

Інженерний метод визначення вмісту сірки в мінеральних домішках для прогнозу небезпечних властивостей вугільних пластів

Є.С. Руднєв, Е.М. Філатєва, М.В. Філатєв, В.Ю. Тарасов, М.І. Антощенко, 2023

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля,
Київ, Україна

Надійшла 20 січня 2023 р.

Мета — на підставі експериментальних даних щодо споживчих якостей вугілля, які наведені у довідково-нормативних документах, розробити інженерний метод визначення вмісту сірки в мінеральних домішках для прогнозу небезпечних властивостей шахтопластів під час ведення гірничих робіт.

Методика досліджень та розробка способу ґрунтуються на тісній кореляційній залежності вмісту сірки у горючій частині палива від загальної сірки для вугілля практично всіх шахтопластів Донецького та Львівсько-Волинського басейнів. Співвідношення між органічною масою та мінеральними домішками характеризуються виходом золи. Співвідношення зольності пластових та збагачених проб, а також відомості про вміст загальної сірки та сірки в горючій частині, дають можливість розрахунковим шляхом оцінити вміст сірки у мінеральних домішках. Усі вихідні дані, необхідні для розробки методу, отримані експериментально стандартними способами протягом кількох десятиліть і наведені у довідково-нормативних документах про споживчі якості вугілля.

Результати досліджень. Відсотковий вміст загальної сірки для всієї сукупності аналізованих шахтопластів може як перевищувати вміст сірки в горючій частині палива, так і бути меншим. Різниця між вмістом загальної сірки та сірки у горючій частині палива у першому наближенні є критерієм оцінювання можливого вмісту сірки в умовно негорючій частині палива. Від'ємні (за знаком) значення критерію вказують на перевагу вмісту сірки в горючій частині, а додатні — в умовно негорючих (мінеральних) домішках.

На підставі експериментальних даних щодо вмісту загальної сірки та у горючій частині палива, виходу золи їхніх пластових і збагачених проб запропоновано залежності для розрахунку вмісту сірки в умовно негорючих компонентах.

Між розрахунковими значеннями вмісту сірки в умовно негорючій частині та запропонованим критерієм розглянуто кореляційні залежності для семи сукупностей шахтопластів. Ці сукупності сформовано з урахуванням можливого впливу процесів збагачення та додатних або від'ємних значень запропонованого критерію.

На підставі аналізу емпіричних залежностей досліджених сукупностей шахтопластів визначено необхідні умови для отримання найбільш достовірних результатів розрахункового визначення вмісту сірки в умовно негорючих (мінеральних) домішках викопного вугілля.

Наукова новизна. Вперше встановлено емпіричні залежності вмісту сірки в умовно негорючих (мінеральних) домішках відповідно до запропонованого критерію.

Практичне значення. Отримані результати необхідні для вдосконалення нормативної бази безпечного ведення гірничих робіт щодо прогнозу прояву небез-

Citation: Rudniev, Ye.S., Filatieva, E.M., Filatiev, M.V., Tarasov, V.Yu., & Antoshchenko, M.I. (2023). Engineering method for determining the sulfur of mineral impurities for the prediction of hazardous properties of coal seams. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 45(3), 88—102. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i3.282417>.

Publisher Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

печних властивостей шахтопластів, які зумовлені наявністю різновидів сірки.

Ключові слова: вугілля, споживча якість, органічна, мінеральна, горюча, зола, сірка, шахтопласти, небезпечні властивості, прогноз, нормативна база.

Вступ. Сірка міститься в усіх видах твердого палива у складі різних сполук, які входять до органічної та мінеральної частин палива. У мінеральній масі вугілля сірка спостерігається головно у вигляді сульфатів (переважно кальцію та заліза) та дисульфідів заліза FeS_2 (піриту та марказиту), в органічній масі — у вигляді органічних сполук.

Розрізняють кілька основних різновидів (форм) сірки у вугіллі: 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. Вміст загальної сірки та її різновидів, на відміну від вмісту сірки золи, умовно перераховують на вміст елементної сірки.

Сірка — небажана та шкідлива частина палива. Вміст загальної сірки та її окремих різновидів вивчали здебільшого з позицій ефективності процесів переробки палив, якості вугільної продукції та її екологічної безпеки. У цьому напрямі досягнуто певних успіхів, що підтверджується розробкою та успішним використанням сучасної промислової класифікації вугілля за генетичними й технологічними параметрами [ГОСТ 25543-2013, 2014]. Значною мірою її положення ґрунтується на експериментальних даних довідково-нормативних документів [Справочник..., 1965, 1972] минулих років.

Менш значними є успіхи у питанні прогнозування та розробки профілактичних заходів щодо запобігання ендегенним пожежам при веденні гірничих робіт у вугільних шахтах. Так, протягом 20 років (1994—2015 рр.) у шахтах України сталося понад 200 ендегенних пожеж [Греков и др., 2014]. Аналогічні аварії за останнє тридцятиріччя, згідно з матеріалами MiningWiki,

відбувалися у багатьох вугледобувних країнах світу. Це свідчить про існування невирішеної проблеми, актуальність якої виникла ще на початку XIX ст.

Вміст сірки у вугіллі не тільки визначає якість його споживчих властивостей, а й істотно впливає на вияв небезпечних властивостей шахтопластів при веденні гірничих робіт [Руднев та ін., 2021б]. Зокрема, зі збільшенням вмісту у вугіллі загальної сірки від 1 до 6 % зростає ймовірність виникнення ендегенної пожежі більш ніж утричі [Греков, Всякий, 2014]. Вплив видів і форм знаходження сірки у вкопному вугіллі на прояв небезпечних властивостей шахтопластів, на відміну від їх впливу на споживчі якості вугілля, досі залишається практично не вивченим. Внаслідок цього при складанні нормативних документів [Руководство..., 2000; Каталог..., 1981] для характеристики шахтопластів через їхню схильність до виникнення ендегенних пожеж використовували лише показники вмісту загальної сірки.

З цієї причини мета роботи — доведення принципової і в цілому єдиної можливості розрахункового визначення елементного вмісту сірки в мінеральній масі вугілля для прогнозування небезпечних властивостей шахтопластів при веденні гірничих робіт з використанням деяких стандартних показників, згідно з довідково-нормативною документацією стосовно споживчих якостей палива.

Терміни та визначення [ГОСТ 17070-2014, 2015]. Горюча маса вугілля (сухий беззольний стан вугілля) — умовний стан вугілля без загальної вологи та золи. Горючий стан речовини — умовний стан твердого мінерального палива без вологи та мінеральних речовин, за винятком сульфідів й елементної сірки.

Органічна маса — маса вугілля, що містить всі органічні сполуки вуглецю, водню, азоту, кисню та сірки.

Мінеральна маса — умовна маса вугілля

без органічної маси та загальної вологи.

Зола — неорганічний залишок після повного згоряння вугілля. Зольність — маса золи, що визначається в установлених стандартом умовах, віднесена до одиниці маси вугілля та виражена у відсотках.

Збагаченням вугілля називається процес, під час якого в паливі зменшується вміст мінеральних домішок і порожніх порід, а також відбувається поділ вугілля на сорти за критерієм розміру шматків.

Ідея полягає у встановленні співвідношення між вмістом сірки в органічній масі та мінеральних домішках на підставі експериментальних даних щодо вмісту загальної сірки та сірки в горючій частині палива, які наведені у довідково-нормативній документації споживчих якостей вугілля для кожного шахтопласта. Співвідношення між органічною масою та мінеральними домішками для збагачених проб вугілля можна встановити за виходом золи. Співвідношення зольності пластових і збагачених проб вугілля дає можливість оцінити вміст сірки у продуктах збагачення, що видаляються.

