

Determining the qualitative characteristics of raw materials of man-made deposits to consider the parameters of the composite fuel production technology

Oleksandr Haidai^{1*}, Artem Pavlichenko¹, Andrii Koveria¹, Valeria Firsova¹

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

*Corresponding author: Haidai.o.a@nmu.one

Abstract. The paper highlights the main aspects of the technology of obtaining composite fuel from the man-made raw materials that make up the deposits formed as a result of human production and economic activities. The data are given concerning the study of qualitative characteristics of raw materials of man-made deposits to consider the parameters of the composite fuel production technology. To determine the qualitative characteristics of raw materials of man-made deposits, the following is used: analytical and experimental analysis of particle size distribution (PS) – screen and sedimentation; chemical composition analysis – X-ray fluorescence analysis (XRF) and technical analysis (TA); complex analysis including analysis and generalization of the scientific and technical achievements in the field of physicochemical effects on dispersed systems – electrokinetic and surface properties. Estimation of possible directions of complex processing and use of off-balance waste resources of coal beneficiation can be their accumulation at low temperatures and pressures without prior enrichment using low-ash waste chemical and pulp and paper industry as a composite and various additives to intensify fuel production, and without binders.

Keywords: industrial waste, technology, composition, fuel, lump, sludge, lignin, physical and mechanical characteristics, man-made raw materials

Визначення якісних характеристик сировини техногенних родовищ для урахування параметрів технології виготовлення композиційного палива

Олександр Гайдай^{1*}, Артем Павличенко¹, Андрій Коверя¹, Валерія Фірсова¹

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

*Відповідальний автор: Haidai.o.a@nmu.one

Анотація. У статті висвітлені основні аспекти технології отримання композиційного палива з техногенної сировини, що складає родовища, утворені в результаті виробничої та господарчої діяльності людини. Наведено дані з дослідження якісних характеристик сировини техногенних родовищ для урахування параметрів технології виготовлення композиційного палива. За для визначення якісних характеристик сировини техногенних родовищ застосовано аналітичного та експериментального аналізу гранулометричного складу (ГС) – ситовий та седиментаційний; аналізу хімічного складу – рентгенофлуоресцентний аналіз (РФА) та технічний аналіз (ТА); комплексний, що включає аналіз та узагальнення науково-технічних досягнень у галузі фізико-хімічного впливу на дисперсні системи – електрокінетичних та поверхневих властивостей. Оцінка можливих напрямків комплексної переробки і використання ресурсів позабалансових відходів вуглезбагачення, може бути їх згрудкування при низьких температурах і тисках без попереднього збагачення з використанням низькозольних відходів хімічної та целюлозно-паперової галузі в якості композиту і різних добавок, що дозволяють інтенсифікувати процес отримання палива, а також без сполучних.

Ключові слова: відходи промисловості, технологія, композиція, паливо, згрудкування, шлам, лігнін, фізико-механічна характеристика, техногенна сировина

1. Вступ

Тверді вуглецеві відходи (ТВВ), основну масу яких складають відходи вуглезбагачення, різні шлами та побутові відходи є специфічним видом відходів, мають високий енергохімічний потенціал і не такі токсичні, як багато видів промислових твердих відходів. Загалом можна зробити їхню переробку економічно вигідною [1].

Тому одним із перспективних варіантів є застосування існуючих та розробка нових технологій переробки відходів гірничодобувної та гірничо-збагачувальної промисловостей, а також розробка техногенних родовищ. Такими техногенними родовищами є мільйони тонн вугільних шламів [2].

Поблизу шахт та збагачувальних фабрик за різними даними від 120 до 250 млн тонн вугільних шламів, які є вторинним паливним ресурсом, використання якого може суттєво покращити паливно-енергетичний баланс України. З іншого боку, проблемою є те, що накопичені відходи займають великі площі земельних угідь, складів, бункерів [3].

У вирішенні питань переробки і використання промислових відходів при отриманні додаткового паливного ресурсу, таких як вугільні шлами, основними є достовірні знання про різні фізико-механічні характеристики відходів, оскільки вони є вихідними розрахунковими величинами при обґрунтуванні технологічних параметрів розроблюваної технології і проектуванні обладнання. Ці характеристики змінюються дуже широкому діапазоні; зокрема, насипна густина $750 - 2350 \text{ кг/м}^3$, вміст води $4 - 65\%$, крупність – від пилоподібних класів $+0 \text{ мм}$ до великих -6 мм та інше. Слід зазначити, що різні склади вугільних шламів суттєво відрізняються за своїми фізико-механічними характеристиками [4], [5].

