірки у видалених при збагаченні мінеральних домішках немає істотного значення для визначення споживчих властивостей вугілля, але знання її вмісту необхідне для прогнозу прояву небезпечних властивостей шахтопластів під час гірничих робіт.

Враховуючи різні методики визначення загальної сірки згідно з рівняннями (1) і (2) слідує, що в загальному випадку значення  $S_t$  не може однозначно дорівнювати  $S_t^d$ . Можливі три варіанти співвідношення між ними:

1.  $S_t = S_t^d$ . Цьому варіанту відповідає рівності  $S_o = S^r$  та  $S_{SO_4} + S_p = S^H$ . Вміст загальної сірки ( $S_t$ ) визначають у відсотках по відношенню до суми органічної маси ( $M_o$ ) та мінеральних домішок ( $M_n$ ). Вміст загальної сірки в паливі ( $S_t^d$ ) розраховується по її відношенню до суми горючої маси ( $\Gamma$ ) та золи ( $A^c$ ). Для розглянутого варіанта це означає що

$$\frac{S_t}{M_o + M_n} = \frac{S_t^d}{\Gamma + A^c}, \text{ або } S_t(\Gamma + A^c) = S_t^d(M_o + M_n). \quad (4)$$

Для розглянутого варіанта рівність  $S_t$  та  $S_t^d$  можливе лише за умови  $\Gamma + A^c = M_o + M_n$ . Воно дотримується, якщо горюча частина ( $\Gamma$ ) дорівнює органічній масі ( $M_o$ ), а вихід золи ( $A^c$ ) - мінеральним домішкам ( $M_n$ ). Вихід золи в збагачених пробах вугілля явно не може дорівнювати вмісту мінеральних домішок, тому що їх частина видаляється при збагаченні проб до значень золи, як правило, менше десяти відсотків. Практично приблизна рівність  $S_t \approx S_t^d$  може виконуватися в окремих випадках тільки для шахтопластів з малозольним вугіллям ( $A^c < 10\%$ ) або збагачених до аналогічного рівня та низьким виходом золи.

2.  $S_t < S_t^d$ . Для цієї нерівності справедливе співвідношення

$$\frac{S_t}{M_o + M_n} < \frac{S_t^d}{\Gamma + A^c}, \text{ або } S_t(\Gamma + A^c) < S_t^d(M_o + M_n). \quad (5)$$

В усіх випадках дотримується приблизна рівність органічної маси ( $M_o$ ) і горючої складової вугілля ( $\Gamma$ ), тобто  $M_o \approx \Gamma$ . Внаслідок цього висока ймовірність виконання нерівності (5) спостерігатиметься, якщо вихід золи ( $A^c$ ) свідомо нижче вмісту мінеральних домішок ( $M_n$ ). Співвідношення  $A^c < M_n$  гарантовано для усіх випадках аналізу збагачених проб, оскільки при збагаченні видаляється частина мінеральних домішок з допомогою чого знижується вихід золи. Наприклад, зольність пластової проби може перевищувати 40%, а після збагачення вихід золи становить, у більшості випадків менше 10% [7, 8]. Це свідчить, що в процесі збагачення видаляється значна частина мінеральних домішок, а разом з ними і деяка частина сірки в цих домішках.

3.  $S_t > S_t^d$ . Цій нерівності відповідає вираз

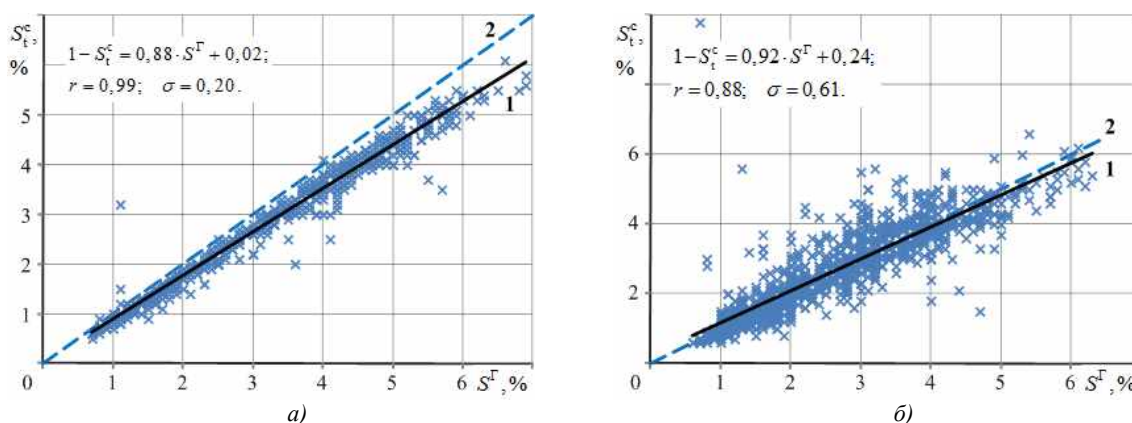
$$S_t (\Gamma + A^c) > S_t^d (M_o + M_n) \quad (6)$$