Методика проведення досліджень заснована на тісному кореляційному зв'язку (коефіцієнт кореляції $r=0,93$) вмісту сірки у горючій частині палива (S_r) і вмісту загальної сірки (S_t^d) для вугілля практично всіх шахтопластів Донецького та Львівсько-Волинського басейнів (рис. 1).

Статистичну обробку залежності S_r від S_t^d виконано для 1827 шахтопластів, для яких отримано відомості про вміст загаль-

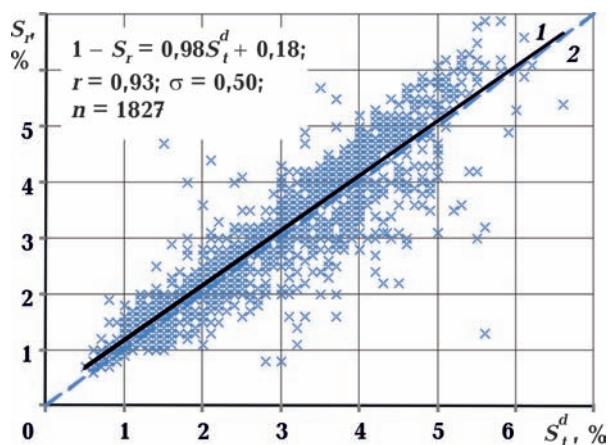


Рис. 1. Залежність вмісту сірки у горючій частині палива (S_r) від вмісту загальної сірки (S_t^d) згідно із статистичною обробкою експериментальних даних [Справочник..., 1965, 1972]: 1 — усереднена пряма; 2 — бісектриса координатної сітки (штрихпунктирна лінія); × — експериментальні дані; r — коефіцієнт кореляції; σ — середньоквадратичне відхилення; n — кількість оброблених пар даних.

Fig. 1. Dependence of the sulfur content in the combustible part of the fuel (S_r) on the total sulfur (S_t^d) according to the statistical processing of experimental data [Handbook..., 1965, 1972]: 1 — averaging straight line; 2 — bisector of the coordinate grid (dash-dot line); × — experimental data; r — correlation coefficient; σ — standard deviation; n — number of data pairs processed.

ної сірки та сірки у горючій частині палива.

У довідковому нормативному документі [Справочник..., 1965] є загальні відомості про елементний склад вугілля для 734 шахтопластів, а в довіднику [Справочник..., 1972] — для 1379. Загальна кількість шахтопластів, для яких наведені відомості, становить 2113. Для деяких шахтопластів

Т а б л и ц я 1. Відомості про шахтопласти, для яких не наведено даних щодо виходу золи з пластових проб

Шахта	Індекс пласта	Зольність, %		Вміст сірки, %	
		пластової, A_n^c	збагаченої, A_n^c	загальної, S_t^d	у горючій частині, S_r
№ 144*	l_1	—	6,3	6,3	1,9
№ 144*	k_8	—	6,1	2,8	3,0
10-біс*	m_3	—	7,0	3,2	3,5
ім. Войкова**	l_2	—	—	—	—

*Див.: [Справочник..., 1965, с. 74]. **Див.: [Справочник..., 1972, с. 106].

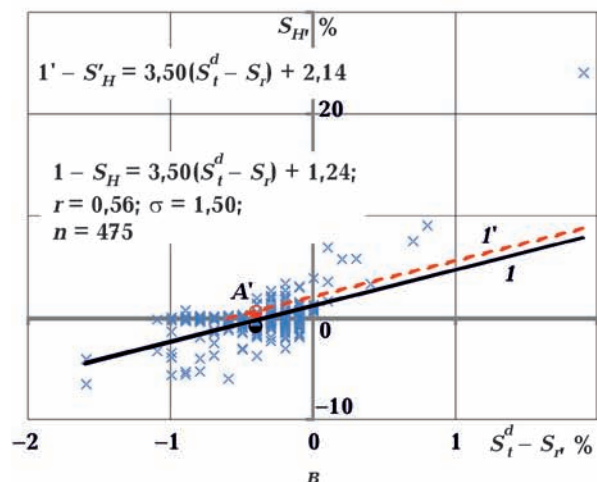
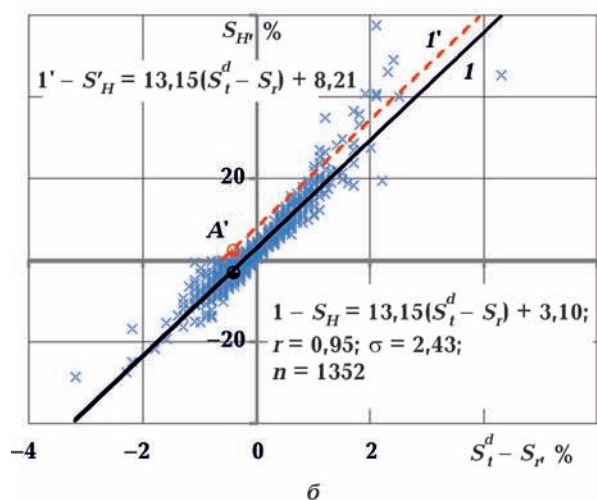
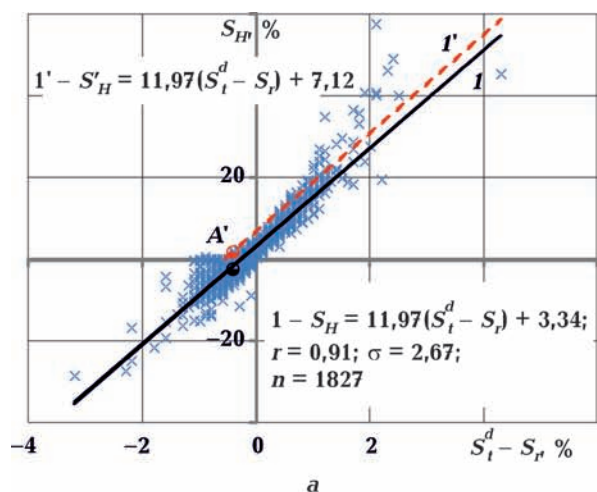


Рис. 2. Залежність розрахованих значень за рівнянням (2) вмісту сірки (S_H) в умовно негорючій частині палива від критерію $S_t^d - S_r$: а-в — відповідно для всієї сукупності з 1827 шахтопластів; для 1352 шахтопластів, вугілля яких попередньо збагачувалося; для

у аналізованих документах експериментальні дані дублюються, що підтверджує їх вірогідність.

Для чотирьох шахтопластів не наведено даних стосовно виходу золи із пластових проб (табл. 1).

З цієї причини існує можливість аналізувати експериментальні дані щодо виходу золи для 2109 шахтопластів, з них збагачено 1622 шахтопласта, для 487 шахтопластів збагачення не проводили.

З огляду на близькість розташування прямої l і бісектриси 2 координатної сітки (рис. 1) виходить, що в загальному випадку значення вмісту сірки S_r можуть як перевищувати значення S_t^d , так й бути меншими. Різниця між S_t^d та S_r ($S_t^d - S_r$) може бути критерієм, у першому наближенні, співвідношення між елементним вмістом сірки в горючій масі та в умовно негорючій частині палива. Показник $S_t^d - S_r$ для 1315 шахтопластів був від'ємним, що вказує на переважний вміст сірки у горючій масі. Для 429 шахтопластів цей показник характеризувався додатними значеннями, що свідчить про переважне знаходження сірки в умовно негорючій частині палива. Нульове значення різниці $S_t^d - S_r$ для 83

475 шахтопластів з незбагаченим вугіллям; l — усереднені прямі; l' — скориговані положення усереднених прямих; A' — умовне знаходження точки для коригування розташування прямої l' та усунення підстав для отримання «диких» усереднених значень S_H ; \times — розраховані значення S_H за рівнянням (2) на підставі експериментальних даних [Справочник..., 1965, 1972]; r — коефіцієнт кореляції; σ — середньоквадратичне відхилення; n — кількість оброблених пар даних.

