

Є.С. Руднєв

*Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Україна***ДО ПИТАННЯ НАУКОВОГО ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПОКАЗНИКІВ ПРОЯВУ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВУГІЛЬНИХ ШАХТОПЛАСТІВ**

*У статті здійснений перерахунок показників якості вугілля на їх робочий стан з урахуванням виходу золи та вмісту вологи для шахтопластів з подальшим аналізом зміни кореляційних зв'язків між показниками. Результати досліджень дозволяють розробити пропозиції щодо вдосконалення нормативної бази щодо прогнозу прояву небезпечних властивостей шахтопластів при веденні гірничих робіт.*

**Ключові слова:** вугілля, метаморфізм, показники, обґрунтування, мінеральні домішки, співвідношення, стан, сухе, беззольне, робоче, шахтопласти, гірничі роботи, безпека, нормативна база, удосконалення.

**Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій**

В даний час склалася ситуація, коли для прогнозу прояву небезпечних властивостей шахтопластів під час гірничих робіт використовуються показники, розроблені для встановлення споживчих якостей вугілля. До небезпечних властивостей відносяться виділення вибухонебезпечних газів, раптові їх викиди з вибоїв виробок разом з вугіллям або породою, виникнення вогнищ самозаймання вугілля, вибуховість вугільного пилу та деякі інші негативні наслідки ведення гірничих робіт, які нерідко закінчуються аваріями з тяжкими наслідками для працюючих та фінансовими витратами вугільних підприємств.

У нормативній базі України щодо безпечного ведення гірничих робіт [1-10] для прогнозу зазначених небезпечних властивостей використовується обмежена кількість показників: вихід летких речовин при термічному розкладанні вугілля без доступу повітря ( $V^{daf}$ ); об'ємний вихід летких речовин ( $V_V^{daf}$ ); логарифм питомого електроопору антрацитів ( $lg\rho$ ); товщина пластичного шару ( $y$ ). За допомогою цих показників проводиться оцінка ступеня метаморфічних перетворень вугільних шахтопластів, які сприяють появі небезпечних властивостей.

В окремому випадку, згідно з офіційним визначенням [11], під метаморфізмом мається на увазі перетворення бурого вугілля послідовно на кам'яне вугілля та антрацит внаслідок зміни хімічного складу, структури та фізичних властивостей вугілля у надрах переважно під впливом підвищеної температури та тиску.

У більш загальному випадку до метаморфічних порід відносяться породи, що змінили мінеральний склад або розмір та текстуру агрегатів зерен, без істотної зміни хімічного складу (за винятком вмісту

$H_2O$  та  $CO_2$ ) під впливом флюїдів, температури та тиску [12].

Сучасна промислова класифікація вугілля [13], як і всі попередні, були розроблені на підставі раніше складеної геолого-вуглехімічної карти [14]. В якості одного з основних показників ступеня метаморфізму вугілля в цих документах було прийнято показник  $V^{daf}$ . Залежно від значень цього показника було встановлено [14] зміни вмісту вуглецю в органічній масі, товщині пластичного шару, виходу нафталінового екстракту, теплоти згоряння та механічної міцності по копру. Встановлено також одностороннє елементне збільшення вмісту вуглецю та зниження вмісту інших основних компонентів вугілля (водню, азоту, кисню) при посиленні впливу метаморфічних процесів (зниженні  $V^{daf}$ ). Вважалось, що споживчі якості вугілля (спікання, розчинність у вуглеводнях, теплота згоряння, механічна міцність та деякі інші) достатньою мірою характеризуються показником  $V^{daf}$  [14]. У найбільш досконалій сучасній промисловій класифікації [13] спільно з показником  $V^{daf}$  розглядаються ще дев'ять показників. Враховуючи завдання, які вирішуються промисловою класифікацією в частині визначення якості вугілля, всі показники, крім максимальної вологоємності ( $W_{max}$ ), розглядалися на різних стани палива. Ці стани прийняті на підставі методик визначення показників згідно з відповідними ДСТУ. Теплота згоряння визначається на вологий беззольний стан (af), вихід смоли напівкоксовання, вихід летких речовин - на сухий беззольний стан (daf). Інші показники визначаються для аналітичного стану проб (a).

Аналітична проба - проба, отримана внаслідок обробки об'єднаної або лабораторної проб і призначена для проведення аналізів. Аналітична проба зазвичай характеризується крупністю  $0\div 0,2$  мм (-212 мкм). Обробка лабораторією проби

до аналітичної складається з операцій підсушування, подрібнення та скорочення [15]. Метою розгляду показників різних станів вугілля є об'єктивне встановлення споживчих якостей палива. Для цього попередньо проводиться збагачення проб вугілля до виходу золи, як правило, до рівня менше 10% та їх підсушування до стану, який близький до повітряно сухого.

На відміну від аналітичного стану проб вугілля показники ступеня метаморфізму при визначенні небезпечних властивостей шахтопластів повинні відповідати стану вугілля у зонах ведення гірничих робіт. Використовуючи показники для прогнозу небезпечних властивостей шахтопластів, значення яких визначено за методиками для встановлення якості продукції, заздалегідь вносяться похибки у достовірність таких прогнозів. Похибки в цьому випадку викликані тим, що всі показники відносяться лише до органічної (горючої) маси та ігнорується наявність мінеральних домішок та вологи.

### Формулювання мети статті

**Ідея** полягає у використанні результатів аналізу якості вугілля [16, 17] після перерахунку на робочий стан палива згідно з методиками [15, 18] з подальшим їх розглядом для вдосконалення прогнозу небезпечних властивостей шахтопластів під час гірничих робіт. Необхідність розгляду палива на його робочий стан обумовлена різними кінцевими цілями між встановленням споживчих якостей вугілля та проявом небезпечних властивостей шахтопластів. Різні кінцеві цілі розглянутих проблем припускають і різні шляхи їх вирішення, включаючи відмінності між впливаючими факторами та їх параметрами.

**Мета** - встановити зміни тісноти кореляційних взаємозалежностей між показниками якості продукції, встановленими на підставі результатів аналізу аналітичних проб та перерахунку цих результатів на робочий стан палива у зоні ведення гірничих робіт з додатковим розглядом для кожного шахтопласту вмісту мінеральних домішок та вологи.

### Методика

Методика передбачає для досягнення поставленої мети використовувати вихідні експериментальні дані [16, 17], які були накопичені протягом кількох десятиліть на підставі досвіду використання вугілля в промислових цілях. Стан та якість вугілля після його підготовки для використання суттєво відрізняється від стану у зоні ведення гірничих робіт. Ці відмінності пов'язані з попереднім збагаченням вугілля та видаленням деякої кількості мінеральних домішок. Їх загальний вміст, виходячи з виходу золи [16, 17], може у ряді

випадків перевищувати 40%. При встановленні якості палива також видаляється зовнішня волога.

Видалення частини мінеральних домішок та зовнішньої вологи змінюють фізико-хімічні властивості вугілля, які не відповідають його стану в зоні ведення гірничих робіт. Відомі методики [15, 18] дозволяють з достатньою для практики точністю перерахувати значення показників якості на їх робочий стан ( $r$ ) в зоні ведення гірничих робіт.

При перерахунку вихідних даних для пластових проб попередньо не усувається вплив випадкового природного вмісту у вугіллі шахтопласту, який конкретно розглядається мінеральних домішок та вологи. Більшість показників якості характеризують не вугілля загалом, а його органічну масу (елементний склад, вихід летких речовин, теплоту згоряння тощо). Перерахунок цих результатів на органічну масу (табл. 1) утруднений через відсутність надійного методу визначення у вугіллі мінеральної маси [15]. Оскільки надійного методу визначення мінеральної маси ( $MM$ ) у твердих паливах немає, свого часу було запропоновано ряд наближених формул для її підрахунку. В основі формул лежить значення зольності та введені поправочні коефіцієнти відповідно до реакцій перетворення мінеральних компонентів при озоленні. Щоб при перерахунках наблизити значення зольності ( $A$ ) до мінеральної маси ( $MM$ ) вводяться поправки на масову частку вуглецю  $CO_2$  з карбонатів мінеральної маси, гідратну вологу ( $W_{MM}$ ) і поправки, пов'язані з вмістом різновидів сірки у вугіллі. Ці додаткові дані у довідково-нормативних документах [16, 17] не наведені, а замість елементного складу органічної маси вказаний склад горючої частини палива. З зазначених причин перехід наведених у довідниках показників від вмісту в паливній частині на їхній робочий стан ( $r$ ) проводили з поправкою коефіцієнтів як для стану  $daf$  (табл. 1) з урахуванням виходу золи для кожного шахтопласту та вологості вугілля.

При перерахунку враховувався для кожного показника стан палива, що відповідає його якості та вводилися необхідні поправки на вихід золи для збагачених ( $A_0^{\circ}$ ) та пластових ( $A_p^{\circ}$ ) проб, та вміст загальної вологи ( $W$ ). Крім цього розглянуто співвідношення вмісту загальної сірки ( $S_t^{\circ}$ ) та сірки у горючій частині ( $S_r$ ), а також загальної сірки ( $S_t^{\circ}$ ) та її значеннями, перерахованими на робочий стан палива ( $S_r^f$ ). Результати перерахунку значень окремих показників на робочий стан для шахтопластів, наведених у довідково-нормативних документах [16, 17], систематизовано у таблицях 2 та 3. У ній наведені отримані емпіричні залежності між значеннями показників на робочий стан палива ( $r$ ) та вихідним станом проб, що характеризують відповідно збагачене та незбагачене вугілля.

