

© М.І. Антощенко<sup>1</sup>, Є.С. Руднєв<sup>1</sup>, Е.М. Філатьєва<sup>1</sup>, М.В. Філатьєв<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Северодонецьк, Україна.

## ПРО ВІДПОВІДНІСТЬ ПРАВИЛА ХІЛЬТА МЕТАМОРФІЧНИМ ПЕРЕТВОРЕННЯМ ВУГІЛЬНИХ ШАХТОПЛАСТІВ

© M. Antoshchenko<sup>1</sup>, Ye. Rudniev<sup>1</sup>, E. Filatieva<sup>1</sup>, M. Filatiev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Severodonetsk, Ukraine

## ON THE CORRESPONDENCE OF HILT'S RULE TO METAMORPHIC TRANSFORMATIONS OF COAL SEAMS

**Мета.** Доказати відповідність правила Хільта для всіх шахтопластів, якщо замість виходу летких речовин для визначення ступеня метаморфізму використати показники, що безпосередньо характеризують зміни у складі органічної маси.

**Методика дослідження** передбачає розгляд експериментальних даних, на підставі яких встановлено відступ від правила Хільта для пластів десяти шахт з використанням показника виходу летких речовин ( $V^{daf}$ ). Зіставляючи геометричне розташування шахтопластів та їх метаморфічні характеристики, відповідно за показниками  $V^{daf}$  та  $C^o$ , можна аналізувати відповідність кожного шахтопласту правилу Хільта.

**Результати дослідження.** За допомогою показника виходу летких речовин немає можливості розкрити картину метаморфічних перетворень шахтопластів. Один показник метаморфічних перетворень шахтопластів не може одноосібно та всебічно характеризувати одночасно зміни як у складі, так і властивостях вугілля. Елементний вміст вуглецю в органічній масі відноситься до більш інформативних показників при встановленні небезпечних властивостей шахтопластів у порівнянні з виходом летких речовин. Відповідність правилу Хільта, що встановлюється по виходу летких речовин та вмісту вуглецю, носить згідно з обома показниками випадковий характер. Абсолютна максимальна невідповідність правилу Хільта щодо виходу летких речовин становить 7,84%, а відносна – 23,08%. Максимальне абсолютне і відносне відхилення від правила Хільта за вмістом вуглецю не перевищують 4%, що в більшій частині зумовлено відбором проб у різних частинах шахтних полів. Волога разом із виходом летких речовин та вмістом вуглецю є показником метаморфічних перетворень шахтопластів, у тому числі визначальним їх небезпечних властивостей. Вміст мінеральних домішок окремих шахтопластів носить випадковий характер. При розробці нормативних документів щодо безпечного ведення гірничих робіт додатково до показників метаморфічних перетворень, що характеризують склад та властивості вугілля, необхідно розглядати гірничо-геологічні та гірничотехнічні умови відпрацювання шахтопластів.

**Наукова новизна.** Вперше встановлено, що невідповідність метаморфічних перетворень вугільних шахтопластів правилу Хільта усуваються, якщо замість показника виходу летких речовин використовувати вміст вуглецю в органічній масі. В цьому випадку абсолютні та відносні відхилення від правила Хільта не перевищують 4%, що відповідає точності визначення вмісту вуглецю у різних частинах шахтного поля.

**Практичне значення.** Результати досліджень дозволяють розробити пропозиції щодо вдосконалення нормативної бази у частині прогнозу прояву небезпечних властивостей шахтопластів при веденні гірничих робіт.

**Ключові слова:** вугілля, метаморфізм, шахтопласти, правило Хільта, відповідність, мінеральні домішки, гірничі роботи, безпека, нормативна база, удосконалення.

**Вступ.** Метаморфічні перетворення вугільних шахтопластів є однією з основних причин прояву їх небезпечних властивостей під час гірничих робіт. До таких властивостей відносяться виділення вибухонебезпечних газів, раптові їх викиди разом із вугіллям або породою, схильність до виникнення ендегенних пожеж та деякі інші негативні наслідки впливу гірничих робіт, що призводять до виникнення аварій із важкими наслідками у підземних умовах.

За офіційним визначенням [1] під метаморфізмом мається на увазі перетворення бурого вугілля послідовно на кам'яне вугілля та антрацит внаслідок зміни хімічного складу, структури та фізичних властивостей вугілля у надрах Землі переважно під впливом підвищеного тиску та температури.

У загальному випадку такі перетворення відносяться не тільки до вугільних шахтопластів, але й до всіх метаморфічних порід. Вони полягають у зміні мінерального складу або розміру та структури агрегатів зерен, без істотної зміни хімічного складу (за винятком вмісту  $H_2O$  та  $CO_2$ ) під впливом флюїдів, температури та тиску [2].

Згідно з правилом Хільта стверджується, що зі збільшенням стратиграфічної глибини залягання пласта вихід летких речовин з вугілля ( $V^{daf}$ ) при його температурній деструкції без доступу повітря знижується. Цей показник беззастережно прийнятий як критерій, що виражає закономірність зміни метаморфізму на площі вугільного басейну та у вугленосній товщі [3]. Вважалося, і було встановлено, що показник виходу летких речовин визначає практично всі найважливіші споживчі якості вугілля. На його основі розроблено багато промислових класифікацій, у тому числі й найбільш досконала сучасна [4]. Вивчення якісних показників вугілля залежно від виходу летких речовин, на думку авторів [3], розкрило картину зміни метаморфічних перетворень шахтопластів. Таке твердження викликає сумнів, оскільки вихід летких речовин при термічному розкладанні вугілля без доступу повітря не відповідає визначенню метаморфізму, який зв'язаний зі зміною складу та властивостей вугілля [1, 2]. Згідно з експериментальними даними [3] термічне розкладання вугілля призводить до виділення водню, метану, вуглекислого газу та окису вуглецю. Ступінь метаморфічних перетворень у разі характеризується їх сумою - виходом летких речовин, без ідентифікації газів, що виділилися. При такому підході практично неможливо, як це потрібно за визначенням метаморфізму [1, 2], встановити компонентний склад вугілля. Крім цього слід зазначити, що метаморфізм вугілля та термічне розкладання є різними стадіями їх перетворення. Кількісний і якісний склад летких речовин, що утворюються при термічному розкладанні не має безпосереднього відношення до метаморфічних процесів, що відбувалися раніше в природних умовах. Він є результатом нового (чергового штучного) етапу перетворення вихідної органічної речовини, яке підняте на поверхню [5].

