

Волога як показник вияву небезпечних властивостей вугільних шахтопластів

*Є.С. Руднєв, А.М. Гальченко, В.Ю. Тарасов,
М.І. Антощенко, 2022*

Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля, Сєвєродонецьк, Україна

Надійшла 31 січня 2022 р.

Мета — встановити зміну співвідношень між окремими видами вологи та показниками метаморфічних перетворень шахтопластів після перерахунку їх значень на робочий стан вугілля. Це дасть змогу прогнозувати вияв небезпечних властивостей шахтопластів під час ведення гірничих робіт.

Методика передбачає залучення вихідних експериментальних даних, які були нагромаджені у нормативно-довідкових документах.

Результати досліджень. При проведенні досліджень враховували досвід використання вологи як показника для розв'язання одразу трьох проблем: критерію оцінювання метаморфічних перетворень шахтопластів; встановлення якості палива; прогнозу вияву небезпечних властивостей шахтопластів під час гірничих робіт. Різні види вологи на різних стадіях метаморфічних перетворень шахтопластів не є рівноцінними за міцністю зв'язку між водою та вугіллям. В одних нормативних документах для характеристики вологості шахтопластів у деяких випадках використовуються показники різних видів вологи, що вносить додаткові похибки у достовірність прогнозу небезпечних властивостей. На ранніх та середніх стадіях метаморфічних перетворень шахтопластів волога переважно не утворюється, лише механічно видаляється вільна волога із системи. Кам'яне вугілля та антрацити мають різну молекулярно-структурну будову, що визначає різні співвідношення між вмістом вільної та зв'язаної вологи. Вміст загальної вологи є метаморфічним показником тільки для органічної (горючої) маси, і загалом він не є критерієм оцінювання перетворення шахтопластів. Обов'язкове попереднє зволоження вугілля в масиві в усіх випадках при веденні очисних робіт недостатньо обґрунтовано для різних стадій метаморфічних перетворень шахтопластів через різне співвідношення між формами вологи та незворотністю процесів метаморфізму.

Наукова новизна. Вперше кількісно оцінено вміст гідратної вологи у мінеральних домішках та вологи в органічній масі залежно від ступеня метаморфічних перетворень шахтопластів.

Практичне значення. Результати досліджень дають змогу розробити пропозиції щодо вдосконалення нормативної бази в частині прогнозу вияву небезпечних властивостей шахтопластів при веденні гірничих робіт залежно від наявності різних форм знаходження вологи у вугіллі.

Ключові слова: вугілля, волога загальна, гідратна, мінеральні домішки, метаморфізм, показник, стан беззолний, робочий, шахтопласти, гірничі роботи, безпека, зволоження, обґрунтування, нормативна база, вдосконалення.

Вступ. Вміст вологи у вкопному вугіллі є одним з найважливіших показників ступеня метаморфічних перетворень шахтопластів [Успенский, 2006] та якості палива [Августевич и др., 2019; ГОСТ 25543-2013,

2014]. Висока вологість негативно позначається на теплотехнічних і технологічних властивостях палива — знижує теплоту згоряння й термічну стійкість, ускладнює помел, розсівання та збагачення, збільшує трива-

лість коксування та інших процесів переробки вугілля, здорожчує (як баласт) вартість його транспортування. Волога багато в чому визначає вияв її небезпечних властивостей під час гірничих робіт [Акиншин, 1985; Antoshchenko et al., 2020]. Багато вчених штучне зволоження вугільних пластів сприймають як метод комплексної боротьби з газовиділенням, раптовими викидами вугілля й газу, вугільним пилом та іншими виявами небезпечних властивостей, що призводить у багатьох випадках до виникнення аварій у підземних умовах із важкими наслідками. До теперішнього часу зберігається невизначеність в оцінюванні впливу вологи на схильність вугілля до самозаймання, що пояснюється різними формами її знаходження в паливі [Кошовский, Орликова, 2015].

Види вологи у вугіллі. Вода у вугіллі перебуває у різному стані: у вигляді крапель, плівок, молекул, адсорбованих на поверхні, капілярної вологи, а також може входити до складу мінеральної частини вугілля. Ці види вологи нерівноцінні за міцністю зв'язку між водою і вугіллям і, відповідно, мають різні властивості. Механічно найменш міцно зв'язана з вугіллям вільна волога, що залишається на зовнішній поверхні шматків вугілля після змочування їх водою. Ця волога має властивості звичайної води.

Адсорбційна волога зв'язана із зовнішньою та внутрішньою поверхнями вугілля силами молекулярної взаємодії, і тому за своїми властивостями вона відрізняється від звичайної води: її властиві знижена пружність пари, підвищена густина, нездатність розчиняти електроліти та знижена температура замерзання (для молекулярного шару -70°C). Зі зростанням кількості шарів молекул міцність зв'язку з поверхнею вугілля слабшає і властивості адсорбційної вологи поступово наближаються до властивостей звичайної води. Неможливо провести чіткий поділ вологи в порах на адсорбційну та капілярну. Найміцніше утримується вугіллям хімічно зв'язана гідратна волога, яка не видаляється при визначенні вологості вугілля висушуванням і може бути виділена лише при розкладанні мінеральної частини

вугілля. З цієї причини в жодній з параметрів, що характеризують вологість вугілля, гідратна волога не входить. Відсутність чітких меж між окремими видами вологи ускладнює їх кількісне визначення [Авгушевич и др., 2019].

Для зручності визначення вологи у вугіллі, на підставі з прийнятими на практиці методами аналізу, вологу вугілля поділили на вологу зовнішню і вологу повітряно-сухого палива [Авгушевич и др., 2019].

Волога зовнішня — частина загальної вологи палива, що видаляється при його висушуванні до повітряно-сухого стану.

Волога повітряно-сухого палива — частина загальної вологи палива, що залишається у ньому після висушування до повітряно-сухого стану.

Загальна волога — загальний вміст зовнішньої вологи та вологи повітряно-сухого палива.

При висушуванні вугілля на повітрі видаляється волога із зовнішньої поверхні шматків і капілярна волога з відкритих тріщин і пор (зовнішня волога). У повітряно-сухому вугіллі залишається капілярна волога закритих пор, адсорбційна та гідратна волога. При висушуванні подрібненого вугілля при 105°C видаляється капілярна волога з пор, розкритих при подрібненні, і адсорбційна волога. Для правильного оцінювання результатів аналізу вугілля необхідно знати вологість проби, в якій безпосередньо визначають показники. З цією метою запроваджено поняття «волога аналітичної проби», тобто вміст вологи у пробі крупністю менш як 212 мкм (0,2 мм). Волога аналітичної проби є нестабільною величиною, її використовують лише для перерахунків результатів аналізу. Вміст вологи у подрібненому вугіллі залежить від природи палива та ступеня його подрібнення, а також від температури та відносної вологості атмосфери приміщення. Для отримання порівнюваних величин вологості було запропоновано уніфікувати умови доведення вугілля до рівноважного стану та запровадити поняття «гігроскопічна волога вугілля» та «максимальна вологоємність» [Авгушевич и др., 2019].