Задля покращення фізико-механічних властивостей і підвищення калориметричних показників палива з відходів пропонується використання в якості композиту – відходи хімічної та целюлозно-паперової галузі.

Для обґрунтування параметрів технології виготовлення композиційного палива необхідні дослідження якісних параметрів сировини техногенних родовищ.

2. Методика проведення досліджень

Для дослідження процесу переробки та вибору оптимальних параметрів необхідний комплекс досліджень, що включає визначення: визначення фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей вихідного вугільного шламу, способи впливу на режими виготовлення – шляхом приведення стану вихідного матеріалу до необхідних його параметрів (підготовка та вплив на фізико-хімічні властивості) [6], [7].

Виготовлення композиційного палива з використанням відходів вуглезбагачення вимагає підготовки, яка залежно від фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей вихідного матеріалу буде включати наступне:

- 1) проведення гранулометричного та седиментаційних аналізів;
- 2) проведення технічного аналізу: визначення вологості, зольності, виходу летких речовин, сірки, теплоти згоряння;
- 3) дослідження за допомогою рентгенофлуоресцентного аналізу: визначення вмісту вуглецю та водню, азоту та основних оксидів, які переважають за кількістю;
- 4) дослідження відходів, як дисперсних систем;
- 5) сушіння вихідної шихти до необхідного стану вологості для здійснення виготовлення палива (у разі, якщо вихідна сировина занадто волога $\approx 25\%$);
- 6) відсіювання великої фракції, що перевищує $10 - 15 \text{ мм}$ (гірських порід, що потрапили в шлами, в силу витрат виробництва та місця розташування відвалу складування).

В результаті досліджень технологічних напрямів переробки відходів вуглезбагачення, які проведенні в Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» – була запропонована технологія полягає в тому, що при перемішуванні і перетиранні вуглистих і глинистих частинок зростає електрозарядженість сировини. Це пояснюється підвищенням питомої поверхні частинок, що несуть електричні заряди [5].

Електрокінетичне згрудкування відходів гірничого виробництва є складним фізико-хімічним процесом взаємодії роз'єднаних твердих частинок. Структура шматків утворюється шляхом безпосередніх контактів частинок між собою або через прошарок компонентів і води за рахунок механоактивації. Дисперсні відходи, що представленні вугільними і породними частинками – речовини, що здатні поєднувати роз'єднані тверді тіла і зберігати їх міцний контакт в умовах значних зовнішніх впливів мають відповідати якостям адгезивів[8].

Фізико-хімічний вплив на властивості вугільних шламів включає ряд заходів та розрахунків за кількістю та процентним вмістом активуючих речовин, що змінюють знак і величину зарядженості частинок (ξ – потенціал) [9].

3. Результати та обговорення

3.1. Дослідження якісних характеристик сировини техногенних родовищ

Для обґрунтування раціональних параметрів процесів розроблювальної технології виготовлення композиційного палива з відходів необхідно виконати комплекс досліджень гранулометричних складів техногенної сировини.

Для отримання готового композиційного палива, що має вигляд циліндричних стрижнів діаметром 8 – 30 мм і довжиною 50 – 200 мм, необхідно підібрати оптимальний гранулометричний склад.

Оптимальний гранулометричний склад зумовлює підготовка техногенних відходів до їх переробки у тверде палива. У разі присутності, наприклад в вихідному вугільному шламі фракцій крупністю більше як 5 мм, виникає необхідність його перепустити через гуркіт. У випадку зі шламами, то такими фракціям є техногенні відходи, в яких крім шуканого вуглецю можуть бути присутніми різні сторонні предмети металевого, дерев'яного або іншого походження (цвяхи, гайки, дошки, сучки та ін.). Величина самих же вугільних частинок, як показали дослідження, не перевищує 2,5 мм [3].

3.1.1. Визначення гранулометричного складу техногенних відходів

Значення гранулометричного складу готового палива визначається впливом сумарної поверхні зіткнення зерен, кількістю і величиною пустот в структурному каркасі брикетів, змістом гострокутних зерен, рельєфом твердої поверхні і наявністю пилоподібних частинок [10].