Fig. 2. Dependence of the calculated values according to equation (2) of the sulfur content (S_H) in the conditionally non-combustible part of the fuel on the criterion $S_t^d - S_r$: а-в — respectively for the entire set of 1827 coal seams; for 1352 coal seams, whose coals were previously enriched, for 475 coal seams with unenriched coals; l — averaging straight lines; l' — corrected positions of the averaging lines; A' — conditional location, points for correcting the location of the straight line l' and eliminating the receipt of «wild» averaged values S_H ; \times — calculated values of S_H according to equation (2) based on experimental data [Handbook..., 1965, 1972]; r — correlation coefficient; σ — standard deviation; n — number of data pairs processed.

шахтопластів відповідало рівності вмісту сірки в горючій та умовно негорючій частинах вугілля.

Результати досліджень. Вміст загальної сірки та її різновидів, на відміну від вмісту сірки золи, умовно перераховують на вміст елементної сірки [Авгушевич и др., 2019]:

$$S_t = S_{\text{so}_4} + S_p + S_o. \quad (1)$$

За наведеними експериментальними даними показників у довідково-нормативних документах [Справочник..., 1965, 1972] було розраховано для 1827 шахтопластів вміст сірки в умовно негорючій частині палива S_H :

$$S_H = \frac{100 \cdot S_t^d - (100 - A_o^c) \cdot S}{A_o^c}, \%, \quad (2)$$

де A_o^c — вихід золи зі збагачених проб, %.

Розрахункові значення S_H пов'язані з показником $S_t^d - S_r$ тісною прямо пропорційною кореляційною ($r=0,91$) залежністю (рис. 2, а). Паралельно з цим отримано значну кількість від'ємних розрахункових значень S_H для 802 шахтопластів. Тісний кореляційний зв'язок між показниками та наявність значних розходжень указує на можливий вплив систематичних похибок при визначенні різниці між S_t^d і S_r . З огляду на наявність від'ємних розрахункових значень S_H систематичні похибки визначення критерію $S_t^d - S_r$ можуть бути обумовлені як заниженням експериментальних значень вмісту загальної сірки, так і їх завищенням у горючій частині палива.

Для розкриття природи появи від'ємних розрахункових значень вмісту сірки в умовно негорючій частині палива за рівнянням (2) розглянуто методики визначення показників, що входять до цієї залежності.

Відомо кілька методів визначення вмісту загальної сірки у вугіллі — від класичного гравіметричного методу Ешка до сучасних інструментальних методів аналізу [Авгушевич, 2019; ГОСТ 8606-2015, 2019]. В основі цих методів лежить реакція окиснення всіх форм сірки до оксидів з подальшим їх визначенням різними способами.

На сьогодні існує кілька взаємозамінних (альтернативних) стандартних методів визначення загальної сірки у вугіллі. Серед них виділяється класичний метод Ешка, запропонований ще 1874 р. Він набув найширшого поширення у світі і не втратив свого значення дотепер і визнаний арбітражним. Цей метод регламентовано відповідним ГОСТом [ГОСТ 8606-2015, 2019]. Метод Ешка полягає у спалюванні навішення вугілля шляхом спікання із сумішшю оксиду магнію та безводного вуглекислого натрію (співвідношення 2:1 за масою) в окиснювальній атмосфері при температурі $(800 \pm 250)^\circ\text{C}$. Відбуваються згоряння органічної маси палива і перетворення сірки на сульфати натрію і магнію. Утворені сульфати переводять у розчин. Сульфат-іон кількісно осаджують у солянокислому середовищі хлористим барієм у вигляді сірчаноокислого барію BaSO_4 , за масою якого розраховують загальний вміст сірки. Метод Ешка має недоліки, пов'язані з його тривалістю (не менш як 6—7 год) та можливістю втрати частини органічної сірки при спіканні із сумішшю Ешка [Авгушевич, 2019]. Здебільшого цей метод застосовують у разі розбіжностей як арбітражний. Вміст загальної сірки у стандартних зразках палив, призначених для градування аналізаторів, визначають лише методом Ешка.

Для практичних цілей рекомендується альтернативний стандартний прискорений метод визначення вмісту загальної сірки [ГОСТ 2059-95, 2008]. Сутність цього методу полягає у спаленні навішення палива в потоці кисню або повітря у трубчастій печі за температури 1350°C з утворенням зольного залишку та газоподібних продуктів спалювання, до складу яких входять оксиди сірки (в основному SO_2) та хлору. Загальна тривалість аналізу не перевищує 40—60 хв. Цей метод був використаний при визначенні вмісту загальної сірки для встановлення споживчих якостей вугілля, експериментальні значення наведено у довідково-нормативних документах [Справочник..., 1965, 1972]. У цілому прискорений метод визначення вмісту загальної

сірки є задовільним для практичних цілей і рекомендується для контролю за вмістом сірки в малозольних паливах. При аналізі високозольних палив зі значним вмістом сполук кальцію застосування цього методу для визначення вмісту загальної сірки небажане. Через різноманітність складу мінеральної маси та сполук сірки не можна бути повністю впевненим у тому, що частина сірки не залишиться у золі у вигляді CaSO_4 . При використанні цього методу для визначення вмісту сірки у високозольному вугіллі з великим вмістом сполук кальцію

результати виходять заниженими внаслідок неповного виділення оксидів сірки [Авгусевич, 2019].

Для більшості шахтопластів після збагачення вугілля вихід золи становить менше 10 %, але були випадки, коли вихід золи був значно вищим (рис. 3).

З цієї причини, навіть після збагачення значної частини проб, немає підстав вважати все вугілля малозольним. Для 487 шахтопластів, згідно з даними [Справочник..., 1965, 1972], збагачення не проводилось і вихід золи у багатьох випадках перевищував 10 %, що також не дає змоги вважати вугілля цих шахтопластів малозольним.

Типізація складу золи (табл. 2), згідно з якою вміст CaO у загальному випадку може досягати 40 %, потребує врахування неорганічних сполук, що містять кальцій, при виконанні досліджень.

З аналізу виходу золи зі збагачених і пластових проб, а також можливого вмісту сполук кальцію в усіх типах золи виходить, що однією з причин отримання від'ємних розрахункових значень S_H за рівнянням (2) є заниження вмісту S_i^d в разі його визначенні прискореним методом.