Гігроскопічна волога вугілля — це волога

аналітичної проби, що перебуває у рівно-важному стані з атмосферою, вологість якої становить $60 \% \pm 2 \%$ за нормальної температури ($20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$) [ГОСТ 8719-90, 1991]. Гігроскопічна волога — один із найстабільніших показників вологості, залежить від властивостей конкретного вугілля (пористості, властивостей поверхні, кількості та якості мінеральної маси та ін.); втім на цей показник не впливають параметри атмосфери приміщення, в якому його вимірюють. У довідниках з якості палив гігроскопічну вологу наведено як аналітичну вологу. Ця величина разом із максимальною вологоємністю є характеристикою палива, що визначає його положення у ряді вуглефікації [Авгушевич и др., 2019].

Максимальна вологоємність вугілля — це вміст загальної вологи у вугіллі у стані повного насичення його водою в установлених стандартом умовах [ГОСТ 8858-93, 1995]. Стан вугілля з вологістю, що дорівнює максимальній вологоємності, імітує стан свіждобутого вугілля, насиченого водою, з поверхні якого видалена вільна волога. Величина максимальної вологоємності дає уявлення про величину пластової вологи або загальну вологу свіждобутого вугілля. Максимальна вологоємність, що розрахована на беззольний стан палива, є класифікаційним показником розподілу бурого вугілля на типи [ГОСТ 25543-2013, 2014].

Перерахунок на робочий стан палива.

Методики або ДСТУ визначення стану вугілля у зоні ведення гірничих робіт з метою прогнозу небезпечних властивостей шахтопластів до теперішнього часу не розробляли. Тому для вказаних цілей у нормативних документах з безпечного ведення гірничих робіт використовують значення показників, раніше встановлених для оцінювання якості продукції на підставі аналізу аналітичних проб.

Стан аналітичних проб вугілля не відповідає його стану в зоні ведення гірничих робіт, оскільки попередньо підготовка проб включає процеси збагачення до значень зниження виходу золи менш як 10% , дроблення та сушіння. Внаслідок цього при прогнозі небезпечних властивостей шахтопластів

не враховується вплив віддалених під час сушіння зовнішньої вологи та мінеральних домішок у разі попереднього збагачення.

У цьому випадку для прогнозу впливу небезпечних властивостей максимальної вологоємності вугілля на робочий стан (W_{\max}^r) використовують [Авгушевич и др., 2019] вологоємність беззольного палива (W_{\max}^{af}):

$$W_{\max}^{af} = W_{\max}^r \frac{100}{100 - A^r}, \quad (1)$$

$$A^r = A^a \frac{100 - W_{\max}^r}{100 - W^a}, \quad (2)$$

де W^a — волога аналітичної проби, %; A^a — зольність аналітичної проби, %; A^r — зольність робочого палива, %.

Значення максимальної вологоємності для прогнозу небезпечних властивостей шахтопластів з огляду на рівняння (1), (2) можна розрахувати з виразу

$$W_{\max}^r = \frac{W_{\max}^{af} (100 - A^r)}{100}, \quad \% \quad (3)$$

Згідно з рівнянням (3), для зворотного перерахунку з максимальної вологоємності беззольного палива (W_{\max}^{af}) на максимальну вологоємність вугілля в робочій зоні (W_{\max}^r) є експериментальні дані щодо зольності A^r шахтопластів Донецького та Львівсько-Волинського басейнів [Справочник ..., 1972]. За цими даними можна аналізувати відмінну впливу максимальної вологоємності від впливу інших показників на стан вугілля в робочій зоні.

У довідково-нормативному документі [Справочник ..., 1965] замість максимальної вологоємності наведено експериментальні дані про гігроскопічну вологу шахтопластів Донбасу та Львівсько-Волинського басейну. Методики визначення цих показників принципово різняться між собою [Авгушевич и др., 2019; ГОСТ 8719-90, 1991; ГОСТ 8858-93, 1995]. Наявність даних щодо гігроскопічної вологи та максимальної вологоємності для одних шахтопластів дає змогу оцінити можливі похибки прогнозу небезпечних властивостей при заміні одного показника (виду вологи) на інший.

У нормативних документах щодо безпечного ведення гірничих робіт не розглядаються окремі види вологи. Наприклад, у каталозі з пилового фактора [Руководство ..., 1979] наведено дані стосовно вологості вугілля без урахування її виду та методики визначення. З огляду на наявність у деяких випадках одних і тих самих шахтопластів у каталозі [Руководство ..., 1979] та довідниках [Справочник ..., 1965, 1972] виходить, що в одному нормативному документі волога характеризується одночасно двома різними її видами. У такому випадку експериментальні значення впливу гігроскопічної вологи і максимальної вологосмності на беззольний стан палива можуть не збігатися, оскільки методи їх визначення засновані на різних принципах [Авгушевич и др., 2019; ГОСТ 87 19-90, 1991; ГОСТ 8858-93, 1995]. Тому при прогнозі небезпечних властивостей шахтопластів становить інтерес пошук можливої похибки, викликані використанням різних видів вологи в одному нормативному документі [Руководство ..., 1979].

Використання непрямих методів (емпіричної залежності) визначення гідратної вологи у твердому паливі [Авгушевич и др., 2019] та експериментальних даних щодо масової частки оксиду алюмінію (Al_2O_3) у золі [Справочник ..., 1972] дає змогу оцінити вміст гідратної вологи залежно від показників ступеня метаморфізму шахтопластів. Така інформація необхідна для вдосконалення нормативної бази стосовно безпечного ведення гірничих робіт.

Ідея полягає у використанні для прогнозу небезпечних властивостей шахтопластів експериментальних даних щодо різних видів вологи, які перераховані з беззольного стану палива на робочий. Робочий стан палива (r) близький до умов ведення гірничих робіт.

Мета — встановити зміну співвідношень між окремими видами вологи та показниками метаморфічних перетворень шахтопластів після перерахунку їх значень на робочий стан вугілля. Це дасть змогу прогнозувати вияв небезпечних властивостей шахтопластів під час ведення гірничих робіт.

Методика передбачає для досягнення поставленої мети залучення вихідних експериментальних даних [Справочник ..., 1965, 1972]. До аналізу також залучено відомості про пилоутворювальну здатність шахтопластів залежно від ступеня їх метаморфічних перетворень [Руководство ..., 1979].

Стан та якість вугілля після його підготовки для використання суттєво відрізняються від його стану та якості в зоні ведення гірничих робіт. Ці відмінності пов'язані з попереднім видаленням зовнішньої вологи та збагаченням вугілля до виходу золи менш як 10 % [Авгушевич и др., 2019]. Вихід золи значною мірою визначає вміст мінеральних домішок. Вихідний вміст мінеральних домішок, згідно з виходом золи для багатьох шахтопластів [Справочник ..., 1965, 1972], перевищує іноді 40 %. Попереднє видалення частини мінеральних домішок та зовнішньої вологи змінює фізико-хімічні властивості вугілля, що не відповідають його стану в зоні ведення гірничих робіт. Методики [Авгушевич и др., 2019; ГОСТ 27313-95, 2003] дають змогу з достатньою для практики точністю перерахувати значення показників якості на робочий стан (r) у зоні ведення гірничих робіт.

