

Башлій Сергій Вікторович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0002-6134-4849

Коваленко Віктор Леонідович, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0001-5950-4412

Артемчук Віктор Васильович, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0002-6056-5344

Левченко Сергій Андрійович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0001-6477-2825

Воденнікова Оксана Сергіївна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0003-0496-5435

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕРМІЧНОЇ АКТИВАЦІЇ БОКСИТІВ

Розглянуто сучасний стан та питання зниження енергетичних витрат і собівартості виготовленої продукції за рахунок вдосконалення технологій у сфері видобутку глинозему та виробництва алюмінію. Наведено можливість використання генераторного газу для опалювання трубчатих обертових печей під час випалу бокситів. Запропоновано технологію застосування генераторного газу, якого видобувають з дешевої біомаси (як основного джерела для газифікації на відміну від рідких видів палива), а також дає змогу вирішити низку суміжних питань, а саме утилізацію деревних відходів, відходів сільськогосподарського виробництва, бурого вугілля та ін. Описано фізичне моделювання процесу випалу низькоякісної алюмінійвмісної сировини у трубчатих обертових печах за її переробки способом «термохімія-Байер». Виконано аналітичні дослідження температурного режиму процесу термічної активації низькоякісного бокситу та описано фізико-хімічні перетворення матеріалу на кожній стадії експерименту. Розроблено рекомендації щодо модернізації системи опалення трубчастої обертової печі під час термічної активації бокситів. Розглянуто можливість переведення опалення печі з природного газу на альтернативне паливо – генераторний синтез-газ. Доведено економічну доцільність запропонованої модернізації.

Ключові слова: боксити, трубчаста обертова піч, система опалювання, випал, термічна активація, теоретична температура горіння, коефіцієнт дисоціації

Вступ. Питання зниження енергетичних витрат і собівартості виробленої продукції за рахунок вдосконалення технологій у сфері видобутку глинозему та виробництва алюмінію на сьогоднішній день набуває першочергової уваги через постійне зростання конкуренції закордонних виробників. Енергетичне споживання вітчизняних заводів у сім разів вище ніж для зарубіжних підприємств [1]. Модернізація глиноземного виробництва є можливою за рахунок замінювання традиційного палива (вугілля, мазуту, природного газу), що використовують для процесів спікання, випалу та термічної активації бокситів на більш дешевше паливо. Вибірання найбільш раціонального енергоносія в цій сфері виробництва вирішує проблему не тільки зменшення матеріалоемності, але й раціонального використання різних видів палива.

Аналіз досягнень. У роботі [2] пропонують як технологічне паливо використовувати модифіковане буре вугілля з додаванням важких нафтових залишків, що дає змогу збільшити його калорійність за рівних значень зольності та вмісту летких речовин.

Ще одним напрямом є застосування як палива низькокалорійного генераторного газу [3]. На сьогодні цей напрям не набув широкого поширення через значну

металоемність обладнання, малу продуктивність пристроїв, складність контролю за процесом виробництва та подальшого розподілу газу споживачам. Проте, починаючи з 2014 р. спостерігають тенденцію щодо зниження вартості газогенерації та світові виробники обладнання для виробництва генераторного газу досягли позитивного економічного ефекту під час використання процесу газифікації.

Очевидною перевагою застосування генераторного газу є дешевизна біомаси як основного джерела для газифікації на відміну від рідких видів палива. Окрім того, така технологія дає змогу вирішити низку суміжних питань: утилізацію деревних відходів, відходів сільськогосподарських виробництв і бурого вугілля, а для районів, що не мають доступу до природного газу, газифікація є найбільш раціональним економічно ефективним способом одержання енергії [4].

Як вихідну сировину для процесу газифікації можна використовувати різноманітні матеріали, серед яких є присутнім і небезпечні компоненти, наприклад, пластикові відходи, але після відповідної підготовки їх застосування в даному процесі стає можливим. Також, існує можливість одночасного використання різних видів вихідної сировини за так званого змішаного завантаження реактора або створення комбінованого палива, що призводить до значного зниження собівартості та є економічно виправданим для заміщення природного газу. Розрахункова економія від такого впровадження становить близько 50% [5].

Калорійності генераторного газу залежить від типу вихідної сировини та становить приблизно 7,0 МДж/м³, що значно поступається калорійності природного газу (32...33 МДж/м³), проте з огляду на необхідну кількість окислювача для створення газоповітряної суміші (під час спалювання природного газу потрібно дев'ять частин повітря, а генераторного газу ~ дві частини), виходить, що газоповітряні суміші можуть бути взаємозамінними.

