

Матеріальний баланс метаморфічних перетворень вугільних пластів та їх небезпечні властивості

Є.С. Руднєв, Е.М. Філатєва, М.І. Антощенко, В.А. Попович, 2024

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Київ, Україна
Надійшла 22 лютого 2024 р.

Мета — встановити емпіричні залежності між основними компонентами органічної (горючої) маси, вмістом води та мінеральних домішок при вуглефікації шахтопластів з використанням експериментальних даних щодо споживчої якості твердих палив. Достовірно встановлені співвідношення між цими основними компонентами дають можливість науково обґрунтувати та розкрити природу виникнення небезпечних властивостей шахтопластів під час проведення гірничих робіт за фактором метаморфічних перетворень та генерації газоподібних і рідких продуктів.

Методика досліджень розроблена на підставі результатів попереднього аналізу зміни співвідношення між основними компонентами органічної (горючої) маси, вмістом води та мінеральних домішок при вуглеутворенні починаючи від процесів торфоутворення та подальшої вуглефікації. Використано експериментальні дані щодо споживчих якостей твердих палив, які встановлені загальноприйнятими стандартними способами.

Результати досліджень. На всіх стадіях метаморфічних перетворень вугільних пластів зі зростанням вмісту вуглецю встановлено одностороннє скорочення елементного вмісту кисню в органічній (горючій) масі. Це свідчить про утворення газоподібних продуктів на всіх стадіях метаморфізму з участю вуглецю і кисню органічної (горючої) маси. Скорочення елементного вмісту водню, азоту та органічної сірки на пізніх стадіях метаморфізму вказує на участь цих компонентів у генерації газоподібних продуктів.

Проведена апробація достовірності емпіричної залежності вмісту вуглецю від середнього показника відбивної здатності вітриніту.

Генерація води на стадії метаморфічних перетворень вугілля не підтвердилася повною мірою, спрямованістю трендів середнього вмісту води, кисню та водню на послідовних стадіях процесів торфоутворення, діагенезу та метаморфізму, аж до переходу від кам'яного вугілля до антрацитів.

Встановлено значне перевищення (до двох разів) виходу легких речовин порівняно із вмістом суми основних компонентів органічної (горючої) маси за фіксованих значень вмісту вуглецю.

Наукова новизна. На підставі зміни співвідношення елементного вмісту основних компонентів органічної (горючої) маси (твердого залишку) встановлено їх участь в утворенні газоподібних продуктів на всіх метаморфічних стадіях перетворення вугільних пластів. Отримані результати формування матеріального балансу дають можливість внести відповідні уточнення до схеми вуглеутворення в частині генерації конкретних газоподібних продуктів на кожній стадії.

Практичне значення полягає у необхідності та можливості удосконалення нормативної бази безпечного ведення гірничих робіт при прогнозі небезпечних властивостей шахтопластів.

Citation: Rudniev, Ye., Filatieva, E., Antoshchenko, M., & Popovich, V. (2024). Material balance of metamorphic transformations of coal seams and their dangerous properties. *Geofizychnyi Zhurnal*, 46(3), 85–110. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i3.298964>.

Publisher Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

Ключові слова: матеріальний баланс, шахтопласти, вугілля, елементний склад, компоненти, газоутворення, продукти, небезпечні властивості, прогноз, нормативна база, удосконалення.

Вступ. Аналіз аварій у вугільних шахтах багатьох країн світу за останні кілька десятиліть показав, що вони сталися внаслідок прояву небезпечних властивостей вугільних пластів (шахтопластів) під час проведення гірничих робіт. До найбільш небезпечних властивостей, що призводять до аварій з тяжкими наслідками, належать підвищене газовиділення в гірничі виробки легкозаймистих газів, раптові викиди вугілля та газу, виникнення ендегенних пожеж, виділення пилу та його здатність утворювати з метаном вибухові суміші та деякі інші особливості, що ускладнюють безпечне відпрацювання вугільних пластів [Руднєв та ін., 2022a]. Формування небезпечних властивостей шахтопластів, з огляду на характер їхнього прояву, може визначатися як фізико-механічним станом та елементним складом вихідної органічної речовини, так і газоподібними продуктами, що утворюються при геологічних процесах. У даному випадку для достовірного прогнозу небезпечних властивостей вугільних пластів необхідно знати кількісне співвідношення між газоподібними продуктами, які виділилися, та зміненням під впливом геологічних процесів елементним складом викопного вугілля. Інакше кажучи, необхідні відомості про матеріальний баланс співвідношення вихідного складу органічної речовини та кількість утворених на кожній стадії вуглеутворення газоподібних продуктів.

Науково-дослідні роботи, пов'язані з вивченням матеріального балансу, є дуже актуальними не тільки для вдосконалення нормативної бази з безпечного ведення гірничих робіт, а й для геологічної науки в цілому. Це обумовлено з остаточно не вирішеними до теперішнього часу проблемами встановлення балансу газів, які утворилися в процесі вуглефікації рослинної органічної речовини.

Виділяють дві стадії вуглефікації — діагенез та метаморфізм вугілля [Горная ...,

1991]. За сукупністю основних показників складу та властивостей виділяють три ступеня вуглефікації: низький (буровугільний), середній (кам'яновугільний) і вищий (антрацитовий).

Аналіз досліджень та публікацій. Загальна тенденція послідовного природного перетворення вихідної органічної речовини, від накопичення продуктів фотосинтезу та подальшого їх перетворення на торф, буре і кам'яне вугілля до антрациту, не викликає сумнівів. Це підтверджується роботами багатьох учених, які вивчали утворення вугілля з рослинної органічної речовини, що супроводжувалося виділенням газів. Перші публікації з цієї проблеми з'явилися у п'ятдесятих роках минулого сторіччя. К. Паттейський склав баланс газоутворення, виходячи з того, що кисень, який містився у вугіллі, виділяється, утворюючи діоксид вуглецю та воду, а водень — метан та його гомологи. При цьому були враховані результати експериментів зі штучної вуглефікації під впливом значної температури та підвищеного тиску. Утворення 1 т антрациту супроводжувалося виділенням відповідно 278 м³ метану та 123 м³ вуглекислого газу. Підвищення ступеня вуглефікації призводило до зростання виділення метану, а вуглекислого газу — до зниження [Козловский, 1975; Анциферов и др., 2009].

У наступні роки проводилися лабораторні експерименти моделювання природних процесів вуглефікації викопної органічної речовини. У 1972—1976 рр. у ВНДІГаз експерименти проводилися на спеціальній лабораторній установці, що дало змогу досліджувати процес виділення газу з гумусного (кларенового) кам'яного вугілля на всіх стадіях вуглефікації при температурі від 50 до 300 °С та у широкому діапазоні значень тиску — від 0,981 до 19,662 МПа. Принциповим недоліком спроб лабораторного моделювання є неможливість відтворення дії фактора гео-

логічного часу та невирішеність проблеми моделювання відтоку виділених газів, оскільки цей фактор суттєво впливає на кінетику процесу газогенерації [Анциферов и др., 2009].

Для кількісної оцінки газоподібних і рідких продуктів, що утворилися та видалилися важливе значення, має методика матеріального балансу, складена Успенським [Успенский, 2006]. На думку самого автора, це дало можливість спочатку обмежитися розв'язанням системи з десяти рівнянь як грубе наближення. Причини такого висновку обґрунтовані у зазначеній статті. Додатковою причиною відсутності певної закономірності виходу летких речовин в міру посилення метаморфізму на окремих стадіях стала, на нашу думку, градація їх діапазонів за однаковим (рівномірним) виходом коксу від першої до останньої стадії. Отримання коксу відбувається при температурі (близько 900 °С), яка значно перевищує температуру (200—600 °С) утворення кам'яного вугілля та антрацитів [Гапеев, 1949; Геологический ..., 1973; Козловский, 1975]. Згідно з довідником [Горная ..., 1991], утворення кам'яного вугілля відбувається при температурі 50—220 °С, а антрацитів — більш як 220 °С, що принципово не суперечить зазначеним температурним діапазнам утворення викопного вугілля [Гапеев, 1949; Геологический ..., 1973; Козловский, 1975].

Вихід летких речовин залежить переважно від температури нагріву проби та збільшується з підвищенням температури внаслідок глибшого розкладання палива. Основна маса летких речовин утворюється під час нагрівання вугілля до 850—900 °С [Kishore Nadkarni, 2008; Speight, 2015]. У природних умовах при температурі 800—850 °С згідно з круговим циклом утворення порід відбувається повне плавлення та осадові породи, зокрема викопне вугілля, переходять у магматичні [Gillen, 1982] з виділенням залишкової кількості газоподібних продуктів. Виділення цих продуктів не може відповідати процесам утворення летких речовин за кам'яновугільного або антрацитового ступеня вуглефікації шах-

топластів, оскільки вони зазнавали температурному впливу не більш як 600 °С.

Невідповідність температурних режимів отримання коксу та утворення викопного вугілля на різних стадіях метаморфізму [Успенский, 2006] не дали змоги встановити строгу закономірність виходу газоподібних продуктів шляхом розв'язання системи 10 рівнянь матеріального балансу метаморфічних процесів перетворення вугільних пластів.

Відповідно до світової статистики, близько 90 % вибухів у вугільних шахтах сталося за участю метану. Така ситуація зумовила актуальність та необхідність вивчення генезису метану у вугільних пластах та форми його знаходження в органічній речовині [Козловский, 1975; Айруни, 1981]. Відповідно до цих та деяких інших робіт, при перетворенні речовини вугілля від довгополуменевих марок до антрацитів тільки на стадії метаморфізму мало утворитися 100—170 кг метану та 120—130 кг води на 1 т антрациту. У цьому випадку розглядалися лише кількості метану та води, що відповідають процесам кам'яновугільної та антрацитової стадій вуглефікації. Утворення ж метану відбувалося починаючи з моменту осадоагромадження, і перетворення органічної речовини до теперішнього часу у вугільну масу [Багринцева, 1968; Анциферов и др., 2009]. Залежно від ступеня вуглефікації утворення та виділення рудничних газів пов'язане з біохімічними, хімічними та метаморфічними процесами [Айруни, 1981].

Основна частина газів біохімічного походження утворюється при розкладанні органічної речовини з виділенням газоподібних продуктів, в тому числі метану та води. Газу хімічних реакцій утворюються без участі мікроорганізмів. Утворення метаморфічних газів відбувається за зміни хімічного складу органічної речовини під впливом високих температур і тиску протягом тривалого часу [Айруни, 1981]. Метан, що виділився при торфоутворенні та на наступних стадіях вуглефікації (діагенезу та метаморфізму) зазнавав впливу геологічних процесів перерозподілу між

вугільним пластом, вмісними породами та атмосферою.

Постановка завдання. Зі стану розглянутого питання випливають проблеми, які необхідно розв'язати для можливості складання достовірного матеріального балансу вугільних шахтопластів під час метаморфічних перетворень і формування їх небезпечних властивостей. У першому наближенні вони зумовлені використанням для цілей методик, переважно призначених для встановлення споживчих властивостей вугілля. Деякі невідповідності сучасних методик визначення небезпечних властивостей шахтопластів полягають у такому:

- при встановленні небезпечних властивостей шахтопластів утворення метану та води розглядається тільки на стадії метаморфізму, без урахування можливого перерозподілу газоподібних і рідких продуктів на попередніх стадіях торфоутворення та діагенезу;

- лабораторні експерименти моделювання процесів вуглефікації не відображають дії фактора геологічного часу та відтоку газів, що виділилися;

- при складанні матеріального балансу за виходом коксу на органічну масу доволіно були встановлені однакові діапазони стадій метаморфізму, а потім за середнім елементним складом (вуглецю, кисню, водню, азоту, органічної сірки) та вологою вихідних проб розраховували прогнозовану кількість летких продуктів, що утворилися в цих діапазонах, та їх середній склад (H_2O , CO_2 , CH_4 , H_2S , NH_4). Кількість і склад летких продуктів при високій температурі отримання коксу (близько $900\text{ }^\circ\text{C}$) априорі не можуть відповідати їх утворенню на стадіях метаморфізму кам'яного вугілля та антрацитів, що відбувалося при температурі менше $600\text{ }^\circ\text{C}$.

Ідея досліджень повністю заснована на вихідних положеннях, викладених у статті [Успенский, 2006]:

- на підставі наявних даних щодо складу продуктів, які утворюються за геологічно тривалої зміни забороненої похованої органічної речовини, він може бути охарак-

теризований лише частково. Газоподібні та рідкі продукти метаморфізму вуглистих речовин унаслідок особливостей їх фізичного стану в основному видаляються, і лише тверді залишкові продукти повністю зберігаються в місці початкового залягання;

- точна кількісна характеристика можлива лише для залишкових продуктів – різного роду вуглистих речовин. Баланс усієї суми речовин і характеристика газоподібних і рідких продуктів, які видалилися, можуть бути отримані лише непрямими (побічним) шляхами з більшим або меншим ступенем вірогідності.

