

© Є.С. Руднєв¹, Е.М. Філатьєва¹, В.А. Попович¹, М.І. Антощенко¹

¹Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Київ, Україна

ПРО МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ДІЙСНОЇ ГУСТИНИ ВУГІЛЛЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВИКИДОНЕБЕЗПЕЧНОСТІ ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ

© Ye. Rudniev¹, E. Filatieva¹, V. Popovych¹, M. Antoshchenko¹

¹Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Kyiv, Ukraine

ON METHODS FOR DETERMINING THE TRUE DENSITY OF COALS TO PREDICT THE OUTBURST HAZARD OF COAL SEAMS

Мета. Встановити доцільність визначення дійсної густини вугілля з використанням емпіричних залежностей наведених у каталозі колекторських властивостей кам'яного вугілля та антрацитів Донецького та Львівсько-Волинського басейнів, які отримані на підставі статистичної обробки показників технічного аналізу та їх відповідність d_r точності результатам, визначеним стандартним методом.

Методика дослідження заснована на порівняльному аналізі відповідності розрахункових значень дійсної густини вугілля для кожного шахтопласту згідно з емпіричними рівняннями їх значенням, які встановлені стандартним методом.

Результати дослідження. Встановлене значне середньоквадратичне відхилення від усередненої кривої яке перевищує до десяти разів точність визначення дійсної густини вугілля стандартним методом, виключає практичну можливість використання розрахункових значень відповідно до емпіричних рівнянь для прогнозування схильності шахтопластів до раптових викидів вугілля й газу, а також управління газовиділенням у гірничі виробки.

Дійсна густина вугілля є суворо індивідуальною характеристикою конкретного шахтопласту. Достовірне її визначення можливе лише стандартним методом. Усереднені емпіричні залежності, у своїй основі, дають лише деяку спрямованість зміни дійсної густини вугілля при метаморфічних перетвореннях шахтопластів.

Наукова новизна. Вперше на підставі статистичної обробки експериментальних даних наведених про густину вугілля та показників технічного аналізу для 590 шахтопластів Донбасу та Львівсько-Волинського басейнів доведена неприпустимість використання розрахункових значень відповідно до емпіричних рівнянь для прогнозування схильності шахтопластів до раптових викидів вугілля й газу.

Практичне значення. Результати досліджень дозволяють розробити пропозиції щодо вдосконалення нормативної бази у частині прогнозу викидонебезпечності вугільних пластів.

Ключові слова: вугілля, дійсна густина, стандартний метод, викидонебезпечність, шахтопласти, метаморфізм, гірничі роботи, нормативна база, удосконалення.

Вступ. Густина є однією з найважливіших характеристик викопного вугілля. Значення дійсної густини використовують для технологічних розрахунків, обчислення запасів вугілля в надрах, встановлення кількості видобутого палива, а також для розрахунку пористості вугілля. Під дійсною густиною вугілля розуміють масу одиниці його об'єму за вирахуванням об'єму пор та тріщин. Середні показники дійсної густини (d_r) вугілля (без породи) коливаються для бурого вугілля в інтервалах $1,1 \div 1,4$ г/см³, для кам'яного вугілля – $1,2 \div 1,8$ г/см³, антрацитів

– 1,4÷ 1,8 г/см³. Дійсна густини, за інших рівних умов, залежить від вмісту та складу мінеральних компонентів. Зі збільшенням зольності густини вугілля зростає. Це пояснюється тим, що густини мінеральних компонентів значно вище дійсної густини органічної маси вугілля і коливається від 2,5 г/см³ (глини) до 5 г/см³ (пірит). Дійсна густини вугілля може бути виражена тільки на сухий стан палива (d_r^d). Її визначають з повітряно-сухої аналітичної проби та перераховують вимірну масу на сухий стан [1].

