

Determining the parameters of brown coal mass processing using different separation methods

Oleksandr Shustov^{1*}, Oleksandr Bielov², Andrii Adamchuk¹

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

²PJSC "Techenergo", Lviv, Ukraine

*Corresponding author: shustov.o.o@nmu.one

Abstract. The analysis of the chemical composition of brown coal ash and coal clays is given. It is established that the principle of action in electric concentration is determined by the ratio between the electrical and mechanical forces (gravitational force, centrifugal force, and resistance force of the medium, molecular adhesion forces of the particles with each other and with electrodes) acting on them. A higher calorific value of the concentrate is about 7200-7500 kcal/kg per absolutely dry matter. The operating heat of combustion of the concentrate of the heat-treated brown coal is expected at the level of 4500-5300 kcal/kg depending on other parameters of the coal.

Keywords: brown coal, coal clays, separation, heat treatment of coal

Визначення параметрів переробки буровугільної маси з використанням різних способів сепарації

Олександр Шустов^{1*}, Олександр Бєлов², Андрій Адамчук¹

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

²ПАТ «Техенерго», Львів, Україна

*Відповідальний автор: shustov.o.o@nmu.one

Анотація. Наведено аналіз хімічного складу золи бурого вугілля і вуглистих глин. Встановлено, що принцип дії при електричному збагаченні визначається співвідношенням між електричними і механічними силами (гравітаційна сила, відцентрова сила і сила опору середовища, сили молекулярного зчеплення часток між собою і з електродами), що діють на них. Наведено параметри сепарації термічно обробленого бурого вугілля. Вища теплотворна здатність концентрату складає близько 7200-7500 ккал/кг на абсолютно суху речовину. Робоча теплота згорання концентрату термообробленого бурого вугілля очікується на рівні 4500-5300 ккал/кг, в залежності від інших параметрів вугілля.

Ключові слова: буре вугілля, вуглисті глини, сепарація, термічна обробка вугілля

1. Вступ

Як відомо, рядове буре вугілля марки Б-1 відноситься до того виду ТГК який не підлягає збагаченню класичними способами [1]. Процес збагачення вугілля потрібний для відділення чистого вугілля від різних мінеральних домішок і пустих порід. Класичний цикл переробки сировини на збагачувальних підприємствах включає три основні етапи:

1. Підготовчий етап збагачення вугілля :
 - дроблення / подрібнення;
 - сортування і класифікація.
2. Безпосереднє збагачення вугілля
 - мокрий спосіб;
 - сухий спосіб.
3. Завершальний етап збагачення вугілля.

У результаті, на виході після збагачувальної фабрики отримують вугільний концентрат і хвости (шлами) [2].

Проте, зважаючи на фізичні (технологічних) властивості бурого вугілля марки Б-1, класичний підхід не прийнятний і не дає необхідних результатів. Це пояснюється передусім тим, що в процесі вугленагромадження і вуглефікації між органічними і мінеральними компонентами вугілля відбувалася взаємодія, що приводить до утворення органомінеральних комплексних з'єднань [3].

2. Методика досліджень

У цьому зв'язку, необхідно розробити технологічні рішення щодо каскадної сепарації, яка поєднує в собі магнітні та електричні методи розділення буровугільної маси. Мінеральна складова бурого вугілля і вуглистих глин наводиться в табл. 1, 2.

Таблиця 1. Хімічний склад золи бурого вугілля у %

Компоненти	Од. ваг.
діоксид кремнію, SiO ₂	30,2-59,9
оксид заліза, Fe ₂ O ₃	1,55-8,74
оксид алюмінію, Al ₂ O ₃	9,2-14,6
оксид магнію, MgO	1,8-2,13
оксид кальцію, CaO	9,84-20,0
оксид натрію, Na ₂ O	0,12-0,45
оксид калію, K ₂ O	0,24-0,34
діоксид титану, TiO ₂	0,73-3,0
триоксид сірки SO ₃	8,09-10,31
оксид фосфору P ₂ O ₅	0,03

Таблиця 2. Хімічний склад золи вуглистих глин

Компоненти	Тугоплавкі і вогнетривкі золи, %	Легкоплавкі і плавкі золи, %
SiO ₂	43,2-66,8	15,1-45,3
Al ₂ O ₃	22,5-38,9	5,6-28,0
TiO ₂	0,8-1,2	0,6-2,7
Fe ₂ O ₃	0,8-5,7	3,9-13,0
CaO	0,3-1,4	8,8-30,3
SO ₃	5,5-11,0	7,1-23,4
MgO	0,1-0,9	1,5-4,7

Вміст великої кількості SiO₂ в золах пов'язаний з кварцом, присутність значної кількості оксидів заліза пояснюється наявністю в них піриту як в розсіяному стані, так і у вигляді окремих конкрецій. Підвищений вміст в золах CaO, Al₂O₃ обумовлене присутністю гіпсу, каолініту [4].