Залишкові продукти вугільної речовини сучасних шахтопластів доволі глибоко вивчені при встановленні споживчих властивостей викопного вугілля. До складу органічних сполук, що утворюють основну речовину вугілля, входять вуглець (C_o), водень (H_o), кисень (O_o), азот (N_o) та органічна сірка (S_o). Ці елементи наявні в усіх без винятку паливах в сумі складають майже 100% їхньої органічної маси [Kishore Nadkarni, 2008; Speight, 2015]. У процесі посилення вуглефікації елементний вміст вуглецю одностороннє збільшується за пропорційного скорочення суми вмісту інших основних компонентів. Це співвідношення практично функціонально контролюється вмістом вуглецю:

$$\sum O_o, H_o, N_o, S_o = 100 - C_o (\%). \quad (1)$$

Тверде паливо всіх видів містить також домішки мінеральних речовин, які складають його мінеральну масу. Здебільшого її основою є силікати алюмінію, заліза, кальцію, магнію, натрію, калію, переважно у вигляді глинистих мінералів, і кремнезем (кварц). У мінеральній масі частково трапляються дисульфід заліза (пірит і марказит), карбонати кальцію, магнію (кальцит, доломіт) і заліза (сидерит), сульфати кальцію (гіпс), заліза та алюмінію, оксиду заліза, кальцію, хлориду, а також сполуки рідкісних розсіяних елементів. Вуглець, водень і кисень одночасно входять до складу органічної та мінеральної маси вугілля. У мінеральній масі вуглець спостерігається

у вигляді карбонатів, водень — у волозі та гідратній воді силікатів, кисень — у сполуках силікатів (оксидах алюмінію та кремнію), оксидах заліза, карбонатах, сульфатах та ін. [Speight, 2015].

Запланована методика досліджень принципово відрізняється від методики розрахунку можливого утворення легких продуктів за однакового виходу коксу на кожній стадії метаморфізму [Успенский, 2006]. Вона враховує практично функціональну, експериментально підтверджену залежність (1) і полягає у додатковому виявленні, на підставі наявних експериментальних даних, індивідуальних кореляційних зв'язків кожного основного компонента органічної маси із вмістом вуглецю. Тіснота цих зв'язків вказує на роль кожного основного компонента у перетворенні органічної маси під час метаморфічних процесів. Аномальне відхилення вмісту одного з основних компонентів від усередненої лінії встановленого кореляційного зв'язку викликає перерозподіл співвідношення між рештою основних компонентів і, отже, засвідчує його можливу роль у формуванні небезпечних властивостей конкретного шахтопласта [Руднев та ін., 2021б, 2022б, д].

Небезпечні властивості шахтопластів визначаються також вмістом загальної вологи на всіх стадіях їх вуглефікації та її видами при метаморфічних перетвореннях [Руднев та ін., 2022е]. Вміст вологи у вугіллі зменшується в міру підвищення ступеня метаморфізму, проте з переходом до антрацитів він знову зростає. Перелам кривої можна розглядати як початок антрацитової стадії метаморфізму вугілля [Успенский, 2006].

Сучасна вивченість споживчих якостей вугілля дає змогу аналізувати додатково до складу органічної маси та вмісту вологи вплив на прояв небезпечних властивостей шахтопластів наявність мінеральних домішок за умови виходу золи менш як 10 % [Kishore Nadkarni, 2008; Speight, 2015].

Мета статті. На підставі енциклопедичних відомостей про вуглеформування, як перетворення відмерлих решток рослин

на торф з подальшим його захороненням похованням у надрах Землі та послідовним перетворенням на буре, потім кам'яне вугілля та антрацит, встановити емпіричні залежності між основними компонентами органічної маси, вмістом вологи та мінеральних домішок при вуглефікації з використанням експериментальних даних споживчих якостей твердого палива. Вірогідно встановлені співвідношення між основними компонентами органічної маси, вологою та мінеральними домішками дають можливість науково обґрунтувати природу виникнення небезпечних властивостей шахтопластів під час проведення гірничих робіт за фактором метаморфічних перетворень.

Методика досліджень розроблена на підставі результатів попереднього аналізу зміни співвідношення вмісту основних компонентів органічної маси, вологи та мінеральних домішок під час вуглеутворення — від процесів торфоутворення та подальшої вуглефікації. Були використані експериментальні дані споживчих якостей твердих палив, що накопичилися протягом кількох десятиліть і встановлені загальноприйнятими стандартними способами (табл. 1—3). Як головний критерій зміни співвідношень між вмістом основних компонентів органічної маси, вологи та мінеральних домішок прийнято зміну середнього вмісту вуглецю (\bar{C}_o). У цілому критерій \bar{C}_o контролює загальну суму інших основних компонентів органічної маси (практично виконується умова рівняння (1)), але однозначно не встановлює чітких меж між торфом і бурим вугіллям, бурим і кам'яним вугіллям, кам'яним вугіллям і антрацитами (рис. 1). Це засвідчує, що на споживчі властивості аналізованих палив доволі вагомо впливають крім елементного складу органічної маси інші чинники.

Зокрема такими класифікаційними показниками у деяких випадках прийнято вважати загальну вологу (W_t^r) та максимальну вологоємність (W_{\max}^{af}). Загальна волога торфу становить 86—95 % [Горная ..., 1991], і вона суттєво перевищує загальну вологу у бурого вугілля $W_t^r=19\div 70$ %

Т а б л и ц я 1. Відомості про зміну елементного складу органічної маси та температури процесів її перетворення для різних видів палива, встановлених експериментально стандартними методами

Вид палива	Елементарний склад органічної маси, %				Температура* <i>t</i> , °С
	C _o	O _o	H _o	N _o	
Деревина	45—50 [Горная ..., 1991]	43—50 [Горная ..., 1991]	6,0—6,5 [Горная ..., 1991]	0,1—0,7 [Горная ..., 1991]	—
	47,5	46,5	6,25	0,85	
Торф	50—60 [Горная ..., 1991] 48—65 [Горная ..., 1991] 50—60 [Советский ..., 1982]	25—45 [Горная ..., 1991]	4,7—7,0 [Горная ..., 1991]	0,6—3,8 [Горная ..., 1991]	20**
	55,5	30	5,85	2,2	
Буре вугілля	64—77 [Горная ..., 1991] 64—78 [Горная ..., 1984]	16—28 [Горная ..., 1991] 16—28 [Горная ..., 1984]	4,0—6,7 [Горная ..., 1991] 3,8—6,0 [Горная ..., 1984]	0,2—1,1 [Горная ..., 1991]	<50 [Горная ..., 1991] 150—180 [Козловский, 1975] 60—70 [Гапеев, 1949]
	70,75	22,0	5,13	0,65	
Кам'яне вугілля	74—92 [Горная ..., 1991] 75—89 [Анциферов и др., 2009] 79,6—93,61 [Геолого-углехимическая ..., 1954] 75—92 [Горная ..., 1985] 75—97 [Советский ..., 1982]	1,6—17,0 [Горная ..., 1991] 1,8—13,0 [Анциферов и др., 2009] 0,45—13,71 [Геолого-углехимическая..., 1954] 1,5—15 [Горная ..., 1985] 1—3 [Украинский ..., 1989]	3,4—6,0 [Горная ..., 1991] 4,2—5,5 [Анциферов и др., 2009] 3,83—6,33 [Геолого-углехимическая..., 1954] 2,5—5,7 [Горная ..., 1985] 1,0—6,0 [Украинский ..., 1989]	1,2—1,8 [Горная ..., 1991] 1,5—1,6 [Анциферов и др., 2009] 0,94—2,06 [Геолого-углехимическая..., 1954] 1,0—2,5 [Горная ..., 1984]	50—220 [Горная ..., 1991] 230—300 [Козловский, 1975] 450—500 [Геологический ..., 1973]
	84,22	9,51	4,45	1,58	
Антрацит	89—98 [Горная ..., 1991] 92,0—96,6 [Анциферов и др., 2009] 95,0—97,0 [Айруни, 1981] 93,9—97,41 [Геолого-углехимическая ..., 1954] 94,0—97,0 [Горная ..., 1984] 93,5—97,0 [Советский ..., 1982]	0,1—2,3 [Горная ..., 1991] 0,2—2,7 [Анциферов и др., 2009] 0,18—2,76 [Геолого-углехимическая ..., 1954]	1,3—3,0 [Горная ..., 1991] 1,7—2,1 [Анциферов и др., 2009] 1,00—2,58 [Геолого-углехимическая ..., 1954] 1,0—3,0 [Горная ..., 1984] 1,0—3,0 [Советский ..., 1982]	0,1—1,3 [Горная ..., 1991] 0,6—1,0 [Анциферов и др., 2009] 0,83—1,98 [Геолого-углехимическая ..., 1954]	>220 [Горная ..., 1991] 350—600 [Козловский, 1975] 350—550 [Горная ..., 1984]
	95,03	1,37	1,97	0,97	

Примітка: * — передбачувана температура процесів перетворення, ** — відповідає температурі клімату.

Т а б л и ц я 2. Відомості про зміну вмісту (в %) сірки та вологи для різних видів палива, встановлених експериментально стандартними методами

Вид палива	Вміст сірки		Загальна волога, W_t^r	Максимальна вологодіємність, W_{\max}	Волога аналітичної проби, W^a
	Загальний S_t^d	у горючій частині, S_r			
Деревина	—	—	—	—	—
Торф	До 2,5* [Горная ..., 1991]	—	86—95 [Горная ..., 1991]	—	—
			90,5		
Буре вугілля	0,2—8,0 [Горная ..., 1984]	—	20—70 [Горная ..., 1984] 19—58 [Горная ..., 1984]	—	—
			41,10		
Кам'яне вугілля	2,7—3,5 [Анциферов и др., 2009] 0,68—6,43 [Геолого- углехимическая ..., 1954] 0,5—6,1 [Справочник ..., 1965] 0,6—6,6 [Справочник ..., 1972]	0,7—6,9 [Справочник ..., 1965] 0,6—6,3 [Справочник ..., 1972]	0,5—13,2 [Анциферов и др., 2009] 1,0—12,0 [Украинский ..., 1989]	1,0—16,5 [Справочник ..., 1972]	1,5—4,5** [Анциферов и др., 2009] 0,47—10,32 [Геолого- углехимическая ..., 1954] 1,1—11,2 [Справочник ..., 1965]
	2,94	3,01	6,68	4,5	3,7
Антрацит	0,6—1,1 [Анциферов и др., 2009] 0,87—6,75 [Геолого- углехимическая ..., 1954] 0,6—4,2 [Справочник ..., 1965] 0,6—5,5 [Справочник ..., 1972]	0,7—5,1 [Справочник ..., 1965] 0,8—4,2 [Справочник ..., 1972]	8,5 [Анциферов и др., 2009]	—	1,0—4,2** [Анциферов и др., 2009]
	1,81	1,90			

Примітка: * — вміст органічної сірки, ** — значення при експериментальному моделюванні [Анциферов и др., 2009].

[Горная ..., 1984]. Вміст загальної вологи, на відміну від вмісту вуглецю органічної маси, вказує на конкретну межу між видами палив, якими є торф і буре вугілля.

Максимальна вологодіємність у сучасній класифікації вугілля за генетичними та технологічними параметрами [Горная ..., 1991] застосовується для градації бурого вугілля на типи. У цьому виданні вона не

використовується для встановлення виду палива як для бурого та кам'яного вугілля, так й для антрацитів. Види викопного вугілля, згідно з [ДСТУ 3472:2015, 2015], визначені за середнім показником відображення вітриніту (R_{or}). При R_{or} менше 0,60 % викопні вугілля відносять до бурих, у діапазоні 0,4—2,59 % — до кам'яного вугілля, при R_{or} більше як 2,20 % — до антрацитів. Цей кри-

Таблиця 3. Відомості про зміну виходу золи (в %) для різних видів палива, яка встановлена експериментально стандартними методами

Вид палива	Пластова проба	Аналітична проба	Склад золи
Деревина	—	—	—
Торф	—	Низинний 6,5—12,0 [Горная ..., 1991]	CaO 40; SiO ₂ 24; Fe ₂ O ₃ 17; Al ₂ O ₃ 8 [Горная ..., 1991]
		9,25	
		Верховий 2,7—4,0 [Горная ..., 1991]	CaO 23; SiO ₂ 43; Fe ₂ O ₃ 9,5; Al ₂ O ₃ 11 [Горная ..., 1991]
		3,35	
Буре вугілля	—	7—45 [Горная ..., 1984]	—
		26,0	
Кам'яне вугілля	20—28 [Анциферов и др., 2009]	1,7—20,7 [Геолого- углехимическая ..., 1954]	CaO 0,4—30,26; SiO ₂ 7,36—48,72; Fe ₂ O ₃ 5,55—71,03; Al ₂ O ₃ 4,11—32,37 [Геолого-углехимическая ..., 1954]. CaO 0,3—18,3; SiO ₂ 10,5—59,2; Fe ₂ O ₃ 5,8—75,04; Al ₂ O ₃ 6,6—36,9 [Справочник ..., 1972]
	1,0—48,2 [Справочник ..., 1965]	3,7—16,7 [Справочник ..., 1965]	
	2,4—44,7 [Справочник ..., 1972]	3,8—16,0 [Справочник ..., 1972]	
	20,93	7,93	
Антрацит	30 [Анциферов и др., 2009]	2,4—3,8* [Анциферов и др., 2009]	CaO 0,65—14,4; SiO ₂ 16,11—71,3; Fe ₂ O ₃ 7,9—59,72; Al ₂ O ₃ 7,32—36,05 [Справочник ..., 1972]
	4,5—31,7 [Справочник ..., 1965]	4,1—15,8 [Справочник ..., 1965]	
	6,5—42,8 [Справочник ..., 1972]	4,1—11,2 [Справочник ..., 1972]	
	20,78	7,82	

Примітка: * — значення для експериментального моделювання [Анциферов и др., 2009].