Достовірне визначення значень d_r^d також необхідне для встановлення схильності шахтопластів до раптових викидів вугілля й газу під час проведення гірничих робіт, а також для прогнозу та управління газовиділенням у виробці вугільних шахт. Для сприяння успішному вирішенню цих актуальних для вугільної промисловості проблем було розроблено каталог колекторських властивостей кам'яного вугілля та антрацитів Донецького та Львівсько-Волинського басейнів [2]. У цьому нормативно-довідковому документі для визначення значень d_r^d використано два методи, які принципово відрізняються між собою. Для більшості шахтопластів (їх кількість дорівнює 590) значення d_r^d встановлені за вдосконаленою МакНДІ методикою, в основу якої покладено ГОСТ 2160-82. В даний час дія цього стандарту за своєю суттю продубльована сучасним документом [3, 4]. Похибка визначення d_r^d для аналізованої сукупності із 590 шахтопластів максимально допускається в залежності від використовуваної пікнометричної рідини. Для водного розчину змочувача (0,5%) межа повторюваності (точність визначення) становить 0,02 г/см³, а етилового спирту – 0,01 г/см³.

Для другої сукупності зі 186 шахтопластів така точність визначення значень d_r^d не гарантується, оскільки вони були визначені згідно з емпіричними рівняннями в залежності від виходу летких речовин при термічному розкладанні вугілля без доступу повітря (V^{daf}), виходу золи пластових проб (A^r) та вологи (W_t^r). При $W_t^r < 3\%$ значення d_r^d були визначені для 135 шахтопластів згідно з емпіричними рівняннями:

$$d_r^d = \frac{V^{daf}}{0,778V^{daf} - 0,665} + 0,01(A^r - W_t^r), \text{ г/см}^3. \quad (1)$$

Для другої частини цієї сукупності з 51 шахтопласту значення d_r^d розраховувалися при $W_t^r > 3\%$ з використанням іншої емпіричної залежності:

$$d_r^d = \frac{V^{daf}}{0,778V^{daf} - 0,665} (1,002 - 0,007W_t^r) + 0,01A^r, \text{ г/см}^3. \quad (2)$$

Показники тісноти кореляційних зв'язків (коефіцієнти детермінації R^2 та середньоквадратичні відхилення індивідуальних значень від усередненої кривої σ) для емпіричних рівнянь (1, 2) у каталозі [2] не наведені. З цієї причини не встановлено достовірність визначення дійсної густини вугілля для 186 шахтопластів

розрахунковим методом з використанням емпіричних рівнянь.

Мета – встановити доцільність визначення дійсної густини вугілля з використанням емпіричних залежностей (1, 2), отриманих на підставі статистичної обробки показників технічного аналізу та їх відповідність d_r^d точності результатам, визначеним стандартним методом.

Методика заснована на порівняльному аналізі відповідності розрахункових значень дійсної густини вугілля ($d_r^{d(p)}$) для кожного шахтопласту згідно з емпіричними рівняннями (1, 2) їх значенням $d_r^{d(cr)}$, які встановлені стандартним методом. Експериментальні значення $d_r^{d(cr)}$ наведені для більшості шахтопластів у каталозі [2].

Основна частина. У каталозі [2] є сукупність із 590 шахтопластів, для яких визначені значення $d_r^{d(cr)}$ стандартним методом і для переважної їх більшості вказані параметри V^{daf} , W_t^r та A^r . Це дало можливість для вказаних шахтопластів розрахувати значення $d_r^{d(p)}$. Їхня відповідність величинам, які встановлені стандартним методом, характеризуються графіком (рис. 1).