Таблиця 1

Коефіцієнти для перерахунку результатів аналізу з одного стану палива до іншого згідно з [15, 18]

| Вихідний стан палива, індекс | Стан, на який проводять перерахунок, індекс |                                  |                           |                                   |                                    |
|------------------------------|---|----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
|                              | Робочий, r                                  | Аналітичний, a                   | Сухий, d                  | Сухий беззольний, daf             | Органічний, o                      |
| Робочий, r                   | 1   | $\frac{100 - W^a}{100 - W_t^r}$  | $\frac{100}{100 - W_t^r}$ | $\frac{100}{100 - (W_t^r + A^r)}$ | $\frac{100}{100 - (W_t^r + MM^r)}$ |
| Аналітичний, a               | $\frac{100 - W_t^r}{100 - W^a}$             | 1                                | $\frac{100}{100 - W^a}$   | $\frac{100}{100 - (W^a + A^a)}$   | $\frac{100}{100 - (W^a + MM^a)}$   |
| Сухий, d                     | $\frac{100 - W_t^r}{100}$                   | $\frac{100 - W^a}{100}$          | 1                         | $\frac{100}{100 - A^d}$           | $\frac{100}{100 - MM^d}$           |
| Сухий беззольний, daf        | $\frac{100 - (W_t^r + A^r)}{100}$           | $\frac{100 - (W^a + A^a)}{100}$  | $\frac{100 - A^d}{100}$   | 1                                 | $\frac{100 - A^d}{100 - MM^d}$     |
| Органічний, o                | $\frac{100 - (W_t^r + MM^r)}{100}$          | $\frac{100 - (W^a + MM^a)}{100}$ | $\frac{100 - MM^d}{100}$  | $\frac{100 - MM^d}{100 - A^d}$    | 1                                  |

Таблиця 2

Результати статистичної обробки показників споживчих якостей палива [16, 17] на стан збагачених проб

| Показники споживчих якостей вугілля         | Умовне позначення | Розмірність        | Джерело | Кількість пластів | Залежності між показниками якості палива та стану збагачених проб | Коефіцієнти кореляції | Середньоквадратичне відхилення, $\sigma$ |
|---|-------------------|--------------------|---------|-------------------|---|-----------------------|--|
| Вихід летких речовин                        | $V^{daf}$         | %                  | [16]    | 52                | $V_o^r = 0,67 \cdot V^{daf} + 8,33$ (1)                           | 0,84                  | 1,20                                     |
|   |                   |                    | [17]    | 567               | $V_o^r = 0,86 \cdot V^{daf} + 0,31 \dots\dots(2)$                 | 0,99                  | 1,00                                     |
| Об'ємний вихід летких речовин               | $V_v^{daf}$       | см <sup>3</sup> /г | [16]    | —*                | —   | —                     | —  |
|   |                   |                    | [17]    | 277               | $V_{V_o}^r = 0,92 \cdot V^{daf} - 1,67$ (3)                       | 0,99                  | 4,22                                     |
| Теплота згоряння на вологий беззольний стан | $Q_s^{daf}$       | ккал/кг            | [16]    | 377               | $Q^r = 0,93 \cdot Q_s^{daf} - 145,1$ (4)                          | 0,74                  | 216,7                                    |
|   |                   |                    | [17]    | 1166              | $Q^r = 0,97 \cdot Q_s^{daf} - 420,5$ (5)                          | 0,88                  | 143,3                                    |
| Вміст вуглецю на горючу масу                | $C_r$             | %                  | [16]    | 52                | $C_o^r = 1,63 \cdot C^r - 60,89$ (6)                              | 0,90                  | 1,90                                     |
|   |                   |                    | [17]    | 491               | $C_o^r = 1,15 \cdot C^r - 23,94$ (7)                              | 0,94                  | 2,46                                     |
| Вміст водню на горючу масу                  | $H_r$             | %                  | [16]    | 52                | $H_o^r = 0,91 \cdot H^r - 0,12$ (8)                               | 0,86                  | 0,17                                     |
|   |                   |                    | [17]    | 491               | $H_o^r = 0,85 \cdot H^r + 0,09$ (9)                               | 0,99                  | 0,15                                     |
| Вміст сірки на горючу масу                  | $S_r$             | %                  | [16]    | 52                | $S_o^r = 0,89 \cdot S^r - 0,01$ (10)                              | 0,99                  | 0,13                                     |
|   |                   |                    | [17]    | 491               | $S_o^r = 0,86 \cdot S^r + 0,04$ (11)                              | 0,99                  | 0,09                                     |
| Вміст азоту на горючу масу                  | $N_r$             | %                  | [16]    | 52                | $N_o^r = 0,78 \cdot N^r + 0,15$ (12)                              | 0,93                  | 0,05                                     |
| Вміст кисню на горючу масу                  | $O_r$             | %                  | [16]    | 52                | $O_o^r = 0,78 \cdot O^r + 0,82$ (13)                              | 0,99                  | 0,22                                     |
| Вміст суми азоту та кисню на горючу масу    | $\Sigma N_r, O_r$ | %                  | [17]    | 491               | $\Sigma N_o^r, O_o^r = 0,84 \cdot (N_r + O_r) + 0,21$ (14)        | 0,99                  | 0,26                                     |

\* - відсутні дані [16] для спільної обробки показників

Таблиця 3

Результати статистичної обробки показників споживчих якостей палива [16, 17]  
на стан пластових проб

| Показники споживчих якостей вугілля        | Умовне позначення               | Розмірність        | Джерело | Кіл-ть пластів | Залежності між показниками якості палива та стану пластових проб                  | Коефіцієнти кореляції | Середньоквадратичне відхилення, $\sigma$ |
|--|---------------------------------|--------------------|---------|----------------|---|-----------------------|--|
| Вихід летких речовин                       | $V^{daf}$                       | %                  | [16]    | 100            | $V_{\Pi}^r = 0,64 \cdot V^{daf} + 6,56$ (1')                                      | 0,58                  | 2,65                                     |
|  |                                 |                    | [17]    | 637            | $V_{\Pi}^r = 0,72 \cdot V^{daf} + 0,32$ (2')                                      | 0,98                  | 2,07                                     |
| Об'ємний вихід летких речовин              | $V_V^{daf}$                     | см <sup>3</sup> /г | [16]    | –              | –   | –                     | –  |
|  |                                 |                    | [17]    | 318            | $V_{V\Pi}^r = 0,79 \cdot V^{daf} - 0,32$ (3')                                     | 0,98                  | 13,22                                    |
| Теплота згоряння на вологий беззолний стан | $Q_S^{daf}$                     | ккал/кг            | [16]    | 730            | $Q_{\Pi}^r = 0,42 \cdot Q_S^{daf} + 3381$ (4')                                    | 0,18                  | 624,6                                    |
|  |                                 |                    | [17]    | 1291           | $Q_{\Pi}^r = 0,48 \cdot Q_S^{daf} + 2598$ (5')                                    | 0,21                  | 660,6                                    |
| Вміст вуглецю на горючу масу               | $C_{\Gamma}$                    | %                  | [16]    | 100            | $C_{\Pi}^r = 1,28 \cdot C_{\Gamma} - 38,43$ (6')                                  | 0,50                  | 5,47                                     |
|  |                                 |                    | [17]    | 557            | $C_{\Pi}^r = 1,13 \cdot C_{\Gamma} - 34,45$ (7')                                  | 0,68                  | 7,09                                     |
| Вміст водню на горючу масу                 | $H_{\Gamma}$                    | %                  | [16]    | 100            | $H_{\Pi}^r = 0,71 \cdot H_{\Gamma} + 0,51$ (8')                                   | 0,50                  | 0,36                                     |
|  |                                 |                    | [17]    | 557            | $H_{\Pi}^r = 0,68 \cdot H_{\Gamma} + 0,15$ (9')                                   | 0,95                  | 0,36                                     |
| Вміст сірки на горючу масу                 | $S_{\Gamma}$                    | %                  | [16]    | 100            | $S_{\Pi}^r = 0,81 \cdot S_{\Gamma} - 0,01$ (10')                                  | 0,98                  | 0,25                                     |
|  |                                 |                    | [17]    | 557            | $S_{\Pi}^r = 0,70 \cdot S_{\Gamma} + 0,07$ (11')                                  | 0,96                  | 0,23                                     |
| Вміст азоту на горючу масу                 | $N_{\Gamma}$                    | %                  | [16]    | 100            | $N_{\Pi}^r = 0,69 \cdot N_{\Gamma} + 0,17$ (12')                                  | 0,74                  | 0,10                                     |
| Вміст кисню на горючу масу                 | $O_{\Gamma}$                    | %                  | [16]    | 100            | $O_{\Pi}^r = 0,73 \cdot O_{\Gamma} + 0,57$ (13')                                  | 0,94                  | 0,61                                     |
| Вміст суми азоту та кисню на горючу масу   | $\Sigma N_{\Gamma}, O_{\Gamma}$ | %                  | [17]    | 557            | $\Sigma N_{\Pi}^r, O_{\Pi}^r = 0,70 \cdot (N_{\Gamma} + O_{\Gamma}) + 0,21$ (14') | 0,98                  | 0,58                                     |

\*

За значеннями коефіцієнтів кореляції та середньоквадратичним відхиленням від усереднюючих прямих аналізували ступінь впливу виходу золи та вологи на зміну значень аналізованих показників при їх перерахунку на робочий стан.

### Виклад основного матеріалу

Відповідно до статистичної обробки вихідних експериментальних даних, наведених відповідно в різних джерелах [16] та [17], отримані, в більшості випадків, приблизно однакові результати. Вони насамперед відносяться до емпіричних залежностей для перерахунку показників якості палива від стану збагачених проб до робочого стану вугілля в зоні ведення гірничих робіт (табл. 2, пари рівнянь 1,2; 4,5; 6,7; 8,9; 10,11; 12,13). Близькість між зазначеними парами залежностей для збагачених проб пояснюється усуненням впливу попередньо віддаленої більшої частини мінеральних домішок. У цьому випадку перерахунок з сухого беззолного стану аналітичних проб на показники якості палива

проводився з поправкою на коефіцієнт  $\frac{100 - A_0^c}{100}$ . У

цій поправці використовувалася зольність тільки збагаченої проби  $A_0^c$ , значення якої свідомо менше 10%, що багато в чому визначає близькість між парами залежностей (табл. 2, пари рівнянь 1,2; 4,5; 6,7; 8,9; 10, 11; 12,13). Підтвердженням близькості між парами емпіричних залежностей для збагачених проб є не тільки значення, що мало відрізняються коефіцієнтів регресії і вільних членів рівнянь, а й близькі значення між собою коефіцієнтів кореляції та середньоквадратичних відхилень від усереднюючих прямих (табл. 2). У документі [17] містяться відомості лише про сумарний вміст азоту та кисню в горючій масі, а в довіднику [16] ці дані наведено окремо. Незважаючи на такі відмінності вихідних даних отримані досить близькі між собою залежності (табл. 2 рівняння 13 та 14), що пояснюється високою хімічною активністю кисню та інертністю азоту та його низьким вмістом (0,7÷1,8%) у горючій частині палива на всіх стадіях

метаморфічних перетворень шахтопластів. Зміна вмісту кисню в горючій частині відбувалося для аналізованої сукупності шахтопластів у ширшому діапазоні від 0,3 до 14,6% [16], що і вплинуло, спільно з процесами збагачення проб, на близькість рівнянь 13 та 14 (табл. 2).

Результати статистичної обробки експериментальних даних із різних джерел [16, 17] показали достатню їхню близькість на підставі аналізу отриманих емпіричних рівнянь. Вони характеризуються маловідмінними коефіцієнтами регресії, вагомими значеннями коефіцієнтів кореляції та допустимими для інженерних розрахунків середньоквадратичними відхиленнями від усереднюючих прямих, що вказує на достовірність вихідних експериментальних даних та доцільність їх використання при встановленні якості продукції.

При використанні аналізованих показників (табл. 2, 3) для прогнозу прояву небезпечних властивостей шахтопластів необхідно враховувати способи та методи визначення стану палива у лабораторних (штучних) умовах. Визначення показників на сухий беззольний стан (daf) або вологе беззольне (af) і встановлення вмісту компонентів горючої частини палива засновані на фізико-хімічних процесах, що принципово відрізняються між собою. Наприклад, у першому випадку показники стану палива ( $V_V^{daf}$ ,  $V_V^{daf}$ ) визначаються при температурній деструкції вугілля без доступу повітря, у другому визначення горючої-негорючої частини проводиться шляхом спалювання та видалення органічної маси у вигляді  $CO_2$  та  $H_2O$ , а мінеральні компоненти, які піддавалися ряду перетворень утворюють золу. Зола – неорганічний залишок після повного згоряння вугілля. Маса золи, що утворюється, або зольність, залежить від вмісту і складу мінеральної маси вугілля, а також умов їх спалювання [15].