Особливості утворення летких речовин при термічному розкладанні вугілля та в процесі метаморфічних перетворень свідчать про неповну відповідність застосовуваного показника  $V^{daf}$  для встановлення ступеня метаморфізму шахтопластів.

Відповідність метаморфічних перетворень шахтопластів правилу Хільта має важливе значення для вдосконалення нормативної бази по забезпеченню безпечних умов ведення гірничих робіт. Відступи від правила Хільта з використанням показника виходу летких речовин ( $V^{\text{daf}}$ ) встановлені для багатьох шахтопластів [3]. Враховуючи зазначені недоліки  $V^{\text{daf}}$ , як показника ступеня метаморфічних перетворень шахтопластів, представляє науковий та практичний інтерес перевірка правила Хільта з використанням показників, що відповідають загальноприйнятому визначенню поняття метаморфізму [1, 2]. Ця задача є актуальною, оскільки її вирішення сприяє удосконаленню нормативної бази щодо безпечного ведення гірничих робіт.

Проведені раніше дослідження [6] дозволили оцінити обґрунтованість застосування окремих показників ступеня метаморфічного перетворення вугілля для прогнозу прояву небезпечних властивостей шахтопластів. Елементний вміст вуглецю в органічній масі ( $C^o$ ) є більш інформативним показником для встановлення небезпечних властивостей шахтопластів порівняно з виходом летких речовин ( $V^{\text{daf}}$ ). Його перевага полягає у можливості надійного визначення у всьому ряді метаморфічних перетворень вугілля та стовідсотковим контролем вмісту суми інших основних компонентів в органічній масі.

**Ідея.** Показник виходу летких речовин при термічному розкладанні вугілля без доступу повітря не відображає безпосередньо зміни у складі та властивостях шахтопластів і не може з цієї причини достовірно характеризувати їх метаморфічні перетворення. За загальноприйнятим визначенням більш підходящим для встановлення ступеня метаморфізму шахтопластів та їх небезпечних властивостей є вміст вуглецю в органічній масі.

**Мета** – довести відповідність правила Хільта для всіх шахтопластів, якщо замість виходу летких речовин для визначення ступеня метаморфізму використати показники, що безпосередньо характеризують зміни у складі органічної маси.

**Методика** передбачає розгляд експериментальних даних [3], на підставі яких встановлено відступ від правила Хільта для шахтопластів десяти шахт з використанням показника виходу летючих речовин. Для цих шахтопластів у джерелі [3] наведено експериментальні дані про вміст вуглецю на умовну органічну масу  $C^o$  (табл. 1). Індокси пластів дають інформацію про стратиграфічне їх розташування відносно один одного в кожному шахтному полі. Зіставляючи геометричне розташування шахтопластів та їх метаморфічні характеристики відповідно за показником  $V^{\text{daf}}$  та  $C^o$ , можна аналізувати відповідність кожного шахтопласту правилу Хільта.

Метаморфічне перетворення нижчерозташованого шахтопласту відповідає правилу Хільта, якщо значення  $V^{\text{daf}}$  менше порівняно зі значенням цього показника для вищезалігаючого пласта. Це слідує із спрямованості скорочення виходу летких речовин по мірі посилення впливу метаморфічних процесів. Для вищерозташованих шахтопластів визначили також абсолютне ( $\Delta V_a$ ) і відносне ( $\Delta V_o$ ) відхилення виходу летких речовин по відношенню до нижче розташованих пластів, для яких не виконується правило Хільта. Це дозволило кількісно встановити ступінь невідповідності розглянутому правилу.

Таблиця 1  
 Результати розрахунку відповідності метаморфічних перетворень шахтопластів  
 правилу Хільта із залученням для оцінки відповідно виходу летких речовин  
 ( $V^{daf}$ ) та вмісту вуглецю ( $C^o$ ) в органічній масі згідно з даними [3]