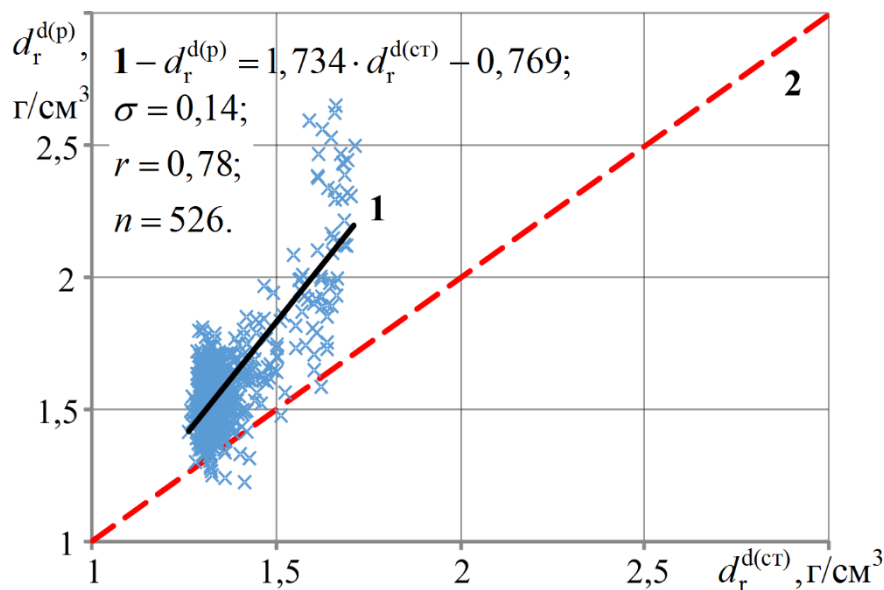


Рис. 1. Взаємозалежність між розрахунковими значеннями дійсної густини вугілля $d_r^{d(p)}$ та їх величинами $d_r^{d(cr)}$, які визначені для шахтопластів за методикою загальноприйнятих стандартів: \times – встановлене співвідношення для кожного шахтопласту між значеннями $d_r^{d(p)}$ та $d_r^{d(cr)}$; 1 – усереднена пряма; 2 – бісектриса координатної сітки; σ – середньоквадратичне відхилення; r – коефіцієнт кореляції; n – кількість оброблених пар даних.

У аналізованому випадку спостерігається досить висока кореляційна взаємозалежність ($r = 0,78$). Розташування більшості точок, що визначають співвідношення між $d_r^{d(p)}$ та $d_r^{d(cr)}$, вище бісектриси координатної сітки (2), свідчить про

наявність систематичної похибки визначення $d_r^{d(p)}$ відповідно до рівнянь 1 та 2. Середньоквадратичне відхилення $\sigma=0,14$ г/см³ від усередненої прямої (1) значно (на порядок) перевищує точність визначення (0,01÷0,02 г/см³) стандартним методом. Це вказує на нижчу точність визначення дійсної густини вугілля згідно з емпіричними залежностями (1, 2) порівняно з її встановленням стандартними методами.

Виходячи зі структури побудови емпіричних залежностей (1, 2), головним впливаючим фактором, який визначає дійсну густину, є ступінь метаморфічних перетворень вугілля. Як основний і єдиний критерій таких перетворень прийнятий вихід летких речовин (V^{daf}). Аналіз розрахункових значень $d_r^{d(p)}$ для 186 шахтопластів, які наведені у каталозі [2], показав на незначний вплив інших передбачуваних факторів. В емпіричних рівняннях (1, 2) до таких факторів відносяться вологість вугілля (W_t^r) та вихід золи пластових проб (A^r). Підтвердженням цьому є можливість замість двох застосовуваних рівнянь 1 та 2 використовувати, без особливої шкоди для точності розрахунків, одне загальне рівняння. Таким рівнянням для 186 шахтопластів є експонента:

$$d_r^{d(p)} = 1,28 \cdot e^{\left(\frac{0,95}{V^{daf}}\right)}, \text{ г/см}^3. \quad (3)$$

Відповідно до цього рівняння значення $d_r^{d(p)}$ практично функціонально співпадають з їх розрахунковими значеннями при спільному використанні двох рівнянь 1 та 2. При цьому коефіцієнт детермінації (R^2) дорівнює 0,99 а середньоквадратичне відхилення (σ) склало 0,026 г/см³, що вказує на високу близькість отриманих результатів.

Аналогічна висока збіжність встановлена між отриманими результатами визначення $d_r^{d(p)}$ за рівнянням 1 для 135 шахтопластів (з використанням даних технічного аналізу вугілля V^{daf} , A^r та $W_t^r < 3\%$) та їх значеннями, які визначені тільки за одним параметром (V^{daf}) згідно з емпіричною експонентою:

$$d_r^{d(p)} = 1,28 \cdot e^{\left(\frac{0,95}{V^{daf}}\right)}, \text{ г/см}^3. \quad (4)$$

Показники тісноти кореляційного зв'язку R^2 та σ між розрахунковими значеннями дійсної густини відповідно дорівнювали 0,99 та 0,0020 г/см³.