Якщо умовно  $\Gamma \approx M_o$ , то для дотримання нерівності необхідно, щоб  $A^c > M_n$ . Таке співвідношення неможливе через вихід золи з мінеральних домішок у вигляді деякої її частини (негорючого залишку), що у всіх випадках визначає співвідношення  $M_n \geq A^c$ . Отже, приблизна рівність між  $\Gamma$  та  $M_o$  може не дотримуватися, а додатковою горючою масою є деяка частина мінеральних домішок, видалених при збагаченні. Чим більше значення виходу золи з вугілля пластової проби, тим вища ймовірність нерівності  $S_t > S_t^d$ .

З наведеного аналізу слідує, що в реальних умовах відпрацювання вугільних шахтопластів можливий будь-який варіант співвідношення між  $S_t$  та  $S_t^d$ , що не враховується чинними нормативними документами щодо безпечного ведення гірничих робіт.

У нормативно-довідкових документах [7, 8] наведено загальну сірку  $S_t^c$ , значення якої відображають її вміст у сухій пластовій пробі вугілля при виході золи  $A^c$ . Вихід золи  $A^c$  відповідає певному вмісту в органічній масі та мінеральних домішках негорючих речовин. Відомо також [7, 8] для вугілля кожного шахтопласту вміст сірки  $S_r$  в горючій частині.

Взаємозалежність між ними  $S_t^c$  та  $S_r$  показує прямо-пропорційний зв'язок між ними (рис. 1). На підставі даних, наведених в обох джерелах [7, 8], встановлено тісну кореляційну залежність. Коефіцієнти кореляції ( $r$ ) відповідно дорівнюють 0,99 та 0,88. Близькі між собою та коефіцієнти регресії рівнянь (1). Вони відповідно дорівнюють 0,88 і 0,92, що свідчить про відсутність важливих відмінностей експериментальних даних, наведених у різних джерелах.



**Рис. 1.** Взаємозалежність між значеннями загальної  $S_t^c$  та сірки горючої частини  $S_r$  для шахтопластів згідно даних відповідно [7] (а) та [8] (б): 1 - усереднюючі прямі; 2 - бісектриси координатних сіток; x - експериментальні дані;  $r$  - коефіцієнти кореляції;  $\sigma$  - середньоквадратичні відхилення

Різниця між  $S_r$  та  $S_t^c$  для окремих шахтопластів обумовлена як різним співвідношенням вмісту між органічною масою та мінеральними домішками, так і відмінностями між горючими та негорючими складовими палива. Бісектриси координатних сіток (2) відповідає першому гіпотетичному варіанту співвідношення, коли горюча частина палива знаходиться тільки в органічній речовині ( $S^r = S_o$ ), а негорюча ( $S^H$ ) дорівнює мінеральним домішкам ( $S_{SO_4} + S_p$ ). Виходячи із значень коефіцієнтів регресії рівнянь (1), відповідно 0,88 (рис. 1а) і 0,92

(рис. 1б), які менше одиниці слідує, що в більшості випадків такий варіант співвідношення між аналізованими параметрами на практиці малоймовірний. З цієї причини умовна рівність між горючою частиною палива та органічною масою на підставі експериментальних даних [7, 8] не підтверджується. Не дотримується також відповідність негорючої частини палива до її мінеральних домішок. Різне можливе співвідношення між показниками вмісту органічної маси, мінеральних домішок, горючою та негорючою частинами палива, визначає випадковість співвідношення між  $S_t^c$  та  $S_t^r$  для окремих шахтопластів. Це підтверджується розташуванням індивідуальних експериментальних даних для шахтопластів як вище, так і нижче усереднюючих прямих (1) і бісектрис (2) координатних сіток (рис. 1а, б). В більшості випадків (728 з 734) дотримується нерівність  $S_t^c < S_t^r$  і лише для шести шахтопластів відповідно [7] спостерігалось співвідношення  $S_t^c \geq S_t^r$  (табл. 1).