Другим фактором, що сприяє отриманню від'ємних розрахункових значень S_H , є завищення частки горючої частини палива з використанням як множника $(100 - A_o^c)$ у рівнянні (2). Вміст загальної сірки S_i^d стосується як органічної частини, так і мінеральної маси (MM) палива. З цієї причини більш логічним було б використовувати у рівнянні (2) замість виходу золи A_o^c значення MM , які для розглянутих шахтопластів [Справочник..., 1965, 1972] експериментально не визначали. Значення MM , згідно

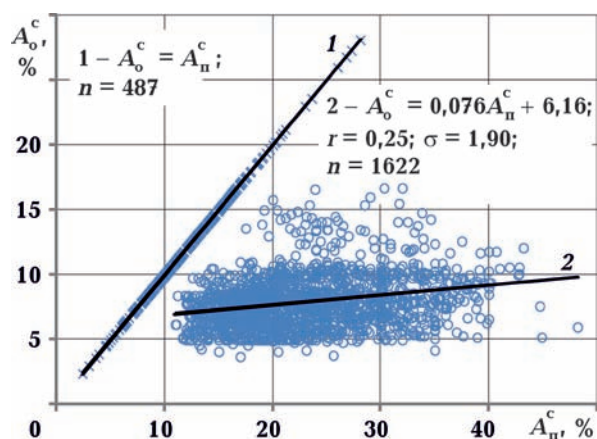


Рис. 3. Залежність виходу золи із збагачених проб вугілля (A_o^c) від виходу золи із пластових (незбагачених) проб (A_n^c), згідно з експериментальними даними [Справочник..., 1965, 1972]: 1, 2 — усереднені прями; \times , \circ — відповідно дані щодо незбагачених (пластових) і збагачених проб; n — кількість оброблених пар даних; r — коефіцієнт кореляції; σ — середньоквадратичне відхилення.

Fig. 3. Dependence of ash yield from enriched coal samples (A_o^c) on ash yield from seam (unenriched) samples (A_n^c) according to experimental data [Handbook..., 1965, 1972]: 1, 2 — averaging lines; \times , \circ — data for unenriched (seam) and enriched samples, respectively; r — correlation coefficient; σ — standard deviation; n — number of data pairs processed.

Т а б л и ц я 2. Типізація складу золи вугілля [Клер, 1975]

Типи золи вугілля	Межі коливання складу, %			
	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO
Кременисті	8—30	40—70	до 20	до 20
Глиноземні	30—45	40—55	до 20	до 20
Залізисті	10—20	30—55	>20	до 20
Вапняні	5—20	15—40	5—20	20—40

із відомими емпіричними залежностями, завжди перевищують вихід золи на сухий стан [Руднев та ін., 2021а]. Щоб врахувати таке перевищення, необхідно додатково мати відсутні відомості про гідратну вологу діоксиду вуглецю, що виділяється за повного розкладання карбонатів, піритну та сульфатну сірки. Для приблизного оцінювання вмісту мінеральної маси іноді використовують співвідношення $MM \approx 1,1 \cdot A_o^c$ [Авгушевич, 2019].

Наведений аналіз показав причини систематичного заниження добутку $100 \cdot S_i^d$ та його завищення для виразу $(100 - A_o^c) S_r$ при визначенні розрахункових значень S_H за рівнянням (2).

Наявність від'ємних значень S_H для сукупності з 802 шахтопластів (рис. 2, а) дає можливість оцінити середнє заниження критерію $S_i^d - S_r$, за якого отримано результати з максимальним розходженням:

$$\overline{S_i^d - S_r} = \frac{\sum_i (S_i^d - S_r)_i}{n} = \frac{-336,3}{802} = -0,42\% \quad (3)$$

де $n=802$ — кількість шахтопластів, для яких отримано від'ємні значення S_H ; $\sum (S_i^d - S_r)_i$ — сума від'ємних значень $S_i^d - S_r$ для сукупності з $n=802$ шахтопластів.

Середньому від'ємному значенню $\overline{S_i^d - S_r} = -0,42\%$ відповідає середнє від'ємне значення $\overline{S_H}$:

$$\overline{S_H} = \frac{\sum_i S_{Hi}}{n} = \frac{-1682,18}{802} = -2,10\% \quad (4)$$

де $\sum S_{Hi}$ — сума від'ємних розрахункових значень S_H для сукупності з $n=802$ шахтопластів.

Щоб унеможливити отримання від'ємних усереднених значень S_H необхідно положення прямої 1 (рис. 2, а) скоригувати з урахуванням координат $\overline{S_i^d - S_r} = -0,42\%$ та $\overline{S_H} = -2,10\%$. Скоригована пряма 1' має проходити не нижче за точку A' , з координатами $\overline{S_i^d - S_r} = -0,42\%$ та $\overline{S_H} = +2,10\%$. Висока прямо пропорційна залежність S_H від $S_i^d - S_r$ ($r=0,91$) вказує на

те, що справжнє положення скоригованої прямої 1' буде близькою до паралельності з прямою 1. Використання в інженерних розрахунках значень S_H' , визначених за рівнянням 1' (див. рис. 2, а), гарантує, як мінімум, відсутність їх від'ємних усереднених значень. Емпіричне рівняння 1' отримано на підставі експериментальних даних для 1827 шахтопластів. З них для проб вугілля 1352 шахтопластів було проведено попереднє збагачення. Для вугілля решти 475 шахтопластів процеси збагачення не були передбачені, оскільки вихід золи з пластових проб вугілля цих шахтопластів був дещо нижчим. Процес попереднього збагачення вугілля суттєво вплинув на вихід золи порівняно з незбагаченими пробами (див. рис. 3). Для встановлення можливо впливу процесів збагачення вугілля на точність розрахункового визначення сірки за рівнянням (2) в умовно негорючій частині палива відособлено розглянули окремі характерні сукупності шахтопластів. До однієї сукупності з 1352 варіант віднесли шахтопласти, вугілля яких піддавали попередньому збагаченню (див. рис. 2, б). До збагачення вихід золи із пластових проб становив 11,0—48,2 %, а після збагачення 3,7—16,7 % (див. рис. 3).

У другій сукупності з 475 варіант розглянуто шахтопласти, вугілля яких попередньо не збагачували (див. рис. 2, в), оскільки умовно їх вважали до малозольними. Вихід золи з незбагаченого вугілля цієї сукупності шахтопластів коливався від 2,4 до 28,1 % (рис. 3).

Вихід золи для обох аналізованих сукупностей шахтопластів у багатьох випадках значно перевищував 10 %. Діапазони її виходу відповідно становили 3,7—16,7 і 2,4—28,1 %, що вказує на відсутність, у деяких випадках для обох сукупностей, обґрунтованого застосування альтернативного прискореного стандартного методу для визначення вмісту загальної сірки S_i^d [Авгушевич, 2019; ГОСТ 2059-95, 2008]. У результаті для більшості розглянутих шахтопластів розрахункові значення S_i^d виявилися заниженими. Внаслідок цього

отримані і від'ємні, розрахункові за рівнянням (2), значення S_H відповідно для 558 та 244 шахтопластів обох (2-ї та 3-ї) сукупностей (табл. 3).

Середні від'ємні значення для шахтопластів 2-ї та 3-ї сукупностей були розраховані за рівнянням 3. Вони дорівнювали відповідно $-0,42$ та $-0,41$ %. Це вказує на практично однакові середні похибки заниження розрахункового вмісту загальної сірки альтернативним прискореним методом для обох сукупностей при розрахунку S_H за рівнянням (2). За вказаними обставинами прискорений метод визначення

вмісту сірки й можливі заниження його справжніх значень не належать до відмітних ознак між 2-ю та 3-ю сукупностями шахтопластів.