Шахта	Індекс пласта	Вихід летких речовин	Пласт для якого не дотримується правила Хільта	Відхилення $V^{daf}$ порівняно зі зближеними пластами		Вміст вуглецю на умовну органічну масу, %	Пласт для якого не дотримується правила Хільта	Відхилення $C^o$ порівняно зі зближеними пластами	
				Абсолютне, %	Відносне, %			Абсолютне, %	Відносне, %
				$V^{daf}$	$\Delta V_a$			$\Delta V_o$	$C^o$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ 1-2 ім. Мельникова	$l_6$	33,62	–	7,84	17,63	81,48	–	–	–
	$l_2$	44,46	$l_2$	–	–	84,98	–	–	–
№2 "Трудівська"	$l_4$	42,02	–	3,02	6,71	81,91	–	2,31	2,90
	$l_3$	40,59	–	4,43	9,84	79,60	$l_3$	–	–
	$l_1$	40,24	–	4,78	10,62	80,13	$l_1$	–	–
	$k_8$	45,02	$k_8$	–	–	80,73	$k_8$	–	–
№2/7 "Лідіївка"	$l_4$	34,28	–	1,09	3,08	83,02	–	3,14	3,94
	$l_1$	35,37	$l_1$	3,78	9,66	79,88	$l_1$	–	–
	$k_8$	39,15	$k_8$	–	–	86,64	–	–	–
№ 4 "Карбоніт"	$l_8$	36,99	–	$\frac{3,73^*}{3,49}$	$\frac{9,16^*}{8,62}$	84,27	–	0,30	0,04
	$l_7$	40,72	$l_7$	–	–	83,97	$l_7$	–	–
	$l_3$	40,48	$l_3$	–	–	85,92	–	–	–
№1 "Центральна"	$l_7$	33,78	–	$\frac{4,34^*}{2,71}$	$\frac{11,39^*}{7,43}$	85,54	–	–	–
	$l_2$	38,12	$l_2$	–	–	85,93	–	0,16	0,02
	$l_1$	36,49	$l_1$	–	–	85,77	$l_1$	–	–
Ім. Ворошилова	$l_7$	31,2	–	4,79	13,31	86,21	–	–	–
	$l_6$	35,99	$l_6$	–	–	87,59	–	2,10	2,43
	$l_5$	34,4	$l_5$	1,77	4,89	86,49	$l_5$	0,32	0,37
	$l_3$	36,17	$l_3$	–	–	86,17	$l_3$	–	–
	$l_2^1$	32,42	$l_2^1$	–	–	87,11	–	0,83	0,96
	$k_8$	32,38	$k_8$	–	–	86,28	$k_8$	–	–
Ім. Рум'янцева	$m_3$	27,21	–	$\frac{2,34^*}{1,04}$	$\frac{7,92^*}{3,68}$	90,61	–	0,70	0,78
	$m_2$	29,55	$m_2$	–	–	89,91	$m_2$	1,54	1,74
	$l_7^1$	28,25	$l_7^1$	–	–	88,37	$l_7^1$	–	–
	$l_6$	27,12	–	3,45	11,29	90,89	–	1,14	1,27
	$l_5$	30,57	$l_5$	–	–	89,75	$l_5$	–	–
№ 2/5 "Кам'янка"	$k_6$	25,09	–	–	–	90,97	–	0,30	0,33
	$k_5$	19,83	–	5,95	23,08	90,67	$k_5$	–	–
	$k_3$	25,78	$k_3$	–	–	90,88	$k_3$	–	–
№ 1-біс "Криворіжжя"	$l_3$	23,03	–	0,31	1,33	89,34	–	–	–
	$l_2^1$	23,34	$l_2^1$	–	–	91,61	–	1,04	1,15
	$k_7$	18,17	$k_7$	–	–	90,57	$k_7$	–	–

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$k_6$	17,45	–	1,92	9,91	92,57	–	0,65	0,71
	$k_5$	19,37	$k_5$	–	–	91,92	$k_5$	1,08	1,19
	$k_3$	17,86	$k_3$	–	–	90,84	$k_3$	–	–
№10 ім. Артема	$l_8$	14,89	–	–	–	93,52	–	1,15	1,24
	$l_6$	14,07	$l_6$	–	–	92,37	$l_6$	–	–
	$l_1$	12,66	–	–	–	93,70	–	1,46	1,56
	$k_7$	12,34	–	–	–	92,24	$k_7$	–	–
	$k_6$	11,05	–	–	–	92,44	–	0,11	0,12
	$k_5$	10,39	–	–	–	92,35	$k_5$	–	–

Примітка: \* – співвідношення показників ступеня метаморфізму для двох нижчих шахтопластів (чисельник/знаменник), для яких не виконується правило Хільта

Аналогічні дані для шахтопластів наведено за показником вмісту вуглецю на умовно органічну масу. Відмінність цього показника від  $V^{\text{daf}}$  полягає у зростанні  $C^\circ$  по мірі посилення метаморфічних перетворень. Тому зі збільшенням стратиграфічної глибини вміст вуглецю за правилом Хільта має збільшуватися. Для кількісної оцінки відповідності правилу Хільта також розраховані абсолютні ( $\Delta C_a$ ) та відносні ( $\Delta C_o$ ) відхилення між вмістом вуглецю для пар шахтопластів, що розглядаються.

**Основна частина.** Результати розрахунку для встановлення відповідності метаморфічних перетворень шахтопластів із залученням показника виходу летких речовин ( $V^{\text{daf}}$ ) та вмісту вуглецю в органічній масі ( $C^\circ$ ) наведено у таблиці 1.

У ній наведені абсолютні ( $\Delta V_a$ ,  $\Delta C_a$ ) та відносні ( $\Delta V_o$ ,  $\Delta C_o$ ) відхилення тільки для шахтопластів, розташованих у таблиці поруч. Навести в одній таблиці всі можливі комбінації співвідношень між парами показників шахтопластів, не втрачаючи наочності, технічно здійснити досить складно. З цієї причини додатково в таблиці 2 наведено дані про максимальні відхилення показників та загальну кількість пар шахтопластів, для яких не дотримувалося правило Хільта.

За показником  $V^{\text{daf}}$  із 41 сукупності шахтопластів невідповідність правилу Хільта встановлено у 31 випадку (табл. 2), а за вмістом вуглецю у 30 випадках. За загальної приблизної рівності випадків невідповідності за порівнюваними показниками є суттєві відмінності в їх абсолютних та відносних відхиленнях.

Абсолютні відхилення від правила Хільта за показником  $V^{\text{daf}}$  для всіх пластів шахт, що розглядаються, знаходилися в діапазоні  $0,31 \div 7,84\%$ , а відносні були в інтервалі  $1,33 \div 23,08\%$  (табл. 1 і 2). За вмістом вуглецю аналогічні показники ( $\Delta C_a$ ,  $\Delta C_o$ ) відповідно рівні  $0,11 \div 3,14\%$  та  $0,12 \div 3,94\%$ .