Таблиця 1

Відомості про шахтопласти [7], для вугілля якого вміст загальної сірки ( $S_t^c$ ) дорівнює або перевищує вміст сірки в горючій масі ( $S_t^r$ )

| Шахта               | Пласти         |                | Зольність, %    |                  | Вміст сірки, $S_t^c$ , % | Елементний склад на горючу масу, % |       |       |       |       |
|---------------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|--------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                     | найменування   | геолог. символ | пластової проби | збагаченої проби |                          | $C_T$                              | $H_T$ | $S_T$ | $N_T$ | $O_T$ |
| № 4-21              | Смоляннівський | $h_7$          | 6,5             | —*               | 1,0                      | 85,9                               | 5,3   | 1,0   | 1,5   | 6,3   |
| № 11 Рау            | Рау            | $m_3$          | 17,0            | 3,7              | 3,2                      | 89,3                               | 4,7   | 1,1   | 1,6   | 3,3   |
| № 1 Великомоствська | Сокальський    | $n_7^H$        | 15,3            | 6,8              | 4,1                      | 81,7                               | 5,4   | 4,0   | 1,2   | 6,7   |
| № 4-6               | Подремовський  | $h_2^1$        | 20,0            | 15,8             | 2,5                      | 92,4                               | 2,1   | 2,5   | 1,2   | 1,8   |
| № 12 Західна        | Алмазний       | $l_3$          | 17,2            | —                | 1,5                      | 94,8                               | 2,2   | 1,1   | 1,2   | 0,7   |
| № 60                | Блазовський    | $i_3$          | 4,5             | —                | 1,2                      | 95,8                               | 1,5   | 1,2   | 1,0   | 0,5   |

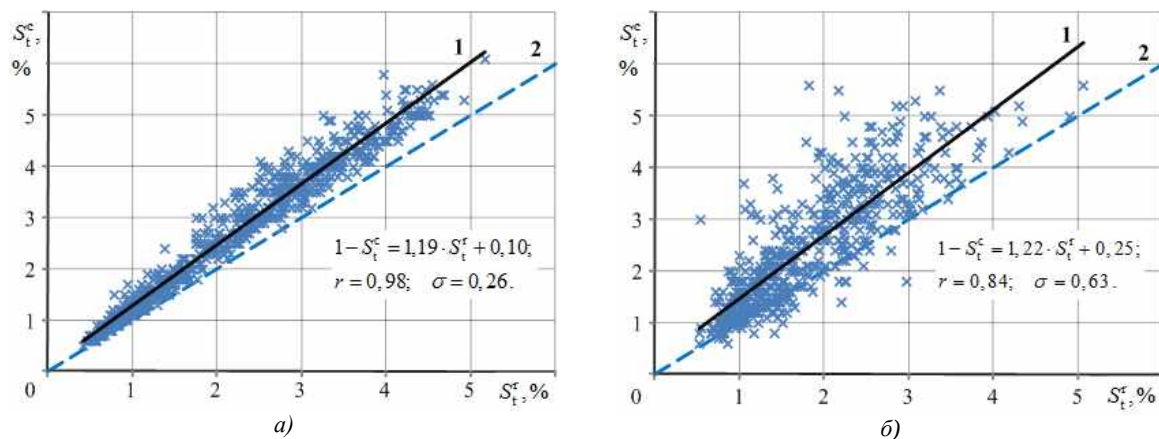
Примітка: \* - проби не збагачувалися

Методики визначення всіх показників споживчих властивостей вугілля [7, 8] базуються на видаленні деякої негорючої частини та зайвої вологи. З цієї причини практично всі показники наведено на сухий беззольний стан, що не відповідає стану вугілля у зоні ведення гірничих робіт. Наявність експериментальних даних [7, 8] про вологість вугілля ( $W$ ) та вихід золи ( $A^c$ ) надали можливість перерахувати значення  $S_t$  на робочий стан вугілля ( $S_t^r$ ) по залежності [1, 9]