Сипуча суміш відходів промисловості становить частинки мінералів різного розміру, починаючи від максимальних, вимірюваних сотнями міліметрів, до найдрібніших зерен в кілька мікрометрів.

Порівнюючи частки, величину їх характеризують одним розміром. Його зазвичай називають діаметром частинки (зерна). Для шматків кубічної форми за діаметр приймають довжину ребра куба; для шматків кулястої форми – діаметр кулі; для шматків неправильної форми – середню величину трьох вимірів: довжини, ширини і товщини паралелепіпеда, в який вписується шматок.

Крупність всієї маси сипучого матеріалу оцінюють по кількісному співвідношенню в ній класів певної крупності. Чисельні співвідношення окремих класів крупності називають гранулометричним складом матеріалу. Визначаємо його за допомогою аналізів:

- ситового – розсівання матеріалу на стандартному наборі сит з розміром отворів 50 мкм і більше;

- седиментаційного – поділ матеріалу на класи за крупністю за швидкостями падіння частинок у водному середовищі (матеріали величиною від 1 до 50 мкм).

Графічне зображення називають характеристикою величин. У табл. 1 наведені результати ситових аналізів шести найбільш представницьких проб вугільних шламів, а на рис. 1 зображено графічні характеристики їх крупності.

Характеристики крупності для інших проб можна отримати ідентичним способом графічного зображення на підставі даних дослідження гранулометричного складу.

При побудові графіків по вісі абсцис в лінійному масштабі відкладають розміри отворів сит (d) в міліметрах, а по вісі ординат сумарний вихід класів крупності більше розміру отворів сит в відсотках.

За кривої сумарної характеристики можна визначити теоретичний вихід будь-якого класу крупності при грохоченні матеріалу за заданим розміром.

При проведенні ситового аналізу з отриманням великої кількості класів та побудові сумарних характеристик в широкому діапазоні крупності зерен відрізки на вісі абсцис в області дрібних класів мають малий розмір.

Це ускладнює побудову та використання характеристик, так як доводиться складати дуже великі графіки. Щоб уникнути цього, сумарні характеристики будують в системі координат з напівліогарифмічними або логарифмічними шкалами. У першому випадку на вісі абсцис відкладають не лінійні розміри отворів сит (d), а $\lg d$, залишаючи вісь ординат в лінійному масштабі. У другому змінюють і масштаб ординати, відкладаючи не сумарний вихід $\Sigma\gamma$, а $\lg \Sigma\gamma$.

Таблиця 1. Результати ситового аналізу

Клас крупності, мм	Техногенна сировина (відходи вуглезбагачення за марками [*])											
	А ₁ шлам		П ₁ шлам		К ₁ шлам		Ж ₁ шлам		Г ₁ шлам		Д ₁ штиб	
	Вихід класу ^{**} , %											
	<i>γ</i>	Σ <i>γ</i>	<i>γ</i>	Σ <i>γ</i>	<i>γ</i>	Σ <i>γ</i>	<i>γ</i>	Σ <i>γ</i>	<i>γ</i>	Σ <i>γ</i>	<i>γ</i>	Σ <i>γ</i>
-10,0+2,5	--	--	16,21	16,21	--	--	--	--	--	--	19,43	19,43
-2,5+1,0	--	--	23,04	35,25	--	--	--	--	12,67	12,67	19,53	38,96
-1,0+0,315	--	--	27,23	62,48	12,14	12,14	16,19	16,19	50,85	63,52	25,26	64,22
-0,315+0,05	42,56	42,56	27,76	90,24	39,23	51,37	42,78	58,97	24,44	87,96	22,90	87,12
-0,05+0	57,44	100	5,76	100	48,63	100	41,03	100	12,04	100	12,88	100
Всього	100		100		100		100		100		100	

Примітка: * – А, П, К, Ж, Г, Д – марка вугілля антрацит, пісне, коксівне, жирне, газове, довгопопелуменеве; ** – γ , $\Sigma\gamma$ відповідно приватний і сумарний вихід класу крупності в відсотках.

Сумарні характеристики крупності, незважаючи на удавану їх відмінність, можуть бути описані аналітично рівняннями одного виду.