Більшість показників якості характеризують не вугілля загалом, а його органічну масу (елементний склад, вихід летких речовин, теплоту згоряння та ін.). Перерахунок цих результатів зі стану органічної маси на робочий стан палива утруднений через відсутність надійного методу визначення у вугіллі мінеральної маси [Авгушевич и др., 2019]. У довідково-нормативних документах [Справочник ..., 1965, 1972] замість елементного складу органічної маси наведено склад горючої частини палива. З цієї причини максимальну вологосмність на робочий стан палива для шахтопластів визначали за рівнянням (3). При перерахунку інших показників на робочий стан палива враховували його вихідний стан, що характеризує якість палива. Вводили необхідні поправки на вихід золи для пластових проб (A') та вміст загальної вологи. Попередньо, до уточнення можливих похибок, вважали, що вміст загальної

вологи дорівнює максимальній вологоємності на робочий стан палива.

Отримано емпіричні залежності показників від їх значень для робочого стану палива. За величиною коефіцієнтів детермінації (кореляції) та середньоквадратичним відхиленням від середніх кривих (прямих) проаналізовано ступінь впливу виходу золи та вологи на зміну кореляційних залежностей при перерахунку показників на робочий стан.

Результати досліджень. При проведенні досліджень враховували досвід використання вологи як показника одразу для вирішення трьох проблем: критерій оцінювання метаморфічних перетворень шахтопластів; встановлення якості палива; прогноз вияву небезпечних властивостей шахтопластів під час гірничих робіт. Ці проблеми кардинально різняться між собою кінцевими цілями та методами визначення стану вугілля та відповідного йому вмісту певного виду вологи. Найбільш вивченими є проблеми, пов'язані зі зміною вмісту вологи в разі посилення метаморфічних перетворень шахтопластів та встановлення якості продукції. Для цих цілей розроблені методики [Авгушевич и др., 2019] та відповідні ДСТУ [ГОСТ 25543-2013, 2014; ГОСТ 17070-2014, 2015] з метою визначення виду вологи та їх відповідності певному стану палива.

Залежно від вирішуваних проблем розглянуто різні види (форми) знаходження вологи у вкопному вугіллі. Для встановлення ступеня метаморфічних перетворень вихідної речовини та якості продукції використовували значення вологи аналітичної проби (W^a). Зважаючи на нестабільність показника W^a у довідниках за якістю палива наводять значення гігроскопічної вологості [Справочник ..., 1965] або максимальної вологоємності [Справочник ..., 1972], тому що ці параметри є характеристикою палива та визначають його положення у ряді вуглефікації [Авгушевич и др., 2019]. Підтвердженням цього є графіки залежності максимальної вологоємності від вмісту вуглецю у горючій частині (C_T) палива (рис. 1, а) і вологості вугілля (W) від виходу летких речовин (V^{daf}) на суху беззольну масу (рис. 1, б). Ці

графіки засвідчують неоднозначний кореляційний зв'язок як максимальної вологоємності, так і вологості вугілля із загальноприйнятими показниками ступеня метаморфізму вугілля відповідно до вмісту вуглецю в горючій частині та виходу летких речовин. В обох випадках після досягнення мінімальних значень підтверджено стійке збільшення вмісту вологи з посиленням впливу метаморфічних процесів (зростання значень C_T та зменшення V^{daf}). Водночас слід вказати на значні середньоквадратичні відхилення в обох випадках від усереднених кривих (рис. 1).

На збільшення відхилень індивідуальних значень від усереднених кривих певною мірою вплинула невизначеність виду вологи згідно з даними, наведеними у каталозі [Руководство ..., 1979]. У цьому джерелі для характеристики вологості шахтопластів одночасно запозичені дані щодо максимальної вологоємності [Справочник ..., 1972] та гігроскопічної вологи [Справочник ..., 1965]. Кількісні значення цих видів вологи не можуть бути однаковими, тому що методи їх визначення ґрунтуються на принципово різних фізико-хімічних процесах.

У довідково-нормативних документах [Справочник ..., 1965, 1972] на відміну від даних [Руководство ..., 1979] здебільшого не наведені відомості для більшості шахтопластів про вологість вугілля. У довіднику [Справочник ..., 1965] із розглянутих 734 шахтопластів дані щодо вологи вказані лише для 104 шахтопластів, а в документі [Справочник ..., 1972] із 1094 шахтопластів — лише для 473. Крім того, для шахтопластів, що містять антрацити та напівантрацити, відомості про наявність вологи взагалі не наведено. Зазначене вказує на те, що вміст зовнішньої вологи мало впливає на споживчі якості палива, а вміст вологи істотно впливає на вияв небезпечних властивостей шахтопластів [Акиншин, 1985; Antoshchenko, 2020; Кошовский, Орликова, 2015].

Для детальнішого вивчення зміни вмісту вологи в процесі метаморфічних перетворень до наявних даних [Справочник ..., 1972] додано відомості про вологість ще для 222 шахтопластів із каталогу [Руководство ..., 1979].

У Довіднику [Справочник ..., 1972] ці шахтопласти умовно віднесено до антрацитових та напівантрацитових. До даної категорії, з огляду на деяку умовність, увійшли також відомості про пласти з вугіллям інших марок. Згадані шахтопласти розглянуто в одній сукупності з антрацитовими та напівантрацитовими шахтопластами (рис. 1, а). У зв'язку з наведеними обставинами слід зазначити деяку некоректність спільного розгляду різних видів вологи при аналізі залежності вологи як від вмісту вуглецю (див. рис. 1, а), так і від виходу летких речовин (рис. 1, б).

На рис. 2 показано взаємозв'язок між значеннями вологи (W) [Руководство ..., 1979] та максимальної вологосмості (W_{\max}^{af}) [Справочник ..., 1972]. Середньоквадратичне відхилення від прямої (1) становить 1,30 %. Якщо застосувати для цього випадку правило «трьох сигм», то фактична різниця між W і W_{\max}^{af} може становити близько 4 %. Індивідуальна похибка визначення максимальної вологосмості або гігроскопічної вологи, згідно з відповідними ДСТУ [ГОСТ 8719-90, 1991; ГОСТ 8858-93, 1995], становить не більш як 1,5 %. Істотна різниця між W та W_{\max}^{af} викликана, вочевидь, різними методами їх визначення на основі фізико-хімічних процесів, що принципово різняться між собою.