Відповідно до логічної побудови рівняння (2), різні розрахункові значення S_H 2-ї та 3-ї сукупностей шахтопластів можуть бути отримані тільки за різного виходу золи зі збагачених та пластових проб вугілля. Для зручності аналізу можливого впливу виходу золи зі збагачених та незбагачених проб вугілля розглянуті сукупності рівняння (2) наведено у вигляді відповідних складових: *для збагачених проб (сукупність 2)*

Таблиця 3. Зведені результати визначення розрахункових значень S_H відповідно до статистичної обробки експериментальних даних [Справочник..., 1965, 1972] для різних сукупностей шахтопластів

Сукупності пластів	Число шахтопластів				Координати точки A' , %		Показники кореляції		Діапазони зміни виходу золи, A^c %	Примітка
	Загальне	$S_i^d - S_r \geq 0$	$S_i^d - S_r < 0$	$S_H < 0$	$\overline{S_i^d - S_r}$	$\overline{S_H}$	r	σ , %		
1 (рис. 2, а)	1827	512	1315	802	-0,42	+2,10	0,91	2,67	2,4—48,2	Вся сукупність шахтопластів зі збагаченим і незбагаченим вугіллям
							—	—		
2 (рис. 2, б)	1352	491	861	558	-0,42	+2,69	0,94	2,43	3,7—16,7	Збагачення проводили
							—	—		
3 (рис. 2, в)	475	21	454	244	-0,41	+0,71	0,56	1,50	2,4—28,1	Шахтопласти з передбачувано низькозоільним вугіллям
							—	—		
4 (рис. 4, а)	1181	452	729	487	-0,41	+2,88	0,95	2,28	3,7—10	Збагачені вугілля з виходом золи менше 10 %
							—	—		
5 (рис. 4, б)	171	39	132	71	-0,50	+1,36	0,92	1,47	10,1—16,7	Вихід золи після збагачення становив понад 10 %
							—	—		
6 (рис. 4, в)	149	13	136	81	-0,26	+1,13	0,79	1,61	2,4—10	Вихід золи з незбагачених проб становив менш як 10 %
							—	—		
7 (рис. 4, г)	326	8	318	163	-0,48	+0,50	0,56	1,04	10,1—28,1	Вихід золи з пластових незбагачених проб понад 10 %
							—	—		

* Залежності згідно з розрахунковими значеннями S_H за рівнянням (2) та експериментальними даними критерію $S_i^d - S_r$. ** Скориговані залежності S_H' .

$$S_{\text{H}}^{\circ} = \frac{100}{A_{\circ}^c} \cdot S_i^d - \frac{100}{A_{\circ}^c} \cdot S_r^{\circ} + S_r^{\circ} [\%]; \quad (5)$$

для пластових проб, які не піддавали збагаченню (сукупність 3)

$$S_{\text{H}}^{\text{n}} = \frac{100}{A_{\text{n}}^c} \cdot S_i^d - \frac{100}{A_{\text{n}}^c} \cdot S_r^{\text{n}} + S_r^{\text{n}} [\%]. \quad (6)$$

Послідовне порівняння складових рівнянь (5) і (6) дало змогу визначити спрямованість їхнього впливу на розрахункові значення S_{H} . Перша складова $100/A_{\circ}^c \cdot S_i^d$ рівняння (5) свідомо більша за аналогічну складову $100/A_{\text{n}}^c \cdot S_i^d$ рівняння (6). Це виходить із безперечного перевищення виходу золи з пластових проб порівняно з її виходом із збагачених проб ($A_{\text{n}}^c - A_{\circ}^c$). У зв'язку з таким співвідношенням виходу золи міст загальної сірки, визначений прискореним альтернативним методом, буде більшою мірою заниженим для пластових проб. З цієї причини значення S_i^d рівняння (5) будуть, як мінімум, не менше відповідних значень у рівнянні (6).

Другі складові зі знаком «мінус» рівнянь (5) і (6) — $100/A_{\circ}^c \cdot S_r^{\circ}$ та $100/A_{\text{n}}^c \cdot S_r^{\text{n}}$, характеризують, відповідно, збільшення частки вмісту сірки в горючій частині палива після збагачення вугілля порівняно із вмістом у пластових пробах до збагачення. Під впливом процесів збагачення вихід золи зменшується ($A_{\circ}^c < A_{\text{n}}^c$) і у кілька разів (див. рис. 3). У результаті цього збільшується частка горючої частини палива збагаченого вугілля ($100/A_{\circ}^c$) порівняно з її часткою у пластових пробах ($100/A_{\text{n}}^c$). З цієї причини та через стійкість сполук сірки зростає і відносний (відсотковий) вміст сірки S_r° в горючій частині палива після збагачення вугілля. Його значення завжди перевищують відсотковий вміст сірки у пластових незбагачених пробах, тобто дотримується нерівність $S_r^{\circ} > S_r^{\text{n}}$. Від'ємні складові рівнянь (5) і (6) ($100/A_{\circ}^c \cdot S_r^{\circ}$ та $100/A_{\text{n}}^c \cdot S_r^{\text{n}}$) за будь-якого їхнього співвідношення складають лише деяку частину в обох випадках від вмісту сірки в горючих частинах. Унаслідок цього сумарні значення другої й третьої складових рівнянь (5) і (6) будуть додатними.

З огляду на нерівності складових рівнянь (5) і (6) — $S_r^{\circ} > S_r^{\text{n}}$ та $100/A_{\circ}^c \cdot S_i^d > 100/A_{\text{n}}^c \cdot S_i^d$, отримуємо, що процеси збагачення призводять до відсоткового збільшення вмісту сірки в негорючій частині палива (S_{H}) та її тісної, кореляційної, майже функціональної ($r=0,94$) залежності від критерію $S_i^d - S_r$ (див. рис. 2, б). Високий кореляційний зв'язок між S_{H} та $S_i^d - S_r$ для збагаченого вугілля шахтопластів 2-ї сукупності обумовлений значним примусовим скороченням вмісту умовно негорючих (мінеральних) домішок. Це виходить із скорочення діапазону виходу золи із пластових незбагачених проб з 11,0—48,2 % до 3,7—16,7 % після їхнього збагачення. Для аналізованої сукупності шахтопластів здебільшого (близько 90 %) вихід золи становив менш як 10 %, що вказує на незначну частку вмісту мінеральних домішок у вугіллі після їх збагачення. Процеси збагачення значною мірою наблизили масову частку горючої частини палива до її органічної маси. Кореляційна залежність 1 (див. рис. 2, б) характеризує незначну частку (менш як 10 %), що збереглася після збагачення мінеральних (умовно негорючих) домішок. Відносно високий коефіцієнт регресії (13,15) рівняння (1) вказує на непропорційне співвідношення скорочення виходу золи після збагачення вугілля і вмісту сірки в частині, що збереглась в умовно негорючих (мінеральних) домішках.

Висока кореляційна залежність S_{H} від показника $S_i^d - S_r$ для шахтопластів 2-ї сукупності, згідно з рівнянням (5), була забезпечена відносною постійністю виходу золи A_{\circ}^c для більшості шахтопластів у межах 3,7—10,0 %. Цим фактично виключався значний вплив непередбачуваних коливань частки умовно негорючих (мінеральних) домішок у ширших діапазонах. Значення S_{H} для 2-ї сукупності шахтопластів, розраховані за рівнянням (5), безпосередньо отримані переважно за експериментальними даними S_i^d та S_r^i . Це підтвердилося результатами статистичної обробки (див. рис. 2, б). Вплив коливань виходу золи A_{\circ}^c після збагачення вугілля було зведено до мінімуму, і розрахункові

значення S_i^i залежали переважно лише від двох показників — S_i^d і S_r^o .

Такий сталий зв'язок між S_n та $S_i^d - S_r$ не спостерігається за відсутності процесів збагачення (рис. 2, в). Це виявилось у нижчому коефіцієнті кореляції ($r=0,56$) і зниженні коефіцієнтів регресії емпіричних рівнянь (1) відповідно з 13,15 (див. рис. 2, б) до 3,50 (рис. 2, в).