За показником  $V^{\text{daf}}$  абсолютна максимальна невідповідність ( $\Delta V_a = 7,84\%$ ) спостерігалася для пластів  $l_2$  та  $l_6$  шахти № 1-2 ім. Мельникова при абсолютних значеннях виходу летких речовин для зазначених пластів відповідно  $44,46\%$  та  $38,62\%$ . Для цих же шахтопластів за показником  $C^\circ$  відступ від правила Хільта не спостерігався. Зміст вуглецю для них відповідно становив  $81,48$  та  $84,98\%$ .

Таблиця 2

Результати для порівняння відповідності метаморфічних перетворень шахтопластів правила Хільта із застосуванням показників виходу летких речовин ( $V^{daf}$ ) та вмісту вуглецю ( $C^o$ ) в органічній масі

Шахта	Індекси пластів	Показник $V^{daf}$			Показник $C^o$		
		Кіл-ть шахтопластів з відступом від правила Хільта	Максимальні відхилення від правила Хільта		Кіл-ть шахтопластів з відступом від правила Хільта	Максимальні відхилення від правила Хільта	
			Абсолютне, %	Відносне, %		Абсолютне, %	Відносне, %
			$\Delta V_a$	$\Delta V_o$		$\Delta C_a$	$\Delta C_o$
№ 1-2 ім. Мельникова	$l_6, l_2$	1	7,84	17,03	0	–	–
№2 "Трудівська"	$l_4, l_3, l_1, k_8$	3	4,78	10,62	3	2,31	2,90
№2/7 "Лідіївка"	$l_4, l_1, k_8$	2	4,87	12,44	1	3,14	3,94
№ 4 "Карбоніт"	$l_8, l_7, l_3$	2	3,73	9,16	1	0,30	0,04
№1 "Центральна"	$l_8, l_2, l_1$	2	4,34	11,39	1	0,16	0,02
Ім. Ворошилова	$l_7, l_6, l_5, l_3, l_2^1, k_8$	8	4,97	13,74	3	1,42	1,65
Ім. Рум'янцева	$m_3, m_2, l_7^1, l_6, l_5$	7	3,45	11,29	5	1,14	1,27
№ 2/5 "Кам'янка"	$k_6, k_5, k_3$	2	5,95	23,08	2	0,30	0,33
№ 1-біс "Криворіжжя"	$l_3, l_2^1, k_7, k_6, k_5, k_3$	4	1,92	9,91	4	1,08	1,19
№10 ім. Артема	$l_8, l_6, l_1, k_7, k_6, k_5$	0	–	–	10	1,46	1,56
<b>Σ</b>		<b>31</b>			<b>30</b>		

Максимальне відносне відхилення за показником  $V^{daf}$  встановлено для пластів  $k_5$  та  $k_3$  шахти №2/5 "Кам'янка". Значення  $\Delta V_o$  дорівнює 23,08% при абсолютних значеннях  $V^{daf}$  відповідно 19,83 та 25,78%. Відхилення ж від правила Хільта для пари шахтопластів за показником  $C^o$  не спостерігалось, оскільки вміст вуглецю відповідно становив 90,67 та 90,88% (табл. 1).

За вмістом вуглецю максимальні абсолютне та відносне відхилення від правила Хільта встановлені для пластів  $l_1$  та  $l_4$  шахти № 2/7 "Лідіївка". Значення  $\Delta C_a$  та  $\Delta C_o$  відповідно дорівнюють 3,14 та 3,94%. За показником  $V^{daf}$  відхилення від правила Хільта для пластів  $l_1$  та  $l_4$  відповідно становили  $\Delta V_a=1,09\%$  та  $\Delta V_o=3,08\%$ . За показником  $V^{daf}$  спостерігається також суттєві невідповідності пластів  $k_8$  та  $l_1$ . Для них відмінності відповідно становлять  $\Delta V_a=3,78\%$  та  $\Delta V_o=9,66\%$ . Водночас для пластів  $k_8$  та  $l_1$  невідповідність за показником  $C^o$  відсутня, тому що для цих пластів вміст вуглецю відповідно становить 86,64 та 79,88%. З наведеного аналізу слідує, що відповідність ступеня метаморфічних перетворень шахтопластів правилу Хільта з використанням обох показників має випадковий характер.

Показники  $V^{\text{daf}}$  та  $C^{\circ}$  визначаються відповідно до розроблених ДСТУ [7]. Методика визначення  $V^{\text{daf}}$  гарантує максимально допустиму розбіжність на аналітичний стан палива 0,3% при  $V^{\text{daf}} < 10\%$  та 3% від середнього результату для кам'яного вугілля з виходом летких речовин десять і більше відсотків. Максимально допустима розбіжність вмісту вуглецю для окремих визначень на аналітичний стан палива становить 0,25%.

При зазначеній точності визначення  $V^{\text{daf}}$  та  $C^{\circ}$  неможливо отримати у більшості прикладів випадкові результати відповідності правилу Хільта. Різниця між виходом летких речовин для пар шахтопластів завжди перевищує допустимі похибки згідно з методиками їх визначення. Найменші розбіжності виявлені між вмістом вуглецю в парах шахтопластів та допустимими похибками їх визначення (табл. 1), але у більшості випадків фактичні відхилення набагато перевищують допустимі похибки. Це вказує, що на випадковість відповідності правилу Хільта впливають не достовірність визначення  $V^{\text{daf}}$  та  $C^{\circ}$ , а інші фактори.

