

10. Олейник Т.А. Повышение качества бедных кусковых руд шахтной добычи Кривбасса методом отсадки / Т.А. Олейник, Л.В. Склад // Збагачення корисних копалин. – 2013. – Вип. 53(94). – С. 44-57.

11. Ніколасенко К.В. Технологічні рішення збагачення бідних гематитових руд штату Оріса (Індія), для отримання з них кондиційного концентрату / К.В. Ніколасенко, В.Д. Євтехов, В.В. Філенко, П.К. Ніколасенко // Вісник Криворізького національного університету. – 2013. – Вип. 34. – С. 111-114.

12. Пат. 26638 України, МПК U51C1/00. Спосіб збагачення залізородної сировини / Рева О.В., Євтехов В.Д., Ахкзов Ю.Л.– u200708203; заявл. 18.07.2007; опубл. 25.09.2007. Бюл. № 15,2007.

13. Пат. 87016 України, МПК C251C1/00. Спосіб збагачення залізородної сировини / Рева О.В., Євтехов В.Д., Ахкзов Ю.Л.– a200708201; заявл. 18.07.2007; опубл. 10.06.2009. Бюл. № 11.2009

Рукопис подано до редакції 25.03.24

УДК 669.054.83

С.Г. САВЕЛЬЄВ, д-р техн. наук, проф., Т.П. ЯРОШ, канд. техн. наук, доц.,
О.В. БАБАЄВСЬКА, М.М. КОНДРАТЕНКО, ст. викладачі,
Д.Ю. БАБОШКО, канд. техн. наук, доц.
Криворізький національний університет

АНАЛІЗ МЕТАЛУРГІЙНИХ МЕТОДІВ УТИЛІЗАЦІЇ ЧЕРВОНОГО ШЛАМУ

Відзначено різноманітність методів утилізації червоного шламу – побічного продукту глиноземного виробництва, світове накопичення якого неухильно збільшується, посилюючи негативний вплив на оточуюче природне середовище. Показано, що переважна більшість найбільш ефективних методів утилізації базується на поєднанні піро- та гідрометалургійних способів. Проаналізовано основні науково-практичні результати ряду досліджень металургійних методів утилізації червоного шламу, опублікованих у провідних фахових виданнях протягом кількох останніх років. Зроблено висновок про економічну доцільність комплексного вилучення з червоного шламу цінних металів – заліза, алюмінію, титану, скандію. Відзначено необхідність проведення дослідно-промислових випробувань технологій безвідходної переробки червоного шламу з урахуванням його характеристик.

Метою роботи є порівняльний аналіз металургійних методів утилізації червоного шламу з метою визначення розробок, найбільш перспективних для промислової реалізації.

Методи наукового дослідження. У роботі використані загальнологічні методи наукового дослідження – аналіз і синтез, аналогія, узагальнення.

Наукова новизна роботи. На основі проведеного аналізу встановлено, що найбільш ефективними методами металургійної переробки червоного шламу, які забезпечують найбільший ступінь вилучення металів, є такі, що в оптимальному співвідношенні поєднують процеси піро- і гідрометалургії при мінімальних витратах енергії та викидах шкідливих речовин в оточуюче середовище.

Практична значущість роботи полягає в розширенні уявлень щодо можливих напрямів вирішення проблеми масштабної утилізації червоного шламу, отриманні висновків, які дають необхідну науково-технічну інформацію для ефективного практичного застосування найбільш результативних методів металургійного використання червоного шламу та вказують перспективні шляхи продовження досліджень у цьому напрямку.

Результати роботи свідчать про те, що сучасний рівень розробок металургійних методів утилізації червоного шламу вже наблизився до положення, яке дозволяє впевнено визначати економічно ефективні, технологічно досконалі безвідходні прийоми переробки цієї цінної техногенної сировини. Широке промислове впровадження безвідходних металургійних методів утилізації червоного шламу не тільки зменшить собівартість виробництва глинозему і відповідно алюмінію, але й суттєво покращить екологічну ситуацію в районах розташування підприємств алюмінієвої промисловості.