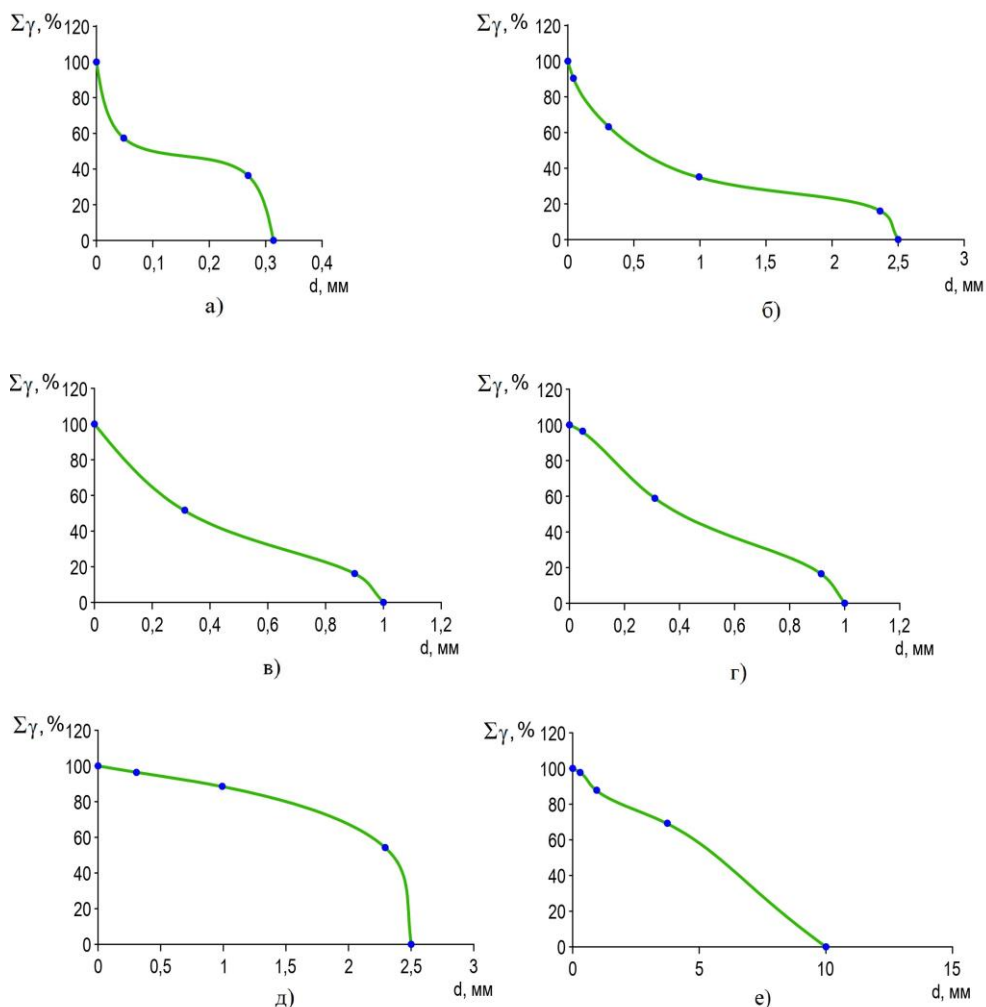


Рисунок. 1. Гранулометричні характеристики відходів вуглезбагачення (шламів): а) шлам марки А, б) шлам марки П, в) шлам марки К, г) шлам марки Ж, д) шлам марки Г, е) шлам марки Д

Часто використовують рівняння Розіна – Рамлера:

$$R = 100e^{-bd^n},$$

де R – сумарний вихід класу крупніше d (залишок на ситі), %;

b, n – параметри, що залежать від властивостей сировини і розмірності;

d – розмір отворів сита.