Вихід летких речовин при термічному розкладанні вугілля є відносно постійним показником для окремих шахтопластів різних вугільних басейнів, що підтверджується високою взаємною кореляційною залежністю між результатами випробувань лабораторних проб вугілля, відібраних у різних частинах шахтних полів. Водночас відносна похибка визначення вагового виходу летких речовин залежить від абсолютного значення показника. Максимальні відносні середньоквадратичні відхилення від усереднюючих прямих понад 100% спостерігаються при виході летких речовин менше 8%, а при виході летких речовин понад 25% - вони стабілізуються лише на рівні 10-20% [8]. Такі особливості зміни відносних похибок від абсолютних значень виходу летких речовин цілком могли вплинути на випадковість та точність відповідності метаморфізму шахтопластів правилу Хільта. Залежність відносної похибки від абсолютних значень вмісту вуглецю не вивчалася. Можна припустити, що вплив місця відбору проб у шахтному полі на значення  $\Delta C^{\circ}$  не перевищуватиме значення аналогічного показника при визначенні  $\Delta V_0$ . Таке співвідношення між  $\Delta C^{\circ}$  та  $\Delta V_0$  забезпечується більш високими абсолютними значеннями  $C^{\circ}$  порівняно з  $V^{\text{daf}}$  ( $|C^{\circ}| > |V^{\text{daf}}|$ ). Крім цього відносні максимальні відхилення від правила Хільта  $\Delta V_0$  у всіх випадках перевищує  $\Delta C^{\circ}$  мінімально у 3,16 рази, а максимального у 569,5 рази (табл. 2).

Одним з факторів, що визначають достовірність застосування правила Хільта, може бути ступінь відповідності показників  $V^{\text{daf}}$  та  $C^{\circ}$  критеріям визначення метаморфізму. За загальноприйнятим визначенням [1,2] такими критеріями є зміни складу та властивостей органічної маси.

Основними компонентами органічної маси вугілля є вуглець  $C^{\circ}$ , водень  $H^{\circ}$ , азот  $N^{\circ}$  та кисень  $O^{\circ}$ . В органічну масу також входять волога та органічна сірка  $S^{\circ}$ . Сумарний вміст цих компонентів наближається до 100%. У геолого-вуглехімічній карті [3] для аналізованих шахтопластів десяти шахт наведені дані про показники органічної маси  $C^{\circ}$ ,  $H^{\circ}$ ,  $N^{\circ}$ ,  $O^{\circ}$  без органічної сірки, а також вологи аналітичних проб  $W^a$ , загальної сірки  $S_t^d$  та виходу летких речовин  $V^{\text{daf}}$ . Це дозволило порівняти відповідність показників  $V^{\text{daf}}$  та  $C^{\circ}$  метаморфічним перетворенням шахтопластів, обумовлених зміною органічної маси вугілля.

Вміст вуглецю практично однозначно визначає вміст кожного компонента органічної маси  $O^\circ$ ,  $H^\circ$ ,  $N^\circ$ , а їх сума функціонально залежить від вуглецю, так як  $\Sigma O^\circ, H^\circ, N^\circ = 100 - C^\circ$  (рис. 1). У двох випадках із 41 спостерігалися незначні відхилення від цієї функціональної залежності. В одному випадку таке відхилення викликане вихідною сумою компонентів органічної маси  $\Sigma C^\circ, O^\circ, H^\circ, N^\circ$ , що дорівнює 101% для пласта  $l_4$  шахти №2 "Трудівська". У другому для пласта  $l_7^1$  шахти ім. Румянцева вихідна сума органічної маси становить 99,5% замість необхідних 100% викликане, судячи з розташування експериментальних точок (рис. 1), похибкою визначення кисню розрахунковим методом з використанням наближеної формули [7]. З перелічених причин відхилення зазначених значень не впливає на справедливність функціональної залежності  $\Sigma O^\circ, H^\circ, N^\circ = 100 - C^\circ$ .

З позицій характеристики зміни складу органічної маси у процесі метаморфічних перетворень шахтопластів вміст вуглецю є ідеальним критерієм оцінки ступеня метаморфізму. У плані оцінки перетворення складу органічної маси він набагато якісніше контролює як індивідуальні зміни вмісту кожного компонента, так і їх суму. Показник виходу летких речовин таких якостей не має. Їхні відмінності видно з порівняння графіків (рис. 1, 2).