Наявність різних видів вологи та методів її визначення не береться до уваги у чинних нормативних документах, що регламентують безпечне ведення гірничих робіт. Це впливає з різних визначень вологості, використаних у цих документах, які за своєю суттю не збігаються з офіційними прийнятими положеннями про загальну вологу та її можливі види [Августевич и др., 2019; ГОСТ 8719-90, 1991; ГОСТ 8858-93, 1995; ГОСТ 27313-95, 2003]. В одному з основних документів щодо безпечного ведення гірничих робіт [НПАОП 10.0-1.01-10, 2010] волога характеризується як природна. В інших документах її визначено як робочу вологу [Руководство ..., 2000], вміст вологи [СОУ-П 10.1.00174088.016:2009] чи вологість вугілля [Руководство ..., 1979]. Підвищений вміст вологи у нормативних документах у деяких випадках розглянуто як позитивний фактор, що перешкоджає вияв-

ленню більшості небезпечних властивостей шахтопластів. У зв'язку з цим для підвищення ефективної попередньої дегазації розроблених пластів передбачається застосовувати гідророзрив, гідророзчленування і гідроімпульсний вплив на пласти через свердловини [СОУ 10.1.0017-4088.011-2004]. Допускається гідророзпушування при перетині геологічних порушень гірничими виробками на пластах, схильних до раптових викидів вугілля та газу [СОУ-П 10.1.00174088.017:2009]. Для зменшення пилоутворення при веденні гірничих робіт слід застосовувати попереднє зволоження вугільного масиву [Руководство ..., 1979]. Водночас, згідно із загальними рекомендаціями [Руководство ..., 1979; НПАОП 10.0-1.01-10, 2010; СОУ 10.1.0017-4088.011-2004; СОУ-П 10.1.00174088.017:2009] щодо штучного підвищення вмісту вологості, попередньо не встановлено форми її знаходження у вугільному масиві для шахтопластів різного ступеня метаморфічних перетворень. Досі немає єдиної думки стосовно впливу вологи на схильність вугілля до самозаймання. Різні форми знаходження вологи у вугіллі по-різному впливають на його схильність до самозаймання. Вміст одних її видів підвищує схильність до самозаймання, а надлишок — знижує хімічну активність вугільної субстанції внаслідок заповнення її поверхні [Кошовский, Орликова, 2015].

Незважаючи на недостатню вивченість різних форм знаходження вологи у вугіллі та їх вплив на прояв небезпечних властивостей шахтопластів, нормативним документом [НПАОП 10.0-1.01-10, 2010] в обов'язковому порядку передбачається попереднє зволоження вугілля в масиві за його природної вологості менш як 12 %. Якщо в даному випадку під природною вологістю мається на увазі загальна волога, значення якої близькі до максимальної вологосмості, то відповідно до графіка (див. рис. 1, а) практично всі шахтопласти Донбасу та Львівсько-Волинського басейну попередньо потрібно штучно зволожувати під час очисних робіт. З усієї аналізованої сукупності шахтопластів (2099) лише шість містили вугілля з максимальною вологосмністю (W_{\max}^{af}) понад 12 %. Зазвичай пласти вугілля містять воду

у значно більшій кількості, ніж це властиве природі та віку вугілля [Авгушевич и др., 2019], що не враховується вимогами нормативного документа [НПАОП 10.0-1.01-10, 2010].

У процесі метаморфізму з вугілля виділяються насамперед метан і вода, що супроводжується зміною вмісту вуглецю, кисню та водню; одночасно знижується вміст азоту та сірки — утворюються оксиди та солі цих елементів [Айруни, 1981]. Виходячи з того, що при метаморфічних процесах утворюються метан і вода, розраховано ймовірні розміри їх виділення з підвищенням ступеня метаморфізму вугілля. При метаморфізмі речовини вугілля від довгопламенно до антрациту має утворитися $120 \div 130$ кг води на одну тонну антрациту [Айруни, 1981]. Така гіпотеза утворення вологи під час переходу у процесі метаморфічних перетворень від кам'яного вугілля до антрацитів не підтверджується графіками (див. рис. 1). На ранніх і середніх стадіях перетворення кам'яного вугілля волога в загальній частині не утворюється, а тільки механічно видаляється із системи. Це підтверджується зниженням вмісту вологи від 35 до 5 % і менше при скороченні виходу легких речовин від 53 до 20 % (див. рис. 1, б) та збільшення вмісту вуглецю від 75 до ~84 % (див. рис. 1, а). При переході від торфу до бурого вугілля головними помітними ознаками є лише вміст вологи та кисню. У торфі вміст вологи становить близько 75 %, у бурому вугіллі — 60 % і менше. Вміст кисню — відповідно $31 \div 40$ і $18 \div 26$ % [Миронов, 1982]. Це засвідчує, що при переході від бурого вугілля до кам'яного ступінь їх метаморфічних перетворень пов'язаний переважно з кількістю віддаленої вологи та кисню з бурого вугілля під впливом зовнішніх умов. У разі впливу на буре вугілля факторів, властивих метаморфічним перетворенням (тиск, температура і період часу), воно втрачає до 90 % вологи і починає набувати якостей, властивих кам'яному вугіллю (спікання, коксування, вихід смоли та ін.).

При переході від кам'яного вугілля до антрацитів набуті раніше властивості у процесі метаморфічних перетворень частково втрачалися, але з'являлися нові. Утворення

кам'яного вугілля відбувалося, орієнтовно, за температури 250—300, антрацитів — до 600 °С [Tarasov et al., 2020]. Зрештою, така різниця в температурному режимі вплинула на структурно-молекулярне перетворення вугілля, у тому числі і на утримання різних видів вологи в кам'яному вугіллі та антрацитах. Найміцніше утримується вугіллям хімічно зв'язана гідратна волога, яка не видаляється при визначенні вологості вугілля висушуванням за температури 105 °С і може бути виділена лише при розкладанні мінеральної частини вугілля. Дегідратація, тобто видалення гідратної вологи з амоносилікатів (глин), оксидів та гідроксидів заліза (гематитів), відбувається в лабораторних умовах за температури понад 500 °С [Авгушевич и др., 2019], що відповідає температурі утворення антрацитів у природних умовах [Tarasov et al., 2020]. Такий збіг температурних режимів засвідчує можливе додаткове виділення зв'язаної води при утворенні антрацитів ($C_T > 90$ %; $V^{daf} < 8$ %) та деякому збільшенню за рахунок цих процесів вмісту загальної вологи до 5—7 % (див. рис. 1).

Прямого методу визначення гідратної вологи у твердому паливі на даний час немає. Непрямі методи та деякі емпіричні формули розрахунку вологи мінеральної маси (W_{MM}) засновані на результатах аналізу складу золи [Авгушевич и др., 2019]:

$$W_{MM} = 0,353 (Al_2O_3)_A A^r / 100, \quad (4)$$

де $(Al_2O_3)_A$ — масова частка оксиду алюмінію у золі, %.

Для 102 шахтопластів масова частка оксиду алюмінію (Al_2O_3) та робоча зольність палива (A^r) наведені спільно у довіднику [Справочник ..., 1972]. Це дало можливість для зазначеної сукупності шахтопластів розрахувати за рівнянням (4) значення вологи у мінеральній масі.