Ключові слова: червоний шлам, утилізація, пірометалургія, гідрометалургія, технологія, відновлення, вилугування, ефективність.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-39-45

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Червоний шлам є побічним продуктом найбільш поширеного процесу промислового виробництва глинозему з бокситу за способом Байєра, а глинозем є сировиною для отримання алюмінію, другого за затребуваністю металу в світі після заліза. У зв'язку з характерними технологічними операціями гідрохімічного способу Байєра, який передбачає тонке подрібнення вихідної сировини та її подальшу обробку лужним розчином, на виході з процесу червоний шлам являє собою лужну (рН = 9-12) розбавлену (R = P : T = 8-10) пульпу червоного кольору, шкідливу для оточуючого середовища та здоров'я людини. Завдяки цим характеристикам, а також наявності в складі червоного шла-

му цінних металів – заліза, алюмінію, титану, скандію та ін.– питання його безпечної та ефективної утилізації є дуже актуальним.

Широкомасштабне промислове використання червоного шламу, світові запаси якого знаходяться на рівні 4 млрд т [1], здатне суттєво вплинути на розвиток не лише чорної та кольорової металургії, а й промисловості будівельних матеріалів, шляхового будівництва тощо. Але поки що зі 180 млн т червоного шламу, які щорічно утворюються, лише 3 % використовуються для отримання керамічної продукції. Тому останнім часом спостерігається збільшення кількості наукових досліджень, спрямованих на розробку ефективних металургійних процесів переробки червоного шламу, про що свідчить тематика публікацій, представлених у міжнародних «індексах цитування» – Scopus і Web of Science. Саме новітні матеріали, розміщені на найбільш авторитетній платформі Scopus впродовж останніх п'яти років, були використані при проведенні детального аналізу металургійних методів утилізації червоного шламу. Адже серед усіх можливих сфер його використання тільки металургійна галузь промисловості з її величезними виробничими потужностями здатна забезпечити не тільки переробку в повному обсязі червоного шламу поточного виробництва, але й поступову розробку раніше накопичених запасів цієї цінної техногенної сировини.

Аналіз досліджень і публікацій. Останнім часом у фахових закордонних виданнях було опубліковано ряд оглядових статей, присвячених проблемі утилізації червоних шламів методами піро- і гідрометалургії.

Докладний спеціалізований огляд технологій вилучення заліза з червоного шламу на підставі 61 публікації виконано в Університеті Цінхуа (Китай) [1]. З існуючих трьох основних процесів виробництва гідроксиду алюмінію – спікання, Байєра і комбінованого – було розглянуто використання червоного шламу, що утворюється при реалізації байєровського методу, яким виробляється 95 % гідроксиду алюмінію завдяки простоті процесу та низькому енергоспоживанню.

Стислі результати дослідження технології металургійного використання червоного шламу на підставі аналізу 165 публікацій викладено в роботі співробітників Південно-Східного університету (Китай) [2], мета якої полягала в з'ясуванні міри небезпечності червоного шламу шляхом вивчення його фізичних і хімічних властивостей. Кінцева ціль – на базі розгляду можливості використання червоного шламу в різних галузях, оцінюючи переваги та недоліки різних технологій, визначити найбільш здійснений підхід до комплексної та нешкідливої утилізації червоного шламу у великих масштабах.

Аналіз 3422-х журнальних статей, присвячених червоному шламу, розміщено в статті працівників трьох установ: компанії International Envirotech Limited, Південно-Китайського педагогічного університету (Китай) і Університету Дікіна, Бервуд (Австралія) [3]. Цю роботу проведено для оцінки доступності літератури з наступних аспектів дослідження червоного шламу: характеристика, обробка для мінімізації шкідливого впливу, відновлення цінних металів, застосування в оточуючому середовищі та використання в якості будівельних матеріалів.

Проблемам і можливостям використання процесу прямого відновлення-магнітної сепарації на основі вугілля для переробки відходів кольорової металургії з високим вмістом заліза присвячена стаття співробітників Центрального Південного університету (Китай) [4], для написання якої проаналізовано 107 літературних джерел.

Ціллю критичного огляду 147 публікацій, виконаного співробітниками Індійського технологічного інституту ІТІ-Руркі (Індія), була оцінка червоного шламу як поліметалічного джерела [5]. У статті представлено огляд лабораторних і пілотних досліджень, комерційних проєктів, використовуваних для вилучення заліза, алюмінію, титану, скандію та рідкоземельних металів з червоного шламу різного походження.

У статті співробітників Північно-Східного університету (Китай) на підставі аналізу 108 літературних джерел систематизовано стан досліджень з вторинної переробки цінних металів (алюмінію, заліза, натрію, титану, скандію, галію, ванадію та рідкоземельних металів) із червоних шламів за останні роки [6]. При цьому було порівняно переваги та недоліки різних процесів відновлення з урахуванням таких показників, як ефективність відновлення, енергоспоживання та вплив на довкілля.