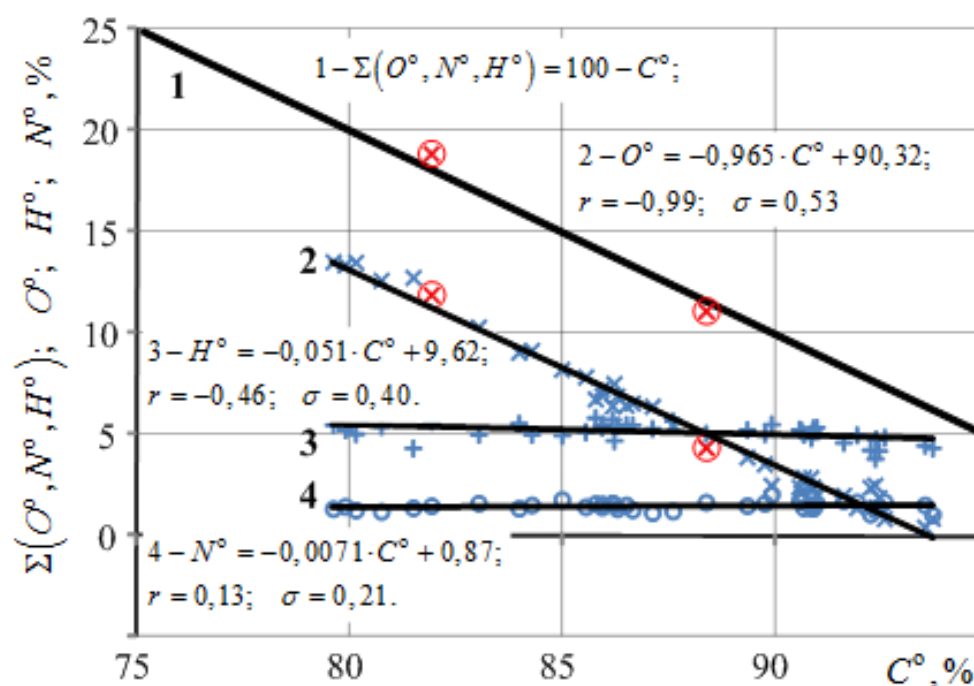


Рис. 1. Залежність основних компонентів органічної маси від вмісту вуглецю  $C^\circ$ :  
 1 – функціональна залежність суми основних компонентів ( $\Sigma O^\circ, H^\circ, N^\circ$ ) від вмісту вуглецю ( $C^\circ$ ); 2 – залежність вмісту кисню ( $O^\circ$ ) від  $C^\circ$ ; 3 – залежність вмісту водню ( $H^\circ$ ) від  $C^\circ$ ; 4 – залежність вмісту азоту ( $N^\circ$ ) від  $C^\circ$ ; ×, +, ○ – експериментальні дані про зміст відповідно  $O^\circ, H^\circ, N^\circ$  згідно [3]; ⊗ – експериментальні дані  $\Sigma O^\circ, H^\circ, N^\circ$  та  $O^\circ$  для пласта  $l_4$  шахти № 2 "Трудівська" та пласта  $l_7^1$  шахти ім. Рум'янцева;  
 $r$  – коефіцієнти кореляції;  $\sigma$  – середньоквадратичні відхилення



Зміна вмісту кисню в органічній масі ( $O^o$ ) з посиленням метаморфічних перетворень (зростання вмісту  $C^o$  та зниження  $V^{daf}$ ) характеризується однаковою спрямованістю до зниження. Воднораз залежності відрізняються як тісністю кореляційного зв'язку та середньоквадратичними відхиленнями від усереднюючих прямих. Якщо для вуглецю ця залежність (рис. 1) характеризується високим коефіцієнтом кореляції ( $r=0,99$ ) і допустимим для інженерних розрахунків середньоквадратичним відхиленням ( $\sigma=0,53\%$ ), то для  $V^{daf}$  ці показники відповідно дорівнюють 0,82 та 2,25% (рис. 2, а).

Вміст водню  $H^o$  в залежності від  $C^o$  залишається практично постійною величиною і тільки після досягнення високої стадії метаморфізму ( $C^o > 90\%$ ) спостерігається деяке його зниження (рис. 1). Така тенденція до зміни підтверджується незначним коефіцієнтом кореляції ( $r=-0,46$ ) та відносно невисоким значенням середньоквадратичного відхилення ( $\sigma=0,40\%$ ). В залежності від виходу летких речовин спостерігається стійке зниження вмісту водню (рис. 2, б) при посиленні впливу процесів метаморфічних перетворень (зменшення  $V^{daf}$ ). Значний коефіцієнт кореляції ( $r=0,68$ ) та середньоквадратичне відхилення ( $\sigma=0,33\%$ ) свідчать про не випадковість такої залежності.