Рис. 1. Залежності зміни середнього елементного вмісту кисню (\bar{O}_0), водню (\bar{H}_0), азоту (\bar{N}_0) органічної маси та загальної вологи (\bar{H}_2O) від вуглецю (\bar{C}_0) для різних видів палива при їх перетворенні під впливом процесів торфоутворення та вуглефікації: ×, ●, ▲, ■ — середні значення елементного вмісту в органічній масі відповідно кисню, водню, азоту та загальної вологи, встановлених експериментально [Геолого-углехимическая ..., 1954; Справочник ..., 1965, 1972; Козловский, 1975; Айруни, 1981; Советский..., 1982; Горная ..., 1984, 1985, 1991; Украинский..., 1989; Анциферов и др., 2009]; ◆ — передбачувана середня температура (t , °C) перетворення видів палив у природних умовах [Гапеев, 1949; Горная ..., 1984, 1991]; ◇ — діапазони зміни вуглецю у твердих паливах [Геолого-углехимическая ..., 1954; Советский ..., 1982; Горная ..., 1984, 1985, 1991; Анциферов и др., 2009].

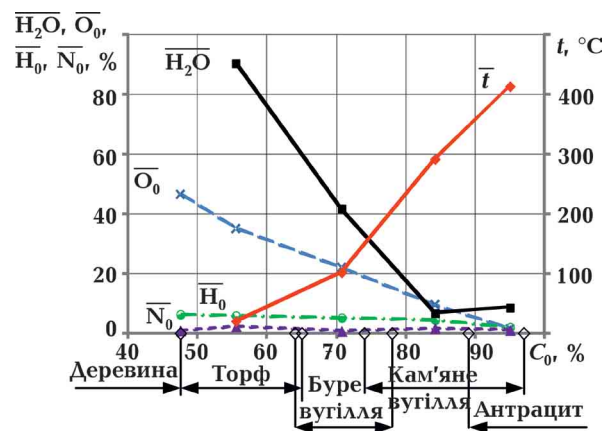


Fig. 1. Dependences of changes in the average elemental content of oxygen (\bar{O}_0), hydrogen (\bar{H}_0), nitrogen (\bar{N}_0) organic mass and total moisture (\bar{H}_2O) on carbon (\bar{C}_0) for different types of fuel during their transformation under the influence of the processes of peat formation and coalification: ×, ●, ▲, ■ — average values of the elemental content in the organic mass of oxygen, hydrogen, nitrogen and total moisture, respectively, established experimentally [Geological ..., 1954; Handbook..., 1965, 1972; Ayruni, 1981; Prokhorov, 1982; Kozlovskiy, 1984, 1985; Babichev, 1989; Kozlovskiy, 1991; Antsiferov et al., 2009]; ◆ — expected average temperature (t , °C) of transformation of fuel types under natural conditions [Gapeev, 1949; Kozlovskiy, 1984, 1975, 1991]; ◇ — ranges of carbon changes in solid fuels [Geological ..., 1954; Ayruni, 1981; Prokhorov, 1982; Kozlovskiy, 1984, 1985, 1991; Antsiferov et al., 2009].

терій однозначно не вказує на належність викопного вугілля до одного з його видів. З цієї причини на додаток до показника $R_{\text{ор}}$ розглядають найвищу теплоту згоряння на вологий беззольний стан (Q_S^{af}) і вихід летких речовин на сухий беззольний стан (V^{daf}). Класифікаційні показники Q_S^{af} та V^{daf} розроблені суто для характеристики споживчих якостей викопного вугілля. Вони не можуть відображати повною мірою прояв небезпечних властивостей шахтопластів, оскільки в методиках їх визначення не розглядається наявність вологи та мінеральних домішок у вугіллі під час ведення гірничих робіт.

Суттєві відмінності споживчих властивостей між видами викопного вугілля виявляються за різними допоміжними критеріями визначення типів вугілля: для бурого вугілля — $W_{\text{max}}^{\text{af}}$, кам'яного — V^{daf} , антрацитів — об'ємний вихід летких речовин V_V^{daf} . За аналогією для встановлення різних властивостей підтипів вугілля застосовуються відповідні їх природі виникнення різні показники. Для бурого вугілля це вихід смоли напівкоксовання ($T_{\text{sk}}^{\text{daf}}$), кам'яних — товщина пластичного шару (y) та показник вільного спучування (SI), антрацитів — анізотропія відбиття вітриніту (A_R). Для остаточного виявлення можливого напрямку використання викопного вугілля (встановлення марок, їх груп та підгруп), згідно зі стандартом [ДСТУ 3472:2015, 2015], використовують у різному поєднанні 11 класифікаційних показників. Залежно від природи виникнення та формування кожної споживчої якості вугілля застосовується деяке комплексне поєднання кількох класифікаційних показників. Достовірне визначення споживчих якостей апріорі неможливе за одним, навіть головним, класифікаційним показником. Це підтверджується відсутністю конкретних меж між видами вугілля, що встановлюються за індивідуальним вмістом вуглецю або середнім відбиттям вітриніту. На додаток до них для достовірного оцінювання ступеня впливу метаморфічних процесів як на формування споживчих якостей вугілля, так і на прояв небезпечних властивостей

шахтопластів необхідно використовувати деяке додаткове поєднання допоміжних класифікаційних показників.

При встановленні споживчих якостей викопного вугілля додаткове поєднання допоміжних класифікаційних показників підібрано дослідним шляхом. Застосування такого підходу до встановлення прояву небезпечних властивостей шахтопластів виключено через неможливість їх повторного експериментального відтворення у шахтних умовах. З цієї причини для прогнозу небезпечної властивості кожного шахтопласта застосування деякого поєднання допоміжних класифікаційних показників має строго теоретично науково обґрунтовано з огляду на природу виникнення цієї властивості та умови можливого її прояву під час проведення гірничих робіт. Природа формування споживчих якостей вугілля та методи їх визначення апріорі не можуть збігатися з умовами виникнення небезпечних властивостей шахтопластів при геологічних процесах та з можливим їх проявом під час проведення гірничих робіт.

Методи прогнозу формування небезпечних властивостей шахтопластів насамперед мають враховувати співвідношення між основними компонентами органічної маси [Руднев та ін., 2021б, 2022б, д], вміст різних форм вологи [Руднев та ін., 2022е], кількісний та якісний склад мінеральних домішок [Руднев та ін., 2021а]. Ці показники визначають хімічну активність органічної речовини та фізико-механічний стан шахтопластів під час проведення гірничих робіт. Їх значення експериментально встановлено стандартними методами при визначенні якості продукції [Kishore Nadkarni, 2008; Speight, 2015] та наведені у довідково-нормативних документах [Геолого-углехимическая ..., 1954; Справочник ..., 1965, 1972] практично для всіх шахтопластів Донецького та Львівсько-Волинського вугільних басейнів. Експериментальне визначення елементного складу твердих залишкових продуктів органічної речовини та їх співвідношення при торфоутворенні і на наступних стадіях вуглефікації дає змогу оцінити кількість газоподіб-

них і рідких продуктів, що утворилися та мігрували до теперішнього часу.

Генерація вологи, як і метану, передбачається [Козловский, 1975; Айруни, 1981] на стадії метаморфічних перетворень вугілля. Таке припущення утворення води та метану не підтверджується повною мірою спрямованістю трендів середнього вмісту вологи, кисню та водню на послідовних стадіях процесів торфоутворення, діагенезу та метаморфізму, аж до переходу від кам'яного вугілля до антрацитів (рис. 1). Практично постійні середні значення вмісту водню в органічній масі на зазначених стадіях ($\bar{H}_o = 5,85 \pm 4,45 \%$, табл. 1) та суттєве паралельне скорочення середнього вмісту загальної вологи з 90,5 % у торфі до 6,68 % у кам'яному вугіллі (див. табл. 2) вказують на відсутність певного взаємозв'язку між цими процесами.

Вуглефікація на аналізованих стадіях відбувається без участі водню органічної маси в хімічних перетвореннях, що підтверджується його незмінним вмістом щодо вмісту вуглецю. Скорочення вологості торфу, бурого та кам'яного вугілля обумовлено механічним видаленням зовнішньої вологи за відсутності впливу цих процесів на зміну елементного співвідношення між основними компонентами органічної маси. Збільшення середнього вмісту загальної вологи на антрацитовій стадії (до 8,5 %, табл. 2) викликано додатковими виділеннями гідратної вологи з гіпсу, алюмосилікатів, оксидів та гідроксидів заліза при температурі близько 500 °C з утворенням CaSO_4 , Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 і H_2O [Speight, 2015].

Генерація газоподібних сполук за участю водню органічної маси, у тому числі метану, можлива на антрацитовій стадії внаслідок відчутного зниження його середнього вмісту з 4,45 до 1,97 % (див. табл. 1, рис. 1). На кам'яновугільній стадії утворення аналогічних сполук не підтверджується отриманими результатами незмінних середніх значень елементного вмісту водню в органічній масі. Сучасна газоносність кам'яновугільних шахтопластів за вмістом метану обумовлена переважно його біохі-

мічним походженням на попередніх стадіях вуглефікації та збереженням певної частини під час наступних метаморфічних перетворень.

Одностороннє зменшення середнього елементного вмісту кисню (\bar{O}_o) в органічній масі за відповідного збільшення вмісту вуглецю (\bar{C}_o) і приблизно постійного вмісту водню (\bar{H}_o) та азоту (\bar{N}_o) засвідчує переважне утворення газоподібних продуктів за участю кисню і вуглецю на всіх стадіях торфоутворення (див. табл. 1, рис. 1). Утворення газоподібних продуктів за участю вуглецю, водню та азоту органічної речовини можливе при переході від кам'яного вугілля до антрацитів. Хімічна активність вуглецю при температурі понад 300 °C зростає [Speight, 2015] і, з огляду на зниження середнього елементного вмісту водню та азоту органічної маси (див. табл. 1), утворюються газоподібні продукти з їх участю. На цій стадії можливе також утворення сполук за участю сірки. На таку можливість вказує зниження середнього вмісту загальної сірки з 2,94 до 1,81 %, а також її скорочення у горючій частині з 3,01 до 1,90 % (див. табл. 2).

При встановленні споживчих якостей вугілля елементний склад основних компонентів горючої частини палива незначно відрізняється від елементного складу органічної маси. Це обумовлено методами підготовки проб для лабораторних випробувань. В обох випадках передбачається їхнє попереднє збагачення, дроблення та висушування до повітряно-сухого стану [Kishore Nadkarni, 2008; Speight, 2015]. У результаті такої підготовки до аналізу залучаються проби з однаково низьким виходом золи (зазвичай менше 10 %) та видаленою зовнішньою вологою. При прогнозі небезпечних властивостей шахтопластів необхідно враховувати ступінь відповідності стану проб умовам ведення гірничих робіт.

У всіх випадках визначення елементного складу органічної маси палив [Геолого-углехимическая ..., 1954; Айруни, 1981; Советский ..., 1982; Горная ..., 1984, 1985, 1991; Украинский..., 1989; Анциферов и др., 2009]

не розглядається наявність органічної сірки як одного з основних компонентів (див. табл. 1, 2). Підвищений або знижений елементний вміст кисню органічної маси пояснювали окисно-відновними процесами при вуглеутворенні та відповідним розподілом шахто пластів на типи за їх споживчими якостями [Геолого-углехимическая ..., 1954]. Разом з тим процеси вуглеутворення, за своєю суттю, є незворотними. Вони відбуваються в одному напрямку — зростання вмісту вуглецю та пропорційне зниження суми вмісту інших основних компонентів органічної (горючої) маси відповідно до рівняння (1). При цьому співвідношення між основними компонентами для кожного шахтопласта є строго індивідуальною характеристикою незалежно від застосовуваного головного показника ступеня метаморфізму.

Співвідношення між основними компонентами формувалося на більш ранніх стадіях осадоагромадження і торфоутворення. Воно залежить від 40 видів торфу, які визначаються за інтенсивністю та ступенем розкладання біомаси, видом рослин, їх хімічним складом (вмістом протеїнів, азоту, кальцію та водорозчинних органічних сполук), кислотністю середовища, кліматичними умовами, водо- та повітряна насиченістю торф'яного шару, складом мінеральних речовин, що надходять, та інших факторів [Горная ..., 1991].

Однією з основних причин різного елементного вмісту кисню є не окисно-відновні процеси при метаморфізмі, а переважний вплив на співвідношення між всіма основними компонентами вихідного вмісту органічної сірки. Для окремих шахтопластів її вміст, як і вміст загальної сірки, і в горючій частині палива, може становити перебувати в межах від десятих часток до 10 % [Геолого-углехимическая..., 1954; Справочник..., 1965, 1972; Каталог..., 1981; Spreight, 2015]. Дотримання умови рівності рівняння (1) за різного вмісту органічної сірки виконується, в основному, за відповідної зміни вмісту кисню [Руднев та ін., 2022в].

Приблизно однакові співвідношення

якісного та кількісного виходу золи з торфу, кам'яного вугілля та антрацитів вказують на переважне збереження мінеральних домішок у шахтопластах на всіх стадіях вуглефікації (див. табл. 3). Це засвідчує, що елементний склад мінеральних домішок, як і небезпечних властивостей шахтопластів, зумовлених різним співвідношенням їх компонентів, формувався на ранніх стадіях, що передували вуглефікації. При метаморфізмі елементне співвідношення змінювалося передусім між основними компонентами органічної маси. Співвідношення між компонентами мінеральних домішок на цій стадії залишалися практично без змін.