Огляд світової практики переробки червоних шламів пірометалургійними способами виконано співробітниками Інституту металургії та матеріалознавства ім. О.О. Байкова РАН, Націо-

нального дослідницького технологічного університету «MICS», Президії РАН (РФ) [7]. При аналізі 91 джерела інформації розглянуто як способи низькотемпературного твердофазного відновлення за температур 1050-1200 °С з наступним відділенням заліза методом магнітної сепарації, так і високотемпературні процеси, що включають відновлювальну плавку за температур вище 1400 °С. Крім того, в роботі розглянуто способи вторинного використання одержуваних шлаків для вилучення глинозему, титану та рідкоземельних металів, а також процеси підготовки червоних шлаків: знезлучування, сушіння та згрудкування.

У статті співробітників Державної ключової лабораторії передової металургії та Пекінського науково-технологічного університету (Китай) [8], з посиланням на 94 літературні джерела інформації, розглядається великомасштабний і нешкідливий метод переробки червоного шламу з високим вмістом заліза, який включає вилучення заліза за допомогою пірометалургії з наступною утилізацією відходів для приготування в'язучих матеріалів.

Три аспекти комплексного використання червоного шламу розглянуто в роботі співробітників Центрального Південного університету (Китай) [9]: ефективне вилучення цінних компонентів, повне використання сировинного ресурсу та екологічна складова. Їх застосування при розробці нових технологій повинно забезпечувати ринкову конкурентоспроможність, захист навколишнього середовища й екологічний баланс.

Стисла характеристика представлених вище аналітичних статей, присвячених переважно металургійному напрямку утилізації червоного шламу, дає підставу поставити наступну задачу даної статті.

Постановка задачі. Завданням представленого дослідження є порівняльна аналітична оцінка піро- і гідрометалургійних методів утилізації червоного шламу на підставі новітніх публікацій останніх п'яти років з метою визначення напрямів розробок, найбільш перспективних для реалізації в промислових масштабах.

Викладення матеріалу та результати. Аналіз досліджень і розробок пірометалургійних методів утилізації червоного шламу представлено в роботах [10-16].

Сутність нової технології вилучення заліза з червоного шламу, розробленої співробітниками Південно-Західного університету науки і технологій, Ключової лабораторії радіоактивних і рідкісних розсіяних мінералів Міністерства землі та ресурсів [10] і Північно-Східного університету [11] (Китай), полягає в додаванні до шламу присадки та відновника з наступною сегрегаційною випал-магнітною сепарацією (рис. 1). Після збагачення отримано залізний концентрат (Fe 80,29 мас. %) при загальному вилученні заліза 92,08 %. Результати рентгенівської дифракції та скануючої електронної мікроскопії показали, що після сегрегаційного випалу гематит перетворився на нову фазу, що складалася в основному з металевого заліза та магнетиту.

Схожий процес вилучення заліза з червоного шламу досліджено співробітниками IT Roorkhee (Індія) [12]. Було з'ясовано, що стадія карбонізації сприяє вилученню лугу з червоного шламу у вигляді розчинного натрію алюмінату, який можна повторно використовувати в процесі Байєра. Тому процес попередньої карбонізації шламу з наступним первинним магнітним збагаченням перед відновлювальним випалом і подальшим вторинним магнітним збагаченням забезпечує оптимальні умови для вилучення заліза та є економічно ефективним з погляду питомої витрати відновника.

Технологію карботермічного відновлення для вилучення заліза та видалення натрію з червоного шламу досліджено також співробітниками Пекінського університету науки і технологій (Китай) і Вуллонгонгського університету (Австралія) [13]. При оптимальній температурі відновлення 1450 °С, основності 1,5 і часу відновлення 12 хв. ступінь металізації та видалення натрію досягають 96,63 і 90,62 % відповідно.