При цьому, зола бурого вугілля і вуглистих глин в межах того або іншого родовища має різний хімічний склад і зміст компонентів в ній і коливається в досить широких межах [5]. Температура плавлення вогнетривких зол складає – 1670-1770 °С, тугоплавких зол – 1380-1495 °С, легкоплавких і плавких зол – 1180-1300 °С.

Наприклад, в роботі [6] вказується, що зв'язування гумінових кислот (компонент органічної маси бурого вугілля якій становить від 55 до 85% вагових від органічної маси) з каолінітом в основному відбувається за рахунок неспецифічної адсорбції, але можливе також і специфічна адсорбція між позитивно зарядженими центрами каолініту і карбоксильними групами гумінової кислоти. У публікації [7] вказано, що гумінові речовини адсорбуються каолінітом переважно за рахунок гідрофобного зв'язування. У роботі [8] показано, що при малих заповненнях поверхні адсорбенту

молекулами поліелектролітів взаємодія здійснюється по механізму активованої хемосорбції, при великих – по механізму фізичної адсорбції, що призводить до кластерно-матричного розподілу мінералорганічних з'єднань на поверхні.

3. Викладення основного матеріалу

Варто відмітити, що в процесі термічної обробки, молекула гумінової кислоти починає руйнуватися з відщепленням функціональних груп і її сорбційні властивості слабшають [9]. А після обробки бурого вугілля при температурі 400 °С і більше, вміст гумінових кислот у вугільній речовині не спостерігається.

Отже, враховуючи розрив лабільних зв'язків, зміни пористої структури і інших фізичних властивостей, буре вугілля після теплової обробки цілком може бути придатне для подальшої стадії розділення органічною і мінеральною частин.

Так, в роботі [10] проводилися дослідження з метою порівняння енерговитрат при різних способах дроблення вугілля і напівкоксу. Причому досліджувався напівкокс, отриманий при температурах 450 (ПК 450) і 525 (ПК 525) С. Крім того, вивчалася збагачуваність отриманих продуктів по зольності. Схема сепарації і результати представлені нижче (рис.1).

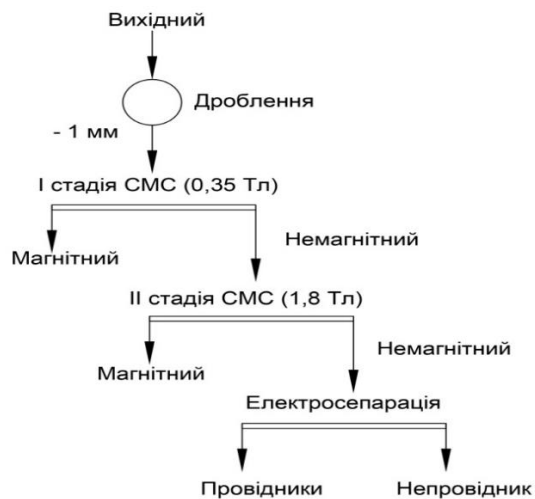


Рисунок 1. Схема проведення аналізів по збагачуваності вугілля і напівкоксу

Технологічні показники дослідів по збагаченню вугілля і напівкоксу приведені в табл. 3.

Таблиця 3. Технологічні показники дослідів по збагаченню вугілля і напівкоксу

Продукт	Вихід %			Зольність %			Витягання золи %		
	Вихід-ний	ПК-450,0	ПК-525,0	Вихід-ний	ПК-450,0	ПК-525,0	Вихід-ний	ПК-450,0	ПК-525,0
Магнітний 1	1,5	8,1	10,0	43,6	70,3	75,2	1,6	11,4	15,4
Магнітний 2	34,6	51,0	49,4	78,7	67,7	69,2	66,8	69,1	69,7
Провідник	17,1	11,1	12,7	35,3	19,0	14,3	14,8	4,2	3,7
Непровідник	46,8	29,9	27,9	14,6	25,6	19,5	16,8	15,3	11,1
Початковий	100,0	100	100	40,8	50,0	49,0	100	100	100

Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки:

1) напівкоксування вугілля істотно посилює магнітні властивості мінеральної складової, що дозволяє ефективніше витягати її методами магнітної сепарації.