З огляду на аналіз споживчих властивостей викапного вугілля встановлено, що матеріальний баланс метаморфічних перетворень шахтопластів визначається, в основному, експериментально встановленим твердим залишковим продуктом органічної (горючої) маси. При цьому зовнішня волога видаляється механічним способом, аж до переходу від кам'яного вугілля до антрацитів, без її участі в хімічному перетворенні органічної речовини. Додаткове виділення гідратної вологи мінеральних домішок відбувається при переході від кам'яного вугілля до антрацитів. Газоподібні продукти, згідно із зміною елементного співвідношення основних компонентів органічної маси (див. табл. 1), утворюються на всіх стадіях вуглефікації.

Про кількісний та якісний склад газоподібних продуктів, що утворилися, на кожній стадії метаморфізму можна робити висновки за середньою зміною співвідношення між основними компонентами органічної (горючої) маси. Стадії метаморфізму в такому випадку визначають як за характером індивідуальних залежностей вмісту основних компонентів органічної (горючої) маси від вмісту вуглецю, так і за точками перетину цих середніх ліній. Додатковим критерієм можливого індивідуального прояву небезпечної властивості шахтопласта може бути аномальне відхилення одного з основних компонентів від відповідної усередненої лінії.

Результати досліджень спрямовані на підтвердження попередніх висновків, отриманих на підставі аналізу зміни середніх значень показників споживчих якостей твердих палив за їх вуглефікації. Розглянемо залежність зміни елементного

вмісту основних компонентів органічної маси від вмісту вуглецю (рис. 2).

Стабільне скорочення з 13,71 до 0,18 % вмісту кисню при посиленні впливу метаморфічних процесів (зростанні вмісту C_0 до 97,41 %) відбувалося згідно з емпіричним рівнянням, близьким до функціональної залежності (рис. 2, а, крива 1, $R^2=0,98$, $\sigma=0,58$). Обернено пропорційне зменшення вмісту O_0 за відповідного зростання C_0 досягало приблизно 90 %, при цьому вміст водню H_0 (рис. 2, б) та вміст азоту N_0 (рис. 2, в) залишалися практично постійними. Незмінними також були вміст загальної сірки (рис. 3, а) та вихід золи (рис. 3, б). Вміст вологи в аналітичних пробах досяг його мінімальних значень (рис. 3, в).

Одностороннє зменшення вмісту кисню за збільшення вмісту вуглецю до 90 % і постійних середніх значень вмісту водню та азоту органічної речовини, незмінних середніх значень загальної сірки та виходу золи, а також зменшення вологи аналітичних проб до мінімального вмісту кисню, вказують на єдине можливе утворення газоподібних продуктів на аналізованій стадії лише за участю вуглецю та кисню органічної маси.

При зростанні вмісту вуглецю органічної маси (C_0) понад 90 % спостерігається зменшення скорочення вмісту кисню (див. рис. 2, а) та водню (рис. 2, б). Це засвідчує участь у генерації газоподібних продуктів разом із вуглецем та киснем певної частки водню органічної речовини.

Участь азоту в утворенні газоподібних продуктів також можлива, внаслідок помітного зменшення середнього його вмісту зі збільшенням вмісту вуглецю понад 92 % (див. рис. 2, в). За аналогічною причиною

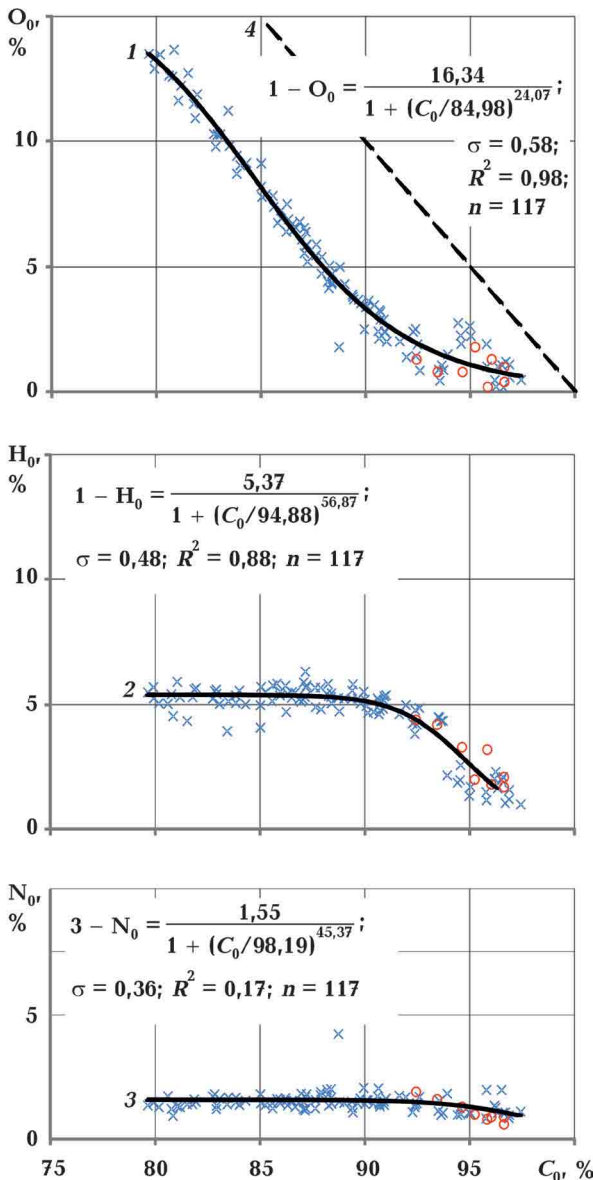


Рис. 2. Залежності зміни елементного вмісту в органічній масі кисню (а), водню (б) та азоту (в) від вмісту вуглецю (C_0): 1—3 — усереднені лінії відповідно зміни кисню (O_0), водню (H_0) та азоту (N_0); 4 — обернено пропорційна залежність $\Sigma O_0, H_0, N_0$ від C_0 ; \circ, \times — експериментальні дані відповідно до публікацій [Геолого-углехимическая ..., 1954; Анциферов и др., 2009]; σ — середньоквадратичні відхилення; R^2 — коефіцієнти детермінації; n — кількість оброблених пар даних.

Fig. 2. Dependencies of changes in elemental content in the organic mass of oxygen (a), hydrogen (б) and nitrogen (в) from carbon (C_0): 1—3 — averaging lines, respectively, of changes in oxygen (O_0), hydrogen (H_0) and nitrogen (N_0); 4 — inversely proportional dependence $\Sigma O_0, H_0, N_0$ on C_0 ; \circ, \times — experimental data, respectively, according to [Geological..., 1954; Antsiferov et al., 2009]; σ — standard deviations; R^2 — coefficients of determination; n — is the number of processed data pairs.

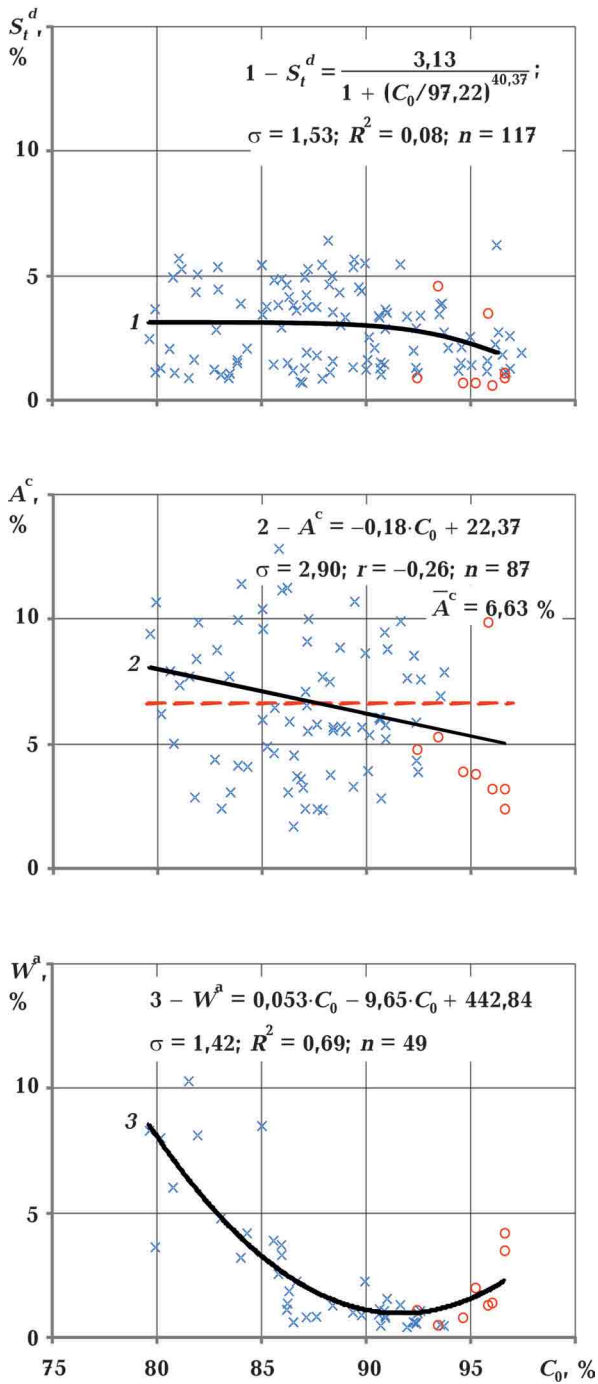


Рис. 3. Залежності зміни елементного вмісту горючої частини палива при метаморфічних перетвореннях шахтопластів загальної сірки (а), виходу золи (б) та вмісту вологи аналітичних проб (в) від вмісту вуглецю (C_0): 1—3 — усереднені лінії відповідно зміни загальної сірки (S_t^d), виходу золи (A^c) та вологи аналітичних проб (W^a); \circ , \times — експериментальні дані відповідно до публікацій [Геолого-углехимическая ..., 1954; Анциферов и др., 2009]; σ — середньоквадратичні відхилення; R^2 , r — відповідно коефіцієнти детермінації та кореляції; n — кількість оброблених пар даних.

Fig. 3. Dependencies of changes in elemental content in combustible part of the fuel during metamorphic transformations of coal seams of total sulfur (a), ash yield (b) and moisture analytical samples (b) from carbon (C_0): 1—3 — averaging lines, respectively, of changes in total sulfur (S_t^d), ash yield (A^c) and moisture of analytical samples (W^a); \circ , \times — experimental data according to and [Geological ..., 1954; Antsiferov et al., 2009] respectively; σ — standard deviations; R^2 , r — coefficients of determination and correlation, respectively; n — is the number of processed data pairs.

зменшення елементного вмісту можлива висока ймовірність участі сірки в утворенні газоподібних продуктів (див. рис. 3, а). На цій стадії метаморфізму ($C_0=92\div 97$ %) також збільшується вміст води внаслідок виділення гідратної води (рис. 3, в).

За графіками залежностей основних компонентів органічної маси, загальної сірки, виходу золи та вологи аналітичних проб вугілля від C_0 (рис. 1—3) неможливо аналізувати збільшення елементного вмісту вуглецю в органічній масі і міру посилення впливу метаморфічних процесів. Залежність зміни елементного вмісту вуглецю органічної маси необхідна для оцінювання генерації можливої кількості газоподібних продуктів на стадії метаморфізму. Емпіричну залежність елементного вмісту вуглецю від середнього показника відбивної здатності вітриніту встановлено [Руднев та ін., 2022г] з використанням експериментальних даних [Эттингер, Шульман, 1975; Федорова и др., 2015; Бутузова и др., 2016]. Її апробовано на підставі рекомендованих діапазонів зміни крайніх значень R_{or} для різних марок вугілля згідно з чинним стандартом [ДСТУ 3472:2015, 2015], а також відомостей про R_{or} для цих марок, наведених у гірничій енциклопедії [Горная ..., 1991]. Крайні експериментальні значення вмісту вуглецю у горючій частині палива, які відповідають зазначеним маркам [Горная ..., 1991; ДСТУ 3472:2015, 2015], наведено у довідково-нормативному документі [Справочник ..., 1972]. За відповідності нижніх і верхніх меж зміни R_{or} кожної марки [Горная ..., 1991; ДСТУ 3472:2015, 2015] до аналогічних меж зміни

C_r цих марок [Справочник ..., 1972] встановлено положення крайніх меж зміни R_{or} та C_r щодо емпіричної кривої 1 (рис. 4).

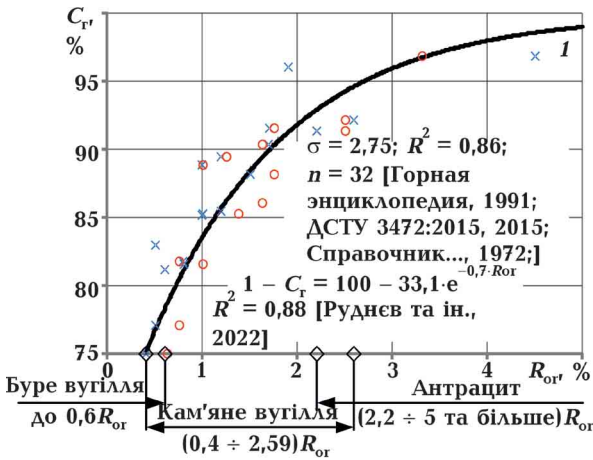


Рис. 4. Взаємозалежність між вмістом вуглецю (C_r) і середнім показником відбивної здатності вітриніту (R_{or}): 1 — емпірична залежність [Руднев та ін., 2022г], встановлена на підставі експериментальних даних [Эттингер, Шульман, 1975; Федорова и др., 2015; Бутузова и др., 2016]; ×, ○ — дані, отримані на підставі крайніх значень R_{or} для марок вугілля відповідно [ДСТУ 3472:2015, 2015] та [Горная ..., 1991]; значення C_r — згідно з діапазонами зміни для цих марок, наведених у довідково-нормативному документі [Справочник..., 1972]; σ — середньоквадратичне відхилення значень, встановлених згідно з документами [Справочник..., 1972; Горная ..., 1991; ДСТУ 3472:2015, 2015] від емпіричної залежності 1; R^2 — коефіцієнти детермінації; n — кількість оброблених пар даних.