Гідравлічні режими роботи установок, що працюють на генераторному та природному газі збігаються, а сумарний обсяг продуктів згоряння залишається практично незмінним. Проте через низьку калорійність генераторного газу слід відповідно збільшувати кількість пальників для забезпечення необхідної калорійності палива для реалізації процесу.

Особливе значення під час проектування процесів з використанням низькокалорійного палива має створення печей попередньої термічної обробки на рудниках глиноземної сировини, що призведе до зниження транспортних витрат за рахунок видалення вологи та газів з вихідної сировини.

Постановка завдання. З огляду на відносно невелику калорійність генераторного газу необхідно було вивчити процес його згоряння в умовах виконання стадії термічної активації низькоякісної алюмінієвмісної сировини у трубчастих обертових печах під час її переробки за способом «термохімія-Байер».

Головна частина досліджень. Було виконано гранулометричний аналіз вихідного бокситу (табл. 1), після чого було підготовлено десять наважок з пропорційним складом для вивчення залежності насипної щільності бокситу від температури випалу (табл. 2). Значення насипної щільності визначали за допомогою приладу волюмометрії [6].

Таблиця 1 – Фракційний склад вихідного бокситу

| Розмір частинок, мм | -0,25 | +0,25...-0,50 | +0,50...-1 | +1...-2 | +2...-3 | +3...-7 | +7 |
|---------------------|-------|---------------|------------|---------|---------|---------|-----|
| Вихід класу, % | 11,0 | 15,0 | 7,8 | 25,0 | 15,4 | 24,1 | 1,6 |

Таблиця 2 – Насипна щільність бокситу, ρ за різної температури T , К

| T , К | 298 | 473 | 593 | 673 | 773 | 873 | 973 | 1099 | 1173 | 1273 |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ρ , т/м ³ | 1,36 | 1,36 | 1,33 | 1,31 | 1,31 | 1,26 | 1,26 | 1,27 | 1,27 | 1,31 |

Змінювання насипної щільності бокситу під час спікання має складний характер, що можна пояснити особливостями, характерними для кожної зони печі: для зони сушіння – випаровуванням зовнішньої вологи, для зони підігрівання – видаленням кристалогідратної вологи та початковим розкладанням мінералів, таких як беміт і діаспор, для зони кальцинації – розкладанням головних кремнійвмісних мінералів (каолініту, шамозиту), окисленням двовалентних форм заліза, що призводить до утворення інших сполук.

Хімічний склад вихідного бокситу вивчали за допомогою растрової електронної мікроскопії та рентгеноспектрального мікроаналізу (РЕМ і РСМА) (табл. 3).

Таблиця 3 – Хімічний склад досліджених зразків бокситів

| | | | | | | | |
|-----------|---------|-----------|-------|---------|-------|-------|------------|
| Al_2O_3 | SiO_2 | Fe_2O_3 | FeO | TiO_2 | CaO | впп | μ_{Si} |
| 42,10 | 13,54 | 21,04 | 2,40 | 2,27 | 0,34 | 13,70 | 3,11 |

Для моделювання процесів горіння у трубчастій обертовій печі обрано генераторний газ, одержаний зі сланцю складу, що подано у табл. 4.

Таблиця 4 – Склад робочого генераторного палива, %

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------|------|--------|--------|-------|-------|--------|----------|----------|-------------|-------------|----------|----------|--------|
| H_2 | CO | CO_2 | H_2S | O_2 | N_2 | CH_4 | C_2H_6 | C_3H_8 | C_4H_{10} | C_5H_{12} | C_2H_4 | C_2H_2 | H_2O |
| 8,2 | 7,6 | 15,0 | 0,8 | 1,1 | 63,1 | 2,5 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 1,2 |

Без врахування дисоціації двооксиду вуглецю (CO_2) та водяної пари (H_2O) продукти горіння мають склад, що подано у табл. 5.

Таблиця 5 – Склад продуктів горіння без врахування дисоціації CO_2 та H_2O

| | | | | | | |
|--|--------|--------|-------|-------|--------|------------|
| Хімічний склад, % | CO_2 | H_2O | N_2 | O_2 | SO_2 | $\sum V_i$ |
| Кількість продуктів горіння, m^3/m^3 | 0,30 | 0,21 | 1,45 | 0,01 | 0,01 | 1,98 |
| Вміст, % | 15,20 | 10,60 | 73,30 | 0,50 | 0,40 | 100 |
| Вміст, частка | 0,152 | 0,106 | 0,733 | 0,005 | 0,004 | 1,0 |

Основні розрахункові параметри процесу горіння наведено у табл. 6.