Збагачення проб вугілля істотно знижує вплив мінеральних домішок, за рахунок видалення, як правило, більшої їх частини, на значення показників на сухий беззольний стан палива або елементний вміст компонентів у її горючій частині. Процес збагачення сприяє більш точному визначенню якості продукції за показниками, що відносяться як до її органічної маси, так і до встановлення вмісту основних компонентів у горючій частині палива. У даному випадку стан палива на сухий беззольний стан наближається до стану при його спалюванні з метою визначення горючих компонентів. Після збагачення в більшості випадків, судячи з виходу золи, вміст мінеральних домішок не перевищує, як правило 10%, що й визначає тісні кореляційні зв'язки між різними станами палива. З вказаних причин показники на стан daf (af) і вміст

компонентів у горючій частині характеризують, переважно, лише стан органічної (горючої) маси, а не стан палива в цілому у зоні ведення гірничих робіт.

Спільний розгляд органічної маси та мінеральних домішок (негорючого залишку пластових проб - золи) незбагачених проб необхідний для встановлення небезпечних властивостей шахтопластів у зоні ведення гірничих робіт. Спільний розгляд показників стану та властивостей органічної маси (горючої частини) та мінеральних домішок (виходу золи з пластової проби) вносить елемент випадковості у визначення значень показників ступеня метаморфічних перетворень. На значення показників при їх розгляді для окремого шахтопласту надаватиме додатковий вплив непередбачуваний вміст мінеральних домішок (вихід золи з незбагачених проб) та неоднозначна зміна вмісту вологи з посиленням впливу метаморфічних процесів. Неоднозначна зміна вологи у вугіллі полягає у її зменшенні по мірі посилення метаморфічних перетворень, але при переході до антрацитів вміст вологи знову зростає [19].

Значення показників органічної (горючої) частини палива є загальними характеристиками його якості для всієї сукупності шахтопластів. Це впливає з близькості коефіцієнтів регресії рівнянь між показниками якості палива та стану збагачених проб, високих значень коефіцієнтів кореляції та незначних середньоквадратичних відхилень від усереднюючих прямих, отриманих на підставі вихідних даних із різних [16, 17] джерел (табл. 2, 3). Це дає підстави всі розглянуті показники на стан збагачених проб вважати достовірними критеріями оцінки якості продукції і метаморфічних перетворень лише органічної (горючої) маси.

Такий висновок неможливо зробити на підставі результатів статистичної обробки та аналізу перерахунку вихідних показників зі станів палива, що характеризують його якість на стан вугілля в зоні ведення гірничих робіт (табл. 2, 3). Непередбачуваний вміст мінеральних домішок (вихід золи з пластових проб) і неоднозначна залежність вологи від ступеня метаморфічних перетворень є суто індивідуальними показниками для пласта, який окремо розглядається. Це слідує з ослаблення кореляційних залежностей між показниками на робочий стан палива зі своїми значеннями, які характеризують споживчі якості вугілля. У всіх розглянутих випадках (табл. 2, 3) спостерігалось зниження коефіцієнтів кореляції порівняно із залежностями між показниками якості палива на стан збагачених проб. Так для теплоти згоряння на вологе беззольне паливо коефіцієнти кореляції для різних джерел [16, 17] знизилися з



0,74±0,88 до 0,18±0,21. Відзначено також суттєве зниження коефіцієнтів кореляції деяких інших показників. Середньоквадратичні відхилення від усереднюючих прямих у всіх випадках зросли вдвічі-втричі. Такі співвідношення між статистичними показниками на робочий стан палива в зоні ведення гірничих робіт з їх значеннями, які визначають споживчі якості вугілля, не можуть гарантувати достовірну оцінку прояву небезпечних властивостей шахтопластів.

З отриманих результатів слідє, що для достовірного прогнозу прояву небезпечних властивостей конкретного шахтопласту в залежності від ступеня метаморфізму необхідно враховувати індивідуальну зміну властивостей вугілля, а також фактичне співвідношення між органічною (горючою) та мінеральною частинами палива та його вологістю в зоні ведення гірничих робіт.

При визначенні елементного вмісту вуглецю, водню та кисню необхідно мати на увазі, що ці елементи одночасно входять до складу органічної (горючою) та мінеральної (умовно негорючої) маси вугілля [15].

У мінеральній масі вугілля вуглець зустрічається у вигляді карбонатів, водень - у волозі та гідратній воді силікатів, кисень - у таких сполуках, як силікати (оксиди алюмінію та кремнію), оксиди заліза, карбонати, сульфати та ін. Відповідно до цього розрізняють: вуглець загальний ( $C$ ) та водень загальний ( $H$ ) - вміст вуглецю або водню в органічній та мінеральній масі вугілля; органічний вуглець ( $C_o$ ) та водень органічний ( $H_o$ ) - частина загального вуглецю або водню, що входить до складу органічної маси вугілля; вуглець неорганічний ( $C_{MM}$ ) - частина загального вуглецю, що входить до складу карбонатів мінеральної маси, та водень неорганічний ( $H_{MM}$ ) - частина загального водню, що входить до складу гідратної води силікатів. Азот та органічна сірка є елементами, пов'язаними виключно з органічними речовинами вугілля.

Визначення вмісту основних елементів  $C$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $N$  необхідне обов'язково для характеристики якості вугілля [14, 15]. Спочатку для визначення таких якостей ставився практично знак рівності між метаморфізмом і масовим виходом летких речовин ( $V^{daf}$ ), тому що залежно від цього показника склад вугілля за елементами ( $C$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $N$ ) змінювався в одному напрямку: вміст вуглецю зростає, а вміст інших елементів зменшується [14]. Поряд з цим, використовуючи  $V^{daf}$  як показник ступеня метаморфізму, який не характеризує безпосередню зміну елементного складу вугілля, не могли пояснити всю різноманітність їх споживчих якостей [14].

Зокрема це стосувалося різного вмісту кисню

при однаковому значенні  $V^{daf}$ . Враховуючи вплив вмісту кисню на споживчі якості вугілля (спікання, температура плавлення та згоряння тощо), близьких до виходу летких речовин, додатково стали розглядати різні типи вугілля. Наявністю типів вугілля пояснювали великий розкид експериментально визначених показників ( $C$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $N$ ) залежно від виходу летких речовин [14]. При цьому не бралось до уваги, що метаморфічні перетворення шахтопластів у природних умовах та температурна деструкція вугілля без доступу повітря в лабораторних умовах відносяться до різних стадій перетворення палива. Штучні процеси термічного розкладання визначають якість вугілля після його видобутку та подальше перетворення вихідної органічної речовини. Показник  $V^{daf}$  характеризує в цьому випадку тільки суму газів, що виділилися ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ), за якою немає безпосередньої можливості встановити зміни в елементному складі або структурі вугілля, які відбувалися в минулі геологічні періоди часу в підземних умовах. На різних стадіях метаморфічних змін шахтопластів відбувалися неоднозначні зміни елементарного складу органічної речовини. Зміни встановлені у вмісті вуглецю ( $C_o$ ), азоту ( $N_o$ ), сірки ( $S_o$ ), водню ( $H_o$ ) та кисню ( $O_o$ ). Паралельно з цими процесами спостерігалось утворення летких продуктів кожної стадії метаморфізму. Внаслідок реалізації певних стадій метаморфічних процесів з'явилися леткі продукти, які могли видалятися із системи. До них відносяться  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2S$  і  $NH_3$  [20].

Наведені особливості утворення летких речовин при термічному розкладанні вугілля та в процесі метаморфічних перетворень свідчать про неповну відповідність застосовуваного показника  $V^{daf}$  для встановлення ступеня метаморфізму та прогнозу прояву небезпечних властивостей шахтопластів під час гірничих робіт. Метаморфізм вугілля та його термічне розкладання є різними формами перетворення органічної маси, оскільки хімічні сполуки суттєво відрізняються за кількісним та якісним складом.

Раніше проведені дослідження [20] дозволили оцінити обґрунтованість застосування окремих показників ступеня метаморфічного перетворення вугілля для прогнозу прояву небезпечних властивостей шахтопластів. Деякі з рекомендацій для вдосконалення нормативної бази щодо безпечного ведення гірничих робіт зводяться до наступного:

– виходячи з визначення метаморфізму вугілля необхідно контролювати збільшення вмісту вуглецю та скорочення інших компонентів при паралельній зміні у фізико-механічних властивостях та структурній будові перетвореної речовини;

– кожен, окремо взятий, класифікаційний показник, як правило, відображає одну сторону метаморфічних перетворень вугілля;

– у більшості випадків при визначенні небезпечних властивостей шахтопластів дослідники використовували один-два показники, які однобоко характеризували різноманітність метаморфічних перетворень вугілля та служили загальним мірилом ступеня метаморфізму. Зокрема такі властивості, без достатнього наукового обґрунтування, приписувалися виходу летких речовин при термічному розкладанні вугілля та його марочної приналежності;

– ранжування властивостей вугілля за марочною приналежністю не співпадає зі ступенем його метаморфічних перетворень у минулі геологічні періоди;

– різні способи, методики, точність визначення класифікаційних показників та їх нелінійні взаємозалежності між собою не допускають їх повну взаємозамінність при визначенні небезпечних властивостей шахтопластів;

– сучасна промислова класифікація не розглядає одночасну зміну органічних та мінеральних складових вугілля, що не дає можливості використовувати її у незмінному вигляді для прогнозу небезпечних властивостей шахтопластів.

Елементний вміст вуглецю в органічній (горючій) масі є більш інформативним показником для встановлення небезпечних властивостей шахтопластів порівняно з виходом летких речовин. Перевага полягає у можливості його надійного визначення в усьому ряді метаморфічних перетворень вугілля та стовідсотковим контролем вмісту суми інших основних компонентів в органічній (горючій) масі  $O_o, H_o, N_o, S_o$  ( $O_{\Gamma}, H_{\Gamma}, N_{\Gamma}, S_{\Gamma}$ ). За здатністю контролювати суму інших компонентів в органічній або горючій масі показник  $C_o$  ( $C_{\Gamma}$ ) має перевагу перед одним з основних показників сучасної промислової класифікації [13] - відображенням вітриніту ( $R_{or}$ ). Між показниками  $V^{daf}$ ,  $C_o$  ( $C_{\Gamma}$ ) та  $R_{or}$  встановлені тісні нелінійні взаємозалежності (рис. 1), але при визначенні небезпечних властивостей шахтопластів, враховуючи можливість контролювати суму інших компонентів, перевага залишається за показником  $C_o$  ( $C_{\Gamma}$ ). В цьому випадку у суму інших контрольованих вуглецем елементів входить також вміст сірки  $S_o$  ( $S_{\Gamma}$ ), який мало вивчався під час встановлення якості продукції залежно від  $V^{daf}$  та  $R_{or}$ . Вміст загальної сірки багато в чому визначає безпеку шахтопластів щодо виникнення ендегенних пожеж [22].