Fig. 4. Interdependence between carbon content (C_r) and average vitrinite reflectance (R_{or}): 1 — empirical dependence [Rudniev et al., 2022g], established on the basis of experimental data [Ettinger, Shulman, 1975; Fedorova et al., 2015; Butuzova et al., 2016]; ×, ○ — data obtained on the basis of the extreme values of R_{or} for the grades of coal according to [DSTU 3472:2015, 2015] and [Kozlovskiy, 1991], and the value of C_c is in accordance with the ranges of change for these grades given in the reference and normative document [Handbook..., 1972]; σ — standard deviations of the values established according to [Handbook..., 1972; Kozlovskiy, 1991; DSTU 3472:2015, 2015] from empirical dependence 1; R^2 — coefficients of determination; n is the number of processed data pairs.

Крайні граничні межі зміни R_{or} та C_r для кожної марки характеризують максимально можливе їх відхилення від усередненої кривої. Середньоквадратичне відхилення даних [Справочник ..., 1972; Горная ..., 1991;

ДСТУ 3472:2015, 2015] від емпіричної кривої 1 дорівнює 2,75 %. Це дає можливість використовувати емпіричну залежність 1 (при коефіцієнті детермінації $R^2=0,88$ [Руднев та ін., 2022г]) для оцінювання генерації газоподібних продуктів метаморфізму за участю вуглецю органічної (горючої) маси. Характер емпіричної залежності (рис. 4, крива 1) засвідчує уповільнення темпу зростання вмісту вуглецю в органічній (горючій) масі антрацитових шахтопластів. Зниження темпу зростання вмісту C_o вказує на утворення основної кількості газоподібних продуктів за участю компонентів органічної (горючої) маси на ранніх стадіях метаморфізму.

В умовах нагрівання без доступу повітря утворюються газо- і пароподібні продукти розкладання, тобто леткі речовини. Після їхнього видалення із зони нагріву залишається твердий нелеткий залишок. При встановленні споживчих якостей виходу вугілля таким нелетким залишком є нелеткий вуглець C_f^a [Kishore Nadkarni, 2008; Speight, 2015]:

$$C_f^a = 100 - (W^a + A^a + V^a), \% \quad (2)$$

де W^a, A^a, V^a — відповідно волога, вихід золи та летких речовин аналітичної проби.

Показники (W^a, A^a, V^a) для багатьох шахтопластів наведені на геолого-вуглехімічній карті Донецького басейну [Геолого-углехимическая ..., 1954], їх значення відомі для шахтопластів з вугіллям високого ступеня вуглефікації (марок Т, ПА, А), які були використані для моделювання процесів газонафтоутворення [Анциферов и др., 2009]. За експериментальними даними [Геолого-углехимическая ..., 1954; Анциферов и др., 2009] згідно з рівнянням (2) для вказаних шахтопластів розраховано значення нелеткого вуглецю (C_f^a) та встановлено їх залежність від елементного вмісту вуглецю (C_o^a) органічної маси (рис. 5, крива 1), а також залежність виходу летких речовин (V^{daf}) в міру посилення (зростання C_o^a) ступеня метаморфічних перетворень шахтопластів (рис. 5, крива 2).

Показник V^{daf} був прийнятий єдиним і першим критерієм оцінювання ступеня

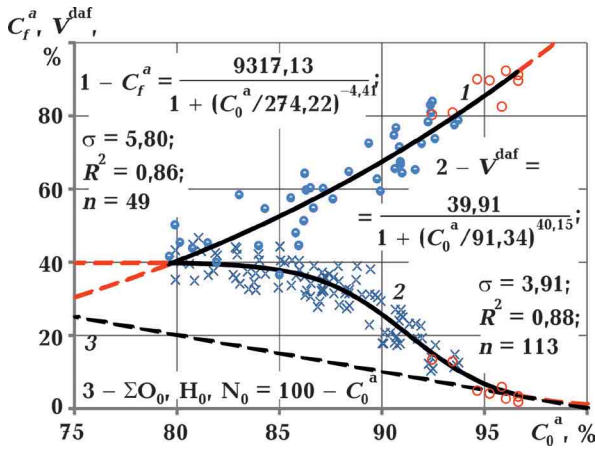


Рис. 5. Залежності вмісту нелеткого вуглецю (C_f^a) та виходу летких речовин (V^{daf}) від елементного вмісту вуглецю в органічній масі (C_o^a): 1, 2 — відповідно емпіричні залежності C_f^a та V^{daf} від C_o^a ; 3 — обернено пропорційна (функціональна) залежність суми основних компонентів органічної маси від вмісту вуглецю; \circ , \bullet — розраховані за рівнянням (2) значення з використанням експериментальних даних (W^a , A^a , V^a) відповідно, згідно з публікаціями [Анциферов и др., 2009] та [Геолого-углехимическая..., 1954]; \circ , \times — експериментальні дані V^{daf} відповідно [Анциферов и др., 2009] та [Геолого-углехимическая..., 1954]; σ — середньоквадратичні відхилення; R^2 — коефіцієнти детермінації; n — кількість оброблених пар даних.

Fig. 5. Dependence of values of non-volatile carbon (C_f^a) and the yield of volatile substances (V^{daf}) on the elemental content of carbon in the organic mass (C_o^a): 1, 2 — empirical dependences C_f^a and V^{daf} on C_o^a ; 3 — inversely proportional (functional) dependence of the sum of the main components of organic mass on carbon content; \circ , \bullet — values calculated according to equation (2) using experimental data (W^a , A^a , V^a), respectively according to [Antsiferov et al., 2009] and [Geological ..., 1954]; \circ , \times — experimental data of V^{daf} according to [Antsiferov et al., 2009] and [Geological ..., 1954], respectively; σ — standard deviations; R^2 — coefficients of determination; n is the number of processed data pairs.

метаморфізму при встановленні споживчих якостей викопного вугілля [Геолого-углехимическая..., 1954]. Паралельно з цим на підставі загальної закономірності його зміни на площі вугільного басейну величину V^{daf} використовували і для обґрунтування геологічної будови вугленосної товщі. При оцінюванні ступеня метаморфічних перетворень деяких шахтопластів були виявлені випадки відхилень від строгої закономірності дотримання правила Хільга. Відповідно до цього правила зі збільшенням стратиграфічної глибини залягання

пласта вихід летких речовин знижується, що не в усіх випадках підтверджувалося досвідом ведення гірничих робіт [Геолого-углехимическая..., 1954]. При розробці сучасного стандарту класифікації викопного вугілля за генетичними та технологічними параметрами показник V^{daf} втратив стан першого та єдиного критерію оцінювання ступеня метаморфізму. Для цих цілей використовується середній показник відбивної здатності вітриніту (R_{or}), а V^{daf} застосовується як один із допоміжних показників [ДСТУ 3472:2015, 2015]. Додаткове застосування 10 допоміжних показників дало змогу більш диференційовано зробити градацію вугілля за його споживчими якостями.

Показник V^{daf} на цей час залишається першим і основним критерієм оцінювання ступеня метаморфічних перетворень при прогнозі небезпечних властивостей шахтопластів. У сучасній нормативній базі з безпечного ведення гірничих робіт додаткове використання допоміжних показників обмежене або їх здебільшого не використовують. Прикладом такого оцінювання ступеня метаморфізму є відомі нормативні документи з безпечного ведення гірничих робіт [Руководство ..., 1979, 1994, 2000, Каталог ..., 1983; Инструкция ..., 1987; Правила ..., 2005] та багато інших.

Недостатня повна відповідність показника V^{daf} метаморфічним процесам, що супроводжували перетворення вугільних пластів, впливає з порівняння графіків (рис. 5). Склад органічної маси (твердий залишок для аналізованої стадії метаморфізму), виходячи з кількості прийнятих до розгляду основних компонентів C_o , O_o , H_o , N_o [Геолого-углехимическая ..., 1954; Анциферов и др., 2009], характеризується строгою функціональною взаємозалежністю:

$$C_o = 100 - \Sigma O_o, H_o, N_o \text{ (y \%)} \quad (3)$$

Для проб на сухий беззолний стан, згідно з експериментальними даними [Анциферов и др., 2009; Геолого-углехимическая ..., 1954], має також виконуватися рівність

$$C_o = C_f + V^{daf} \text{ (y \%)} \quad (4)$$

Вона підтверджується емпіричними залежностями 1 та 2, що характеризуються тісним кореляційним зв'язком. Для залежності 1 нелеткого залишку вуглецю $R^2=0,86$ та $\sigma=5,80$ %, для залежності 2 виходу летких речовин ці показники відповідно дорівнюють: $R^2=0,88$ та $\sigma=3,91$ % (див. рис. 5). Відповідно до зазначених залежностей зі зростанням вмісту нелеткого вуглецю в деякій пропорції скорочується вихід летких речовин. Сумарне значення C_o^a та V^{daf} згідно з емпіричними залежностями за фіксованого елементного вмісту C_o^a приблизно дорівнює 100 %.

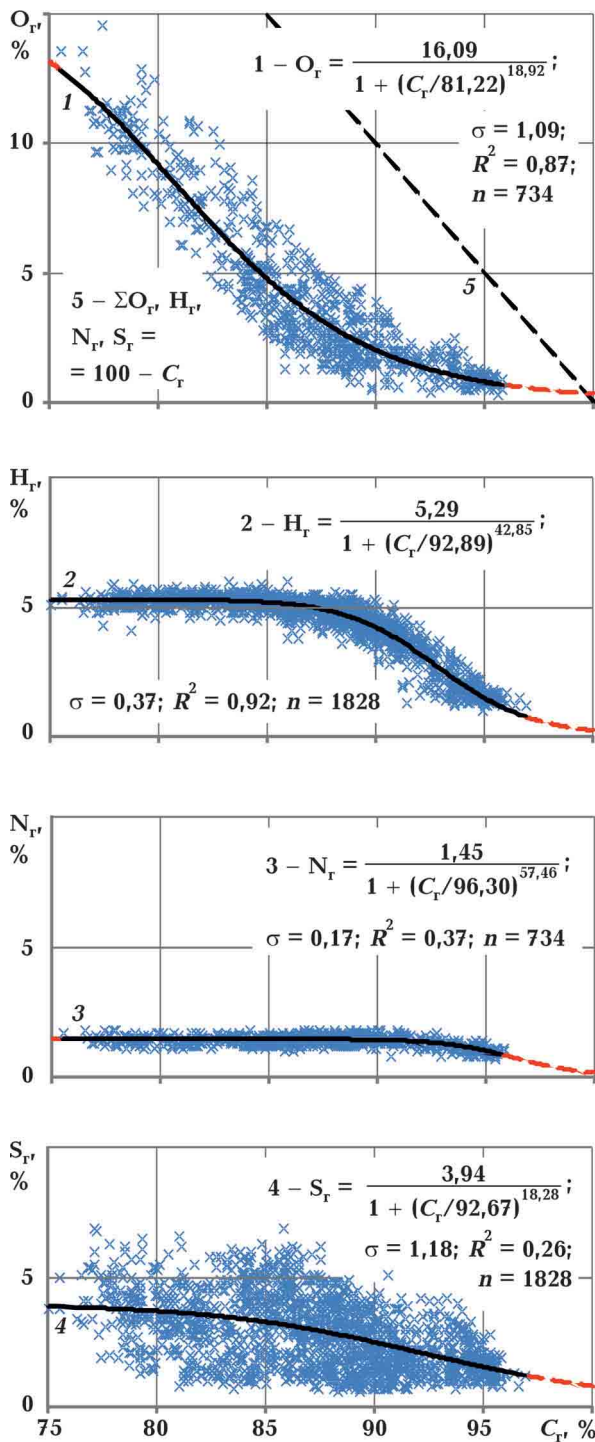
В обох випадках рівностей (3) і (4) достовірність експериментального визначення значень C_o^a , як і інших складових членів цих рівнянь, стандартними методами не викликає сумнівів. Істотне перевищення виходу летких речовин при термічному розкладанні вугілля (рис. 5, б, крива 2) порівняно із сумарним вмістом інших основних компонентів органічної маси $\sum O_o$, H_o , N_o (рис. 5, б, пряма 3) вказує на різні процеси, що відбуваються в разі термічної деструкції вугілля та метаморфічних перетворень шахтопластів. Для формального дотримання достовірності матеріального балансу вихідної органічної речовини та підтвердження близькості аналізованих процесів необхідно, як мінімум, дотримання співвідношення $V^{daf} \leq \sum O_o$, H_o , N_o . У так випадку сума $C_o^a + V^{daf}$ не перевищуватиме 100 % і можна стверджувати деяку ідентичність аналізованих процесів.