Таблиця 6 – Розрахункові параметри процесу горіння

| | |
|--|----------|
| Хімічний склад | Значення |
| Калорійність Q_i^d , МДж/ m^3 | 4,44 |
| Коефіцієнт надлишку повітря, α | 1,05 |
| Теоретична кількість повітря $L_{теор}$, m^3/m^3 | 1,05 |
| Кількість газоподібних продуктів горіння $V_{г}$, m^3/m^3 | 1,98 |
| Калориметрична температура, К | 1675 |

Склад продуктів згоряння за дисоціації CO_2 та H_2O має вигляд (табл. 7).

Таблиця 7 – Склад продуктів горіння за дисоціації CO_2 та H_2O

| | |
|--------|------------------------------|
| CO_2 | $0,151 - (1 - x)$ |
| CO_2 | $0,151 - (1 - x)$ |
| CO | $0,151 x$ |
| H_2O | $0,106 - (1 - y)$ |
| H_2 | $0,106 y$ |
| O_2 | $0,076 x + 0,053 y + 0,0053$ |
| N_2 | 0,733 |
| SO_2 | 0,004 |

З огляду на те, що калориметрична температура горіння є практично недосяжною через витрати теплової енергії на часткову дисоціацію продуктів горіння, слід розрахувати теоретичну температуру або температуру продуктів горіння палива за часткової дисоціації двооксиду вуглецю та водяної пари [9]. Для визначення теоретичної температури процесу горіння, слід враховувати, що у складі продуктів горіння присутні не тільки CO_2 і H_2O , а і O_2 , CO та H_2 . При цьому повинна встановитися рівновага (рис. 1):

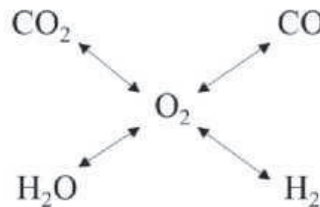


Рисунок 1 – Динамічна рівновага між основними частинами

Отже, під час вирішення задачі слід взяти до уваги наявність трьох невідомих: температури, ступеня дисоціації двооксиду вуглецю та пари води, яким відповідають три рівняння (1):

$$Q_n^p = T \cdot \sum V_i \cdot C_i ; \quad (1)$$

$$\lg K_1 = \frac{29250}{T} - 2,5 \lg T - 1,24 ; \quad (2)$$

$$\lg K_2 = \frac{25000}{T} - 2,5 \lg T + 2,68 . \quad (3)$$

Вирішення системи рівнянь (1)-(3) може бути досягнуто графо-аналітично способом, запропонованим Н.С. Курнаковим. Приймаючи різні значення коефіцієнта дисоціації, визначають які відповідають певному значенню температури продуктів горіння. За отриманими точками будують залежність в координатах «ступінь дисоціації – температура». Потім, задаючись значеннями температури, з рівняння рівноваги визначають значення коефіцієнтів дисоціації. Перетин двох кривих дає значення температури та ступеня дисоціації, що задовольняють системі рівнянь [9; 10].

Авторами запропоновано аналітичний метод розрахунку теоретичної температури горіння:



Сумісне розглядання реакцій (4) і (5) дає змогу записати



Константи рівноваги реакцій (4) і (5) дорівнюють

$$K_1 = \frac{(CO_2)^2}{(CO)^2 \cdot (O_2)} = \frac{(1-x)^2 \cdot (1+0,5CO_2 \cdot x + 0,5H_2O \cdot y)}{x^2 \cdot (0,5CO_2 \cdot x + 0,5H_2O \cdot y + O_2)} \quad (7)$$

$$K_2 = \frac{(CO) \cdot (H_2O)}{(CO_2) \cdot (H_2)} = \frac{x \cdot (1-y)}{(1-x) \cdot y} \Rightarrow y = \frac{x}{K_3 \cdot (1-x) + x} \quad (8)$$

Теоретичну температуру процесу горіння обчислюють за формулою

$$T = \frac{i_0}{\sum V_i \cdot a_i + 0,5b_i \cdot (T + 273) + \frac{\bar{c}_i}{273T}} , \quad (9)$$

де i_0 – тепломісткість продуктів горіння, кДж/м³; c_i – середня теплоємність продуктів горіння в інтервалі температур від 273 К до T К, кДж/(м³К); $\bar{c}_i = a_i + 0,5b_i \cdot (T + 273) + \frac{c_i}{273T}$; a_i, b_i, c_i – коефіцієнти.