Дослідження основних факторів, що впливають на ефективність вилучення заліза з червоного шламу при відновлювальному випалі, виконано співробітниками Технологічного університету Шахруду за участю представника компанії Jajarm Alumina (Іран) [14]. Встановлено, що кра-

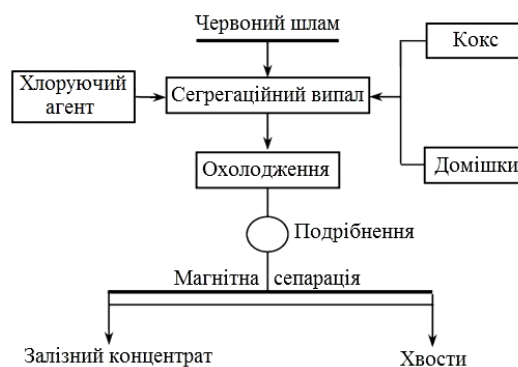


Рис. 1. Схема технологічного процесу випробування сегрегаційного випалу – магнітної сепарації

шим агрегатом для відновлення є трубчаста піч з аргонем, оптимальна температура і час випалу складають відповідно 1000 °C і 60 хв., напруженість магнітного поля дорівнює близько 1000 Гаус; за цих умов можна отримати концентрат магнітної сепарації з вилученням заліза на рівні 89,9 %.

Співробітниками Північно-Східного університету, Спільного національно-місцевого інженерно-дослідницького центру високоєфективних технологій розробки ресурсів тугоплавких залізних руд і ТОВ «Чанчунський інститут золотого дизайну» (Китай) запропоновано відновлення червоного шламу монооксидом вуглецю в псевдозрідженому шарі [15]. Результати експериментів показали, що за оптимальних умов процесу – температура відновлення 800 °C, концентрація CO 85 % і час відновлення 30 хв. – досягнуто ступінь металізації та ступінь відновлення на рівні 68,08 і 78,72 % відповідно. Попередньо відновлені таким чином матеріали можуть бути використані як сировина для відновної плавки в електропечах.

Фахівцями Уханьського університету науки та технологій і Ключової лабораторії з ефективного використання та агломерації металургійних мінеральних ресурсів Хубей (Китай) досліджено вплив залізної руди з високим вмістом марганцю на процес прямого відновлення високозалізного червоного шламу [16]. Під час випробувань змінювали такі параметри, як температура і час відновлення, масове співвідношення C/Fe і кількість заліза, що додавалася з рудою з високим вмістом марганцю. Результати показали, що ступінь металізації червоного шламу досягала 84,07 % при температурі 1150 °C, часі витримки 150 хв. і масовому співвідношенні C/Fe 2,0. За рахунок синергетичного ефекту відновлення червоного шламу в присутності високомарганцевого залізняку прискорювалось і ступінь металізації шихти збільшувалась до 93,52 %.

Варто відзначити, що, не зважаючи на високий ступінь вилучення заліза, описані технології відновного випалу червоного шламу не можна вважати цілком досконалими, оскільки вони спрямовані на витягання зі шламу тільки одного корисного компоненту – заліза, а отриманий при цьому супутній продукт потребує подальшої переробки.



Рис. 2. Блок-схема вилучення глинозему та оксиду заліза з червоного шламу

Аналіз досліджень і розробок гідрометалургійних методів утилізації червоного шламу представлено в роботах [17-21].

У результаті ступінчастого вилуговування основних цінних компонентів червоного шламу – оксидів заліза й алюмінію – з використанням соляної кислоти співробітники Іранського університету науки і технологій (Іран) отримали наступні результати [17]. На стадії попереднього вилуговування в оптимізованих умовах з використанням HCl (0,2 M) при кімнатній температурі протягом 2 год. видалено 89 % кальцію, що міститься в червоному шламі. Для селективного видалення твердого кремнезему залишок обробляли концентрованою HCl (3,0 M) при 95 °C, що приводило до розчинення заліза й алюмінію з ефективністю до 90 % (рис. 2). Використання методик FT-IR, BET, EDS, XRD, SEM і TEM дозволило встановити, що новоствореними продуктами при осадженні катіонів Fe³⁺ і Al³⁺ є нанорозмірний α-гематит і мезопористий γ-оксид алюмінію. Отже, дешевий червоний шлам був перетворений на дуже цінні нанорозмірні оксиди металів за нескладною технологією та при використанні дешевих реагентів. Більш того, цей метод генерує найменшу кількість відходів у процесі вилуговування, а всі реагенти можуть бути відновлені для подальшого використання, що робить цей метод перспективним.