Розгляд показників органічної маси на сухий беззольний стан, а показників горючої частини - на

сухий стан дозволив значною мірою усунути вплив мінеральних домішок та вологи щодо споживчих якостей продукції. Внаслідок цього вдалося встановити тенденцію зміни середнього вмісту основних компонентів органічної маси та горючої частини вугілля від вмісту вуглецю (рис. 2).

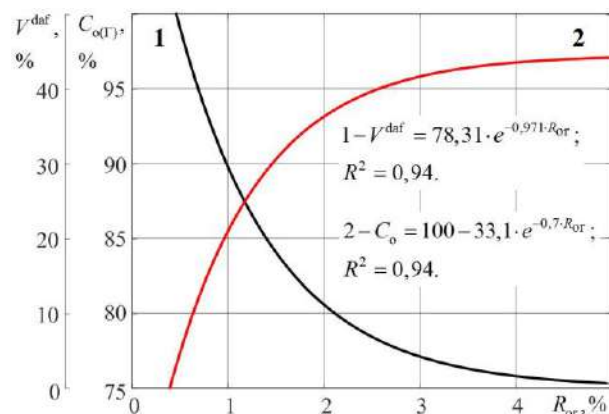


Рис.1. Взаємозалежність класифікаційних показників ступеня метаморфізму вугілля від відображення вітриніту  $R_{or}$ .

1 - крива залежності  $C_o(\Gamma)$  від  $R_{or}$  згідно з [21];  
 2 - крива залежності  $C_o(\Gamma)$  від  $R_{or}$  на підставі обробки відомих експериментальних даних;  $R^2$  – коефіцієнти детермінації.

Після розробки геолого-вуглехімічної карти [14] і до сьогодні вважається, що вміст кисню визначає основні якості вугілля за критерієм відновленості (окисленість). На прикладі експериментальних даних для десяти шахт був виконаний попередній аналіз співвідношення між виходом летких речовин, вмістом кисню в органічній масі, товщиною пластичного шару, розчинністю у вуглеводнях (виходом нафталінового екстракту), вмістом загальної сірки і складом золи основних окислів. Такої інформації було цілком достатньо для градації шахтопластів та встановлення споживчих якостей палива за вмістом лише одного компонента – кисню. На прояв небезпечних властивостей шахтопластів під час гірничих робіт можуть впливати, крім вмісту кисню, та інші компоненти органічної маси. До них відносяться, насамперед, вміст сірки та водню. Вміст вологи, враховуючи методики визначення основних компонентів органічної (горючої) маси, не розглядається разом із цими компонентами. Вміст всіх основних компонентів в органічній (горючій) масі та вологи не залишаються постійними під впливом метаморфічних перетворень. Спрямованість зміни вмісту середніх значень основних компонентів в органічній (горючій) масі та вологи від вмісту вуглецю чітко видно на підставі графіків (рис. 2). Зміна вмісту співвідношення основних компонентів в органічній масі та вологи

розглянуті на підставі їхніх середніх значень, встановлених для кожної з десяти стадій метаморфічних перетворень на підставі статистичної обробки понад тисячі проб (рис. 2, а) [23].

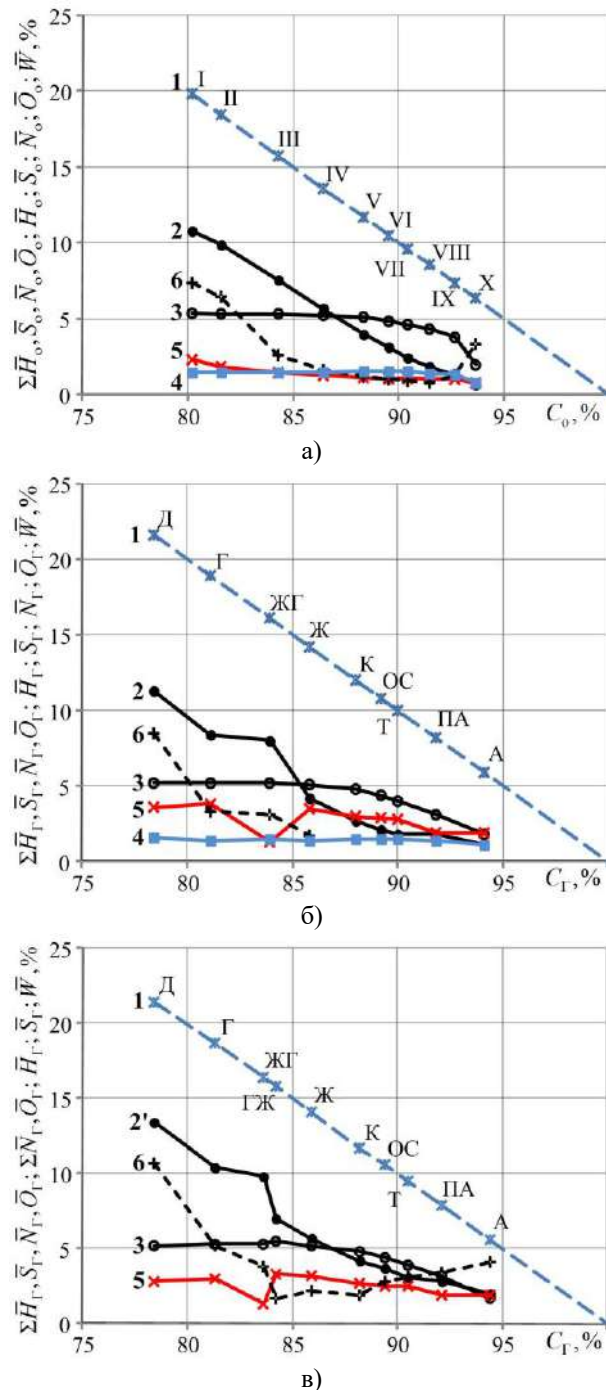


Рис.2. Залежність зміни вмісту середніх значень компонентів елементного складу органічної речовини на різних стадіях метаморфізму [23] (а) та зміна вмісту аналогічних компонентів у горючій складовій палива згідно з даними [16] (б) та [17] (в).

1 - прями залежностей середніх значень суми основних компонентів  $\Sigma \bar{H}_o, \bar{S}_o, \bar{N}_o, \bar{O}_o$  ( $\Sigma \bar{H}_\Gamma, \bar{S}_\Gamma, \bar{N}_\Gamma, \bar{O}_\Gamma$ ) від вуглецю  $\bar{C}_o$  ( $\bar{C}_\Gamma$ ); 2 - криві

зміни середніх значень кисню  $\bar{O}_o$  ( $\bar{O}_\Gamma$ ) від вуглецю  $\bar{C}_o$  ( $\bar{C}_\Gamma$ ); 2' - крива зміни середніх значень суми вмісту азоту та кисню  $\Sigma \bar{N}_\Gamma, \bar{O}_\Gamma$  у горючій частині палива; 3 - криві залежностей середніх значень водню  $\bar{H}_o$  ( $\bar{H}_\Gamma$ ) від вмісту вуглецю  $\bar{C}_o$  ( $\bar{C}_\Gamma$ ); 4 - криві зміни середнього вмісту азоту в органічній ( $\bar{N}_o$ ) або горючій ( $\bar{N}_\Gamma$ ) масі від вуглецю  $\bar{C}_o$  ( $\bar{C}_\Gamma$ ); 5 - криві зміни вмісту сірки в органічній ( $\bar{S}_o$ ) або горючій ( $\bar{S}_\Gamma$ ) масі; 6 - криві зміни середніх значень води ( $\bar{W}$ ) у пластових пробах; I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X - стадії метаморфічних перетворень згідно [23]; Д, Г, ЖГ, ГЖ, Ж, К, ОС, Т, ПА, А - марки вугілля згідно [16, 17];  $\times, \bullet, \circ, \blacksquare, \times, +$  - експериментальні дані середнього вмісту відповідно суми основних компонентів  $\Sigma \bar{H}_o, \bar{S}_o, \bar{N}_o, \bar{O}_o$  ( $\Sigma \bar{H}_\Gamma, \bar{S}_\Gamma, \bar{N}_\Gamma, \bar{O}_\Gamma$ ), кисню  $\bar{O}_o$  ( $\bar{O}_\Gamma$ ) або суми вмісту азоту та кисню  $\Sigma \bar{N}_\Gamma, \bar{O}_\Gamma$ , водню  $\bar{H}_o$  ( $\bar{H}_\Gamma$ ), азоту  $\bar{N}_o$  ( $\bar{N}_\Gamma$ ), сірки  $\bar{S}_o$  ( $\bar{S}_\Gamma$ ) в органічній чи горючій масі палива та води у пластових пробах ( $\bar{W}$ ) при визначенні компонентів органічної маси або у горючій частині палива.

Аналогічне співвідношення між зазначеними показниками розглянуті для їхнього середнього вмісту в горючій частині палива від вугілля марок Д до антрацитів (рис. 2, б і в). Такому напрямку ранжування вугілля за їх марочним визначенням відповідає посилення впливу метаморфічних процесів (зростання вмісту вуглецю в горючій частині). Для кожної марки розраховані також середні значення вмісту води у пластових пробах. У довідково-нормативних документах [16, 17] у більшості випадків не наведено відомостей для більшості шахтопластів про вологість вугілля. У довіднику [16] з розглянутих 734 шахтопластів дані про вологу вказані лише для 104, а в документі [17] із 1094 шахтопластів – у 473 випадках. У документах [16, 17] для шахтопластів, які містять антрацити та напівантрацити, відомості про наявність води взагалі не наведені. Це свідчить, що вміст зовнішньої води мало впливає на споживчі якості палива. Вміст води істотно впливає на прояв небезпечних властивостей шахтопластів. Наприклад, виникнення осередок самозаймання [24], рівень газоносності пластів [25] і пилоутворююча здатність вугілля [26]. Для детальнішого розгляду зміни води до наявних даних [17] додали відомості про вологість ще для 222 шахтопластів, наведених в каталозі [1]. У



документі [17] ці шахтопласти умовно були віднесені до антрацитових та напівантрацитових. До цієї категорії, враховуючи деяку умовність, увійшли також відомості про пласти з вугіллям інших марок. Ці шахтопласти наведені в одній сукупності з антрацитовими та напівантрацитовими шахтопластами. Додаткове залучення даних дало можливість аналізувати середню зміну вологості для 695 шахтопластів, у тому числі для 152 антрацитових та напівантрацитових (рис. 2, в). Порівняння графіків (рис. 2, а, б, в) показують, що зміна середньої вологи ( $\bar{W}$ ) в органічній масі вугілля (рис. 2, а) у мірі посилення впливу метаморфічних процесів (зростання  $\bar{C}_O$ ) та її зміна в пробах ( $W_T$ ) при розгляді основних компонентів горючої частини (рис. 2, б, в) від вмісту  $\bar{C}_T$  мають не тільки однаковий характер, а й близькі кількісні значення між  $\bar{W}_O$  та  $\bar{W}_T$ . Це свідчить про деяке закономірне зростання вологи в органічній (горючій) масі при переході від кам'яного вугілля до антрацитів, що підтверджується індивідуальними графіками залежності  $W_T$  від  $C_T$  шахтопластів (рис. 3).