Головним фактором, що впливає на підвищений вихід летких речовин, порівняно із сумарним вмістом основних компонентів ($\leq \sum O_o$, H_o , N_o), за термічного розкладання вугілля є висока температура проведення лабораторних випробувань [Speight, 2015]. Відповідно до стандартів вона становить $(900 \pm 5)^\circ\text{C}$ [ДСТУ 9220:2023, 2023] та $(900 \pm 10)^\circ\text{C}$ [ГОСТ 7303-90, 1990], що відповідає процесам часткового плавлення та магмоутворення. Кількісний та якісний склад газоподібних продуктів, які утворюються в процесі метаморфічних перетворень шахтопластів, не може відповідати їх значенням за термічної деструк-

ції вугілля, оскільки в природних умовах не досягається температура часткового плавлення та магмоутворення. Показник V^{daf} характеризує суто споживчі якості вугілля, а температурний режим його визначення не має відношення до умов метаморфічних перетворень шахтопластів за температури менше 600°C . Про можливу значну похибку прогнозу небезпечних властивостей шахтопластів можна робити висновки з огляду на співвідношення розташування усередненої кривої 2 та прямої 3 (див. рис. 5). Для метаморфічних процесів усереднена лінія, що відповідає залежності кількості утворених газоподібних продуктів, не може розміщуватися вище прямої 3. Усереднена крива 2 залежності V^{daf} розташовується значно вище прямої 3. Це виключає дотримання матеріального балансу між основними компонентами органічної маси (твердого залишку) згідно з рівнянням (3) та підтверджує значну відмінність метаморфічних процесів і процесів при визначенні V^{daf} у лабораторних умовах.

Усі методики встановлення споживчих якостей вугілля згідно з розробленими стандартами передбачають температуру проведення лабораторних випробувань, що значно перевищує температуру метаморфічних перетворень шахтопластів. Для виявлення конкретної споживчої властивості розроблено відповідні спеціальні стандарти. Продукти напівкоксування бурого та кам'яного вугілля, лігнітів, гірських сланців і торфу (маси смоли, виходу пірогенетичної води та газу) визначають при температурі 520°C [ISO 647:2017, 2017]. При прогнозі раптових викидів вугілля і газу як допоміжний показник застосовують товщину пластичного шару (ν) [Правила ..., 2005]. Її визначають під час послідовного нагрівання проби від 250 до 750°C зі швидкістю також не відповідає умовам метаморфічних перетворень шахтопластів.

Незбіг температурних режимів визначення споживчих якостей палив [ГОСТ 7303-90, 1990; ISO 647:2017, 2017; ISO/TS 20362:2022, 2022; ДСТУ 9220:2023, 2023] з умовами їх утворення в природних умовах (див. табл. 1 [Гапеев, 1949; Геологический



..., 1973; Козловский, 1975; Горная ..., 1984, 1991]) вказує на необхідність внесення відповідних коригувань як при прогнозі небезпечних властивостей шахтопластів, так і при розрахунку можливого утворення газоподібних і рідких продуктів при метаморфічних процесах.

Аналіз зміни вмісту нелеткого вуглецю, суми основних компонентів органічної маси та виходу летких речовин (див. рис. 5) зроблено без розгляду елементного вмісту органічної сірки як одного з основних компонентів органічної маси (див. рис. 2). Близькість елементного складу органічної маси та горючої частини палива забезпечується в обох випадках однаковими методами підготовки та аналізу проб. Вони полягають у попередньому їх дробленні та збагаченні до виходу золи, як правило менше 10 %, та доведення до повітряно-сухого стану [Kishore Nadkarni, 2008; Speight, 2015]. Завдяки такій підготовці видаляється значна частка мінеральних домішок та елементний вміст всіх основних компонентів органічної маси наближається до їх вмісту в горючій частині палива. Це дає можливість аналізувати зміну співвідношення між усіма основними компонентами горючої частини палива (C_r, O_r, H_r, N_r, S_r), зокрема елементний вміст сірки, згідно з експериментальними даними, наведеними у довідково-нормативних документах [Справочник ..., 1965, 1972].

Близькі, майже однакові, співвідношення між основними компонентами органічної маси та горючою частиною палива підтверджуються результатами порівняння відповідних графіків їх зміни залежно від C_o (див. рис. 2) та C_r (рис. 6).

Залежність зміни елементного вмісту кисню (див. рис. 2, а, б, а), водню (див.

Рис. 6. Залежності зміни елементного вмісту в горючій частині вугілля кисню (а), водню (б), азоту (в) та сірки (г) від вуглецю (C_r): 1–4 — усередненні криві (сигмоїди) відповідно зміни кисню (O_r), водню (H_r), азоту (N_r) та сірки (S_r); 5 — обернено пропорційна залежність $\Sigma C_r, O_r, H_r, N_r, S_r$ від C_r ; \times — експериментальні дані та [Геолого-углехимическая..., 1954; Справочник..., 1965, 1972]; σ — середньоквадратичні відхилення; R^2 — коефіцієнти детермінації; n — кількість оброблених пар даних.

Fig. 6. Dependence of changes in the elemental content of oxygen (a), hydrogen (б), nitrogen (в), and sulfur (г) in the combustible part of coal on carbon (C_c): 1–4 — averaging curves (sigmoid functions), respectively, changes in oxygen (O_c), hydrogen (H_c), nitrogen (N_c) and sulfur (S_c); 5 — inversely proportional dependence $\Sigma C_r, O_r, H_r, N_r, S_r$ on C_c ; \times — experimental data [Geological ..., 1954; Handbook ..., 1965, 1972]; σ — standard deviations; R^2 — coefficients of determination; n is the number of processed data pairs.

рис. 2, б та в, в) та азоту (див. рис. 2, в, б, в) відповідно від C_0 і C_r незначно відрізняють-

ся між собою як за характером зміни, так й за тісністю кореляційних зв'язків.

Максимальних змін, порівняно з іншими основними компонентами при метаморфічних процесах, зазнавал елементний вміст кисню в органічній масі (див. рис. 2, а) і горючій частині палива (див. рис. 6, а). За високої тісноти кореляційних залежностей (відповідно R^2 дорівнює 0,98 і 0,87) суттєвою відмінною ознакою було більш високе середньоквадратичне відхилення від усередненої кривої значень елементного вмісту кисню в горючій частині палива. Показник σ відповідно дорівнює 0,58 і 1,09 %. Така відмінність, майже вдвічі, пов'язана з методикою визначення вмісту кисню за різницею між 100 % і сумою інших основних компонентів. При визначенні O_0 у цій сумі не враховувалася наявність органічної сірки. Її вміст не підпорядковується певній тісній кореляційній залежності від метаморфічних процесів. Про це свідчить відсутність тісного кореляційного зв'язку вмісту загальної сірки S_t^d як з елементним вмістом вуглецю органічної маси C_0 (див. рис. 3, а, $R^2=0,08$; $\sigma=1,53$ %), так й з її залежністю від вмісту вуглецю горючої частини палива (рис. 7, а, $R^2=0,25$; $\sigma=1,12$ %).

Водночас встановлена тісна прямо пропорційна взаємозалежність вмісту сірки горючої частини S_r із вмістом загальної сірки (рис. 8, $r=0,93$; $\sigma=0,50$). Розташування значень експериментальних даних вище і нижче бісектриси координатної сітки свідчить про можливе (випадкове) переважне знаходження S_r як у горючій частині палива, так й у мінеральних домішках збага-

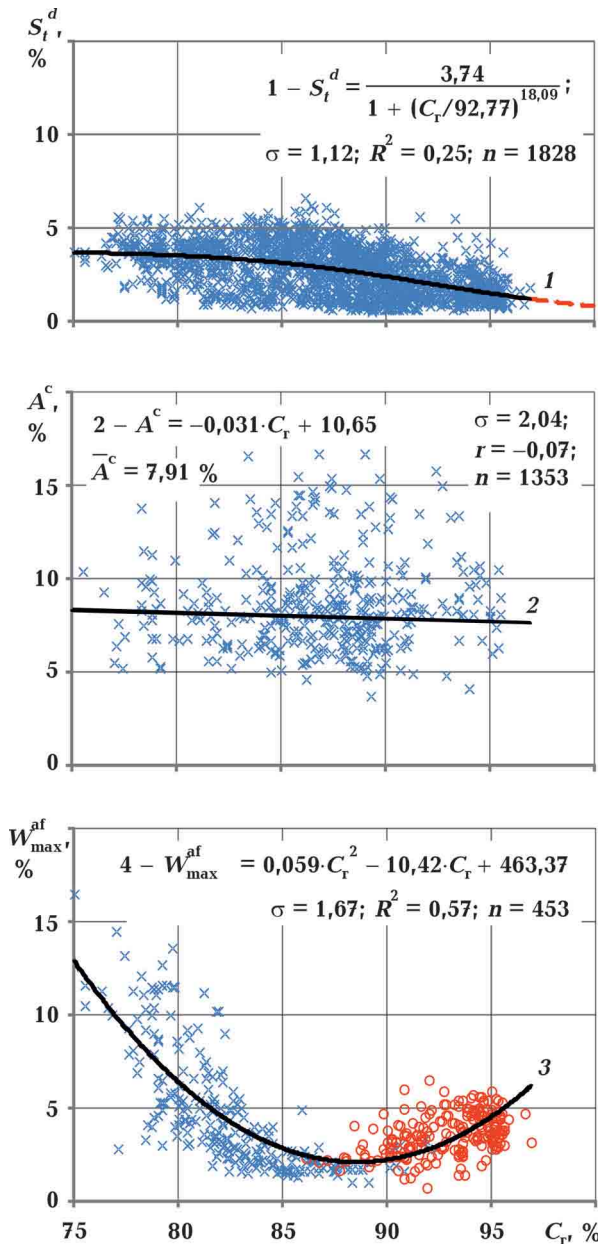


Рис. 7. Залежності зміни елементного вмісту загальної сірки (а), виходу золи (б) та максимальної вологосмності (в) у горючій частині палива при метаморфічних перетвореннях шахтопластів від вуглецю (C_r): 1—3 — усереднені лінії відповідно зміни загальної (а) сірки (S_t^d), виходу (б) золи (A^c) та максимальної (в) вологосмності (W_{max}^{af}); × — експериментальні дані [Справочник ..., 1965, 1972]; ○ — експериментальні дані W_{max}^{af} згідно [Руднєв та ін., 2022А]; σ — середньоквадратичні відхилення; R^2 , r — відповідно коефіцієнти детермінації та кореляції; n — кількість оброблених пар даних.

Fig. 7. Dependencies of changes in the elemental content of total sulfur (а), ash yield (б) and maximum moisture content (в) in the combustible part of the fuel during metamorphic transformations of coal seams and carbon (C_r): 1—3 — averaging lines, respectively, of changes in total sulfur (S_t^d) (а), ash yield (A^c) (б) and maximum moisture capacity (W_{max}^{af}) (в); × — experimental data [Handbook..., 1965, 1972]; ○ — experimental data according to [Rudniev et al., 2022А]; σ — standard deviations; R^2 , r — coefficients of determination and correlation, respectively; n is the number of processed data pairs.

чених проб. При попередньому збагаченні проб вугілля забезпечується мінімальний вміст мінеральних домішок. Як правило, їх вміст відповідає виходу золи менше ніж 10 %. Це дає підставу вважати достовірною рівність $S_r \approx S_o$. З цієї причини показники кореляційної залежності S_o від C_o та S_r від C_r мають незначно різнитися між собою. За відсутності тісної кореляційної залежності S_r від C_r (див. рис. 6, г, $R^2=0,26$; $\sigma=1,18$ %) слід очікувати аналогічний незначний кореляційний зв'язок між S_o та C_o .

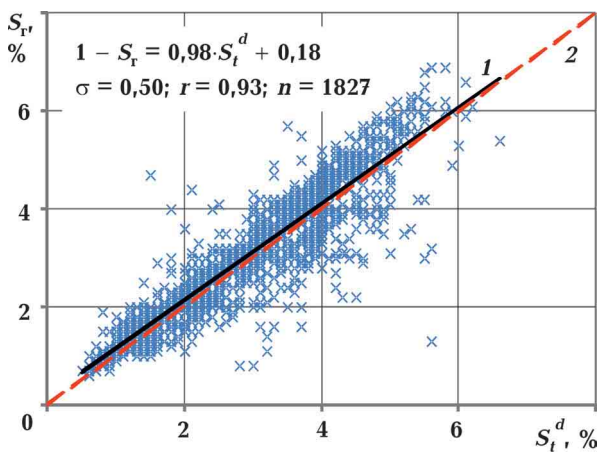


Рис. 8. Взаємозалежність вмісту сірки у горючій частині палива (S_r) та загальної сірки (S_t^d): 1 — усереднена пряма; 2 — бісектриса координатної сітки; x — експериментальні дані [Справочник ..., 1965, 1972]; σ — середньоквадратичне відхилення; r — коефіцієнт кореляції; n — кількість оброблених пар даних.

Fig. 8. Interdependence of sulfur content in the combustible part of the fuel (S_r) and total sulfur (S_t^d): 1 — averaging lines; 2 — bisector of the coordinate grid; x — experimental data [Handbook ..., 1965, 1972]; σ — standard deviation; r — correlation coefficient; n is the number of processed data pairs.