Абсолютний вміст вологи в мінеральній масі (W_{MM}) у рідкісних випадках перевищував один відсоток (рис. 3). Кореляційно вона мало залежить від вмісту вуглецю на робочий стан палива. Можна констатувати лише деяку схильність до зниження її вмісту, оскільки коефіцієнт кореляції (r) незначний

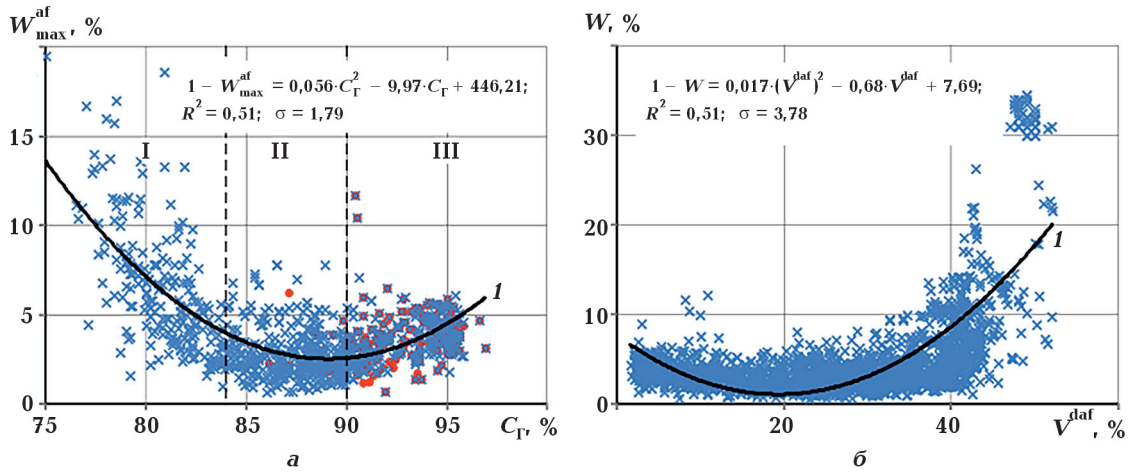


Рис. 1. Залежність максимальної вологоємності (W_{\max}^{af}) від вмісту вуглецю (C_T) у горючій масі (а) та вологості вугілля (W) від виходу летких речовин (V^{daf}) на суху беззолюну масу (б): 1 — усереднені криві; I, II, III — стадії метаморфічних перетворень органічної (горючої) маси вугілля, що характеризуються відповідно видаленням зовнішньої води, відносно стабільним вмістом загальної води та її зростанням через виділення гідратної води на стадії перетворення напівантрацитових та антрацитових шахтопластів; × — експериментальні дані, згідно з [Справочник..., 1972]; ● — спільні експериментальні дані щодо вологості вугілля шахтопластів, згідно з каталогом [Руководство ..., 1979] та вмістом вуглецю в горючій частині відповідно до даних [Справочник ..., 1972]; R^2 , σ — відповідно коефіцієнти детермінації та середньоквадратичні відхилення.

Fig. 1. Dependences of the maximum moisture capacity (W_{\max}^{af}) on the carbon content (C_T) in the combustible mass (a) and coal moisture content (W) on the volatile matter yield (V^{daf}) per dry ash-free mass (b): 1 — averaging curves; I, II, III — stages of metamorphic transformations of the organic (combustible) mass of coals, characterized, respectively, by the removal of external moisture, a relatively stable content of total moisture and its growth due to the release of hydrated moisture at the stage of transformation of semi-anthracite and anthracite coal seams; × — experimental data according to [Handbook ..., 1972]; ● — joint experimental data on the moisture content of mine coal according to the catalog [Guide ..., 1979] and the carbon content in the combustible part in accordance with the data [Handbook ..., 1972]; R^2 , σ — are the coefficients of determination and standard deviations, respectively.

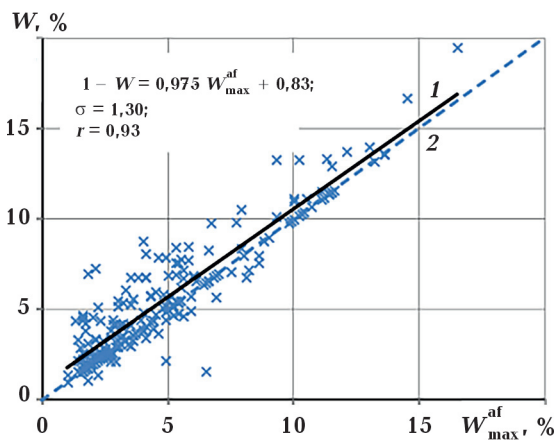


Рис. 2. Взаємозв'язок вологості вугілля (W) шахтопластів [Руководство ..., 1979] та його максимальної вологоємності W_{\max}^{af} [Справочник ..., 1972]: 1 — усереднена пряма; 2 — бісектриса координатної сітки; × — експериментальні дані; σ — середньоквадратичне відхилення; r — коефіцієнт кореляції.

за абсолютною величиною та має від'ємне значення ($-0,34$).

Слід зазначити аналогічну кореляційну залежність та максимальну вологоємність від вмісту вуглецю на робочий стан палива (рис. 4). Це виражається, з огляду на мале від'ємне значення коефіцієнта кореляції ($r = -0,38$), схильністю до зменшення показника максимальної вологоємності. Згідно з графіками (див. рис. 3, 4), показники вологості W_{MM} і W_{\max}^{af} кореляційно практично не залежать

←

Fig. 2. Relationship of coal moisture (W) of coal seams [Guide ..., 1979] with its maximum moisture capacity W_{\max}^{af} [Handbook ..., 1972]: 1 — averaging straight line; 2 — bisector of the coordinate grid; × — experimental data; σ — standard deviation; r — correlation coefficient.

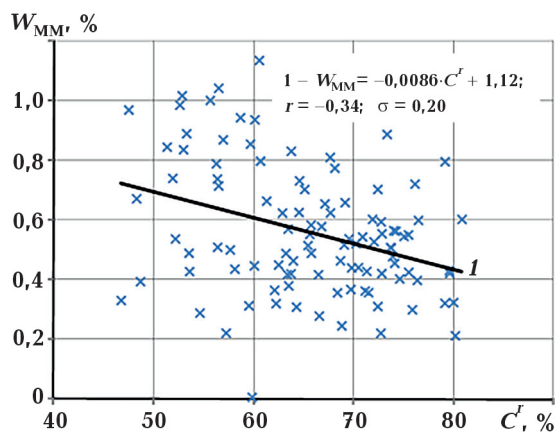


Рис. 3. Залежність гідратної води в мінеральній масі вугілля (W_{MM}) від вуглецю на його робочий стан (C^r) згідно з вихідними експериментальними даними [Справочник ..., 1972]: 1 — усереднена пряма; × — розраховані за рівнянням (4) значення гідратної води в мінеральній масі та розрахунковий вміст вуглецю (C^r) на робочий стан палива; σ — середньоквадратичне відхилення; r — коефіцієнт кореляції.

Fig. 3. Dependence of hydrated moisture in the mineral mass of coals (W_{MM}) on carbon on its working state (C^r) according to the initial experimental data [Handbook ..., 1972]: 1 — averaging straight line; × — values of hydrated moisture in the mineral mass calculated according to equation (4) and calculated carbon (C^r) content for the working condition of the fuel; σ — standard deviation; r — correlation coefficient.