$$S_t^r = S_t^c \cdot \frac{100 - (W + A^c)}{100} \quad (7)$$

Отримані значення порівняли із вмістом загальної сірки  $S_t^c$  (рис. 2), наведеними у довідниках [7, 8]. Попередній аналіз показує, що таке співвідношення може спостерігатися для шахтопластів з різним ступенем метаморфізму вугілля (зміна  $C_T$  від 81,7 до 95,8%) та з різним виходом золи для пластових та збагачених проб. Умови виникнення розглянутого співвідношення між  $S_t^c$  та  $S_t^r$  вимагають залучення для аналізу значень всіх компонентів, що входять як у горючу, так і негорючу частину палива. Вирішення цього завдання потребує окремого розгляду із залученням необхідної кількості статистичних даних. Її можна вирішити з використанням відомостей [8], що підтверджується розташуванням значної кількості експериментальних даних вище бісектриси 1 координатної сітки (рис. 1б).

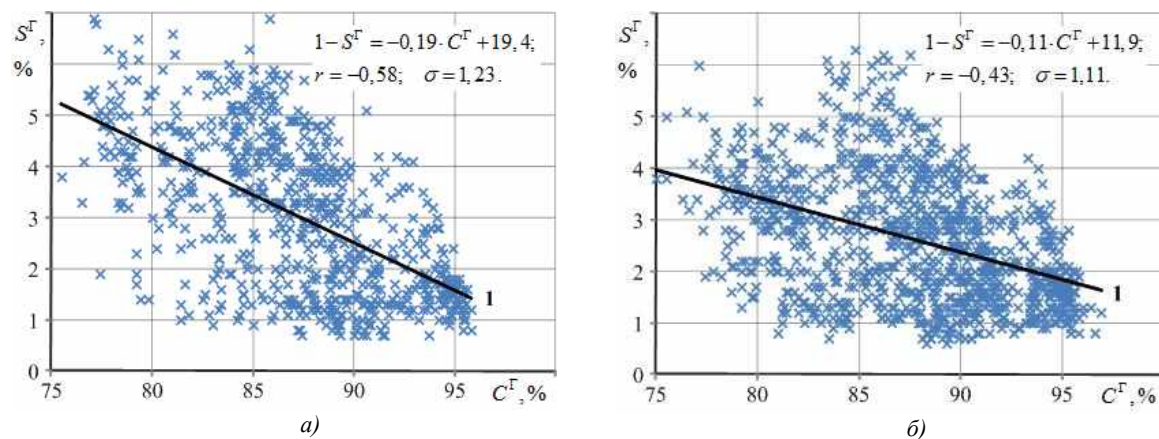
В обох випадках прямі 1 розташовані вище бісектрис 2 координатних сіток, що вказує на вплив вологи ( $W$ ) при перерахунку палива з його сухого на робочий стан. Виходячи з розташування усереднюючих прямих (1) (коефіцієнти регресії 1,19 та 1,22) і бісектрис 2 координатних сіток слідує, що в середньому волога впливає на значення загальної сірки більше 20%. Якщо взяти до уваги правило "трьох сигм", то індивідуальний вплив вологи для окремих шахтопластів можна оцінити приблизно на 60%. Це свідчить, що для оцінки прояву небезпечних властивостей шахтопластів, крім наявності мінеральних домішок, для уникнення значних похибок необхідно враховувати і фактичну вологість вугілля в зоні ведення гірничих робіт.



**Рис. 2.** Взаємозалежність між експериментальними значеннями вмісту загальної ( $S_t^e$ ) та значеннями загальної сірки ( $S_t^r$ ), які перераховані на робочий стан палива для шахтопластів згідно даних відповідно [7] (а) та [8] (б): 1 - усереднюючі прямі; 2 - бісектриси координатних сіток;  $\times$  - індивідуальні співвідношення між експериментальними даними  $S_t^e$  та перерахованими значеннями  $S_t^r$  на робочий стан палива  $S_t^r$ ;  $r$  - коефіцієнти кореляції;  $\sigma$  - середньоквадратичні відхилення