Для 3-ї сукупності шахтопластів при розрахунку значень S_n^n за рівнянням (6) непередбачувані коливання значень виходу золи A_n^c мали ширший діапазон — від 2,4 до 28,1 %, який істотно перевищує стабільний її вихід із збагачених проб вугілля 2-ї сукупності шахтопластів. Посилення впливу додаткового фактора, що пов'язаний із суттєвими коливаннями виходу золи з пластових проб у ширших інтервалах порівняно з її виходом із збагачених проб, призвело до зниження тісноти кореляційної залежності 1 до значення $r=0,56$ (рис. 2, в).

Вугілля 3-ї сукупності шахтопластів за критерієм $S_i^d - S_r < 0$ має переважно належати до малозольних. Для 454 шахтопластів із 475 усїєї аналізованої сукупності значення критерію були від'ємними — 95,6 %. За від'ємними значеннями критерію $S_i^d - S_r$ основний відсотковий вміст сірки необхідно було умовно віднести до горючої маси вугілля цих шахтопластів. За результатами визначення S_n згідно з рівнянням (6) для 244 шахтопластів отримано від'ємні значення, для решти 231 шахтопласта — позитивні (210 варіант) або дорівнювали нулю (21 варіанта). Майже однакове групування кількості шахтопластів близько нульових розрахункових значень S_n підтверджує наявність систематичних похибок експериментально визначених параметрів, що входять до рівняння (6). Доказом цього є також приблизна рівність за абсолютною величиною середніх від'ємних ($-0,71$ %) і середніх доданих ($+0,80$ %) розрахункових значень S_n . Це дає можливість обґрунтовано вносити кількісні коригування до розрахунків для виключення отримання «диких» результатів.

Розрахункові значення вмісту сірки в негорючій частині палива для 2-ї та 3-ї сукупностей шахтопластів різняться між собою передусім вихідними параметрами показників, які були використані при визначенні S_n^o і S_n^n відповідно за рівняннями (5) і (6). Основна відмінність полягала у попередньому збагаченні вугілля 2-ї сукупності. Процеси збагачення непропорційно змінили співвідношення між виходом золи та вмістом сірки у горючій частині палива. Їхні вихідні співвідношення формувалися в природних умовах і пов'язані з індивідуальною геологічною історією утворення кожного шахтопласта кам'яного вугілля або антрацитів. Вони обумовлені умовами послідовного перебігу процесів осадонагромадження, занурення і перетворення вихідної речовини на стадіях торфоутворення та діягенезу, які передували метаморфізму.

У вугіллі 3-ї сукупності шахтопластів збережені вихідні природні співвідношення, що склалися між виходом золи з пластових проб та вмістом загальної сірки і знаходженням її деякої частини у горючій масі палива.

Збагачення вугілля 2-ї сукупності шахтопластів та зниження виходу золи в більшості випадків нижче 10 % визначили штучну близькість усїєї сукупності за вмістом мінеральних (умовно негорючих) домішок. У результаті фактичного усунення впливу виходу золи зі збагачених проб, для більшості шахтопластів за рівнянням (5) отримані розрахункові значення S_n^n , які безпосередньо пов'язані з критерієм $S_i^d - S_r$. Це й зумовило високу їхню кореляційну взаємозалежність (див. рис. 2, б).

Головною відмітною ознакою між вугіллям 2-ї та 3-ї сукупностей шахтопластів є значення виходу золи зі збагачених і пластових проб вугілля. Для детальнішого встановлення впливу виходу золи зі збагачених і незбагачених проб вугілля на розрахункові значення S_n додатково розглянуто ще чотири сукупності шахтопластів з вугіллям різного ступеня глибини їх збагачення (рис. 4).

З урахуванням різного групування шахтопластів за виходом золи зі збагачених проб менше та більше десяти відсотків (див. рис. 3) розглянемо відповідні їм 4-ту (рис. 4, а) і 5-ту (рис. 4, б) сукупності шахтопластів.

Більшість шахтопластів (1181, або 87,4 %) за виходом золи менш як 10 % із збагачених проб було віднесено до 4-ї су-

купності. У 5-й сукупності шахтопластів з виходом золи понад 10 % розглянуто розрахункові значення S_H для 171 шахтопласта, тобто 12,6 % від загальної кількості шахтопластів (1352), вугілля яких збагачувалося. Для обох сукупностей шахтопластів після збагачення вугілля отримано тісні прямо пропорційні кореляційні залежності розрахункових значень S_H від критерію $S_t^d - S_r$.

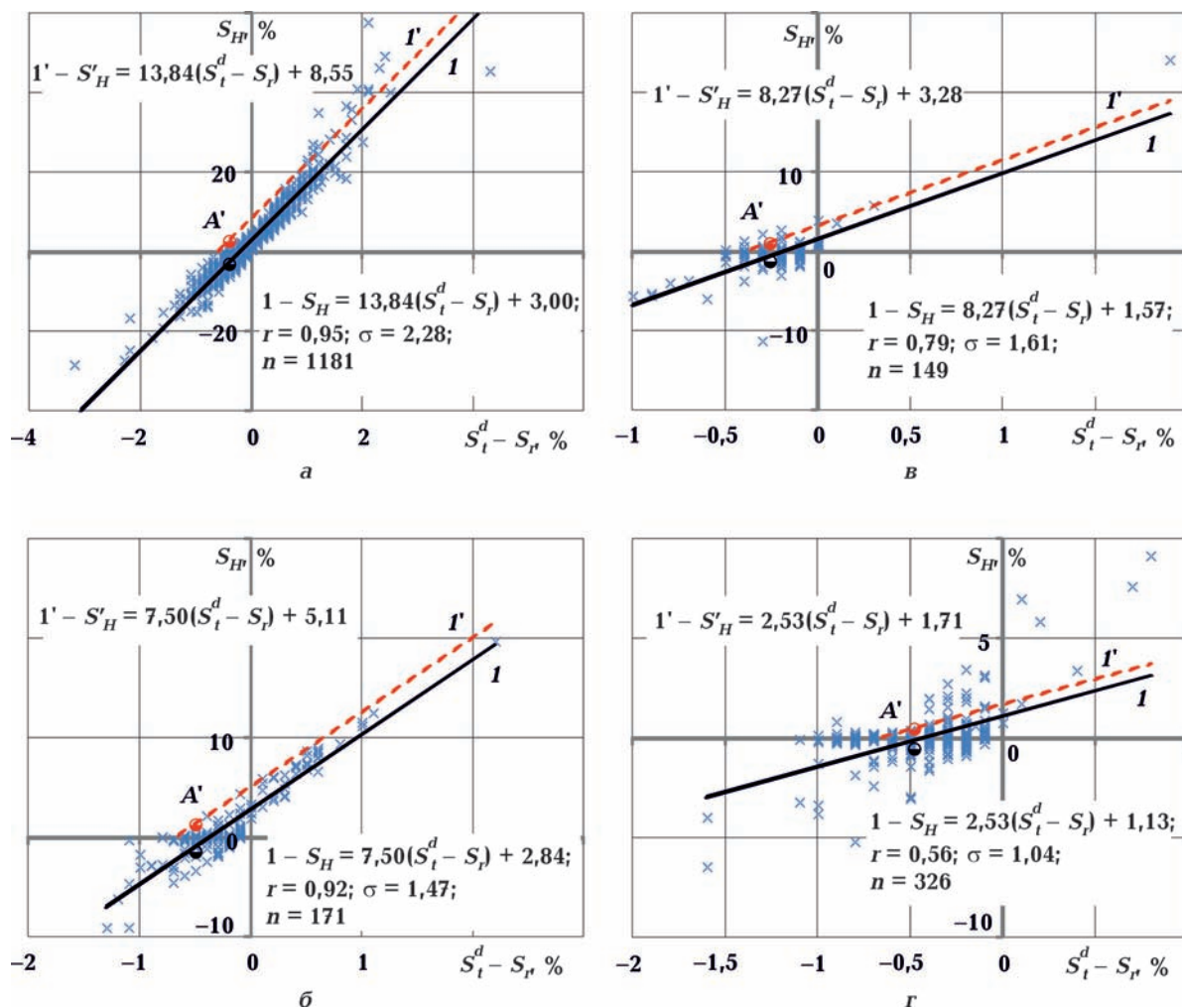


Рис. 4. Залежність розрахункових значень вмісту сірки (S_H) в умовно негорючій частині палива від критерію $S_t^d - S_r$: а–г — відповідно для 4–7-ї сукупностей шахтопластів; I — усереднені прямі; I' — скориговані положення усереднених прямих; A' — умовне знаходження точки для коригування розташування прямої I' та усунення підстав отримання «диких» усереднених значень S_H ; x — розрахункові значення S_H за рівняннями (5) або (6) на підставі експериментальних даних [Справочник..., 1965, 1972]; r — коефіцієнти кореляції; σ — середньоквадратичні відхилення; n — кількість оброблених пар даних.