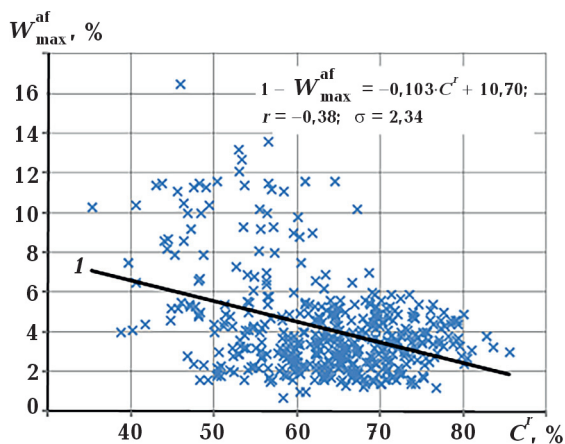


Рис. 4. Залежність максимальної вологоємності (W_{max}^{af}) від вуглецю на його робочий стан (C^r): 1 — усереднена пряма; × — експериментальні значення максимальної вологоємності на беззолний стан [Справочник ..., 1972] і розрахунковий вміст вуглецю на робочий стан палива; σ — середньоквадратичне відхилення; r — коефіцієнт кореляції.

Fig. 4. Dependence of the maximum moisture capacity (W_{max}^{af}) on the ash-free state [Handbook ..., 1972] on carbon on its working state (C^r): 1 — averaging straight line; × — experimental values of the maximum moisture capacity for the ash-free state [Handbook ..., 1972] and the calculated carbon content for the working state of the fuel; σ — standard deviation; r — correlation coefficient.

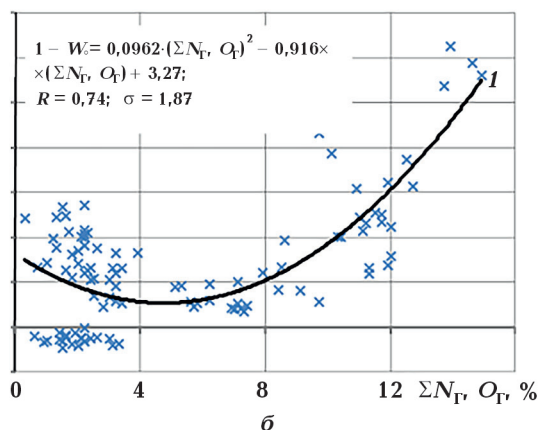
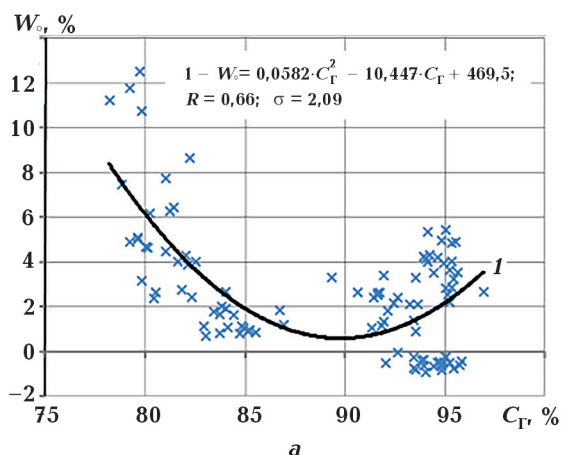


Рис. 5. Залежність вмісту води в органічній масі (W_0) від вмісту вуглецю (C_r) у горючій частині (а) та від суми ($\Sigma N_r, O_r$) азоту та кисню (б), згідно з вихідними даними [Справочник ..., 1972]: 1 — усереднені криві; × — розрахункові значення води в органічній масі та експериментальні дані відповідно вуглецю (а) і суми азоту та кисню (б); R та σ — відповідно емпіричні кореляційні відношення і середньоквадратичні відхилення від усереднених кривих.

від вмісту вуглецю на робочий стан палива.

Такий висновок неможливо зробити, розглядаючи залежність W_{\max}^{af} від вмісту вуглецю в горючій масі (див. рис. 1), яка досить чітко демонструє наявність кореляційного зв'язку між досліджуваними показниками. Кардинальна відмінність між залежностями W_{\max}^{af} відповідно від C_{Γ} (див. рис. 1) та C^r (див. рис. 4) викликана переходом розгляду вмісту вуглецю на робочий стан палива з урахуванням мінеральних домішок. Відсутність певної залежності між W_{\max}^{af} та C^r засвідчує випадковий характер наявності мінеральних домішок у кожному аналізованому шахтопласті. З огляду на те, що мінеральні домішки наявні на всіх стадіях метаморфічних перетворень шахтопластів, вияв їх небезпечних властивостей необхідно прогнозувати з використанням індивідуальних значень показників, пов'язаних з конкретним вмістом мінеральної маси в шахтопласті. Зокрема, це стосується і розгляду всіх видів вологи та форм її знаходження в органічній масі та мінеральних домішках.

Основна кількість загальної вологи (W_0) міститься в органічній масі. Вміст її суттєво пов'язаний зі ступенем метаморфічних перетворень. Це підтверджується графіками залежності вологи як від вмісту вуглецю (рис. 5, а), так і від суми азоту та кисню (рис. 5, б).

Вміст вологи в органічній масі вугілля неоднозначно залежить від ступеня метаморфічних перетворень шахтопластів, що пов'язано з різними її видами та формами знаходження на різних стадіях перетворення шахтопластів. Про причини зміни вмісту загальної вологи (максимальної вологоємності) та окремих форм її знаходження в міру посилення впливу метаморфічних процесів можна говорити на прикладі графіка (див. рис. 1). У процесі метаморфізму вугілля під впливом підвищених температур і тиску гірських порід відбувалось як видалення, так й утворення різних видів вологи. Види воло-

ги видаляються у порядку зростання енергії зв'язку у системі вугілля — вода. Найбільш легко видаляється вода, що механічно утримується, а найважче видалити хімічно зв'язану воду. До шахтопластів, з вугілля яких легко видаляється механічно утримувана волога, належать пласти, що перебувають на стадії I метаморфічних перетворень (див. рис. 1, а). До цієї стадії відносять шахтопласти кам'яного вугілля із вмістом вуглецю в горючій масі приблизно менш як 84 % і з тенденцією до зниження максимальної вологоємності при посиленні метаморфізму. Максимальну вологоємність W_{\max}^{af} визначено за аналітичними пробами, у тому числі на стадії їх підготовки вже було видалено вологу, яку могло утримувати вугілля. Значення W_{\max}^{af} , визначені відповідно до [ГОСТ 8858-93, 1995], свідомо занижені стосовно вологи вугілля, яке складає пласт за природного його залягання. У цьому випадку ставиться під сумнів обґрунтованість вимоги [НПАОП 10.0-1.01-10, 2010] щодо обов'язкового попереднього зволоження вугілля в масиві за його природної вологості менш як 12 %. Показник W_{\max}^{af} вже характеризує максимальну кількість вільної вологи, яка гранично може утримуватися у вугіллі аналізованої сукупності шахтопластів.

Вплинути на зміну стану хімічно зв'язаної вологи шляхом нагнітання води в масив апіорі неможливо, оскільки всі метаморфічні процеси є незворотними. Утворення та одночасного видалення інших видів вологи на стадії I не відбувається, оскільки вміст водню залишається практично на незмінному рівні при значеннях $C_{\Gamma} < 84\%$ [Антощенко, Шепелевич, 2006], що виключає його з'єднання з киснем.