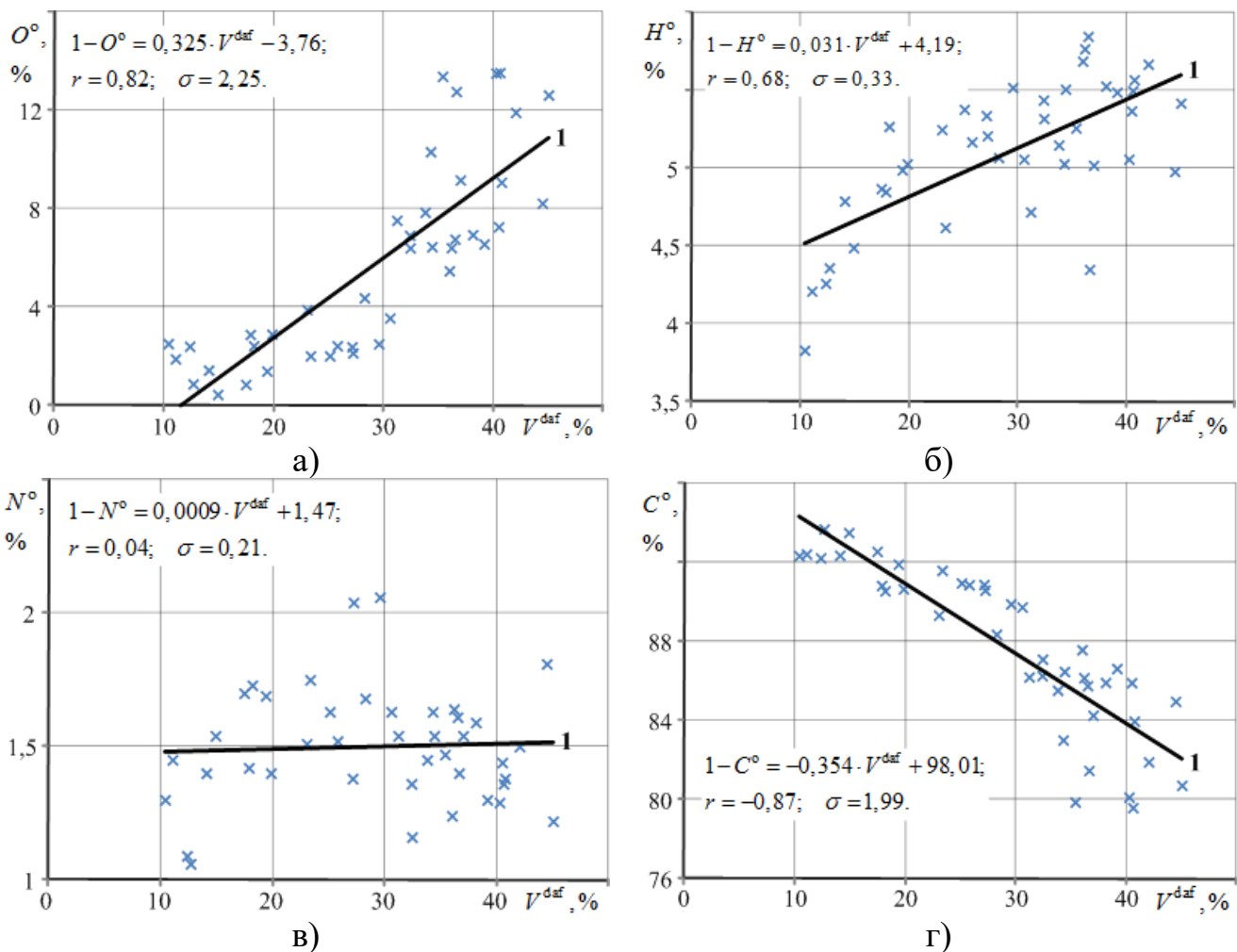


Рис. 2. Залежність основних компонентів органічної маси від виходу летких речовин  $V^{daf}$ : а, б, в, г – відповідно залежності для  $O^o$ ,  $H^o$ ,  $N^o$ ,  $C^o$ ; 1 – прямі залежностей;  $\times$  – експериментальні дані згідно з [3];  $r$  – коефіцієнти кореляції;  $\sigma$  – СКВ

Такі відмінності в характері залежностей водню від вмісту вуглецю та виходу летких речовин вказують, що показники  $C^o$  та  $V^{daf}$  описують різні сторони перетворення органічної речовини.

Вміст азоту в органічній масі  $N^o$  не залежить ні від вмісту вуглецю (рис. 1,  $r = 0,13$ ,  $\sigma = 0,21\%$ ), ні від виходу летких речовин (рис. 2, в,  $r = 0,04$ ,  $\sigma = 0,21\%$ ). В обох випадках середнє значення  $N^o$  для вибірки шахтопластів склало 1,5%.

Між собою показники  $C^o$  та  $V^{daf}$  пов'язані обернено пропорційною залежністю (рис. 2, г). Вона характеризується досить високим коефіцієнтом кореляції ( $r = -0,87$ ), але досить велике середньоквадратичне відхилення від прямої ( $\sigma = 1,99\%$ ) не дає можливості проводити їх взаємозаміну при оцінці ступеня метаморфізму вугілля. Проведені дослідження свідчать, що показники  $C^o$  та  $V^{daf}$  характеризують не лише різні сторони метаморфізму, але й різні процеси, що їх супроводжують.

У нормативних документах щодо безпечного ведення гірничих робіт, а також для встановлення справедливості правила Хільта однозначно необхідно віддавати перевагу вмісту вуглецю. Вихід летких речовин, у комплексі ще з дев'ятьма іншими показниками, знайшли успішне застосування у сучасній промисловій класифікації [4].

Під час проведення досліджень розглянуто зміни вмісту всіх основних компонентів органічної маси, відповідно від виходу летких речовин та вуглецю на стадіях метаморфічних перетворень шахтопластів. Встановлено кореляційні зв'язки між аналізованими показниками. Зміна співвідношення вмісту між основними компонентами органічної маси має призводити до появи нових властивостей, що відрізняються між собою на різних стадіях метаморфізму органічної маси.

Неоднозначність залежностей інших властивостей (теплотворна здатність, механічна міцність, подрібнюваність, діелектрична проникність, вихід нафталінового екстракту тощо) від  $C^o$  та  $V^{daf}$ , свідчить про неможливість їх характеризувати за допомогою одного, навіть універсального показника. З цієї причини в сучасній промисловій класифікації [4] спільно з  $V^{daf}$  для встановлення якості палива використовуються додатково ще дев'ять показників. Це дозволило з усього різноманіття вугілля виділити 81 різновид за споживчими властивостями. Така тонка градація шахтопластів щодо прояву їх небезпечних властивостей під час гірничих робіт відсутня, що свідчить про необхідність розробки нормативного документа, аналогічного класифікації [4]. У ньому повинні бути враховані, крім метаморфічних перетворень, вплив гірничо-геологічних (глибина робіт, потужність пластів та наявність зближених, фізико-механічні властивості порід тощо) та гірничотехнічних (системи розробки, схеми провітрювання, технологія, конструкція виконавчих органів гірничих машин) факторів. Розробка такого нормативного документа сприятиме підвищенню рівня безпечного ведення гірничих робіт.