Виходячи з умови тісного кореляційного зв'язку між отриманими розрахунковими значеннями $d_r^{d(p)}$ для сукупності з 51 шахтопластів (при $W_t^r > 3\%$), рівняння 2 також можна замінити функцією експоненційного типу:

$$d_r^{d(p)} = 1,28 \cdot e^{\left(\frac{0,96}{V^{daf}}\right)}, \text{ г/см}^3. \quad (5)$$

Залежність 5 практично функціонально близька до емпіричного рівняння 2 ($R^2=0,99$, $\sigma=0,0030$ г/см³). Близькість отриманих розрахункових значень $d_r^{d(p)}$, відповідно згідно до емпіричних рівнянь (1, 2) та (3, 4, 5), дає підставу

аналізувати зміну дійсної густини вугілля тільки від одного впливаючого фактору. Таким основним показником перетворення вихідної органічної речовини є процеси вуглефікації шахтопластів. Вони характеризуються фазою вуглеутворення, в якій похований у надрах Землі торф послідовно перетворюється (за відповідних умов) спочатку на буре, потім на кам'яне вугілля та антрацит [5, 6]. Шахтопласти, які досягли кам'яновугільної та антрацитової стадій, піддавалися метаморфічним перетворенням. При складанні каталогу [2] критерієм метаморфічних перетворень шахтопластів прийнято показник виходу летких речовин (V^{daf}).

Зміна експериментально визначених значень дійсної густини вугілля стандартним методом $d_r^{d(cr)}$ для 590 шахтопластів ілюструється графіком їхньої залежності від V^{daf} (рис. 2). Для цього випадку значення $d_r^{d(cr)}$ встановлені з точністю, в залежності від пікнометричної рідини від 0,01 до 0,02 г/см³.

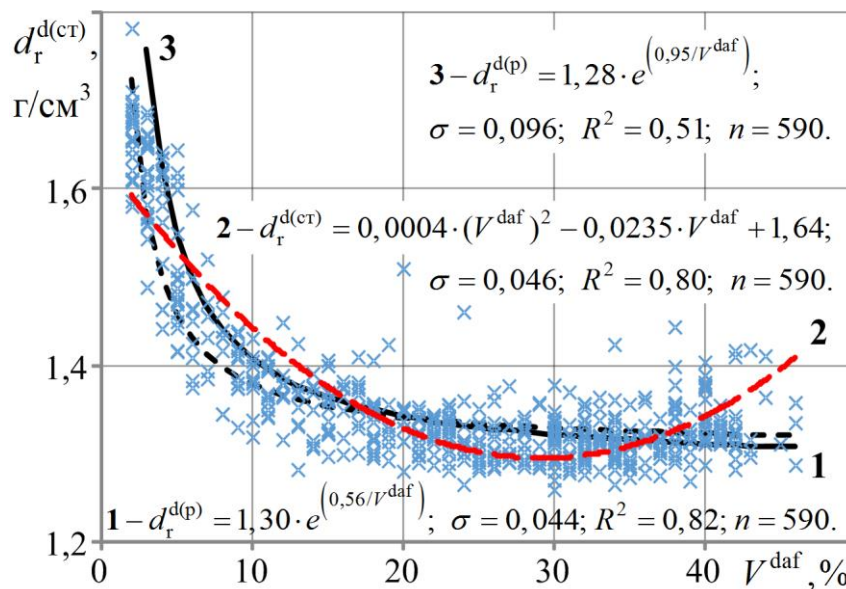


Рис. 2. Залежність дійсної густини вугілля $d_r^{d(cr)}$, визначеної за методикою загальноприйнятих стандартів, від виходу летких речовин (V^{daf}):

× – експериментальні дані визначення дійсної густини вугілля стандартним методом для сукупності з 590 шахтопластів; 1, 2 – емпіричні криві, які встановлені методом найменших квадратів для 590 шахтопластів, відповідно для експоненти (1) та полінома ступеня другого порядку (2); 3 – крива експоненти, яка визначена методом найменших квадратів для 186 шахтопластів згідно з рівнянням 3; σ – середньоквадратичні відхилення експериментальних даних для 590 шахтопластів від усереднених кривих 1, 2, 3; R^2 – коефіцієнти детермінації; n – кількість оброблених пар даних.