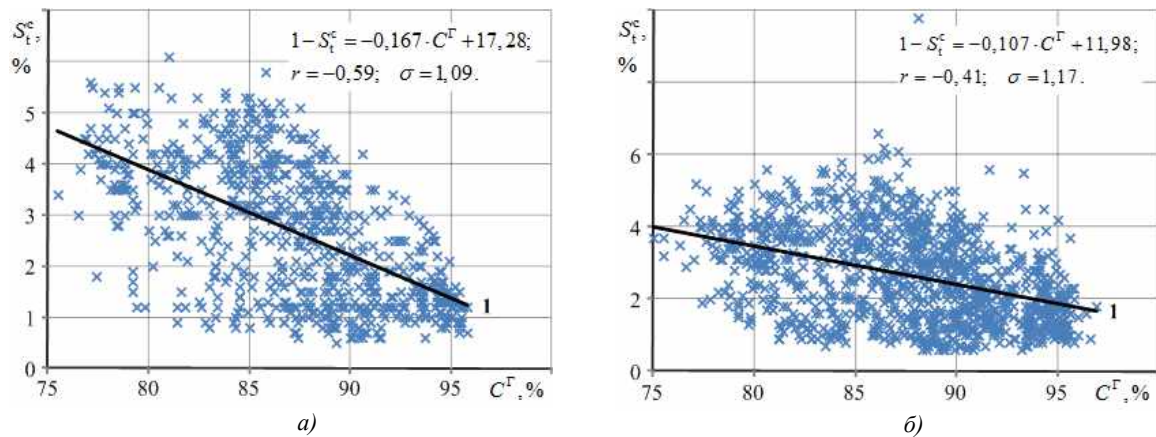
Встановлено [10] досить тісні кореляційні залежності між основними компонентами органічної (горючої) маси від ступеня метаморфічних перетворень вугілля. Одним з основних показників метаморфізму вугілля є вміст вуглецю в органічній масі або горючій частині палива. Він однозначно контролює суму інших компонентів (водень, азот, сірка, кисень). З посиленням впливу метаморфічних перетворень вміст вуглецю зростає в односторонньому порядку, а сума інших компонентів знижується у зворотно-пропорційній залежності. Зменшення окремих складових компонентів органічної (горючої маси) відбувається не так однозначно як їх суми, а характер зміни вмісту сірки від ступеня метаморфізму до теперішнього часу не встановлено.

Вміст вуглецю в горючій масі палива ( $C_r$ ) є одним із основних показників ступеня метаморфізму вугілля. На цій підставі розглянули зміну вмісту сірки ( $S_r$ ) у горючій частині (рис. 3). Аналогічні результати відсутності кореляційних залежностей отримані між загальною сіркою ( $S_t^e$ ) та вмістом вуглецю ( $C_r$ ) у горючій частині (рис. 4), а також між вмістом сірки ( $S_t^r$ ) та вуглецем ( $C^r$ ), перерахованих на робочий стан (рис. 5).