Істотні відхилення розрахункових значень кисню горючої частини палива O_r від усередненої кривої (див. рис. 6, а, $\sigma=1,09$ %) значною мірою, обумовлені, непередбачуваними коливаннями елементного вмісту сірки горючої частини палива S_r (див. рис. 6, г, $\sigma=1,18$ %). Аналогічний вплив на розрахунковий вміст кисню в органічній масі O_o було виключено з огляду ігнорування вмістом органічної сірки як одного з основних компонентів. Унаслідок цього

середньоквадратичні відхилення від усереднених кривих значень інших основних компонентів (водню та азоту) органічної маси та горючої частини палива незначно різнилися між собою. Середньоквадратичні відхилення вмісту водню органічної маси та горючої частини відповідно дорівнювали 0,48 % (див. рис. 2, б) та 0,37 % (див. рис. 6, б). За відсутності суттєвих кореляційних зв'язків середньоквадратичні відхилення від усереднених кривих значень вмісту азоту відповідно становили 0,36 % (див. рис. 2, в) та 0,17 % (див. рис. 6, в). Ігнорування вмісту органічної сірки, як одного з основних компонентів, у кінцевому підсумку вплинуло на розрахункові значення кисню органічної маси та призвело до зменшення середньоквадратичного відхилення від усередненої кривої. Значення σ у цьому випадку (див. рис. 2, а) залежало від точності експериментального визначення лише трьох компонентів (C_o , H_o , N_o). Додаткове залучення значень сірки горючої частини палива при визначенні розрахункових значень кисню (O_r) потенційно викликало збільшення відхилень індивідуальних значень O_r від усередненої кривої (див. рис. 6, а).

Точність визначення елементного вмісту основних компонентів органічної маси та горючої частини палива, згідно з сучасними стандартами, в усіх випадках гарантується за низького вмісту мінеральних домішок [Kishore Nadkarni, 2008; Speight, 2015]. Середній вихід золи під час аналізу проб [Анциферов и др., 2009; Геолого-углехимическая ..., 1954] (див. рис. 3, б) становив 6,63 %. Він незначно відрізняється від його значень 7,91 % (див. рис. 7, б) при технічному аналізі проб після їх збагачення [Справочник ..., 1965, 1972]. Характер зміни вологи аналітичних проб W^a від вмісту вуглецю органічної маси (див. рис. 3, в) подібний до зміни максимальної вологоємності W_{max}^{af} (див. рис. 7, в). Умови визначення виходу летких речовин під час аналізу аналітичних проб (V^a) принципово не відрізняються від умов визначення V^{daf} . З огляду на ідентичність зміни елементного вмісту основних компонентів органічної

маси та горючої частини від вмісту вуглецю (див. рис. 2 і 6), а також незначні відмінності у виході золи та легких речовин і однаковий характер зміни W^a та W_{\max}^{af} , за рівнянням аналогічної залежності (2), для шахтопластів розраховано [Справочник ..., 1965, 1972] нелеткий залишок вуглецю в горючій частині палива:

$$C_f^r = 100 - (W_{\max}^{af} + A^c + V^{daf}), \% \quad (5)$$

Результати розрахунків (рис. 9) за характером збігаються із залежністю нелеткого вуглецю органічної маси (див. рис. 5). Вони повністю підтвердили висновки щодо

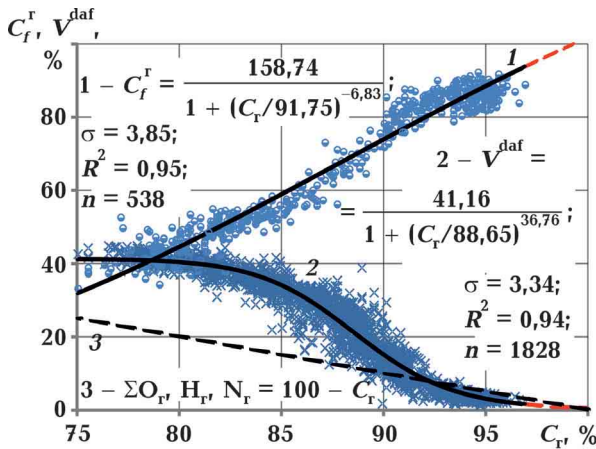


Рис. 9. Залежності значень нелеткого вуглецю (C_f^r) та виходу легких речовин (V^{daf}) від елементного вмісту вуглецю в горючій частині палива (C_c): 1, 2 — відповідно емпіричні залежності C_f^r та V^{daf} від C_c ; 3 — обернено пропорційна (функціональна) залежність суми основних компонентів горючої частини палива від вмісту вуглецю органічної маси; x — розраховані значення C_f^r за рівнянням (5) з використанням експериментальних даних збагачених проб згідно з довідково-нормативними документами [Справочник..., 1965, 1972]; σ — середньоквадратичні відхилення; R^2 — коефіцієнти детермінації; n — кількість оброблених пар даних.

Fig. 9. Dependences of the values of non-volatile carbon (C_f^r) and the yield of volatile substances (V^{daf}) on the elemental content of carbon in the combustible part of the fuel (C_c): 1, 2 — empirical dependences C_f^r and V^{daf} on C_c , respectively; 3 — inversely proportional (functional) dependence of the sum of the main components of the combustible part of the fuel on the carbon content of the organic mass; x — calculated values C_f^r according to equation 5 using experimental data from enriched samples according to reference and regulatory documents [Handbook ..., 1965, 1972]; σ — standard deviations; R^2 — coefficients of determination; n is the number of processed data pairs.

важливої ролі V^{daf} в оцінюванні споживчих якостей вугілля та її відсутності у питаннях оцінювання небезпечних властивостей шахтопластів.

Висновки. На підставі результатів досліджень встановлено різну природу формування під час геологічних процесів споживчих якостей вугілля та прояву небезпечних властивостей шахтопластів. Небезпечні властивості крім співвідношень між основними компонентами органічної (горючої) маси мають відображати кількісний та якісний склад мінеральних домішок, фізико-механічний стан вугільних пластів. Унаслідок статистичної обробки експериментальних даних встановлено кореляційні співвідношення між основними компонентами органічної (горючої) маси та їх участь в утворенні газоподібних продуктів й води на кожній стадії метаморфічних перетворень шахтопластів. Це дає можливість кількісно оцінити генерацію газоподібних продуктів на кожній характерній стадії метаморфізму та внести деякі уточнення до відомої схеми процесу вуглеутворення академіка І.І. Аммосова [Августевич и др., 1987]. У першому наближенні потрібно розглядати п'ять основних компонентів органічної маси замість трьох. У такий спосіб можна визначати конкретний склад газів, що генеруються, і виключити відновно-окисні реакції з огляду на незворотність процесів вуглефікації.

Для удосконалення нормативної бази з безпечного ведення гірничих робіт необхідно враховувати особливості елементного перетворення вихідної речовини під час вуглефікації. Вони полягають у такому:

- показник виходу легких речовин за термічної деструкції вугілля не може бути критерієм небезпечних властивостей шахтопластів, оскільки визначається при температурі 900 °С, а температура метаморфічних процесів утворення викопного вугілля та антрацитів не перевищує 600 °С;
- посилення метаморфічних процесів в односторонньому порядку призводить до зростання вмісту вуглецю органічної (горючої) маси з одночасним обернено пропорційним зниженням суми інших основних

компонентів (кисню, водню, азоту та органічної сірки);

– генерація газоподібних продуктів за участю вуглецю та кисню можлива на всіх метаморфічних стадіях, а за участю вуглецю, водню, органічної сірки та азоту — лише з переходом до антрацитової стадії;

– кількісні показники елементного складу органічної маси та горючої частини палива майже не різняться між собою при визначенні стандартними методами, тобто їх можна взаємозамінювати при прогнозі небезпечних властивостей шахтопластів;

– високий вміст мінеральних домішок у пластових пробах (за виходу золи більше як 10 %) не дає змоги достовірно встановлювати, згідно з діючими стандартами, елементний склад органічної (горючої) маси та як наслідок достовірно прогнозувати небезпечні властивості шахтопластів;

– індивідуальні небезпечні властивості шахтопласту визначаються як за загальним ступенем його метаморфічних перетворень (вмістом вуглецю органічної маси), так й за відхиленням елементного вмісту кожного основного компонента від усередненої лінії.

Список літератури

- Авгушевич И.В., Броневец Т.М., Еремін И.В., Медведев А.В., Чурбаков В.Ф. *Аналитическая химия и технический анализ угля*. Москва: Недра, 1987, 336 с.
- Айруни А.Т. *Теория и практика борьбы с рудными газами на больших глубинах*. Москва: Недра, 1981, 335 с.
- Анциферов А.В., Голубев А.А., Канин В.А., Тиркель М.Г., Задара Г.З., Узиюк В.Ю., Анциферов В.А., Суярко В.Г. *Газоносность и ресурсы метана угольных бассейнов Украины. Т.1. Геология и газоносность Западного, Юго-Западного и Южного Донбасса*. Донецк: Вебер, 2009, 453 с.
- Багринцева К.И., Васильев В.Г., Ермаков В.И. Роль угленосных толщ в процессах генерации природного газа. *Геология нефти и газа*. 1968. № 6. С. 7—11.
- Бутузова Л.Ф., Шакир Ш.М., Кулакова В.О., Колбаса В.А. Взаимосвязь между технологическими свойствами углей и составом экстрактов. *Вестник Донецкого национального технического университета*. 2016. № 1. С. 13—20.
- Гапеев А.А. *Твердые горючие ископаемые (каустобиолиты)*. Москва: Гос. изд-во геолог. литературы, 1949, 335 с.
- Геологический словарь: в двух томах*. Ред. К.Н. Паффенгольц. Том 2. Н-Я. Москва: Недра, 1973, 456 с.
- Геолого-углехимическая карта Донецкого бассейна*. Москва: Углетехиздат, 1954, 430 с.
- Горная энциклопедия. Т. 1. Аа-лава — Геосистема*. Гл. ред. Е.А. Козловский. Москва: Советская энциклопедия, 1984, 560 с.
- Горная энциклопедия. Т. 2. Геосферы — Кенай*. Гл. ред. Е.А. Козловский. Москва: Советская энциклопедия, 1985, 575 с.
- Горная энциклопедия. Т. 5. СССР — Яшма*. Гл. ред. Е.А. Козловский. Москва: Советская энциклопедия, 1991, 541 с.
- ГОСТ 7303-90 (ст. СЭВ 6768-89). Антрацит. Метод определения объемного выхода летучих веществ*. Москва: Издательство стандартов, 1990, 7 с.
- ДСТУ 3472:2015. Вугілля буре, кам'яне та антрацит. Класифікація*. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015, 8 с.
- ДСТУ 9220:2023. Паливо тверде мінеральне. Методи визначення виходу летких речовин*. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023, 13 с.
- Инструкция по прогнозу и предупреждению внезапных прорывов метана из почвы горных выработок. НПА ОП 10.0-5.28-87*. Министерство угольной промышленности Украинской ССР, МакНИИ, 1987, 29 с.
- Каталог динамических разломов горных пород на угольных шахтах*. Ленинград: Изд. Министерства угольной промышленности СССР, ВНИИ горной геомеханики и маркшейдерского дела, 1983, 120 с.
- Каталог углей СССР, склонных к самовозгоранию*. Под ред. Н.И. Линденау, В.М. Маевской, Е.С. Вахрушева и др. Москва: Недра, 1981, 416 с.

- Козловский Б. *Прогнозирование метановой опасности в угольных шахтах*. Москва: Недра, 1975, 152 с.
- Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ: СОУ 10.1.00174088.011—2005*. Київ: Мінвуглепром України, 2005, 224 с.
- Руднєв Є.С., Антощенко М.І., Філатьєва Е.М., Попович В.А. Небезпечні властивості шахтопластів та аварії в основних вугледобувних країнах світу. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2022а. № 70. С. 36—45. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/70.036>.
- Руднєв Є.С., Антощенко М.І., Філатьєва Е.М., Романченко Ю.А. Про вплив мінеральних домішок на виявлення небезпечних властивостей вугільних шахтопластів. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2021а. № 2(49). С. 85—95. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2021-2-85-95>.
- Руднєв Є.С., Антощенко М.І., Філатьєва Е.М., Філатьєв М.В. Вплив вмісту кисню на прояв небезпечних властивостей вугільних шахтопластів. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2022б. № 69. С. 71—82. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/69.071>.
- Руднєв Є.С., Антощенко М.І., Філатьєва Е.М., Філатьєв М.В. До питання встановлення типу шахтопластів за «відновленістю» («окисленістю») вкопного вугілля. *Технічна інженерія*. 2022в. № 1(89). С. 138—157. [https://doi.org/10.26642/ten-2022-1\(89\)-138-157](https://doi.org/10.26642/ten-2022-1(89)-138-157).
- Руднєв Є.С., Антощенко М.І., Філатьєва Е.М., Філатьєв М.В. Наукові основи розробки методу прогнозу небезпечних властивостей вугільних шахтопластів. *Вісті Донецьк. гірнич. ін-ту*. 2022г. № 1(50). С. 132—145. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-1-132-145>.
- Руднєв Є.С., Антощенко М.І., Філатьєва Е.М., Філатьєв М.В. Сукупності шахтопластів за вмістом водню в органічній (горючій) масі та мінеральних домішках вкопного вугілля. *Вісті Донецьк. гірнич. ін-ту*. 2022д. № 2(51). С. 93—107. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-2-93-107>.
- Руднєв Є.С., Гальченко А.М., Тарасов В.Ю., Антощенко М.І. Волога як показник вияву небезпечних властивостей вугільних шахтопластів. *Геофиз. журн.* 2022е. Т. 44. № 3. С. 66—79. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i3.261969>.
- Руднєв Є.С., Гальченко В.А., Філатьєва Е.М., Антощенко М.І. Сірка у вкопному вугіллі як фактор прояву небезпечних властивостей шахтопластів. *Вісник Криворізьк. нац. ун-ту. Зб. наук. праць*. 2021б. Вип. 53. С. 21—28. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2021-1-53-21-28>.
- Руководство по борьбе с пылью в угольных шахтах*. Москва: Недра, 1979, 319 с.
- Руководство по предупреждению и тушению эндогенных пожаров на угольных шахтах Украины: ҚД 12.01.402—2000*. Донецк: Изд. НИИГД, 2000, 216 с.
- Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт*. Киев: Основа, 1994, 311 с.
- Советский энциклопедический словарь*. Гл. ред. А.Н. Прохоров. 2-е изд. Москва: Советская энциклопедия, 1982, 1600 с.
- Справочник по качеству и обогатимости каменных углей и антрацитов Украинской ССР (Донбасс в границах УССР, Львовско-Вольнский бассейн). Характеристика качества каменных углей и антрацитов Украинской ССР*. Москва: Недра, 1965, 204 с.
- Справочник по качеству каменных углей и антрацитов Донецкого и Львовско-Вольнского бассейнов*. Москва: Недра, 1972, 168 с.
- Федорова Н.И., Заостровский А.Н., Исмагилов З.Р. Физико-химические свойства низкометаморфизованных длиннопламенных углей Кузбасса. *Вестник Кузбас. гос. техн. ун-та*. 2015. № 5(III). С. 126—129.
- Украинский советский энциклопедический словарь. В 3 т. Т. 2. «Каптаж — Протерогиния»*. Гл. ред. Ф.С. Бабичев. Киев: Глав. ред. Укр. сов. энциклопедии, 1989, 767 с.
- Успенский В.А. Опыт материального баланса процессов, происходящих при метаморфизме угольных пластов. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2006. Т. 1. С. 1—10.
- Эттингер И.Л., Шульман Н.В. *Распределение метана в порых ископаемых углей*. Москва: Науча, 1975, 112 с.