**Висновки.** Проведені дослідження дозволили зробити важливі для вугільної промисловості науково-практичні висновки:

– за допомогою виходу летких речовин немає можливості розкрити картину метаморфічних перетворень шахтопластів, оскільки виділення летких речовин

при термічному розкладанні вугілля в штучних умовах є продовженням метаморфічних процесів, що відбувалися у надрах Землі у минулі геологічні періоди часу;

– один показник метаморфічних перетворень шахтопластів не може одноосібно та всебічно характеризувати одночасно зміну як у складі, так і властивостях вугілля;

– елементний вміст вуглецю в органічній масі відноситься до більш інформативних показників при встановленні небезпечних властивостей шахтопластів порівняно з виходом летких речовин. Вміст вуглецю є ідеальним критерієм індивідуальної оцінки вмісту окремих основних компонентів, оскільки він функціонально контролює їхню суму в органічній масі, включаючи вміст органічної сірки;

– відповідність правилу Хільта, що встановлюється по виходу летких речовин та вмісту вуглецю, носить згідно з обома показниками випадковий характер. Абсолютна максимальна невідповідність правилу Хільта щодо виходу летких речовин становить 7,84%, а відносна – 23,08%. Такі розбіжності спричинені як відбором проб вугілля у різних частинах шахтних полів, так і невідповідністю показника виходу летких речовин критерієм метаморфічних перетворень шахтопластів щодо зміни складу органічної маси. Максимальне абсолютне і відносне відхилення від правила Хільта за вмістом вуглецю не перевищують 4%, що здебільшого зумовлено відбором проб у різних частинах шахтних полів;

– виходячи з різної спрямованості зміни вмісту водню в органічній масі від виходу летких речовин та вуглецю слідує, що ці показники відображають не лише різні сторони зміни елементного складу, а й різні процеси, що супроводжують ці зміни;

– між показниками виходу летких речовин та вмістом вуглецю в органічній масі встановлено тісну кореляційну обернено пропорційну залежність, але досить велике середньоквадратичне відхилення не дають можливості проводити їх заміну при оцінці ступеня метаморфізму вугілля;

– вихід летких речовин та вміст вуглецю не є надійними показниками властивостей органічної маси, тому для достовірного їх прогнозу необхідно використовувати додаткові показники;

– при розробці нормативних документів щодо безпечного ведення гірничих робіт додатково до показників метаморфічних перетворень, що характеризують склад та властивості вугілля, необхідно розглядати гірничо-геологічні та гірничотехнічні умови відпрацювання шахтопластів.

#### **Перелік посилань**

1. *ГОСТ 17070-2014. Межгосударственный стандарт. Угли. Термины и определения. Издание официальное.* (2015). Стандартиформ.
2. Козловский, Е.А. (1987). *Горная энциклопедия. Т.3: Кенган-Орт.* Сов. энцикл.
3. *Геолого-углехимическая карта Донецкого бассейна.* (1954). Углетехиздат.
4. *ГОСТ 25543-2013. Межгосударственный стандарт. Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам. Издание официальное.* (2014). Стандартиформ.
5. Антощенко, Н.И., Томалак, Н.В., & Сятковский, С.Л. (2002). Влияние температуры на степень метаморфизма ископаемых углей. *Уголь Украины*, 36-38.

6. Antoshchenko, M., Filatieva, E., Yefimtsev, V., & Tarasov V. (2020). Peculiarities of using classification indicators of the coal metamorphism degree for predicting the hazardous coal seams properties. *E3S Web of Conferencess 201, 01014*, 1-10.  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101014>
7. Авгушевич, И.В., Сидорук, Е.И., & Броновец, Т.М. (2019). *Стандартные методы испытания углей. Классификации углей*. «Реклама мастер».
8. Antoshchenko M., Rudniev Y., Filatiev M., Filatieva E., Brozhko R. (2021). Assessment of forecast accuracy dangerous properties of coal layers by the degree of metamorphism of solid fossil coals. *Energy- and resource-saving technologies of developing the raw-material base of mining regions : Multi-authored monograph*. UNIVERSITAS Publishing, 135-148.  
<http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/20358>

### ABSTRACT

**Purpose.** Prove the compliance of Hilt's rule for all coal seams, if instead of the release of volatile matter yield to determine the degree of metamorphism, indicators are used that directly characterize changes in the composition of the organic mass.

**Methodology.** Provides for consideration of experimental data, on the basis of which deviations from the Hilt's rule were established for the seams of ten mines using the indicator of volatile matter yield ( $V^{\text{daf}}$ ). Comparing the geometric arrangement of coal seams and their metamorphic characteristics, respectively, in indicators of  $V^{\text{daf}}$  and  $C^{\circ}$ , it is possible to analyze the compliance of each coal seam with the Hilt rule.

**Findings.** With the help of the indicator of the release of volatile matter yield, it is not possible to reveal the picture of metamorphic transformations of coal seams. One indicator of metamorphic transformations of coal seams cannot single-handedly and comprehensively characterize simultaneously changes in both the composition and properties of coals. The elemental content of carbon in the organic mass is one of the more informative indicators in determining the hazardous properties of coal seams compared to the release of volatile matter yield. Compliance with the Hilt rule, established by the volatile matter yield and carbon content, is, according to both indicators, random. The absolute maximum non-compliance with the Hilt rule for the release of volatile matter yield is 7.84%, and the relative one is 23.08%. The maximum absolute and relative deviations from the Hilt rule for carbon content do not exceed 4%, which is largely due to sampling in different parts of the mine fields. Moisture, together with the release of volatile substances and carbon content, is an indicator of metamorphic transformations of coal seams, including determining their dangerous properties. The content of mineral impurities for individual coal seams is random. When developing regulatory documents for the safe conduct of mining operations, in addition to the indicators of metamorphic transformations that characterize the composition and properties of coal, it is necessary to consider the mining-geological and mining-technical conditions for mining coal seams.

**Originality.** For the first time it has been established that the discrepancy between the metamorphic transformations of coal mine seams and the Hilt rule is eliminated if the carbon content in the organic mass is used instead of the indicator of the release of volatile matter yield. In this case, the absolute and relative deviations from the Hilt rule do not exceed 4%, which corresponds to the accuracy of determining the carbon content in different parts of the mine field.

**Practical implications.** 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.

**Keywords:** coal, metamorphism, coal seams, Hilt's rule, compliance, mineral impurities, mining, safety, regulatory framework, improvement.