Вирішення системи нелінійних рівнянь (1)-(3) з урахуванням рівнянь (7)-(8) здійснюють за допомогою методу послідовних наближень. При цьому вводять нову величину z і складають систему рівнянь, що мають ознаку збіжності.

$$\begin{cases} z = \frac{K_1 \cdot x^2}{(1-x)^2} = \frac{(1+0,5CO_2 \cdot x + 0,5H_2O \cdot y)}{(0,5CO_2 \cdot x + 0,5H_2O \cdot y + O_2)} \Rightarrow x = \frac{-z \pm \sqrt{K_1 \cdot z}}{K_1 - z} \\ y = \frac{x}{K_3 \cdot (1-x) + x} \end{cases} \quad (10)$$

Задають температуру рівноваги 1675 К і за формулами (7) і (8) обчислюють значення K_1 і K_3 . Одержують $K_1 = 145,43 \cdot 10^6$, $K_3 = 4,91$. Приймають $x = 0,02$, тоді $y = 0,041$ $z = 0,1426 \cdot 10^3$.

Приймають $x = 0,99 \cdot 10^{-3}$, тоді $y = 0,0002$. $z = 0,1859 \cdot 10^3$.

Аналогічним чином змінюють значення x , доти, доки одержані значення y та z не співпадуть із заданими.

Одержані значення $x = 1,13 \cdot 10^{-3}$ і $y = 2,3 \cdot 10^{-3}$ використовують для розрахунків кількості продуктів горіння (об'ємні долі) та наводять у табл. 8.

Таблиця 8 – Склад продуктів горіння з урахуванням дисоціації CO_2 і H_2O

| Склад | Кількість, об'ємна доля |
|----------|-------------------------|
| CO_2 | 0,1511 |
| CO | $1,707 \cdot 10^{-4}$ |
| H_2O | 0,1061 |
| H_2 | $2,438 \cdot 10^{-5}$ |
| O_2 | 0,0054 |
| N_2 | 0,733 |
| SO_2 | 0,004 |
| Σ | 1,00 |

Висновки

1. Доведено принципову можливість застосування низькокалорійного синтез-газу в промислових печах для процесів спікання шихти, кальцинації глинозему та вапняку, що активує випал бокситу з позиції досягнення необхідного температурного режиму для зазначених процесів і відсутності зольного залишку за спалюванням газоподібного палива.

2. Для розрахунку температури процесу горіння палива, незалежно від його агрегатного стану складено систему нелінійних рівнянь, що володіють ознакою збіжності та дають змогу скористатися методом послідовних наближень.

3. Розроблено аналітичний алгоритм розрахунку трубчастої обертової печі для випалу низькоякісних бокситів, що дає змогу виконувати моделювання процесу термічної активації сировини за допомогою стандартних програмних пакетів (MS «Excel»).

Бібліографічний перелік

1. Дубовиков О.А., Бричкин В.Н., Николаева Н.В., Ромашев А.О. Исследование процесса термохимического обогащения бокситов Среднего Тимана. *Обогащение руд*. 2014. № 4. С. 14–18.

2. Нифонтов Ю.А., Лазарева В.В. Модифицирование технологического топлива при производстве глинозема. *Обогащение руд*. 2018. № 5. С. 29–32.
3. Копытов В.В. Газификация конденсированных топлив: ретроспективный обзор, современное состояние дел и перспективы развития. Москва : Инфра-Инженерия, 2012. 504 с.
4. Лямин, В.А. Газификация древесины. Москва : Лесная промышленность, 1969. 262 с.
5. Буянтуев С.Л., Шишулькин С.Ю., Старинский И.В., Кондратенко А.С., Хмелев А.Б., Базарсадаев Э.Ц. Экономическая оценка перевода твердотопливного отопительного котла на сжигание генераторного газа. *Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика*. 2015. С. 144–148.
6. ДСТУ ISO 3923-2: 2016 «Порошки металеві. Визначення насипної щільності. Частина 1. Метод використання воронки. Частина 2. Метод волюмометра Скотта». Режим доступа: <http://aquagroup.ru/normdocs/4842>
7. Диомидовский Д.А. *Металлургические печи цветной металлургии : учебное пособие*. Москва : Металлургия. 1970. 704 с.
8. Линчевский В.П. *Топливо и его сжигание*. Москва : Металлургия, 1969. 400 с.
9. Дубовиков О.А., Логинов Д.А., Тихонова А.Д. Переход на низкокачественное углеводородное топливо в процессе получения глинозема из бокситов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017. Выпуск 5–2. С. 214–230.
10. Сундуоров А.В., Дубовиков О.А., Рис А.Д., Бойцова О.А. Риск-ориентированный подход при первичной переработке и подготовке нефти. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019. № 7. С. 507–518.