3.1.2. Дослідження хімічного складу техногенних відходів

Хімічний склад досліджуваних зразків техногенної сировини визначали методом рентгенофлуоресцентного аналізу – метод спектрального аналізу спектрів флюоресценції елементів випромінених при адсорбції високоенергетичного

випромінювання. Один із сучасних спектроскопічних методів дослідження речовини з метою отримання його елементного складу, тобто його елементного аналізу. Атоми досліджуваного об'єкту збуджуються рентгенівським, гамма – чи іонізуючим випромінюванням (на противагу до методів WDS чи EDX, де збудження відбувається пучком електронів). При взаємодії атомів речовини з високоенергетичним випромінюванням, електрони близькі до ядра атома вибиваються із своїх орбіталей. При цьому електрони з вищих енергетичних орбіталей займають їх місце, виділяючи при цьому фотони – характеристичне флуоресцентне випромінювання. Тобто відбувається емісія випромінювання з меншою енергією за поглинуту. За допомогою різноманітних детекторів (PIN diode, Si(Li), Ge(Li), Silicon Drift Detector SDD) реєструють спектр флуоресценції. За положенням максимумів у спектрі випромінювання можна провести якісний елементарний аналіз такого спектру флуоресценції, а за їх величиною, використавши еталонні зразки, зробити кількісний аналіз.

Рентгенофлуоресцентний аналіз дозволяє проводити якісний і кількісний аналіз у речовині усіх елементів починаючи від фтору (F).

Дослідження на спектрометрі ElvaX. Межа виявлення елементів 100s (від 12Mg до 92U) $\leq 0,05\%$. Детектор – SDD із номінальним статистичним завантаженням спектроскопічного тракту 52000 1/с. Роздільна здатність детектора (K α Mn) при номінальному навантаженні не перевищує 149 eV.

Результати якісного і кількісного хімічного складу техногенної сировини представлені в табл. 2.

Таблиця 2. Результати дослідження хімічного складу проб техногенної сировини (основні чотири оксиди, сірка та загальна зола)

№ п/п	Найменування проб	Вміст в % на абсолютну суху речовину					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S _{заг.}	A _{зола}
1	A ₁ шлам	25,04	8,94	3,72	0,055	1,42	44,34
2	П ₁ шлам	28,09	6,95	4,75	0,067	1,22	46,33
3	K ₁ шлам	29,39	6,56	4,22	0,048	1,31	48,28
4	Ж ₁ шлам	33,43	6,98	3,79	0,059	1,45	53,81
5	Г ₁ шлам	29,61	11,02	4,92	0,028	3,31	53,41
6	Д ₁ шлам	24,07	9,92	3,48	0,051	1,57	41,38

3.1.3. Технічний аналіз техногенної сировини

Техногенна сировина по своєму складу неоднорідна і тому відбір представницьких (середніх) проб, що відображають властивості певних партій відходів, і їх оброблення є складними і відповідальними операціями, від правильного виконання яких значною мірою залежить правдоподібність результатів лабораторних досліджень (табл. 3).

Таблиця 3. Характеристика відходів за показниками технічного аналізу

Номер проби	Найменування проби	Показники технічного аналізу, %						
		W ^a	A ^a	A ^d	V ^a	V ^d	V ^{daf}	S ^d
1	Відходи вуглезагачення (шлам марки А)	5,18	17,34	19,38	7,4	7,8	12,87	0,57
2	Відходи вуглезагачення (шлам марки П)	3,63	28,8	30,26	20,92	21,7	49,3	0,93
3	Відходи вуглезагачення (шлам марки К)	4,85	25,86	27,94	24,91	26,17	45,88	2,11
4	Відходи вуглезагачення (шлам марки Ж)	2,26	23,1	25,86	23,98	24,53	37,1	1,19

5	Відходи вуглезбагачення (шлам марки Г)	2,86	31,51	32,73	19,49	20,06	35,03	1,15
6	Відходи вуглезбагачення (шлам марки Д)	2,23	27,46	29,47	2,6	2,66	4,88	0,21
7	Відходи хімічної галузі (лігнін гідролізний)	13,96	14,23	16,54	46,03	53,49	64,1	0,16
8	Відходи целюлозно- паперової галузі (скоп макулатурний)	6,58	43,35	46,76	41,12	44,01	74,86	0,2

Серед проб, що характеризують середню якість техногенної сировини, що досліджується, розрізняють наступні:

- 1) первинні, які включають всю кількість окремих порцій, безпосередньо відібраних від випробовуваної партії відходів виробництв;
- 2) складені, які отримують в результаті пропорційного змішування залишків первинної проби, скороченої і розділеної по частинах в декілька прийомів;
- 3) лабораторні, які отримують в результаті повного оброблення первинних і складених проб.