Fig. 4. Dependence of the calculated values of the sulfur content (S_H) in the conditionally non-combustible part of the fuel on the criterion $S_t^d - S_r$: а–г — respectively for the 4–7th sets of coal seams; I — averaging straight lines; I' — corrected positions of the averaging lines; A' — conditional location, points for correcting the location of the straight line I' and eliminating the receipt of «wild» averaged values S_H ; x — calculated values of S_H according to equations (5) or (6) based on experimental data [Handbook..., 1965, 1972]; r — correlation coefficients; σ — standard deviations; n — number of data pairs processed.

Коефіцієнти кореляції відповідно становили 0,95 та 0,92. Коефіцієнти регресії цих залежностей (рис. 4, а, б) відповідно дорівнювали 13,84 та 7,50. Різниця між емпіричними коефіцієнтами регресії майже вдвічі вказує на наявність суттєвих відмінностей між вугіллям 4-ї та 5-ї сукупностей шахтопластів. Вона може бути викликана як кількісним і якісним складом мінеральних домішок у пластових пробах, так й збагаченням вугілля різними способами. Вплив цих факторів потребує окремого детальнішого дослідження.

Аналогічні сукупності шахтопластів сформували за виходом золи із пластових (незбагачених) проб менше та більше 10%. Для 6-ї сукупності зі 149 шахтопластів виявлено залежність S_H від критерію $S_i^d - S_r$ при виході золи з незбагачених (пластових) проб менш як 10% (див. рис. 4, в). У 7-й сукупності з 326 шахтопластів розглянуто аналогічні залежності розрахункових значень S_H від критерію $S_i^d - S_r$ при виході золи понад 10% (рис. 4, г).

Отримані прямо пропорційні емпіричні залежності для 6-ї та 7-ї сукупностей шахтопластів з різним виходом золи з незбагачених (пластових) проб істотно відрізняються одна від одної. Ці відмінності обумовлені як тісністю кореляційних зв'язків, так і коефіцієнтами регресії емпіричних рівнянь.

Вихід золи з незбагачених (пластових) проб менш як 10% вказує на низьку зольність вугілля 6-ї сукупності шахтопластів. Для цієї сукупності встановлено досить високу тісноту кореляційного зв'язку ($r=0,79$). Для більш зольного вугілля 7-ї сукупності шахтопластів тіснота кореляційного зв'язку значно нижча ($r=0,56$).

Коефіцієнти регресії емпіричних рівнянь 6-ї та 7-ї сукупності шахтопластів відрізняються одна від одної більш ніж утричі: відповідно 8,27 (рис. 4, в) та 2,53 (рис. 4, г). Виявлені суттєві відмінності між емпіричними залежностями 6-ї та 7-ї сукупностями шахтопластів за тісністю кореляційних зв'язків та коефіцієнтів регресії засвідчують різні особливості умов накопичення сірки в мінеральній (умовно негорючій)

частині палива для вугілля з різним рівнем виходу золи.

Низький рівень виходу золи (менш як 10%) відповідає незначному вмісту мінеральних домішок. Досить високий коефіцієнт кореляції ($r=0,79$) між розрахунковим вмістом сірки в умовно негорючій частині та критерієм $S_i^d - S_r$ (рис. 4, в) вказує на одночасне (паралельне) формування вмісту сірки в мінеральних домішках та в органічній масі на різних стадіях вуглеутворення. Відсутність такої тісної кореляційної залежності для високозольного вугілля характеризує різні умови формування вмісту сірки в мінеральних домішках та в органічній масі 7-ї сукупності шахтопластів (рис. 4, г).

Висновки. Відповідно до емпіричних рівнянь (див. рис. 4), попарно розглянуто сукупності шахтопластів, які різнилися, за інших рівних умов, за двома факторами (див. табл. 3):

– вугілля збагачували або ці процеси були відсутні;

– вихід золи зі збагаченого або незбагаченого вугілля становив відповідно менше або більше десяти відсотків.

Процеси збагачення вносять суттєві зміни співвідношень як між органічною масою та мінеральними домішками, так і між горючими та умовно негорючими частинами палива. З цієї причини 1-ша, 2-га, 4-та й 5-та сукупності шахтопластів і відповідні їм емпіричні рівняння не відображають істотного природного вмісту сірки в негорючих частинах викопного вугілля. Вони не можуть бути використані для прогнозу небезпечних властивостей шахтопластів під час ведення гірничих робіт.

Вміст сірки в умовно негорючій масі незбагачених проб для 3-ї та 7-ї сукупностей шахтопластів знижується через наявність високого виходу золи та застосування альтернативного стандартного методу визначення вмісту загальної сірки. Область застосування емпіричних рівнянь, що відповідають цим сукупностям, обмежена шахтопластами з низькозольним вугіллям і незначним вмістом сполук кальцію в мінеральних домішках.

Найбільш достовірні результати визначення розрахункового вмісту сірки в умовно негорючій масі отримані для 6-ї сукупності шахтопластів. Практичне застосування отриманого емпіричного рівняння $S_H = 8,27(S_r^d - S_r) + 3,28$ рекомендується при прогнозі небезпечних властивостей шахтопластів із виходом золи пластових проб менш як 10 %.

Розширення сфери застосування запропонованого методу визначення вмісту

сірки в мінеральних домішках можливе після встановлення співвідношення її вмісту в органічній та горючій масі вугілля, а також між мінеральними домішками та виходом золи з визначенням хімічного складу останньої. Результати таких досліджень сприятимуть удосконаленню нормативних документів щодо безпечного ведення гірничих робіт з урахуванням вмісту сірки як в органічній масі, так й в мінеральних домішках викопного вугілля.