- James, G. Speight. *Handbook of Coal Analysis. Second Edition*. John Wiley & Sons, 2015. 368 p.
- Kishore Nadkarni, R.A. (2008). *Guide to ASTM Test Methods for the Analysis of Coal and Coke*. ASTM International, 40 p.
- Gillen, C. (1982). *Metamorphic Geology: An introduction to tectonic and metamorphic processes. 1st Edition*. Springer, 160 p.
- ISO 647:2017 *Brown coals and lignites. Determination of the yields of tar, water, gas and coke residue by low temperature distillation*. (2017). International Organization for Standardization, 9 p.
- ISO/TS 20362:2022 *Hard coal. Determination of plastometric indices*. (2022). International Organization for Standardization, 22 p.

Material balance of metamorphic transformations of coal seams and their dangerous properties

Ye. Rudniev, E. Filatieva, M. Antoshchenko, V. Popovich, 2024

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Kyiv, Ukraine

Purpose: to establish empirical relationships between the main components of the organic (combustible) mass, moisture content and mineral impurities during coalification of coal seams using experimental data on the consumer qualities of solid fuels. Reliably established relationships between these main components make it possible to scientifically substantiate and find the nature of dangerous properties of coal seams during mining operations due to the factor of metamorphic transformations and the generation of gaseous and liquid products.

The methodology was based on the results of a preliminary analysis of the change in the ratio between the main components of organic (combustible) mass, the content of moisture and mineral impurities during coal formation, starting from the processes of peat formation and subsequent coalification. Experimental data on the consumer qualities of solid fuels determined by generally accepted standard methods were used.

Results: at all stages of metamorphic transformations of coal seams, with an increase in carbon content, a unilateral reduction in the elemental oxygen content in the organic (combustible) mass was established. This indicates the formation of gaseous products at all stages of metamorphism with the participation of carbon and oxygen of the organic (combustible) mass. The reduction in the elemental content of hydrogen, nitrogen and organic sulfur in the later stages of metamorphism indicates the participation of these components in the generation of gaseous products.

The reliability of the empirical dependence of carbon content on the average reflectivity of vitrinite was tested.

The generation of moisture at the stage of metamorphic transformations of coals was not fully confirmed by the direction of trends in the average content of moisture, oxygen and hydrogen at successive stages of the processes of peat formation, diagenesis and metamorphism up to the transition from hard coals to anthracites.

A significant excess (up to two times) of the yield of volatile substances was established compared to the content of the sum of the main components of the organic (combustible) mass at fixed values of carbon content.

Scientific novelty: based on changes in the ratio of the elemental content of the main components of the organic (combustible) mass (solid residue), their participation in the formation of gaseous products at all metamorphic stages of transformation of coal seams has been established. The obtained results of the formation of the material balance make it possible to introduce appropriate clarifications into the scheme of coal formation processes in terms of the generation of specific gaseous products at each stage.

Practical value: the practical significance lies in the need and possibility of improving the regulatory framework for the safety of mining operations when forecasting the hazardous properties of coal seams.

Key words: material balance, coal seams, coal, elemental composition, components, gas formation, products, hazardous properties, forecast, regulatory framework, improvement.

References

- Avgushevich, I.V., Bronovets, T.M., Eremin, I.V., Medvedev, A.V., & Churbakov, V.F. (1987). *Analytical chemistry and technical analysis of coal*. Moscow: Nedra, 336 p. (in Russian).
- Ayruni, A.T. (1981). *Theory and practice of combating mine gases at great depths*. Moscow: Nedra, 335 p. (in Russian).
- Antsiferov, A.V., Golubev, A.A., Kanin, V.A., Tirkel, M.G., Zadara, G.Z., Uziyuk, V.Yu., Antsiferov, V.A., & Suyarko, V.G. (2009). *Gas content and methane resources of coal basins of Ukraine. T.1. Geology and gas content of Western, Southwestern and Southern Donbass*. Donetsk: Weber, 453 p. (in Russian).
- Bagrintseva, K.I., Vasiliev, V.G., & Ermakov, V.I. (1968). The role of coal-bearing strata in the processes of natural gas generation. *Geologiya nefti i gaza*, (6), 7—11 (in Russian).
- Butuzova, L.F., Shakir, Sh.M., Kulakova, V.O., & Kolbasa, V.A. (2016). The relationship between the technological properties of coals and the composition of extracts. *Bulletin of Donetsk National Technical University*, (1), 13—20 (in Russian).
- Gapeev, A.A. (1949). *Solid combustible fossils (caustobiolites)*. Moscow: State Publishing House of Geological Literature, 335 p. (in Russian).
- Paffengolts, K.N. (Ed.). (1973). *Geological Dictionary: in two volumes. Vol. 2. H-Я*. Moscow: Nedra, 456 c. (in Russian).
- Geological and coal chemical map of the Donetsk basin*. (1954). Moscow: Ugletekhizdat, 430 p. (in Russian).
- Kozlovskiy, E.A. (Ed.). (1984). *Mining Encyclopedia. Vol. 1. Aa-lava — Geosystem*. Moscow: Sovetskaya entsiklopedia, 560 p. (in Russian).
- Kozlovskiy, E.A. (Ed.). (1985). *Mining Encyclopedia. Vol. 2. Geospheres — Kenai*. Moscow: Sovetskaya entsiklopedia, 575 p. (in Russian).
- Kozlovskiy, E.A. (Ed.). (1991). *Mining Encyclopedia. Vol. 3. USSR — Jasper*. Moscow: Sovetskaya entsiklopedia, 541 p. (in Russian).
- GOST 7303-90 (Article CMEA 6768-89). (1990). *Anthracite. Method for determining the volumetric yield of volatile substances*. Moscow: Standards Publishing House, 7 p. (in Russian).
- DSTU 3472:2015. *Brown coal, hard coal and anthracite. Classification*. (2015). Kyiv: SE «UkrNDNC», 8 p. (in Ukrainian).
- DSTU 9220:2023. *Solid mineral fuel. Methods of determining the yield of volatile substances*. (2023). Kyiv: SE «UkrNDNC», 13 p. (in Ukrainian).
- Instructions for forecasting and preventing sudden methane breakthroughs from the soil of mine workings. NPAOP 10.0-5.28-87*. (1987). Ministry of Coal Industry of the Ukrainian SCP, MakNII, 29 p. (in Russian).
- Catalog of dynamic rock faults in coal mines*. (1983). Leningrad: Publ. of the Ministry of Coal Industry of the USSR, All-Russian Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying, 120 p. (in Russian).
- Lindenau, N.I., Mayevskaya, V.M., & Vakhruшев, E.S. (Eds.). (1981). *Catalog of USSR coals prone to spontaneous combustion*. Moscow: Nedra, 416 p. (in Russian).
- Kozlovskiy, B. (1975). *Forecasting methane hazard in coal mines*. Moscow: Nedra, 152 p. (in Russian).
- Rules for conducting mining operations in formations prone to gas-dynamic phenomena: SOU 10.1.00174088.011—2005*. (2005). Kyiv: Ministry of Coal Industry of Ukraine, 224 p. (in Ukrainian).
- Rudniev, Ye.S., Antoshchenko, M.I., Filatieva, E.M., & Popovych, V.A. (2022a). Dangerous properties of coal seams and accidents in the main coal-mining countries of the world.

- Collection of Research Papers of the National Mining University*, (70), 36—45. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/70.036> (in Ukrainian).
- Rudnev, E.S., Antoshchenko, M.I., Filatyeva, E.M., & Romanchenko, Yu.A. (2021a). On the influence of mineral impurities on the detection of dangerous properties of coal mine layers. *News of the Donetsk Mining Institute*, (2), 85—95. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2021-2-85-95> (in Ukrainian).
- Rudnev, E.S., Antoshchenko, M.I., Filatyeva, E.M., & Filatyev, M.V. (2022b). Influence of oxygen content on the manifestation of hazardous properties of coal seams. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, (69), 71—82. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/69.071> (in Ukrainian).
- Rudnev, E.S., Antoshchenko, M.I., Filatyeva, E.M., & Filatyev, M.V. (2022b). On the issue of establishing the type of coal seams by «reduction» («oxidation») of fossil coals. *Technical Engineering*, (1), 138—157. [https://doi.org/10.26642/ten-2022-1\(89\)-138-157](https://doi.org/10.26642/ten-2022-1(89)-138-157) (in Ukrainian).
- Rudnev, E.S., Antoshchenko, M.I., Filatyeva, E.M., & Filatyev, M.V. (2022r). Scientific basis for the development of a method for forecasting hazardous properties of coal mine layers. *News of the Donetsk Mining Institute*, (1), 132—145. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-1-132-145> (in Ukrainian).
- Rudnev, E.S., Antoshchenko, M.I., Filatyeva, E.M., & Filatyev, M.V. (2022a). Aggregates of mine plastics by hydrogen content in organic (combustible) mass and mineral impurities of fossil coal. *News of the Donetsk Mining Institute*, (2), 93—107. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-2-93-107> (in Ukrainian).
- Rudnev, Ye.S., Galchenko, A.M., Tarasov, V.Yu., & Antoshchenko, M.I. (2022e). Moisture as an indicator of the manifestation of hazardous properties of coal seams. *Geofizicheskii Zhurnal*, 44(3), 66—79. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i3.261969> (in Ukrainian).
- Rudnev, Ye.S., Galchenko, A.M., Filatyeva, E.M., & Antoshchenko, M.I. (2021b). Sulfur in fossil coal as a factor in the manifestation of dangerous properties of mine plastics. *Journal of Kryvyi Rih National University*, (53), 21—28. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2021-1-53-21-28> (in Ukrainian).
- Guide to dust control in coal mines*. (1979). Moscow: Nedra, 319 p. (in Russian).
- Guidelines for the prevention and extinguishing of endogenous fires in coal mines of Ukraine: KD 12.01.402—2000*. (2000). Donetsk: NIIGD, 216 p. (in Russian).
- Coal mine ventilation design guidelines. (1994). Kyiv: Osnova, 311 p. (in Russian).
- Prokhorov, A.N. (Ed.). (1982). *Soviet encyclopedic dictionary*. Moscow: Sovetskaya Entsiklopediya, 1600 p. (in Russian).
- Handbook on the quality and enrichment 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).
- Handbook on the quality of hard coals and anthracites from the Donetsk and Lvov-Volyn basins*. (1972). Moscow: Nedra, 168 p. (in Russian).
- Fedorova, N.I., Zaostrovskiy, A.N., & Ismagilov, Z.R. (2015). Physico-chemical properties of low-metamorphosed long-flame coals of Kuzbass. *Bulletin of Kuzbass State Technical University*, (5), 126—129 (in Russian).
- Babichev, F.S. (Ed.). (1989). *Ukrainian Soviet encyclopedic dictionary. In 3 vols. Vol. 2. «Captage—Proterogyny»*. Kiev: Main editorial office of the Ukrainian Soviet Encyclopedia, 767 p. (in Russian).
- Uspenskiy, V.A. (2006). Experience of the material balance of processes occurring during metamorphism of coal seams. *Oil and gas geology. Theory and practice*, 1, 1—10 (in Russian).
- Ettinger, I.L., & Shulman, N.V. (1975). *Distribution of methane in the pores of fossil coals*. Moscow: Nauka, 112 p. (in Russian).
- James, G. Speight. *Handbook of Coal Analysis. Second Edition*. John Wiley & Sons, 2015. 368 p.
- Kishore Nadkarni, R.A. (2008). *Guide to ASTM Test Methods for the Analysis of Coal and Coke*. ASTM International, 40 p.
- Gillen, C. (1982). *Metamorphic Geology: An introduction to tectonic and metamorphic processes. 1st Edition*. Springer, 160 p.
- ISO 647:2017 Brown coals and lignites. Determina-*

tion of the yields of tar, water, gas and coke residue by low temperature distillation. (2017). International Organization for Standardization, 9 p.

ISO/TS 20362:2022 Hard coal. Determination of plastometric indices. (2022). International Organization for Standardization, 22 p.