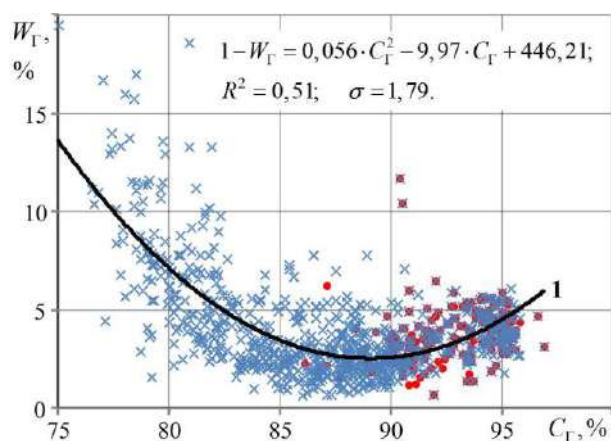


Рис. 3 Залежність вмісту вологи ( $W_T$ ) в пробах вугілля від вмісту вуглецю ( $C_T$ ) в горючій частині палива [17].

1 - усереднююча крива;  $\times$  - експериментальні дані [17];  $\bullet$  - спільні експериментальні дані про вологу шахтопластів згідно з каталогом [1] та вмістом вуглецю в горючій частині відповідно до даних [17];  $R^2, \sigma$  - відповідно коефіцієнт детермінації та середньоквадратичне відхилення.

Наявність кореляційної взаємозалежності між  $W_T$  та  $C_T$  з досить високим коефіцієнтом детермінації ( $R^2=0,51$ ). Поряд з цим великі середньоквадратичні відхилення ( $\sigma=1,79$ ) від усереднюючої кривої (1) свідчить про випадкове значення вологи для окремих шахтопластів. Це вказує на необхідність індивідуального розгляду

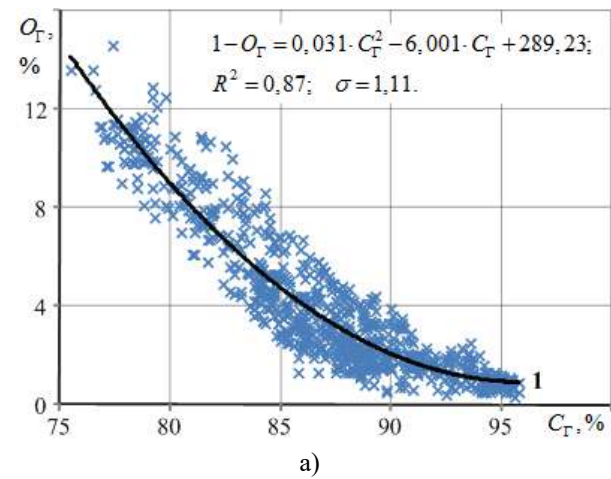
значення вмісту вологи для кожного шахтопласту, який відпрацьовується, при встановленні його небезпечних властивостей. Враховуючи різні можливі форми знаходження вологи у вугіллі [25], питання її впливу на безпеку ведення гірничих робіт потребує індивідуального вивчення при відпрацюванні кожного конкретного шахтопласту.

Спрямованість та характер зміни середнього вмісту кисню в горючій частині палива (рис. 2, б та в) підтвердилися результатами статистичної обробки вихідних даних [16, 17] (рис. 4). При обробці даних [16] встановлено тісну нелінійну кореляційну залежність вмісту кисню в горючій частині ( $O_T$ ) від вуглецю  $C_T$  (рис. 4, а). Вона характеризується високим значенням коефіцієнта детермінації ( $R^2=0,87$ ). Аналогічна залежність отримана під час обробки суми азоту і кисню ( $\Sigma N_T, O_T$ ) від вуглецю  $C_T$  даних, наведених у документі [17] (рис. 4, б). Незначні відмінності між коефіцієнтами детермінації (0,87 та 0,90) та середньоквадратичними відхиленнями (1,11 та 1,12%) від усереднюючих кривих (рис. 4, а та б) обумовлені низьким вмістом азоту ( $0,7 \div 1,8\%$ ) на всіх стадіях метаморфічного перетворення горючої частини палива (рис. 4, в). Вміст кисню при цьому змінювався в межах  $0,3 \div 14,6\%$  [16]. Відносно низький вміст азоту в горючій частині та незначна його зміна, порівняно зі скороченням вмісту кисню по мірі посилення метаморфічних перетворень, зумовило приблизно однакові показники кореляційних залежностей (рис. 4, а і б).

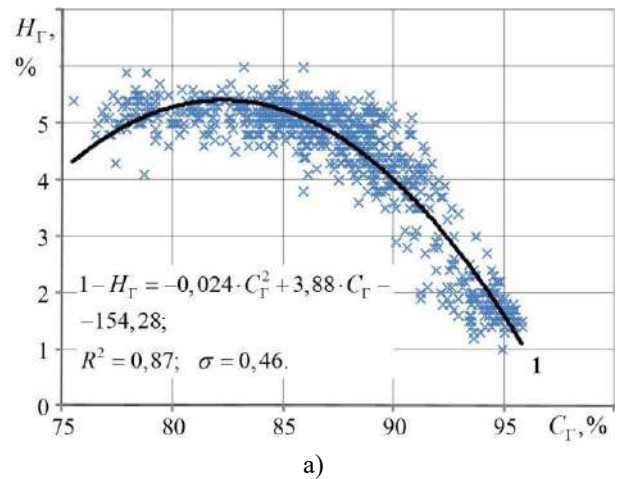
Нелінійна залежність водню у горючій частині палива ( $H_T$ ) встановлена (рис. 5) по мірі посилення впливу процесів метаморфізму (зростанні  $C_T$ ). Коефіцієнти детермінації ( $R^2$ ) для аналізованих залежностей зміни вмісту водню 0,87 та 0,92 приблизно однаково характеризують тісноту кореляційних залежностей у порівнянні із залежностями скорочення кисню, при посиленні впливу ступеня метаморфізму (рис. 4, а і б). Незважаючи на близькість тісноти кореляційних залежностей, скорочення вмісту водню та кисню відбуваються абсолютно за різними залежностями.

Зменшення вмісту кисню на всіх стадіях перетворення вихідної речовини відбувається більш рівномірно. Це підтверджується як графіками індивідуального (рис. 4, а і б), так і середнього (рис. 2, б і в) вмісту кисню в горючій частині палива.

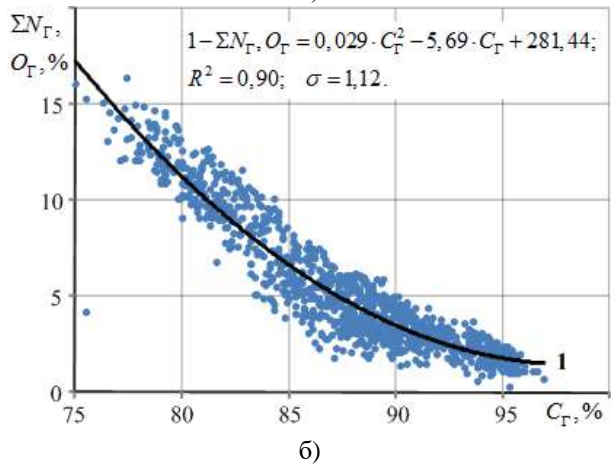
При вмісті вуглецю у горючій частині приблизно менше 85%, виходячи з графіків середнього вмісту водню (рис. 2, б і в) та його індивідуальних значень (рис. 5), зниження вмісту водню не відбувається і залишається приблизно постійною величиною для шахтопласту, який розглядається окремо.



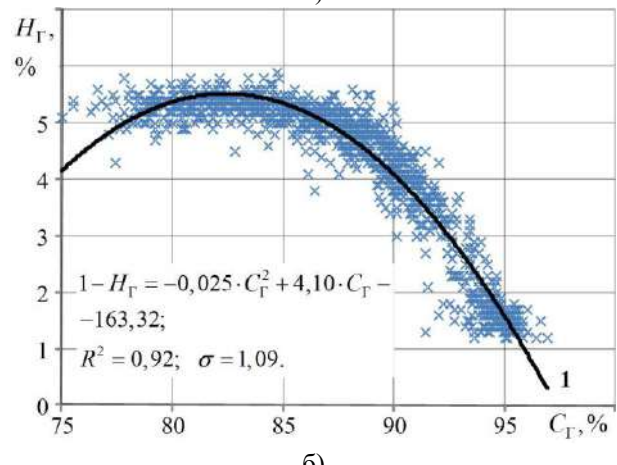
а)



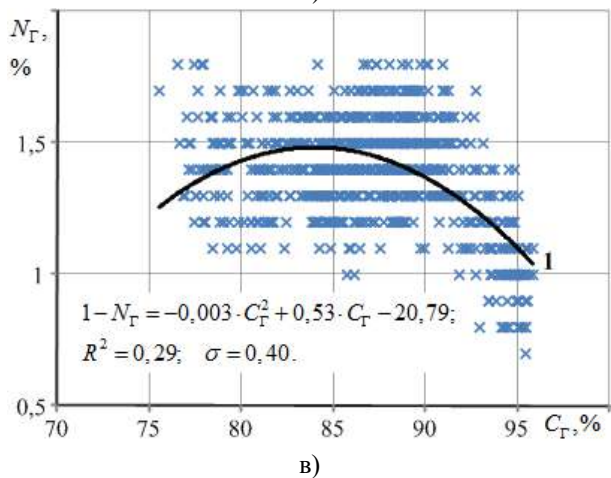
а)



б)



б)



в)

Рис. 4 Залежність вмісту кисню ( $O_G$ ) у горючій частині палива (а) суми ( $\Sigma N_G, O_G$ ) азоту та кисню (б) та азоту  $N_G$  (в) від вмісту вуглецю  $C_G$ . 1 - усереднюючі криві;  $\times$ ,  $\bullet$  - експериментальні дані для шахтопластів відповідно згідно [16] та [17];  $R^2$ ,  $\sigma$  - відповідно коефіцієнти детермінації та середньоквадратичні відхилення від усереднюючих кривих.

Помітне зниження водню відбувається, якщо в результаті метаморфічних перетворень вміст вуглецю в горючій частині палива перевищує приблизно 85%.

Рис. 5 Залежність вмісту водню ( $H_G$ ) у горючій частині палива від вмісту вуглецю ( $C_G$ ) для шахтопластів відповідно згідно [16] (а) та [17] (б). 1 - усереднюючі криві;  $\times$  - експериментальні дані;  $R^2$  та  $\sigma$  - відповідно коефіцієнти детермінації та середньоквадратичні відхилення від усереднюючих кривих.