Список літератури

- Авгушевич И.В., Сидорук Е.И., Броновец Т.М. *Стандартные методы испытания углей. Классификации углей*. Москва: Реклама мастер, 2019. 576 с.
- ГОСТ 17070-2014. *Межгосударственный стандарт. Угли. Термины и определения*. Москва: Стандартинформ, 2015. 15 с.
- ГОСТ 2059-95. *Межгосударственный стандарт. Топливо твердое минеральное. Метод определения общей серы сжиганием при высокой температуре*. Минск: Стандартинформ, 2008. 11 с.
- ГОСТ 25543-2013. *Межгосударственный стандарт. Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам*. Москва: Стандартинформ, 2014. 19 с.
- ГОСТ 8606-2015. *Межгосударственный стандарт. Топливо твердое минеральное. Определение общей серы. Метод Эшка. Издание официальное*. Москва: Стандартинформ, 2019. 22 с.
- Греков С.П., Всякий А.А. Влияние содержания серы в углях на вероятность их самовозгорания. *Уголь Украины*. 2014. № 4. С. 18—21.
- Греков С.П., Пашковский П.С., Орликова В.П. Тепловой эффект окисления углей и эндогенная пожароопасность. *Уголь Украины*. 2014. № 10. С. 46—50.
- Каталог углей СССР, склонных к самовозгоранию. Под. ред. Н.И. Линденау, В.М. Маевской, Е.С. Вахрушева. Москва: Недра, 1981. 311 с.
- Клер В.Р. *Изучение и геолого-экономическая оценка качества углей при геологоразведочных работах*. Москва: Недра, 1975. 320 с.
- Руднев Є.С., Антощенко М.І., Філатьєва Е.М., Романченко Ю.А. Про вплив мінеральних домішок на виявлення небезпечних властивостей вугільних шахтопластів. *Вісник Донецьк. гірничого ін-ту*. 2021а. № 2(49). С. 85—95. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2021-2-85-95>.
- Руднев Є.С., Гальченко В.А., Філатьєва Е.М., Антощенко М.І. Сірка у викопному вугіллі як фактор прояву небезпечних властивостей шахтопластів. *Вісник Криворізьк. нац. Ун-ту. Збірник наук. праць*. 2021б. Вип. 53. С. 21—28. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2021-1-53-21-28>.
- Руководство по предупреждению и тушению эндогенных пожаров на угольных шахтах Украины: ҚД 12.01.402-2000*. Донецк: Изд. НИИГД, 2000. 216 с.
- Справочник по качеству и обогатимости каменных углей и антрацитов Украинской ССР (Донбасс в границах УССР, Львовско-Волынский бассейн). Характеристика качества каменных углей и антрацитов Украинской ССР*. Москва: Недра, 1965. 204 с.
- Справочник по качеству каменных углей и антрацитов Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов*. Москва: Недра, 1972. 168 с.

Engineering method for determining the sulfur of mineral impurities for the prediction of hazardous properties of coal seams

*Ye.S. Rudniev, E.M. Filatieva, M.V. Filatiev, V.Yu. Tarasov,
M.I. Antoshchenko, 2023*

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Kyiv, Ukraine

Purpose: develop an engineering method for determining sulfur in mineral impurities to predict the hazardous properties of mine seams in mining operations.

Methodology: the research methodology and the development of the method are based on a close correlation dependence of the sulfur content in the combustible part of the fuel on the total sulfur for coals of almost all mine seams of the Donetsk and Lvov-Volyn basins. The ratios between the organic mass and mineral impurities are characterized by the yield of ash. The ratio of ash content of reservoir and enriched samples, as well as information about the content of total sulfur and sulfur in the combustible part, make it possible to estimate the sulfur content in mineral impurities by calculation. All the initial data necessary for the development of the method were established experimentally by standard methods over several decades and are given in the reference and regulatory documents on the consumer qualities of coals.

Results: the percentage of total sulfur for the entire set of considered coal seams can either exceed the sulfur content in the combustible part of the fuel or vice versa. The difference between the content of total sulfur and its presence in the combustible part of the fuel is, in the first approximation, a criterion for assessing the possible sulfur content in the conditionally non-combustible part of the fuel. Negative values of the criterion indicate the predominant sulfur content in the combustible part, and positive values, in the conditionally non-combustible (mineral) impurities.

Based on the available initial experimental data on the content of total sulfur in the combustible part of the fuel, the yield of ash from reservoir and enriched samples, dependencies are proposed for calculating the sulfur content in conditionally non-combustible components.

Between the calculated values of the sulfur content in the conditionally non-combustible part and the proposed criterion, correlations are considered for seven sets of coal seams. The formation of the populations was done taking into account the possible influence of enrichment processes and positive or negative values of the proposed criterion.

Based on the analysis of empirical dependences of the considered sets of coal seams, the necessary conditions were established for obtaining the most reliable results of the calculated determination of sulfur in conditionally non-combustible (mineral) impurities of fossil coals.

Scientific novelty: for the first time, empirical dependences of the sulfur content in conditionally non-combustible (mineral) impurities were established according to the proposed criterion.

Practical value: the results are necessary to improve the regulatory framework for the safety of mining operations in terms of predicting the manifestation of hazardous properties of coal seams due to the presence of sulfur varieties.

Key words: coal, consumer qualities, organic, mineral, combustible, ash, sulfur, coal seams, hazardous properties, forecast, regulatory framework.

References

- Avgushevich, I.V., Sidoruk, E.I., & Bronovets, T.M. (2019). *Standard Methods for Testing Coals. Classification of coals*. Moscow: Reklama master, 576 p. (in Russian).
- GOST 17070-2014. *Interstate standard. Coals. Terms and Definitions*. (2015). Moscow: Standartinform, 15 p. (in Russian).
- GOST 2059-95. *Interstate standard. Solid mineral fuel. Method for determination of total sulfur by combustion at high temperature*. (2008). Minsk: Standartinform, 11 p. (in Russian).
- GOST 25543-2013. *Interstate standard. Coals brown, stone and anthracites. Classification according to genetic and technological parameters*. (2014). Moscow: Standartinform, 19 p. (in Russian).
- GOST 8606-2015. *Interstate standard. Solid mineral fuel. Determination of total sulfur. Ashke's method. Official edition*. (2019). Moscow: Standartinform, 22 p. (in Russian).
- Grekov, S.P., & Vsyakiy, A.A. (2014). Influence of sulfur content in coals on the probability of their spontaneous combustion. *Ugol Ukrainy*, (4), 18—21 (in Russian).
- Grekov, S.P., Pashkovskiy, P.S., & Orlikova, V.P. (2014). Thermal effect of coal oxidation and endogenous fire hazard. *Ugol Ukrainy*, (10), 46—50 (in Russian).
- Lindenau, N.I., Maevskaya, V.M., & Vakhrushev, E.S. (Eds.). (1981). *Catalog of USSR coals prone to spontaneous combustion*. Moscow: Nedra, 311 p. (in Russian).
- Claire, W.R. (1975). *Study and geological and economic assessment of the quality of coals during geological exploration*. Moscow: Nedra, 320 p. (in Russian).
- Rudnev, E.S., Antoshchenko, M.I., Filatyeva, E.M., & Romanchenko, Yu.A. (2021a). About the influence of mineral impurities on the detection of dangerous properties of coal mine layers. *Visti Donetskoho hirnychoho instytutu*, (2), 85—95. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2021-2-85-95> (in Ukrainian).
- Rudnev, E.S., Galchenko, V.A., Filatyeva, E.M., & Antoshchenko, M.I. (2021b). Sulfur in fossil coal as a factor in the manifestation of dangerous properties of mine plastics. Bulletin of Kryvyi Rih National University. *Visnyk Kryvoriz'koho natsional'noho universytetu. Zbirnyk naukovykh prats*, (53), 21—28. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2021-1-53-21-28> (in Ukrainian).
- Guidelines for the prevention and suppression of endogenous fires in the coal mines of Ukraine: KD 12.01.402-2000*. (2000). Donetsk: NIIGD Edition, 216 p. (in Russian).
- Reference book on the quality and washability of hard coals and anthracites of the Ukrainian SSR (Donbass within the borders of the Ukrainian SSR, Lvov-Volyn basin). Characteristics of the quality of hard coals and anthracites of the Ukrainian SSR*. (1965). Moscow: Nedra, 204 p. (in Russian).
- Reference book on the quality of hard coals and anthracites of the Donetsk and Lvov-Volyn basins*. (1972). Moscow: Nedra, 168 p. (in Russian).