На стадії II додаткове утворення і видалення гідратної вологи неможливі, тому що кам'яне вугілля утворювалося за температури менш як 350 °С [Tarasov et al., 2020], а дегідратація відбувається за температури

←

Fig. 5. Dependence of the moisture content in the organic mass (W_0) on the carbon content (C_{Γ}) in the combustible part (a) and on the sum ($\Sigma N_{\Gamma}, O_{\Gamma}$) of nitrogen and oxygen (b) according to the initial data [Handbook ..., 1972]: 1 — averaging curves; × — calculated values of moisture in the organic mass and experimental data, respectively, of carbon (a) and the sum of nitrogen and oxygen (b); R and σ — respectively, empirical correlations and standard deviations from the averaging curves.

понад 500 °С [Авгушевич и др., 2019]. Мінімальна вологоємність відповідає вмісту вуглецю в горючій частині в інтервалі 84—90 % (див. рис. 1, а). Мінімальний вміст води в органічній масі відповідає приблизно вмісту вуглецю 90 % (див. рис. 5, а).

На стадії III виділяється гідратна вода, що підтверджується умовами утворення напівантрацитів та антрацитів за температурі нижче 500 °С [Tarasov et al., 2020], яка відповідає температурі видалення гідратної води при озоленні вугілля в лабораторних умовах [Авгушевич и др., 2019]. Крім того, за вмісту вуглецю більш як 90 % спостерігається спільне зменшення вмісту водню та кисню [Антощенко, Шепелевич, 2006], що вказує на можливе утворення додаткової кількості води внаслідок видалення водню та кисню з органічної маси.

Висновки. Проведені дослідження дали змогу з нових наукових позицій розглянути можливу роль впливу різних видів води та форм її знаходження у вкопному вугіллі на вияв небезпечних властивостей шахтопластів. У чинних нормативних документах з безпечного ведення гірничих робіт використовуються показники води, що не відповідають за назвою та методами їх визначення чинним ДСТУ, що може призводити до недостовірного прогнозу небезпечних властивостей шахтопластів.

Для вдосконалення сучасної нормативної бази слід враховувати такі обставини.

– Існують невизначеності у питаннях впливу різних видів води на виникнення самозаймання вугілля.

– Різні види води на різних стадіях метаморфічних перетворень шахтопластів не

рівноцінні за міцністю зв'язку між водою та вугіллям.

– Методи для визначення стану вугілля за фактором вологості та вияву небезпечних властивостей шахтопластів до теперішнього часу не розробляли. Для цих цілей без належного обґрунтування використовують показники, розроблені для характеристики споживчих якостей палива.

– У деяких нормативних документах для характеристики вологості шахтопластів використовують показники, визначені за різними методиками на підставі різних фізико-хімічних процесів. Через такий підхід вносяться додаткові похибки у достовірність прогнозу небезпечних властивостей.

– На ранніх і середніх стадіях метаморфічних перетворень вугілля вода здебільшого не утворюється, а лише механічно видаляється вільна вода із системи.

– Кам'яне вугілля та антрацити мають різну молекулярно-структурну будову, що визначає різні співвідношення між вмістом вільної та зв'язаної води.

– Вміст мінеральних домішок та гідратної води в них має випадковий характер.

– Вміст загальної води є метаморфічним показником тільки для органічної (горючої) маси і не може бути критерієм оцінювання перетворення шахтопластів загалом.

– Обов'язкове попереднє зволоження вугілля в масиві у всіх випадках при веденні очисних робіт недостатньо обґрунтовано для різних стадій метаморфічних перетворень шахтопластів через різне співвідношення між формами води та незворотністю процесів метаморфізму.

Список літератури

- Авгушевич И.В., Сидорук Е.И., Броновец Т. М. Стандартные методы испытания углей. Классификации углей. Москва: Реклама мастер, 2019. 576 с.
- Айруни А.Т. Теория и практика борьбы с рудничными газами на больших глубинах. Москва: Недра, 1981. 335 с.
- Акиншин Б.Т. Метаморфизм и взаимосвязь микро- и макропористой структуры, влажности угля с газоносностью пластов. *Уголь Украины*. 1985. № 3. С. 37—39.
- Антощенко Н.И., Шепелевич В.Д. Метан в угольных пластах от образования до выделения: Монография. Алчевск: Изд. Дон. ГТУ, 2006. 267 с.

- ГОСТ 17070-2014. Межгосударственный стандарт. Угли. Термины и определения. Москва: Стандартинформ, 2015. 17 с.
- ГОСТ 25543-2013. Межгосударственный стандарт. Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам. Москва: Стандартинформ, 2014. 19 с.
- ГОСТ 27313-95 (ИСО 1170-77). Межгосударственный стандарт. Топливо твердое минеральное. Обозначения показателей качества и формулы пересчета результатов анализа для различных состояний топлива. Минск: Изд. Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации, 2003. 15 с.
- ГОСТ 8719-90. Угли бурые, каменные и антрациты. Метод определения гигроскопической влаги. Москва: Издательство стандартов, 1991. 5 с.
- ГОСТ 8858-93 (ИСО 1018-75). Угли бурые, каменные и антрацит. Методы определения максимальной влагоемкости. Москва: Издательство стандартов, 1995. 16 с.
- Кошовский Б.И., Орликова В.П. Влияние влаги на процесс низкотемпературного окисления угля. *Уголь Украины*. 2015. № 3-4. С. 39—43.
- Миронов К.В. Справочник геолога-угольщика. Москва: Недра, 1982. 311 с.
- Нормативно-правовий акт з охорони праці 10.0-1.01-10. Правила безпеки у вугільних шахтах. Київ: Видання Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду, 2010. 211 с.
- Руководство по борьбе с пылью в угольных шахтах. Москва: Недра, 1979. 319 с.
- Руководство по предупреждению и тушению эндогенных пожаров на угольных шахтах Украины: КД 12.01.402-2000. Донецк: Изд. НИИГД, 2000. 216 с.
- СОУ 10.1.0017-4088.011-2004. Стандарт Минтопэнерго Украины. Дегазация угольных шахт. Требования к способам и схемы дегазации. Киев: Изд. Минтопэнерго Украины, 2004. 161 с.
- СОУ-П 10.1.00174088.016:2009. Стандарт Минвуглепрому України. Правила визначення ефективності випереджального захисту пластів, схильних до газодинамічних явищ. Київ, 2009. 36 с.
- СОУ-П 10.1.00174088.017:2009. Правила перетинання гірничими виробками зон геологічних порушень на пластах, схильних до раптових викидів вугілля та газу. Київ: Вид. Минвуглепрому України, 2009. 38 с.
- Справочник по качеству и обогатимости каменных углей и антрацитов Украинской ССР (Донбасс в границах УССР, Львовско-Волынский бассейн). Характеристика качества каменных углей и антрацитов Украинской ССР. Москва: Недра, 1965. 204 с.
- Справочник по качеству каменных углей и антрацитов Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов. Москва: Недра, 1972. 168 с.
- Успенский В.А. Опыт материального баланса процессов, происходящих при метаморфизме угольных пластов. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2006. Т. 1. С. 1—10.
- Antoshchenko, M., Tarasov, V., Zaika, R., Zakharova, A., & Kukota, O. (2020). Moisture and organic mass components as indicators of metamorphism and dangerous properties of coal seams. *Modern engineering and innovative technologies*, (13), 60—75. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2020-13-03-014>.
- Tarasov, V., Filatieva, E., Antoshchenko, M., Galchenko, A., & Zakharova, O. (2020). On selecting the classification degree indicators of coal metamorphism for forecasting dangerous properties of coal seams. *Sciences of Europe*, 1(55), 49—61.