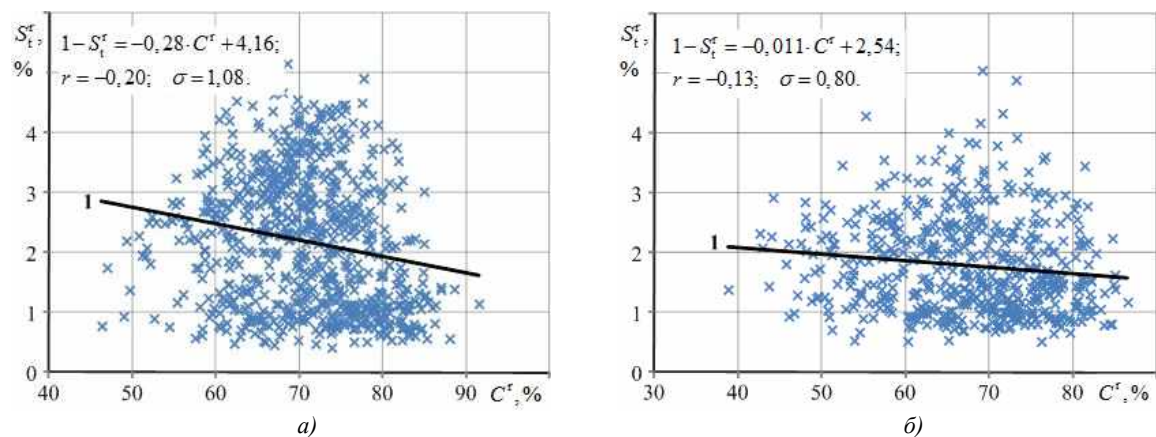


**Рис. 3.** Залежність вмісту сірки ( $S_r$ ) від вуглецю ( $C_r$ ), у горючій частині палива згідно даних [7] (а) та [8] (б): 1 - усереднюючі прямі;  $\times$  - експериментальні дані;  $r$  - коефіцієнти кореляції;  $\sigma$  - середньоквадратичні відхилення

Враховуючи тісні кореляційні залежності (рис. 1) між експериментальними даними [7, 8] загальної сірки  $S_t^e$  та сіркою  $S_r$  в горючій частині ( $r = 0,99$  та  $0,88$ ) та практична відсутність кореляційних зв'язків із вмістом вуглецю (рис. 3 та 4) слідє, що й вміст сірки в негорючій частині ( $S^h$ ) не може значною мірою залежати від ступеня метаморфічних перетворень шахтопластів.



**Рис. 4.** Залежність вмісту загальної сірки ( $S_t^c$ ) від вуглецю в горючій частині палива ( $C^r$ ) згідно даних відповідно [7] (а) та [8] (б): 1 - усереднюючі прямі;  $\times$  - експериментальні дані;  $r$  - коефіцієнти кореляції;  $\sigma$  - середньоквадратичні відхилення



**Рис. 5.** Залежність вмісту загальної сірки ( $S_t^c$ ) від вуглецю ( $C^r$ ), що перераховані на робочий стан згідно даних відповідно [7] (а) та [8] (б): 1 - усереднюючі прямі;  $\times$  - значення, що перераховані на робочий стан палива;  $r$  - коефіцієнти кореляції;  $\sigma$  - середньоквадратичні відхилення

Таким чином значення вмісту сірки в горючій та негорючій частинах палива не залежать від ступеня метаморфічних перетворень і мають випадковий характер. Враховуючи неоднозначні співвідношення між горючою частиною та органічною масою, негорючою частиною та мінеральними домішками, слідує наявність фактора випадковості вмісту сірки для окремого розглянутого шахтопласту, як в органічній масі, так й у мінеральних домішках.

Розглядаючи можливі прояви небезпечних властивостей шахтопластів при веденні гірничих робіт, необхідно враховувати залежність основних компонентів органічної (горючої) маси, крім вмісту сірки, від ступеня метаморфічних перетворень. Випадковий вміст сірки в органічній масі та мінеральних домішках у вугіллі окремого шахтопласту є однією з причин зміни співвідношення між основними компонентами органічної маси та мінеральних домішок, що визначають значною мірою прояв небезпечних властивостей шахтопластів.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Для вдосконалення нормативної бази щодо безпечного ведення гірничих робіт необхідно враховувати висновки, отримані на підставі проведених досліджень. Вони зводяться до наступного:

наведені в нормативно-довідкових документах значення основних компонентів на горючій стан палива адекватно відображають споживчі властивості вугілля, але не відповідають їх стану в зоні ведення гірничих робіт через наявність мінеральних домішок та вологи;

вміст загальної сірки в органічній масі та мінеральних домішках ( $S_t$ ), у загальному випадку, не дорівнює сумі її вмісту в горючій та негорючій частинах ( $S_t^d$ ). Згідно з експериментальними даними можливе будь-яке співвідношення між цими показниками для окремих шахтопластів:  $S_t = S_t^d$ ,  $S_t < S_t^d$  та  $S_t > S_t^d$ . За вказаними ознаками можлива градація шахтопластів за ступенем прояву ними небезпечних властивостей при веденні гірничих робіт;

вплив вологи на вміст загальної сірки, при перерахунку палива із сухого стану на робочий, оцінюється в середньому більш ніж у 20%, а максимальний вплив для окремих шахтопластів може перевищувати 60%;

вміст сірки в горючій та негорючій частинах палива, органічній масі та мінеральних домішках практично не залежить від ступеня метаморфічних перетворень шахтопластів. Можна лише констатувати деяку спрямованість зниження вмісту сірки з посиленням ступеня метаморфічних перетворень.