Вочевидь, що різний характер залежностей та темпи зниження вмісту кисню та водню в горючій частині палива можуть неоднозначно впливати на прояв небезпечних властивостей шахтопластів на всіх стадіях їх метаморфічних перетворень.

Зміна вмісту сірки ( $S_G$ ) в горючій частині палива від вуглецю ( $C_G$ ) не підпорядковується певному виду кореляційного зв'язку. Певною мірою можна стверджувати лише про наявність тенденції до зниження вмісту сірки в горючій частині по мірі посилення метаморфічних перетворень. Така тенденція характеризується негативними, незначними за величиною, значеннями коефіцієнтів (-0,58 та -0,43) кореляції (рис. 6).

На підставі статистичної обробки залежності основних компонентів горючої частини палива від вмісту вуглецю встановлені тісні кореляційні зв'язки лише для кисню (рис. 4, а і б) та водню (рис. 5). Для вмісту сірки встановлені тенденції (рис. 6) до її зниження при значних середньоквадратичних

відхиленнях від усереднюючих прямих ( $\sigma = 1,11 \div 1,23\%$ ). При абсолютних максимальних значеннях сірки в горючій частині близько 6%, використовуючи правило "трьох сигм", слідує, що для будь-якого шахтопласту вміст сірки може непередбачено коливатися у всьому діапазоні її можливої зміни. Випадковий вміст сірки в горючій частині суттєво впливає на зміну співвідношення між іншими основними компонентами, а разом з ними і на прояв небезпечних властивостей шахтопластів. Аналогічний вплив на перерозподіл співвідношення між основними компонентами паливної частини, але меншою мірою, через незначний абсолютний вміст, оказує азот на всіх стадіях метаморфічних перетворень. Особливо велика його роль на пізніх стадіях (при вмісті вуглецю близько 95%), коли вміст основних компонентів (водню, сірки, азоту та кисню) приблизно рівні між собою та індивідуально складають менше двох відсотків (рис. 2, б і в).

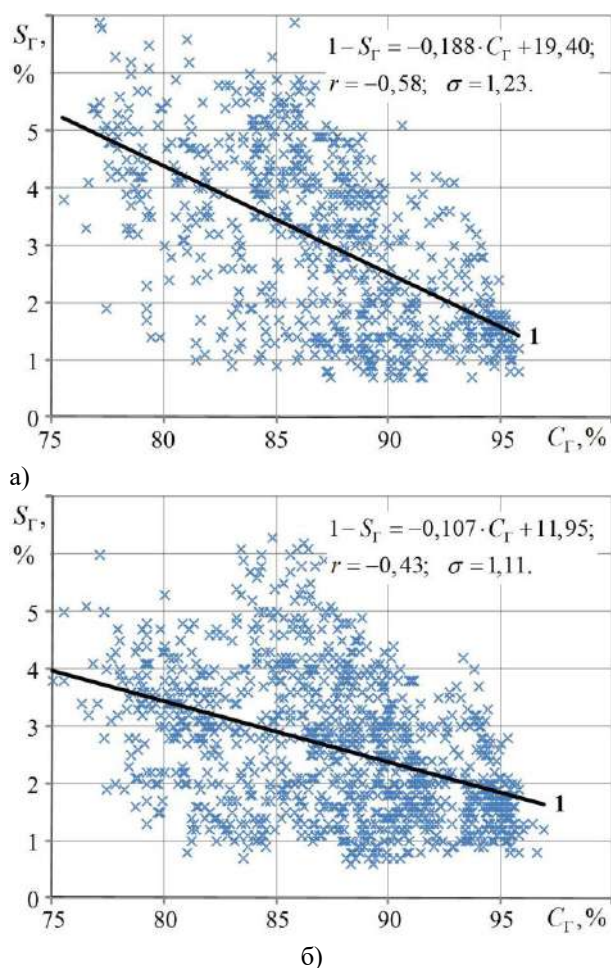


Рис. 6 Залежність вмісту сірки ( $S_{Г}$ ) у горючій частині палива від вмісту вуглецю ( $C_{Г}$ ) для шахтопластів відповідно згідно [16] (а) та [17] (б).

1 - усереднюючі прямі; × - експериментальні дані;  $r$  та  $\sigma$  - відповідно коефіцієнти кореляції та середньоквадратичні відхилення від усереднюючих прямих.

На властивості шахтопластів, при такому складному співвідношенні між основними компонентами горючої частини, додатковий вплив має також неоднозначна зміна вологості по мірі посилення ступеня метаморфізму (рис. 2, в, рис. 3). На завершальних стадіях метаморфізму ( $C_{Г} \approx 95\%$ ) вміст загальної вологи може дорівнювати сумі інших компонентів або перевищувати її, що сприяє появі відмітних властивостей шахтопластів порівняно з попередніми стадіями перетворення горючої частини палива. Неоднозначне та випадкове співвідношення між основними компонентами горючої частини та вологи вказує на необхідність індивідуального розгляду цих співвідношень для кожного шахтопласту при прогнозі його небезпечних властивостей.

Непередбачуваний вміст мінеральних домішок (вихід золи для незабагачених проб) ускладнює, ще більшою мірою, взаємозалежності між компонентами органічної маси та мінеральних домішок (горючою та негорючою частинами). Такі ускладнення пов'язані зі знаходженням більшості компонентів як в органічній, так і в мінеральній масі.

Природний вміст мінеральних домішок значною мірою визначає й вихід золи. Перерахунок вмісту основних компонентів органічної (горючої) маси на робочий стан палива з урахуванням вологості та виходу золи призводить до зниження або усунення кореляційних взаємозалежностей між цими компонентами.

Замість тісних кореляційних залежностей кисню від вуглецю в горючій частині (рис. 4, а і б) встановлено лише деяку тенденцію до зниження вмісту кисню при розгляді палива на його вихідний природний (робочий) стан (рис. 7, а і б). Це свідчить про випадковий характер вмісту кисню для природного (робочого) стану палива, що необхідно враховувати при прогнозуванні небезпечних властивостей шахтопластів.

При перерахунку вмісту азоту на робочий стан палива встановлено тенденцію щодо його зниження в горючій частині (рис. 4, в), а при розгляді палива на робочий стан спостерігається зростання вмісту азоту в загальній масі палива (рис. 7, в). Такі зміни у спрямованості кореляційних залежностей обумовлені незначним вмістом азоту (менше двох відсотків) та відносною його сталістю у всьому ряді метаморфічних перетворень вугілля. Слід зазначити, що вміст азоту відноситься тільки до органічної маси палива [15], скорочення інших загальних компонентів (вуглець, водень, кисень) при посиленні метаморфічних процесів відбувається більш інтенсивно як в органічній (горючій) масі, так і в мінеральних домішках (негорючій частини).



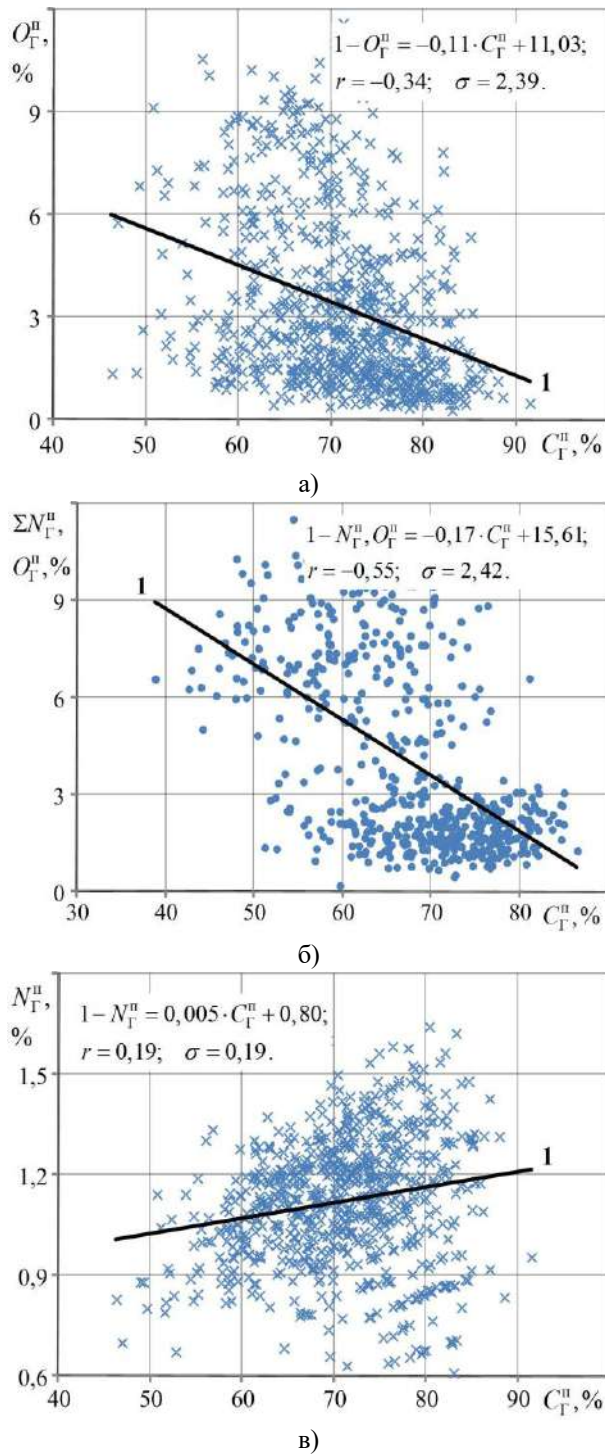


Рис. 7 Залежність вмісту кисню ( $O_{\Gamma}^n$ ) (а), суми азоту та кисню ( $\Sigma N_{\Gamma}^n, O_{\Gamma}^n$ ) (б) та азоту ( $N_{\Gamma}^n$ ) (в) від вмісту вуглецю ( $C_{\Gamma}^n$ ), що перераховані на робочий стан палива з урахуванням вологості пластових проб та виходу золи для незбагаченого вугілля. 1 - усереднюючі прямі; ×, • - експериментальні дані для шахтопластів відповідно до [16] та [17];  $r$  та  $\sigma$  - відповідно коефіцієнти кореляції та середньоквадратичні відхилення від усереднюючих прямих.

Така динаміка у співвідношенні між практично постійним вмістом азоту в органічній масі та інтенсивним спаданням інших компонентів призводить до відносного зростання елементного вмісту азоту в паливі на пізніх стадіях метаморфічних перетворень.

Відносно постійне середнє значення водню спостерігається в горючій частині палива на ранніх стадіях метаморфізму  $C_{\Gamma} < 85\%$  для (рис. 2, в), а потім відбувається інтенсивне зниження. Такий характер зміни вмісту водню в паливі підтверджується тісними кореляційними залежностями для аналізованих сукупностей шахтопластів (рис. 5, а і б). При перерахунку на робочий стан палива, з використанням загальної вологості та зольності незбагачених проб, тісна нелінійна кореляційна взаємозалежність між воднем та вуглецем втрачається (рис. 8, а і б).