2) напівкоксування при більш високій температурі (525 °C) дозволяє підвищити витягання зольної фракції в сумарний магнітний продукт з 80,5 до 85,1 % при порівнянних виходах, у зв'язку з чим даний режим можна визнати оптимальним;

3) електросепарація напівкоксу є недостатньо ефективним методом його збагачення.

Співробітниками НПК «Механобр-техніка» і ОП «Центр Коваля» АТ «УХІН» [11] проведені порівняльні дослідження по сухому збагаченню вугілля різної стадії метаморфізму (буре вугілля, кам'яне вугілля, антрацит) до і після термічної обробки. Термічна модифікація вугілля без доступу повітря дозволяє скоротити питому зольність в 1,3-1,6 разу на одиницю теплоти згорання, тобто зменшити утворення золи і шлаку при спалюванні [12]. Підтверджено, що високоінтенсивна магнітна і електростатична сепарації є продуктивними сухими методами збагачення тонкозернистого високозольного вугілля. Ефективність застосування цих методів для виділення мінеральної фракції зростає після піролізу вугілля різної стадії метаморфізму [13].

У роботі [14] представлена технологія збагачення термообробленого подрібненого бурого вугілля Кансько-Ачинського басейну з використанням ефектів трибозарядки часток вугілля, вихрового розділення димових газів, насичених термообробленим подрібненим бурим вугіллям, і електромагніто-імпульсної дії. Запропонована технологія базується на експериментальних даних попередніх випробувань по збагаченню термообробленого подрібненого бурого вугілля.

ЗАТ "КОМПОМАШ-ПЕК" у 2012 р. виконали дослідно-промисловий комплекс устаткування для швидкісної термообробки бурого вугілля, що знижує вологість і підвищує теплоту згорання. Підвищення теплоти згорання бурого вугілля відбувається за рахунок теплового удару, сприяючого деструкції з переважним утворенням низькомолекулярних кисневмісних сполук (H_2O , CO_2 , CO та ін.) [15]. При цьому відбувається контрольоване видалення вологи і зниження вмісту летких речовин. Відзначається, що отримуване термооброблене, подрібнене буре вугілля в гарячому стані – хороший продукт для збагачення зі значним зниженням змісту мінеральної складової. ЗАТ "КОМПОМАШ-ПЕК" декларує, що досягли показників зольності обробленого вугілля 1%, а сірки – 0,5%, що має вкрай низький коефіцієнт витягання органічної маси з початкової сировини, тобто великі втрати.

Проте, розуміння зміни властивостей термообробленого бурого вугілля і роботи інших дослідників вказують що збагачення (зниження мінеральної частини бурого вугілля) теоретично і технічно можливо.

Тому, термічно оброблене вугілля необхідно піддати седиментації для з'ясування теплоенергетичного потенціалу, а також гідравлічній сепарації (гідрокласифікації) для розділення мінеральних часток за рівнопадинням.

Так само була виконана перевірка за електричним методом збагачення вживаної для дрібнодисперсних сипких матеріалів.

За характером електричного поля розрізняють:

- збагачення в електростатичному полі;
- збагачення в полі коронного розряду;
- збагачення в комбінованому коронно-електростатичному полі.

Принцип дії при електричному збагаченні визначається співвідношенням між електричними і механічними силами (гравітаційна сила, відцентрова сила і сила опору середовища, сили молекулярного зчеплення часток між собою і з електродами), що діють на них (рис.2).

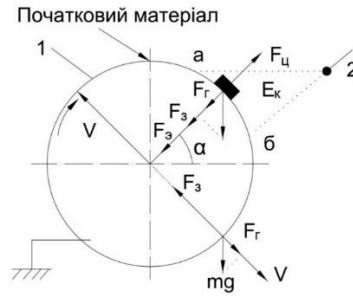


Рисунок 2. Векторна діаграма сил, що діють на частки у барабанних коронних сепараторах: 1 – осаджуючий електрод; 2 – коронуючий електрод; а, б – зона іонізації

У сепараторі матеріал подається безпосередньо на осаджуючий електрод, що обертається, і рухається криволінійно. На осаджуючому електроді в зоні іонізації частку утримує електрична кулонівська сила F_e і сила дзеркального відображення $F_{\partial 3}$. Відриває частку від електроду відцентрова сила F_u .