3.2. Композитні матеріали для виготовлення палива з відходів

У зв'язку з тим, що як показали дослідження, дуже велика кількість відходів вуглезбагачення мають високий показник зольності, тому пропонується застосування в якості сполучної і додаткової сировини відходи хімічної та целюлозно-паперової галузей.

В якості в'язучих речовин хімічної галузі можливе застосування наступної сировини:

- бітуми (нафтові);
- пеки (кам'яновугільний і нафтовий);
- концентровані шлами;
- асфальти;
- рідкі і тверді концентрати сульфітно-спиртової барди;
- гідролізні лігніни.

В хімічній галузі лігнін – органічна речовина, нерегулярний полімер з розгалуженими макромолекулами, побудованими головним чином із залишків заміщених фенолоспиртів. Поряд з целюлозою є складовою частиною здерев'янілих тканин судинних рослин. Разом із геміцелюлозою зумовлює міцність стовбурів і стебел рослин. Найбільше лігніну містить деревина хвойних (до 35 %) і листяних (20 – 25 %) порід.

Гідролізний лігнін має теплотворну здатність, яка для абсолютно сухої лігніну становить 5500 – 6500 ккал/кг для продукту з 18 – 25%-ою вологістю, 4400 – 4800 ккал/кг для лігніну з 65%-ної вологістю, 1500 – 1650 ккал/кг для лігніну з вологістю більше 65%. За фізико-хімічної характеристикою лігнін являє собою трифазну полідисперсну систему з розмірами частинок від декількох міліметрів до мікронів і менше. Дослідження лігніну, отриманих на різних заводах, показали, що склад їх характеризується в середньому наступним змістом фракцій: розміром більше 250 мкм – 54 – 80%, розміром менше 250 мкм – 17 – 46%, і розміром менше 1 мкм – 0,2 – 4,3%. За структурою частинка гідролізного лігніну не є щільним тілом, а являє собою розвинену систему мікро-і макропор, величина його внутрішньої поверхні

визначається вологістю (для вологого лігніну вона становить 760 – 790 м²/г, а для сухого всього 6 м²/г).

Целюлозно-паперове виробництво характеризується утворенням значних обсягів відходів, а саме: кори – під час обкорювання деревинної сировини, м'яких відходів при її розкрякуванні та скопу – під час фільтрації деревинно-волокнистої маси. Варто зауважити, що враховуючи низьку культуру виробництва, застарілість технології та відсутність нових капіталовкладень у технологічні потоки основних виробництв, усі вказані відходи вивозяться на сміттєзвалища. Це негативно впливає на екологічний стан навколишнього середовища, зумовлює забруднення ґрунтових вод та збільшує потреби в лісосировині під час виробництва продукції целюлозно-паперової промисловості. Деревний скоп є сукупністю проклеєних волокон органічними адгезивами природного походження і містить мінеральні включення, клубки нероз'єднаних волокон, продукти часткового гідролізу деревини та проклеюючі речовини. У сухому стані деревний скоп володіє високою міцністю, що зумовлює його використання як в'язучого матеріалу. Разом з цим, тирса підвищеної вологості та кора можуть слугувати наповнювачами для створення нових паливних матеріалів.

Відхід целюлозно-паперової галузі, а саме очищення стічних вод виробництва картону та паперу – є скоп макулатурний.

Оскільки скоп – відходи виробництва з макулатури, значну частину сухих речовин скопа (30-65%) становить целюлозне волокно (вуглець, водень). Інші складові скопа – це сполуки, кремнію, алюмінію (каолін), кальцію, заліза, калію, азоту, фосфору (табл. 4).

Таблиця 4. Складові скопа (відходу целюлозно-паперової галузі)

Показники	Значення, %
Вуглець, С	35,6
Водень, Н	4,2
Азот, N	0,38
Кальцій, в перерахунку на СаО	34,4
Фосфор, в перерахунку на Р ₂ О ₅	0,11
Калій, в перерахунку на К ₂ О	0,4
Кремній, в перерахунку на SiO ₂	19,1
Алюміній, в перерахунку на Al ₂ О ₃	9,0
Залізо, в перерахунку на Fe ₂ О ₃	0,8

Усі відходи, що утворюються від переробки макулатури, та осаді стічних вод за ступенем токсичності основних хімічних компонентів характеризуються як малонебезпечні та відносяться до четвертого класу токсичності.