References

1. Dubovikov O.A., Brichkin A.O., Nikolaeva N.V., Romashev A.O. Issledovanie protsessa termokhimicheskogo obogashcheniya boksitov Srednego Timana. *Obogashchenie Rud*: 2014. No 4. S. 14–18.
2. Nifontov Y.A., Lazareva V.V. Modifitsirovanie tehnologicheskogo topliva pri proizvodstve glinozema. *Obogashchenie Rud*. 2018. No 5. S. 29–32.
3. Kopitov V.V. Gazifikatsiya kondensirovannykh topliv: retrospektivnyy obzor, sovremennoe sostoyanie del i perspektivy razvitiya. Moskva: Infa-Inzheneriya, 2012. 504 s.
4. Lyamin V.A. Gazifikatsiya drevesiny. Moskva: Lesnaya promishlennost', 1967. 262 s.
5. Buyantuev S.D., Shishul'kin S.Y., Starinskiy I.V., Kondratenko A.S., Khmelev A.B., Basarsadayev E.Ts. Ekonomicheskaj otsenka perevoda tverdotoplivnogo otopitel'nogo kotla na szhiganye generatornogo gaza. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya. Fizika.*, 2015. S. 144–149.
6. DSTU ISO 3923-2: 2016 «Poroshki metalevi. Vznachennya nasionoy shilnosti. Chastyna 1. Metod vikoristannya voronky. Chastyna 2. Metod volyumometra. Rezhim dostupa: <http://aquagroup.ru/normdocs/4842>
7. Diomidovskiy D.A. *Metallurgicheskie pechi tsvetnoy metallurgii: uchebnoe posobie*. Moskva : Metallurgiya. 1970. 704 s.
8. Linchevskiy V.P. *Toplivo i ego szhiganie*. Moskva : Metallurgiya, 1969. 400 s.
9. Dubovikov O.A., Loginov D.A., Tikhno A.D. Perekhod na nizkokachestvennoe uglevodorodnoe toplovo v protsesse polucheniya glinozema iz boksitov. *Gornyy informatsinno-analiticheskij byuleten'*. 2017. Iss. 5–2. S. 214–230.
10. Sundurov A.V., Dubovikov O.A., Ris A.D., Boytsova O.A. Risk-orientirovannyu podkhod pri pervichnoy pererabotke i podgotovke nefi. *Gornyy informatsinno-analiticheskij byuleten'*. 2019. No 7. S. 507–518.

Bashliy Sergey, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university. ORCID: 0000-0002-6134-4849

Kovalenko Viktor, chief of department, professor, doctor of technical sciences, Zaporozhe national university. ORCID: 0000-0001-5950-4412

Artemchuk Viktor, professor, doctor of technical sciences, Zaporozhe national university. ORCID: 0000-0002-6056-5344

Levchenko Sergey, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university. ORCID: 0000-0001-6477-2825

Vodennikova Oksana, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university. ORCID: 0000-0003-0496-5435

INCREASE OF ENERGETICALLY EFFICIENCY FOR THERMAL ACTIVATION OF BAUXITES

The modern state and question of decline of power charges and mined-out unit cost is considered due to perfection of technologies in the sphere of booty and production of alumina and aluminium. Possibility of the use of generator gas, which is able to provide a deserving competitive base for the alternative, traditional types of fuel is presented. Technology of application of generator gas which is foremost obtained from cheap biological mass (as a basic source for gasification unlike the liquid kinds of fuel) is offered, and також allows to decide the row of contiguous questions: utilization of waste-woods, offcuts of agricultural productions, brown coal, rubber, but other A physical design is described during the lead through of full factor experiment in the conditions of realization of the stage of burning-out of bad quality table of contents of aluminium raw material at its processing on a method «Thermochemistry-Bayer». Analytical researches of temperature condition of process of the thermal activating of bad quality bauxite are conducted and physical and chemical transformations of material are described on every stage of experiment. It is created and a method and foot-pace algorithm of analytical calculation is described in detail of theoretical temperature of burning is created and described taking into account dissociation aquatic pairs and to carbon dioxide with application of method of successive approaching. It is developed recommendation for modernizations of the system of heating of tubular circulating stove for thermal activating bauxites. Possibility of passing of furnace on heating of natural gas is considered on an alternative fuel – generator synthesis-gas. Financial viability of the offered modernization is well-proven.

Keywords: bauxites, system of heating, burning-out, thermal activating, theoretical temperature of burning, coefficient of dissociation

Стаття надійшла: 05.04.2021 р.