Нормальна складова гравітаційної сили F_2 може або утримувати частку на осаджуючому електроді (у верхній його чверті), або відривати (у нижній чверті електроду) залежно від кута повороту барабана α .

Результуюча сила F в зоні іонізації, що визначає траєкторію руху часток, є векторною сумою основних взаємодіючих сил:

$$F = F_e + F_{\partial 3} - F_u + F_2$$

Частка утримується на осаджуючому електроді при $F > 0$; якщо $F < 0$, частка відриватиметься від нього. Чим вище електропровідність часток, тим більше буде швидкість розрядки часток, менше рівноважний заряд і, отже, менше сили F_e і $F_{\partial 3}$, що утримують частку на електроді.

Після виходу частки із зони іонізації (після точки б), тобто з електричного поля, електрична кулонівська сила F_e перестане діяти. На електроді частку утримуватиме тільки сила дзеркального відображення $F_{\partial 3}$, а механічні сили (відцентрова і нормальна складова гравітаційної сили) відриватимуть їх від електроду. Результуюча сила при цьому визначиться рівністю:

$$F = F_{\partial 3} - F_u - F_2.$$

Враховуючи дослідження інших колективів, на нашу думку, потенційно приємними для розділення мінеральної і органічної термообробленого бурого вугілля являються сепаратори принцип дії яких ґрунтований на полі коронного розряду і в комбінованому коронно-електростатичному полі.

У першому випадку, в електричному барабанному сепараторі (коронному) різниця в зарядах створюється в результаті їх іонізації, з одночасною розрядкою при зіткненні із заземленим електродом. Сепаратор складається з металевого заземленого барабана, що обертається, і загостреного електроду або системи з декількох електродів, на які подається висока напруга, негативного знаку (рис. 3).

Електризатор і сепаруюча частина поєднані в одному вузлі машини. Мінерали заряджаються у верхній зоні **ab** міжелектродного проміжку, де придбавають однойменні електричні заряди в результаті бомбардування газовими іонами.

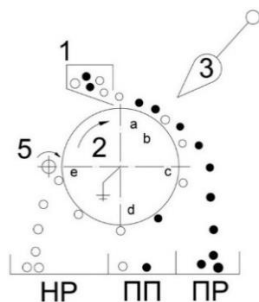


Рисунок 3. Принципова схема коронного сепаратора : 1 – бункер; 2 – заряджений або заземлений барабан; 3 – загострений електрод; 4 – циліндричний електрод; 5 – пристрій для очищення барабана; НР – приймач для непровідників; ПП – те ж, для промпродукту; ПР – те ж, для провідників

Різноманітні заряджені частки розділяються в нижніх зонах. У зоні *bc* створюється різниця у величинах і знаках зарядів. Непровідні частки завдяки залишковому заряду утримуються на поверхні барабана аж до точки *e* і потрапляють у бункер НР. Частки, що проводять, швидко розряджаються і, придбаваючи заряд, однойменний із зарядом барабана, відштовхуються від нього на ділянці *cd*; напівпровідники і зростки мінералів концентруються в середньому приймачі ПП.

Коронно-електростатичний сепаратор для розділення мінералів по електропровідності має додатковий циліндричний електрод, на який подається така ж напруга, як і на коронуючий електрод. Радіус кривизни циліндричного електроду значно більше, ніж коронуючого, але менше радіусу заземленого барабана (рис. 4). Через це між барабаном і електродом створюється нерівномірне електростатичне поле постійної полярності, тому в робочій зоні два поля (електричне поле коронного розряду і електростатичне). Утворення зарядів на частках мінералів шляхом іонізації відбувається в зоні *abc*. Створення в робочій зоні додаткового нерівномірного поля збільшує відносну роль пондеромоторних сил, сприяючи ранньому відхиленню провідних частинок від барабана. Частки діелектриків за інших рівних умов утримуються на більшій ділянці периметра барабана, внаслідок чого збільшується різниця в траєкторіях провідних і непровідних часток.

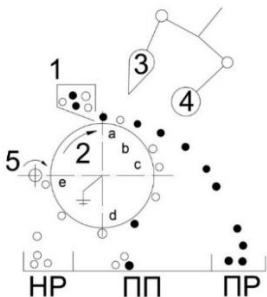


Рисунок 4. Принципова схема коронно-електростатичний сепаратора

Найбільший інтерес представляє електрична сепарація в полі коронного розряду, яка здійснювалася на лабораторному сепараторі ПС- 1 при напрузі на електродах до 21 кВ і обробці термообробленого вугілля при температурі 500 °С. Результати сепарації термічно обробленого бурого вугілля приведені в табл. 4.