### Список літератури

1. Авгушевич И.В., Сидорук Е.И., Бронец Т.М. Стандартные методы испытания углей. Классификации углей. М.: «Реклама мастер», 2019. 576 с.
2. Onifade, M., and B. Genc. A review of research on spontaneous combustion of coal. International Journal of Mining Science and Technology, 2020, 30(3), 303-311.
3. Nosal, D., Kononov S., Shevchenko V. Determination the injuries probability of coal mines workers. Mining of mineral deposits, 2021, 15(2), 47-53.
4. Tarasov, V., Antoshchenko, M., Rudniev, Y., Zolotarova, O., Davidenko, N. Metamorphism indicators for establishing the endogenic fire hazard of coal mining plants in mining. International Journal of Environmental Science and Development this link is disabled, 2021, 12(8), 242-248.
5. Греков С.П., Всякий А.А. Влияние содержания серы в углях на вероятность их самовозгорания / Уголь Украины. 2014. №. 4. С. 18-21.
6. Руководство по предупреждению и тушению эндогенных пожаров на угольных шахтах Украины: КД 12.01.402 - 2000. Донецк : НИИГД. 2000, 216 с.
7. Справочник по качеству и обогатимости каменных углей и антрацитов Украинской ССР (Донбасс в границах УСССР, Львовско-Волинский бассейн). Характеристика качества каменных углей и антрацитов Украинской ССР. М.: Недра. 1965. 204 с.
8. Справочник по качеству каменных углей и антрацитов Донецкого и Львовско-Волинского бассейнов. Донецкий научно-исследовательский угольный институт. М.: Недра. 1972. 168 с.
9. ГОСТ 27313-95 (ИСО 1170-77) Межгосударственный стандарт. Топливо твердое минеральное Обозначения показателей качества и формулы пересчета результатов анализа для различных состояний топлива. Издание официальное. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск. 2003. 15 с.
10. Antoshchenko M., Tarasov V., Zakharova O., Zolotarova O., Petrov A. Analysis of metamorphism and tendency of black coals to spontaneous combustion. Technology audit and production reserves, 2019, 1(50), 18-25

УДК 669.162.267.6

О.С. ВОДЕННИКОВА, канд. техн. наук, доц., Запорізький національний університет  
Л.В. ВОДЕННИКОВА, асист., Запорізький державний медичний університет  
Д.Ю. БАБОШКО, канд. техн. наук, ст. викл., Криворізький національний університет  
П.В. ГОЛОВКОВ, студ., Запорізький національний університет

## ПОЗАДОМЕННА ДЕСУЛЬФУРАЦІЯ ЧАВУНУ: ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ, СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА АНАЛІТИЧНО-РОЗРАХУНКОВА ОБРОБКА ПОКАЗНИКІВ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ

**Мета.** Метою роботи є аналіз досвіду сучасних технологій позадоменної десульфурзації чавуну та на їх основі аналітично-розрахункова обробка відомих експериментальних та розрахункових даних показників десульфурзації чавуну.

Поставлена мета в роботі вирішується наступними завданнями: визначити найбільш техніко-економічно ефективні реагент-десульфуратори для позадоменної десульфурзації чавуну; проаналізувати сучасні методи позадоменної десульфурзації чавуну; на основі відомих експериментальних та розрахункових даних запропонувати аналітично-розрахункову обробку показників десульфурзації чавуну.

**Методи досліджень.** При узагальненні та аналізі науково-технічної літератури з напрямку сучасного огляду українського та закордонного досвіду позадоменної десульфурзації чавуну використовувався комплексний підхід. Аналітично-розрахункова обробка відомих експериментальних та розрахункових даних залежності ступеня використання магнію на десульфурацию чавуну від концентрації сірки в металі при застосуванні в якості реагент-десульфуратору гранульованого магнію марки МГП-99 (згідно з ТУ 1714-004-43055164-2004) та суміші гранульованого магнію й флюїдизованого вапна (згідно з ТУ У 26.5-00193714-042-2001) проводилася кореляційно-регресійним методом в програмі Excel (з оцінкою коефіцієнту детермінації).

**Наукова новизна.** Показано залежність ступеня використання магнію на десульфурацию чавуну (на прикладі