Інтернаціональна команда науковців з університетів Угорщини, Іраку, В'єтнаму, Індії та Південної Кореї вивчала процес вилучення Sc як основного продукту та Fe як побічного продукту з угорського червоного шламу шляхом екст-

ракції розчинником (EP) з подальшим селективним виділенням Sc і Fe з фільтратів [18]. Для видалення заліза перед екстракцією застосовувалися піро- та гідрометалургійні методи. Запропоновано два екстрагенти на основі фосфорорганічних сполук: біс(2-етилгексил)фосфорна кислота (Д2ЕГФК) і трибутилфосфат (ТБФ). Результати показали, що EP з використанням діетилового ефіру та три-н-октиламіну (N235) ефективно екстрагує Fe(III) з фільтрату HCl у вигляді HFeCl_4 . Більше 97 % Sc було екстраговано екстрагентом Д2ЕГФК з концентрацією 0,05 моль/л. Після відгону органічної фази Д2ЕГФК отримували $\text{Sc}(\text{OH})_3$ у вигляді осаду. У системі ТБФ екстраговано 99 % Sc, концентрація екстрагенту – 12,5 об. %.

В процесі досліджень вилучення цінних компонентів з червоного шламу співробітників Університету Севільї (Іспанія) в якості агентів-вилуговувачів використовували воду, сірчану кислоту та гідроксид натрію [19] при різному співвідношенні L/S і часу контакту. З техніко-економічних та екологічних міркувань оптимальними умовами для вилучення цінних елементів з червоного шламу визнано: концентрація H_2SO_4 2 М, контакт впродовж 24 год., співвідношення L/S = 5. В цих умовах досягаються високі ступені вилуговування цінних елементів, таких як La (47,6 %) або V (11 %).

У роботі співробітників Федеральних університетів Пара та Ріо-де-Жанейро (Бразилія) представлено математичне моделювання й оцінено кінетичні параметри вилуговування червоного шламу з використанням алгоритму Метрополіса-Гастінгса методу Монте-Карло Марківських ланцюгів [20]. Червоний шлам, отриманий з регіону Амазонки в Бразилії, вилуговувався сірчаною кислотою концентрацією 20 і 30 об.% при 60, 80 і 90 °С. Під час вилуговування проби відбирали кожні 30 хв. і центрифугували для відокремлення фільтрату від концентрату. Математична модель кінетики вилуговування червоного шламу є системою пов'язаних диференціальних рівнянь і заснована на моделі ядра, що скорочується. Максимальне вилуговування оксидів заліза й алюмінію склало в середньому 96 і 91 % відповідно, тоді як максимальне вилучення титану в сірчаноокислий розчин не перевищило 26 %. Кінетика вилуговування оксидів заліза, титану й алюмінію мала середні значення порядку реакцій 1,52, 2,96 і 2,05 відповідно. Значення енергії активації варіювалися від 64 до 176 кДж/моль. Запропонована математична модель пройшла належну перевірку, що дозволило застосовувати її для оцінки кінетичних параметрів вилуговування інших хімічних елементів, присутніх у червоному шламі.

Співробітники Китайської академії наук і Куньмінського університету науки та технологій (Китай) запропонували спільну стратегію для алюмінієвої та чорної металургії, засновану на переробці червоного шламу гідрометалургійним методом [21]. За цією технологією шлам спочатку оброблявся розчином H_2SO_4 з отриманням катіонів Fe^{3+} і Al^{3+} і одночасним дослідженням численних факторів впливу на процес вилуговування. При подальшому фільтруванні пульпи отримували кек, основними компонентами якого були CaSO_4 , TiO_2 і SiO_2 , придатні для повторного використання як добавки при виробництві будівельних матеріалів. Після співосадження, поділу залізо- та алюмінійвмісних продуктів і прожарювання $\text{Fe}(\text{OH})_3$ отримували кінцевий продукт, вміст заліза в якому становив 58,01 %, що відповідало вимогам до сировини агломерацийного виробництва.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Наявність значної кількості публікацій, присвячених утилізації червоного шламу, як техногенної сировини для отримання цінних металів – заліза, алюмінію, титану, рідкоземельних металів тощо – вказує на надзвичайну актуальність проблеми безпечної й економічно ефективною масштабної переробки цього побічного продукту глиноземного виробництва, щорічне одержання якого складає приблизно 180 млн т., а світове накопичення перевищило 4 млрд т. Важливу роль в актуальності цього питання відіграє екологічна складова – шкідливий вплив червоного шламу на оточуюче середовище та здоров'я людини. Особливо активно дослідження з використанням сучасного обладнання в цьому напрямку проводяться в Китайській Народній Республіці, що можна пояснити накопиченням в цій країні значних обсягів червоного шламу, кількість яких перевищує 1,3 млрд т, у тому числі близько 520 млн т шламу з вмістом оксидів заліза понад 30 %.