В залежності від V^{daf} , експоненційне рівняння (крива 1) та поліном ступеня другого порядку (крива 2) приблизно з однаковою тісністю кореляційного зв'язку характеризують дійсну густину вугілля, яка визначена стандартним методом (відповідно до ДСТУ). Показники тісноти кореляційного зв'язку (R^2 ; σ) для

аналізованої сукупності з 590 шахтопластів відповідно дорівнювали 0,82; 0,044 г/см³ та 0,80; 0,046 г/см³. Середньоквадратичні відхилення експериментальних значень $d_r^{d(ст)}$ від емпіричних кривих (1, 2) більш ніж у 2-4 рази перевищують точність їх визначення стандартним методом. Це вказує на те, що при статистичній обробці та усередненні експериментальних даних вносяться додаткові істотні похибки до визначення дійсної густини вугілля, яка встановлена стандартним методом.

Усереднена експоненційна крива 3 відображає, за своєю суттю, результати, отримані при використанні емпіричних рівнянь 1, 2. Вона, як й рівняння 1, 2, характеризується нижчим коефіцієнтом детермінації ($R^2=0,51$). Значне середньоквадратичне відхилення від усередненої кривої 1 ($\sigma=0,096$ г/см³), що перевищує до десяти разів точність визначення $d_r^{d(ст)}$ стандартним методом, виключає практичну можливість використання розрахункових значень $d_r^{d(p)}$ відповідно до рівнянь 1, 2 для прогнозування схильності шахтопластів до раптових викидів вугілля й газу, а також управління газовиділенням у гірничі виробки.

Висновки. На підставі проведених отриманих результатів слідує висновок, що дійсна густина вугілля є суворо індивідуальною характеристикою конкретного шахтопласту. Достовірне її визначення можливе лише стандартним методом. Усереднені емпіричні залежності, у своїй основі, дають лише деяку спрямованість зміни дійсної густини вугілля при метаморфічних перетвореннях шахтопластів.

Перелік посилань

1. James G. Speight. (2005). *Handbook of coal analysis*. A John Wiley & Sons, Inc.
2. *Katalog kolektorskih svojstv kamennyh uglej i antracitov Doneckogo i L'vovsko-Volynskogo bassejnov*. (1985). Makeevka-Donbass.
3. *ДСТУ ГОСТ 2160:2019 Паливо тверде мінеральне. Визначення дійсної та уявної густини (ГОСТ 2160-2015, IDT)*. (2019). ДП «УкрНДНЦ».
4. *ISO 5072:2021 Brown coals and lignites. Determination of true relative density and apparent relative density*. (2021). International Organization for Standardization.
5. Peter Darling (2011). *SME Mining Engineering Handbook, 3rd Edition*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (U.S.).
6. Antoshchenko, M.I., Tarasov, V.Y., Rudniev, Ye.S. & Zakharova, O.I. (2021) On the Issue of Establishing the Stages of Coal Metamorphism for Predicting the Hazardous Properties of Coal Seams. *Nature Environment and Pollution Technology*, 20(4), 1495–1503.
<http://dx.doi.org/10.46488/NEPT.2021.v20i04.011>

ABSTRACT

Purpose. To establish the expediency of determining the true density of coal using the empirical dependences given in the catalog of the collector properties of hard coal and anthracite of the Donetsk and Lviv-Volyn basins, which are obtained on the basis of statistical processing of technical analysis indicators and their compliance d_r with the accuracy of the results determined by the standard method.

Methodology is based on a comparative analysis of the correspondence of the calculated values of the true density of coal for each coal seam according to empirical equations to their values, which are established by the standard method.

Findings. The established significant root mean square deviation from the averaged curve, which exceeds up to ten times the accuracy of determining the true density of coal by the standard method, excludes the practical possibility of using calculated values according to empirical equations for predicting the susceptibility of coal seams to sudden outbursts of coal and gas, as well as the management of gas release into mining operations.

The true density of coal is a strictly individual characteristic of a particular coal seams. Its reliable determination is possible only by a standard method. The averaged empirical dependences, in their basis, give only some orientation of changes in the true density of coal during metamorphic transformations of coal seams.

Originality. For the first time, on the basis of statistical processing of experimental data on coal density and indicators of technical analysis for 590 coal seams of Donbas and Lviv-Volyn basins, the inadmissibility of using calculated values according to empirical equations for predicting the susceptibility of coal seams to sudden outbursts of coal and gas was proven.

Practical implications. The research results make it possible to develop proposals for improving the regulatory framework in terms of forecasting the outbursts hazard of coal seams.

Keywords: *coal, true density, standard method, outbursts hazard, coal seams, metamorphism, mining operations, regulatory framework, improvement.*