4. Висновки

Виявлено, що в результаті роботи різних галузей промисловості накопичено велика кількість відходів, які можливо використати як паливний ресурс. Якість техногенної сировини, характеризує зола в діапазоні 20 – 70 %, вологість 15 – 60 % (у деяких випадках до 80%), вміст сірки до 4%, вихід летких речовин до 36 % та гранулометричний склад 0 – 2(3) мм. Відповідно, така сировина з зазначеним фізико-механічним станом і визначеними характеристиками, як тверде паливо, не придатна для транспортування, безпечного спалювання та має низьку калорійність. Для використання відходів необхідний вибір раціональної технології їх переробка і приведення потенційного палива в товарний вигляд.

Водночас зменшується кількість пластів кондиційної потужності, що надалі спричинить завершення роботи гірничих підприємств з видобутку вугілля. Крім того, виникають проблеми у зв'язку зі зниженням якості вугілля, що видобувається, в

місцях потоншення пластів, геологічних порушень і в тих випадках, коли виїмкова техніка не дозволяє виїмку без присікання вміщуючих порід.

Для вирішення проблем з відповідністю гірничої маси, що добувається, технічним вимог при реалізації та використанні народним господарством – пропонується приведення до товарного вигляду не конденсатів гірничої маси, отриманої при підземній розробці тонких та некондиційних вугільних пластів та відходів вуглезбагачення. Після переробки гірничої маси, отриманої при виїмці некондиційних вугільних пластів, буде виділено три складові: вугільний концентрат (зольністю $\geq 30\%$ залежно від технічних вимог), шлам із золю 20 – 65 % та майже порожня порода із золю 80 – 100 %.

Відповідно при збільшенні вмісту золи в гірській масі при підземному виїмці вугільних пластів кондиційної потужності в незадовільних гірничо-геологічних геологічних умовах кількість відходів у вигляді шламів буде тільки більшою. Тому запропоновано: для надання товарного вигляду таким відходам – виготовлення композиційного палива за допомогою додавання інших високовуглецевмісних відходів хімічної та целюлозно-паперової галузей. Дане рішення може бути здійснено за допомогою ефективної технології повної реалізації в тверде кускове паливо.

Робота містить дослідження, які було проведено у рамках НТР No 0121U113229 (фінансується МОН України).

Література

1. Ksintaris, V.N., Renitar, Ya.A. (1983). *Use of secondary raw materials and production waste (Domestic and foreign experience, efficiency and trends)*. М.: Economics, 168 p.
2. Pavlychenko, A., Haidai, O., Firsova, V., Ruskykh, V., & Tkach, I. (2020). Technological directions of coal enrichment waste processing. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, (62), 139-148. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/62.139>
3. Pavlychenko, A., Haidai, O., Firsova, V., & Lampika, T. (2020). Optimization of physical and mechanical parameters of fuel products obtained from treatment of coal industry waste. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, (63), 88-97. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/63.088>
4. Haidai, O.A. (2013). Researches of structural-mechanical properties of coal tailings as disperse systems. *Annual Scientific-Technical Collection. Leiden, The Netherland. Press/Balkema*, 327-331.
5. Haidai, O. (2018). On the development of technogenic deposits using composite fuel production technology. *Scientific and technical journal Coal of Ukraine*, (4-5), 27-29.
6. Haidai, O. (2010). Estimation of qualitative indicators of coal at extraction in a technological chain and possibility of secondary use of enrichment products, *Scientific herald of NMU*, (1), 23-25.
7. Haidai, O. Demchenko, Yu., Koval. A. (2011). Investigation of the influence of pH charge on the strength properties of briquettes obtained from coal slimes and mines. *XXV Szkoły Eksploatacji Podziemnej 21-25 lutego 2011*, 451-454.
8. Petlyovany, M., Gaidai, O.A. (2017). Analysis of accumulation and systematization of waste heaps of coal mines, prospects of their development. *Geotechnical mechanics*, (136), 147-158.
9. Haidai, O., Ruskykh, V. (2018). To the problem of development of technogenic deposits using the technology of production of composite fuel. *Physical & Chemical Geotechnologies – 2018: Materials of the International Scientific & Practical Conference*, 26-27.
10. Elishevich, A. (1989). *Mineral briquetting*. М.: Nedra, 300 p.