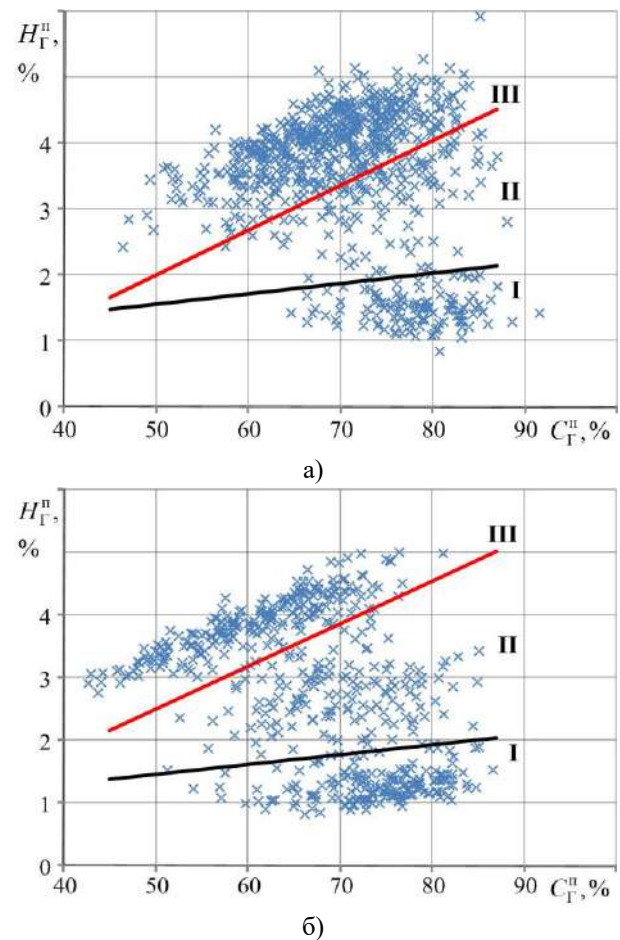
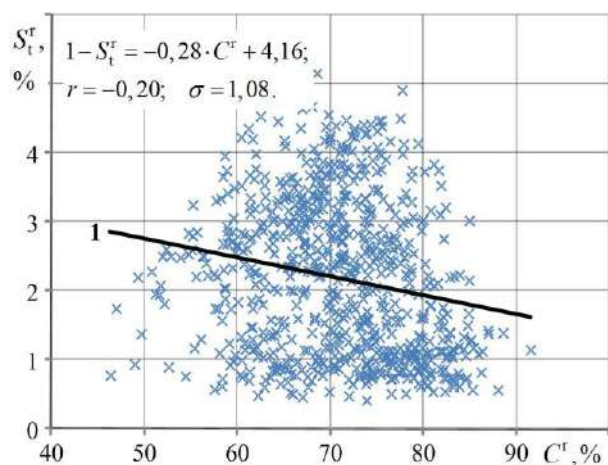


Рис. 8 Залежність вмісту водню ( $H_{\Gamma}$ ) від вмісту вуглецю ( $C_{\Gamma}$ ) на робочий стан палива, що перерахований з урахуванням вологості пластових проб та виходу золи для незбагаченого вугілля для шахтопластів відповідно до [16] (а) та [17] (б). × - експериментальні дані; I, II, III - характерні сукупності шахтопластів, що відрізняються між собою різним вмістом водню при однаковому значенні  $C_{\Gamma}^n$ .

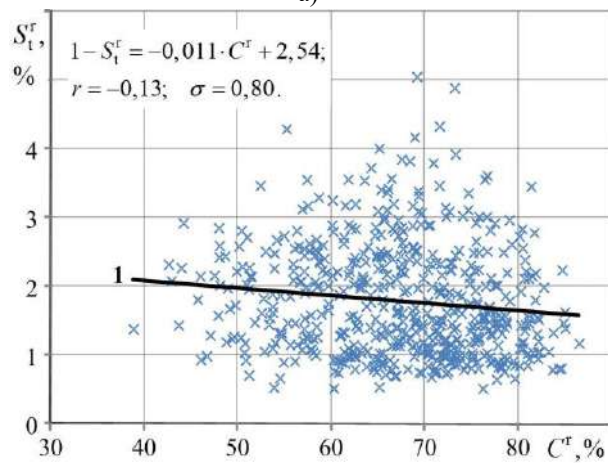


Замість нелінійної залежності з'явилися характерні зони (I, II, III), які відрізняються між собою різним вмістом водню за однакового значення вуглецю. Це свідчить, як і у разі вмісту кисню, про необхідність індивідуального розгляду вмісту водню для встановлення небезпечних властивостей конкретного шахтопласту.

У довідково-нормативних документах [16, 17] наведено дані про вміст сірки як у горючій частині палива ( $S_T^r$ ), так і її загальний вміст ( $S_t^d$ ). Це дозволило встановити деяку тенденцію до зниження середнього вмісту сірки на пізніх стадіях перетворення горючої частини (рис. 2, в). Такі тенденції підтвержені індивідуальними графіками для всієї сукупності шахтопластів залежності сірки в горючій частині від вуглецю (рис. 6, а і б).



а)



б)

Рис. 9 Залежність вмісту загальної сірки ( $S_t^d$ ) від вуглецю ( $C^r$ ), що перераховані на робочий стан з урахуванням вологості пластових проб та виходу золи для незбагаченого вугілля згідно даних відповідно до [16] (а) та [17] (б).

1 - усереднюючі прямі; × - значення, що перераховані на робочий стан палива;

$r$  - коефіцієнти кореляції;  $\sigma$  - середньоквадратичні відхилення.

Слабкі кореляційні залежності характеризуються відповідними негативними значеннями коефіцієнтів кореляції (-0,58 та -0,43). Ця слабка кореляційна залежність практично не виявляється при перерахунку палива на робочий стан. У цьому випадку коефіцієнти кореляції відповідно дорівнюють -0,20 та -0,13 (рис. 9, а і б), що вказує на випадковий характер знаходження сірки як в органічній (горючій) масі, так і в мінеральних домішках.

## Висновки

На підставі проведених досліджень встановлені особливості вибору показників метаморфічних перетворень вугілля, які паралельно використовуються відповідно для встановлення якості палива та прогнозу небезпечних властивостей шахтопластів. Виявлені невідповідності показників ступеня метаморфізму, що використовуються в чинній нормативній базі щодо безпечного ведення гірничих робіт, стану палива під час гірничих робіт у підземних умовах. Для вдосконалення нормативних документів щодо безпечного ведення гірничих робіт необхідно розглядати показники, що характеризують не лише органічну (горючу) частину палива, а й наявність мінеральних домішок та вологи у вугіллі в зоні ведення гірничих робіт. Основні висновки, необхідні для вдосконалення нормативної бази щодо безпечного ведення гірничих робіт, зводяться до наступного:

- для характеристики небезпечних властивостей шахтопластів при веденні гірничих робіт показники метаморфізму запозичені, без належного наукового обґрунтування, з промислових класифікацій, що характеризують якість палива відповідно на вологий беззолний, сухий беззолний або аналітичний стан лише органічної чи горючої маси. Такі стани не відповідають стану вугілля в зоні ведення гірничих робіт, оскільки крім органічної маси є мінеральні домішки до 40 і більше відсотків, а також наявність вологи, яка є одним із характерних показників ступеня метаморфізму;

- всі показники, що стосуються визначення якості продукції, засновані на аналізі аналітичних проб. Їхня підготовка полягає в попередньому збагаченні до виходу золи, як правило, до рівня менш ніж 10%, подрібнення вугілля до розмірів 0-0,2 мм (-212мкм) і його підсушування до сухого, близького до повітряно-сухого стану. Такий стан аналітичних проб вугілля принципово не відповідає умовам його знаходження в зоні ведення гірничих робіт, оскільки нехтується наявність мінеральних домішок та вологи;

- використовуючи показники для прогнозу небезпечних властивостей шахтопластів, які призначені для встановлення якості палива,

заздалегідь вносяться похибки у достовірність таких прогнозів. Попереднє видалення зовнішньої вологи та частини мінеральних домішок змінюють фізико-хімічний стан та властивості вугілля;

– значення показників органічної (горючої) частини палива є загальними достовірними характеристиками його якості для всієї сукупності шахтопластів, але вони не можуть застосовуватися для прогнозу небезпечних властивостей внаслідок зниження точності їх визначення через наявність непередбачуваного вмісту мінеральних домішок та вологи;

– для удосконалення прогнозу прояву небезпечних властивостей конкретного шахтопласту необхідно розглядати індивідуальну зміну властивостей вугілля під впливом метаморфічних перетворень, а також фактичне співвідношення між компонентами органічної (горючої) та мінеральної (умовно негорючої) частинами палива та його вологістю у зоні ведення гірничих робіт;

– вуглець, водень, сірка та кисень входять до складу як органічної (горючої), частини палива, так і до її мінеральної (умовно негорючої) частини. Вміст азоту та органічної сірки характерні лише для органічної маси. Ці особливості впливають на прояв небезпечних властивостей шахтопластів;

– метаморфічні перетворення шахтопластів у природних умовах та температурна деструкція вугілля без доступу повітря в лабораторіях відносяться до різних стадій перетворення палива. Показник виходу летких речовин характеризує тільки суму газів, що виділилися ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ), за якою немає безпосередньої можливості встановити зміни в елементному складі або структурі вугілля, що відбувалися в минулі геологічні періоди часу в надрах Землі;

– кожен, окремо взятий, класифікаційний показник відображає, як правило, одну із сторін метаморфічних перетворень вугілля;

– елементний вміст вуглецю в органічній (горючій) масі є більш інформативним показником для встановлення небезпечних властивостей шахтопластів порівняно з виходом летючих речовин. Перевага полягає у можливості його надійного визначення у всьому ряді метаморфічних перетворень вугілля та стовідсотковим контролем вмісту сум інших основних компонентів органічної (горючої) маси;

– вміст основних компонентів органічної (горючої) частини вугілля (вуглець, водень, азот, кисень), а також волога кореляційно взаємопов'язані між собою. Вміст органічної сірки на усіх стадіях метаморфізму не підпорядковується певної закономірності, але можна констатувати деяку спрямованість її зниження при посиленні впливу метаморфічних процесів;

– вміст основних компонентів, які наведені на робочий стан палива є випадковими величинами;

– перерахунок показників на робочий стан палива призводить не лише до втрати кореляційних взаємозалежностей між ними, а й сприяє зміні їхньої спрямованості. Такі характерні зміни встановлені для вмісту азоту та водню.