Moisture as an indicator of the manifestation of hazardous properties of coal seams

Ye.S. Rudniev, A.M. Galchenko, V.Yu. Tarasov, M.I. Antoshchenko, 2022

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Severodonetsk, Ukraine

Purpose: establish the change in the ratios between individual types of moisture and indicators of metamorphic transformations of coal seams after recalculating their values for the working state of the fuel. This will make it possible to predict the manifestation of hazardous properties mining.

Methodology: provides for the involvement of the initial experimental data that have been accumulated in normative and reference documents.

Results: When conducting research, the experience of using moisture as an indicator for solving three problems at once was taken into account: the criterion for evaluating the metamorphic transformations of coal seams; determination of fuel quality; forecast of the manifestation of hazardous properties of coal seams during mining operations. Different types of moisture at different stages of metamorphic transformations of coal seams are not equivalent in terms of the strength of the bond between water and coal. In some regulatory documents, in some cases, indicators of different types of moisture are used to characterize the moisture content of coal seams, which introduces additional errors in the reliability of the prediction of hazardous properties. In the early and middle stages of metamorphic transformations of coal seams, moisture is not formed for the most part, but only free moisture is mechanically removed from the system. Hard coals and anthracites have different molecular structure, which determines different ratios between the content of free and bound moisture. The content of total moisture is a metamorphic indicator only for organic (combustible) mass, and it is not a reliable criterion for assessing the transformation of coal seams in general. Mandatory pre-moistening of coal in the array in all cases during mining operations is not sufficiently substantiated for different stages of metamorphic transformations of coal seams due to the different ratio between the forms of moisture and the irreversibility of metamorphism processes.

Scientific novelty: for the first time, a quantitative assessment of the content of hydrated moisture in mineral impurities and moisture in the organic mass from the degree of metamorphic transformations of coal seams was made.

Practical value: the research results make it possible to develop proposals for improving the regulatory framework in terms of predicting the manifestation of hazardous properties of coal seams during mining operations, depending on the presence of different forms of moisture in coals.

Key words: coal, moisture, total, hydrate, mineral impurities, metamorphism, indicator, state, ashless, working, coal seams, mining, safety, moisture, justification, regulatory framework, improvement.

References

- Avgushevich, I.V., Sidoruk, E.I., & Bronovets, T.M. (2019). *Standard coal testing methods. Classification of coals*. Moscow: Reklama master, 576 p. (in Russian).
- Ayruni, A.T. (1981). *Theory and practice of combating mine gases at great depths*. Moscow: Nedra, 335 p. (in Russian).
- Akinshin, B.T. (1985). Metamorphism and inter- relation of micro- and macroporous structure, moisture content of coal with gas content of seams. *Ugol Ukrainy*, (3), 37—39 (in Russian).
- Antoshchenko, N.I., & Shepelevich, V.D. (2006). *Methane in coal seams from formation to release: Monograph*. Alchevsk: Edition of the Don State Technical University, 267 p. (in Russian).
- GOST 17070-2014. Interstate standard. Coals.

- Terms and Definitions. (2015). Moscow: Standartinform, 17 p. (in Russian).
- GOST 25543-2013. Interstate standard. Coals brown, stone and anthracites. Classification according to genetic and technological parameters. (2014). Moscow: Standartinform, 19 p. (in Russian).
- GOST 27313-95 (ISO 1170-77). Interstate standard. Solid mineral fuel Designations of quality indicators and formulas for recalculating analysis results for various fuel conditions. (2003). Minsk: Edition of the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 15 p. (in Russian).
- GOST 8719-90. Coals brown, stone and anthracites. Method for determining hygroscopic moisture. (1991). Moscow: Standards Publishing House, 5 p. (in Russian).
- GOST 8858-93 (ISO 1018-75). Coals brown, stone and anthracite. Methods for determining the maximum moisture capacity. (1995). Moscow: Standards Publishing House, 16 p. (in Russian).
- Koshovskiy, B.I., & Orlikova, V.P. 2015. Influence of moisture on the process of low-temperature coal oxidation. *Ugol Ukrainy*, (3-4), 39—43 (in Russian).
- Mironov, K.V. (1982). *Handbook of the geologist-coal miner*. Moscow: Nedra, 311 p. (in Russian).
- Normative-legal act on labor protection 10.0-1.01-10. Safety rules in coal mines. Kyiv: Publ. of the State Committee of Ukraine for Industrial Safety, Labor Protection and Mining Supervision, 2010. 211 p. (in Ukrainian).
- Guidelines for dust control in coal mines. (1979). Moscow: Nedra, 319 p. (in Russian).
- Guidelines for the prevention and suppression of endogenous fires in the coal mines of Ukraine; KD 12.01.402-2000. (2000). Donetsk: NIIGD Edition, 216 p. (in Russian).
- SOU 10.1.0017-4088.011-2004. (2004). Standard of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. Degassing of coal mines. Requirements for methods and schemes of degassing. Kyiv: Edition of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, 161 p. (in Russian).
- SOU-P 10.1.00174088.016:2009. (2009). Standard of the Ministry of Coal Industry of Ukraine. Rules for determining the effectiveness of advanced protection of formations prone to gas-dynamic phenomena. Kyiv, 36 p. (in Ukrainian).
- SOU-P 10.1.00174088.017:2009. (2009). Rules for crossing by mines of zones of geological disturbances on formations prone to sudden emissions of coal and gas. Kyiv: Publication of the Ministry of Coal Industry of Ukraine, 38 p. (in Ukrainian).
- Reference book on the quality and washability of hard coals and anthracites of the Ukrainian SSR (Donbass within the borders of the Ukrainian SSR, Lvov-Volyn basin). Characteristics of the quality of hard coals and anthracites of the Ukrainian SSR. (1965). Moscow: Nedra, 204 p. (in Russian).
- Reference book on the quality of hard coals and anthracites of the Donetsk and Lvov-Volyn basins. (1972). Moscow: Nedra, 168 p. (in Russian).
- Uspenskiy, V.A. (2006). Experience in the material balance of processes occurring during the metamorphism of coal seams. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya I Praktika*, 1, 1—10 (in Russian).
- Antoshchenko, M., Tarasov, V., Zaika, R., Zakharova, A., & Kukota, O. (2020). Moisture and organic mass components as indicators of metamorphism and dangerous properties of coal seams. *Modern engineering and innovative technologies*, (13), 60—75. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2020-13-03-014>.
- Tarasov, V., Filatieva, E., Antoshchenko, M., Galchenko, A., & Zakharova, O. (2020). On selecting the classification degree indicators of coal metamorphism for forecasting dangerous properties of coal seams. *Sciences of Europe*, 1 (55), 49—61.