Таблиця 4. Параметри сепарації термічно обробленого бурого вугілля

Операція	Концентрат		Відходи	
	Вихід%	Зольність%	Вихід%	Зольність%
Початковий продукт	100,00	50,2	-	-
Електрична сепарація	29,1+34,3*	31,4 37,8*	36,6	76,65
Магнітна сепарація	47,0	17,72	16,4	83,9

Примітка: * – промпродукт

4. Висновки

Дослідження вказують, що вища теплотворна здатність концентрату складає близько 7200-7500 ккал/кг на абсолютно суху речовину.

Враховуючи, що для наступного агломерування концентрату цілком можливо добавка водного розчину едальної речовини, робоча теплота згорання концентрату термообробленого бурого вугілля очікується на рівні 4500-5300 ккал/кг, в залежності від інших параметрів вугілля.

Література

1. Belov, O., Shustov, O., Adamchuk, A., & Hladun, O. (2018). Complex processing of brown coal in Ukraine: history, experience, practice, prospects. *Solid State Phenomena*, (277), 251-268. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.251>
2. Babets, Y. K., Bielov, O. P., Shustov, O. O., Barna, T. V., & Adamchuk, A. A. (2019). The development of technological solutions on mining and processing brown coal to improve its quality. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 36-44. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/6>
3. Shustov, O. O., Bielov, O. P., Perkova, T. I., & Adamchuk, A. A. (2018). Substantiation of the ways to use lignite concerning the integrated development of lignite deposits of Ukraine. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (3), 5-13. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-3/6>
4. 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>
5. 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>
6. Perelomov, L. V., Chilachava, K. B., Shvykin, A. Y., & Atroshchenko, Y. M. (2017). Vliyanie organicheskikh veshchestv gumusa na pogloshchenie tyazhelykh metallov glinistymi mineralami. *Agrokimiya*, (2), 89-96.
7. Balcke, G. U., Kulikova, N. A., Hesse, S., Kopinke, F. D., Perminova, I. V., & Frimmel, F. H. (2002). Adsorption of humic substances onto kaolin clay related to their structural features. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 1805-1812.
8. Kurochkina, G. N., & Pinskiy, D. L. (2010). Vliyanie predadsorbirovannykh polielektrolitov na gidrofil'no-gidrofobnye svoystva sinteticheskikh alyumosilikatov. *Zhurn. Fiz. Khimii*, 84(1), 87-96.
9. Falshtynskiy, V., Dychkovskiy, R., Khomenko, O., & Kononenko, M. (2020). On the formation of a mine-based energy resource complex. *E3S Web of Conferences*, (201), 01020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101020>
10. Gerasimov, A. M., & Dmitriev, S. V. (2016). A combined technology of dry beneficiation of coal. *Obogashchenie Rud*, (6), 9-13. <https://doi.org/10.17580/or.2016.06.02>
11. Arsent'yev, V. A., Gerasimov, A. M., Dmitriev, S. V., Mezenin, A. O., & Strakhov, V. M. (2017). Novyy podkhod k pererabotke ugley razlichnoy stadii metamorfizma. *Koks i Khimiya*, (12), 26-30.

12. Dychkovskiy, R., Shavarskiy, J., Cabana, E. C., & Smoliński, A. (2019). Characteristic of Possible Obtained Products during the well Underground Coal Gasification. *Solid State Phenomena*, (291), 52-62. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.291.52>
13. Buzlyo, V., Pavlychenko, A., Borysovska, O., & Saveliev, D. (2019). Investigation of processes of rocks deformation and the earth's surface subsidence during underground coal mining. *E3S Web of Conferences*, (123). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301050>
14. Moiseev, V. A., Andrienko, V. G., Gorlov, E. G., Donchenko, V. A., Zelinskiy, R. V., Makotrenko, N. A., & Mitrofanov, N. I. (2015). Obogashchenie termoobrabotannogo izmel'chennogo burogo uglya. *Khimiya Tverdogo Topliva*, (6), 55-58. <https://doi.org/10.7868/S0023117715060079>
15. *Sostoyanie i perspektivy kompleksnogo ispol'zovaniya tverdykh goryuchikh iskopaemykh. Yubil. sb. tr. IGI.* (2011). NTK Trek.