## Література

1. *Руководство по борьбе с пылью в угольных шахтах.* – М. : Недра, 1979. – 319 с.
2. *Правила ведения гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ: СОУ 10.1.00174088.011:2005. [Чинний від 2005-12-01] / О.М. Брюханов, О.В. Агафонов, А.В. Анциферов [та ін.].* Офіц. вид. Київ : Мінвуглепром України, 2005. – 224 с.
3. *Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт.* – Киев : Основа, 1994. – 311 с.
4. *КД 12.01.402–2000. Руководство по предупреждению и тушению эндогенных пожаров на угольных шахтах Украины.* – Донецк : НИИГД, 2000. – 216 с.
5. *Инструкция по прогнозу и предупреждению внезапных прорывов метана из почвы горных выработок.* – Донецк : МакНИИ, 1987. – 29 с.
6. *СОУ-П 10.1.00174088.016:2009. Стандарт мінвуглепрому України. Правила визначення ефективності випереджального захисту пластів, схильних до газодинамічних явищ.* Офіц. вид. Київ : Мінвуглепром України, 2009. – 36 с.
7. *Каталог динамических разломов горных пород на угольных шахтах.* Л. : ВНИИМ, 1983. – 118 с.
8. *КД 12.01.401-96. Эндогенные пожары на угольных шахтах Донбасса. Предупреждение и тушение.* Инструкция. – Донецк : НИИГД, 1997. – 68 с.
9. *СОУ 10.1.0017-4088.011-2004. Стандарт Минтопэнерго Украины. Дезагазация угольных шахт. Требования к способам и схемы дезагазации.* Издание офиц. Киев : Минтопэнерго Украины, 2004. – 161 с.
10. *Схеми та способи керування газовиділенням на виїмкових дільницях вугільних шахт.* Державний нормативний акт про охорону праці. – Київ.: Державний департамент промислової безпеки, охорони праці й гірничого нагляду, 2006. – 78 с.
11. *ГОСТ 17070-2014. Межгосударственный стандарт. Угли. Термины и определения* Издание официальное. – М. : Стандартинформ, 2015. – 17 с.
12. *Горная энциклопедия / Гл. ред. Е.А. Козловский; ред. кол.: М.И. Агошков, Н.К. Байбаов, А.С. Болдыров и др. Т.3: Кенган - Орт.* – М. : Сов. энциклопедия, 1987. – 592 с.
13. *ГОСТ 25543-2013. Межгосударственный стандарт. Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам.* Издание официальное – М.: Стандартинформ, 2014. – 79 с.
14. *Геолого-углехимическая карта Донецкого бассейна / ДонУГИ. Вып. VIII.* – М. : Углетехиздат, 1954. – 430 с.
15. *Авгусевич И.В., Сидорук Е.И., Броневец Т. М. Стандартные методы испытания углей. Классификации углей.* – М. : «Реклама мастер», 2019. – 576 с.
16. *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.* – М. : Недра, 1965. – 204 с.
17. *Справочник по качеству каменных углей и*

антрацитов Донецького і Львівсько-Волинського басейнів / Донецький науково-дослідницький угольний інститут. – М.: Недра, 1972. – 168 с.

18. 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. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2003. – 15 с.

19. Антощенко Н.И. К вопросу определения классификационных показателей углей для установления опасных свойств шахтопластов / Н.И. Антощенко, В.Ю. Тарасов, Р.Г. Заика, Е. В. Золотарева, О.И. Захарова // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – 2020. – № 152. – С. 149-159. DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2020.152.149>

20. Antoshchenko M. Peculiarities of using classification indicators of the coal metamorphism degree for predicting the hazardous coal seams properties Antoshchenko M., Filatieva E., Yefimtsev V., Tarasov V. // E3S Web of Conferences; Les Ulis, 2020. – 201, 01014. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101014>

21. Опарин В.Н. и др. О некоторых особенностях взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных пластах Кузбасса // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 2. – С. 3-30.

22. Греков С.П. Влияние содержания серы в углях на вероятность их самовозгорания / С.П. Греков, А.А. Всякий // Уголь Украины. – 2014. – № 4. – С. 18-21. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ugukr\\_2014\\_4\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ugukr_2014_4_6)

23. Успенский В.А. Опыт материального баланса процессов, происходящих при метаморфизме угольных пластов / Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2006. – Т.1. – С. 1-10.

24. Кошовский Б.И. Влияние влаги на процесс низкотемпературного окисления угля / Б.И. Кошовский, В.П. Орликowa // Уголь Украины. – 2015. – № 3-4. – С. 39-43. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ugukr\\_2015\\_3-4\\_9](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ugukr_2015_3-4_9)

25. Акиншин Б.Т. Метаморфизм и взаимосвязь микро- и макропористой структуры, влажности угля с газоносностью пластов // Уголь Украины. – 1985. – № 3. – С. 37-39.

26. Медведев Э.Н. Оценка пылеобразующей способности углей в ряду метаморфизма / Э.Н. Медведев, В.И. Саранчук, В.Н. Качан // Уголь Украины. – 1984. – № 9. – С. 32-33.

## References

1. Coal Mine Dust Control Guide (1979). Moscow, Nedra. [in Russian]
2. Rules of mining on the seams, which propensity to gas dynamic phenomena: SOU 10.1.00174088.011:2005. (2005). Kyiv, Ukraine Ministry of Coal Industry. [in Ukrainian]
3. Guide to the design of ventilation of coal mines. (1994). Kyiv, Osнова. [in Russian]
4. KD 12.01.402-2000 Guidelines for the prevention and suppression of endogenous fires in coal mines in Ukraine. (2000). Donetsk, NIIGD. [in Russian]
5. Instructions for the forecast and prevention of sudden breakthroughs of methane from the soil of mine workings. (1987). Donetsk, MakNIL. [in Russian]
6. Rules for determining the effectiveness of advanced protection of formations prone to gas-dynamic phenomena. (2009). Kyiv, Ukraine Ministry of Coal Industry. [in Ukrainian]

7. Catalog of dynamic rock faults in coal mines. (1983). Leningrad, VNIMI. [in Russian]

8. Endogenous fires in the coal mines of Donbass. Warning and suppression. Instruction. (1997). Donetsk, NIIGD. [in Russian]

9. SOU 10.1.0017-4088.011-2004 Degassing of coal mines. Requirements for methods and schemes of degassing. (2004). Kyiv, Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. [in Russian]

10. Schemes and methods for controlling gas separation in the excavation areas of coal mines. (2006). Kyiv, State Department of Industrial Safety, Labor Protection and Mining Supervision. [in Ukrainian]

11. GOST 17070-2014. Coals. Terms and Definitions. (2015). Official publication. Moscow, Standartinform. [in Russian]

12. Mining Encyclopedia. T.3: Kengan - Ort. (1987). Moscow, Sov. Encyclopedia. [in Russian]

13. GOST 25543-2013. Brown coals, hard coals and anthracites. Classification according to genetic and technological parameters. (2014). Official publication. Moscow, Standartinform. [in Russian]

14. Geological and coal-chemical map of the Donetsk basin / DonUGI. Issue. VIII. (1954). Moscow, Ugletekhizdat. [in Russian]

15. Standard Test Methods for Coals. Coal classification. (2019). Moscow: Reklama master. [in Russian]

16. Handbook 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. [in Russian]

17. Handbook on the quality of coal and anthracite of the Donetsk and Lvov-Volyn basins. (1972). Donetsk Research Coal Institute, Moscow, Nedra. [in Russian]

18. GOST 27313-95 (ICO 1170-77) Interstate standard. Solid mineral fuel Designations of quality indicators and formulas for recalculating analysis results for various fuel conditions. (2003). Official edition. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification. [in Russian]

19. Antoshchenko, N.I., Tarasov, V.Yu., Zaika, R.G., Zolotareva, E.V. and Zakharova, O.I. (2020). On determining coal classification indicators for establishing dangerous properties of mines. *Geo-Technical Mechanics*, 152, 149-159. [in Russian].

DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2020.152.149>

20. Antoshchenko, M., Filatieva, E., Yefimtsev, V. and Tarasov, V. (2020). Peculiarities of using classification indicators of the coal metamorphism degree for predicting the hazardous coal seams properties. *E3S Web of Conferences; Les Ulis*, 201, 01014. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101014>

21. Oparin V.N. et al. (2014) On some features of the interaction between geomechanical and physicochemical processes in coal seams of Kuzbass / *Physical and technical problems of mining*, 2, 3-30. [in Russian]

22. Grekov S.P., Vsakij A.A. (2014) Influence of sulfur content in coals on the probability of their spontaneous combustion. *Coal of Ukraine*, 4, 18-21. [in Russian] [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ugukr\\_2014\\_4\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ugukr_2014_4_6)

23. Uspenskij V.A. (2006). Experience in the material balance of processes occurring during the metamorphism of coal seams. *Oil and gas geology. Theory and practice*, 1, 1-10. [in Russian]

24. Koshovskij B.I., Orlikova V.P. (2015). Influence of Moisture on the Process of Low-Temperature Coal Oxidation. *Coal of Ukraine*, 3-4, 39-43. [in Russian] [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ugukr\\_2015\\_3-4\\_9](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ugukr_2015_3-4_9)



25. Akin'shin B.T. (1985). Metamorphism and relationship of micro- and macroporous structure, coal moisture content with gas content of seams. *Coal of Ukraine*, 3, 37-39. [in Russian]
26. Medvedev Ye.N., Saranchuk V.I., Kachan V.N. (1984). Estimation of the dust-forming ability of coals in the series of metamorphism. *Coal of Ukraine*, 9, 32-33. [in Russian]

**Автор:** РУДНЄВ Євген Сергійович  
кандидат технічних наук, доцент, завідувач  
кафедри електричної інженерії  
Східноукраїнський національний університет імені  
Володимира Даля  
E-mail – [rudnev\\_es@snu.edu.ua](mailto:rudnev_es@snu.edu.ua)  
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4236-8407>

**Рецензент:** д-р техн. наук, доц., завідувач кафедри фармації, виробництва та технологій В.Ю. Тарасов, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Україна

## TO THE QUESTION OF SCIENTIFIC SUBSTANTIATION OF THE CHOICE OF INDICATORS OF MANIFESTATION OF HAZARDOUS PROPERTIES OF COAL SEAMS

Ye. Rudniev

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Ukraine

*The article recalculates the quality indicators of coal for their working condition, taking into account the yield of ash and moisture content for coal seams, followed by an analysis of changes in the correlations between the indicators. The need to consider the fuel for its working condition is due to different end goals between establishing the consumer qualities of coal and the manifestation of the hazardous properties of coal seams. Different ultimate goals of the problems under consideration imply different ways of solving them, including differences between the influencing factors and their parameters.*

*The methodology provides for the achievement of the goal to use the initial experimental data that have been accumulated over several decades based on the experience of using coal for industrial purposes. The condition and quality of coal after its preparation for use differs significantly from the condition in the mining area. These differences are associated with the preliminary enrichment of coal and the removal of a certain amount of mineral impurities.*

*Based on conducted research out, the features of the choice of indicators of metamorphic transformations of coals were established, which are used in parallel, respectively, to establish the quality of fuel and predict the hazardous properties of coal seams. Discrepancies between the indicators of the degree of metamorphism used in the current regulatory framework for the safe conduct of mining operations and the state of fuel during mining operations in underground conditions are revealed. To improve normative documents on safe mining operations, it is necessary to consider indicators that characterize not only the organic (combustible) part of the fuel, but also the presence of mineral impurities and moisture in coals in the mining area.*

**Keywords:** coal, metamorphism, indicators, justification, mineral impurities, ratio, condition, dry, ashless, working, coal seams, mining, safety, regulatory framework, improvement.