Переважає більшість опублікованих матеріалів свідчить про ретельні дослідження пропонує ефективних методів металургійної переробки червоного шламу, що дає підстави вважати їх перспективними для дослідно-промислової перевірки та наступного впровадження у виробництво. У першу чергу це стосується пірометалургійних методів переробки червоного шламу, які відрізняються від гідрометалургійних більшою простотою та можливістю прискоре-

них темпів великомасштабної реалізації. Серед пірометалургійних способів найбільш перспективними представляються процеси, в яких обробка матеріалу здійснюється газоподібним відновником у псевдозрідженому шарі, що дозволяє скоротити час обробки, а також методи, що включають технологічні прийоми попередньої підготовки сировини та інтенсифікації процесу відновлення.

Гідрометалургійні технології є більш складними, але дозволяють отримати високу ступінь вилучення металів з червоного шламу. Найбільш ефективним слід вважати комплексний багатостадійний процес переробки червоного шламу, який оптимально поєднує піро- і гідрометалургійні стадії та забезпечує найменші енергетичні витрати і мінімальне забруднення навколишнього середовища.

Одним із напрямків подальших досліджень металургійної утилізації червоного шламу може бути більш детальне вивчення ефективності окремих технологічних прийомів комбінованого піро- та гідрометалургійного процесу з подальшим переходом на його комплексне випробування в умовах дослідно-промислового етапу роботи.

Список літератури

1. Iron Recovery Technology of Red Mud—A review. **Hao Kong, Tuo Zhou, Xinhua Yang, Yingli Gong, Man Zhang and Hairui Yang.** *Energies*. 2022, 15 (10), 3830; <https://doi.org/10.3390/en15103830>
2. Summary of Research Progress on Metallurgical Utilization Technology of Red Mud. **Li, X.-F., Zhang, T.-A., Lv, G.-Z., Wang, K., Wang, S.** *Minerals*, 13 (6), 737. 2023 <https://doi.org/10.3390/min13060737>
3. **Anyi Niu, Chuxia Lin.** Trends in research on characterization, treatment and valorization of hazardous red mud: A systematic review. *Journal of Environmental Management*. Volume 351, February 2024, 119660 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119660>
4. Application of coal-based direct reduction-magnetic separation process for recycling of high-iron-content non-ferrous metallurgical wastes: Challenges and opportunities. **Xianqing Xu, Zhengqi Guo, Deqing Zhu, Jian Pan, Congcong Yang, Siwei Li.** *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 183, March 2024, pp. 59-76. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.12.057>
5. **Shrey Agrawal, Nikhil Dhawan.** Evaluation of red mud as a polycrystalline source – A review. *Minerals Engineering* Volume 171, 1 September 2021, 107084. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107084>
6. Recovery of valuable metals from red mud: A comprehensive review. **Xiaolin Pan, Hongfei Wu, Zhongyang Lv, Haiyan Yu, Ganfeng Tu.** *Science of The Total Environment*. Volume 904, 15 December 2023, 166686. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969723053111>
7. Обзор мировой практики переработки красных шламов. Часть 1. Пирометаллургические способы. **Д.В. Зиневев, П.И. Грудинский, В.Г. Дюбанов и др.** Изв. вузов. Черная металлургия. 2018. Том 1, №11. – С. 843-858. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-11-843-858
8. The harmless and value-added utilization of red mud: Recovering iron from red mud by pyrometallurgy and preparing cementitious materials with its tailings. **Pengfei Wu, Xiaoming Liu, Zengqi Zhang, Chao Wei, Jie Wang, Jiarui Gu.** *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. Available online 21 November 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.11.038>
9. A Review on Comprehensive Utilization of Red Mud and Prospect Analysis. **Li Wang, Ning Sun, Honghu Tang and Wei Sun.** *Minerals*, 2019, 9 (6), 362; <https://doi.org/10.3390/min9060362>
10. A novel process for extraction of iron from a refractory red mud. **Wei Ding, Junhui Xiao, Yang Peng, Siyue Shen, Tao Chen, Kai Zou, Zhen Wang.** *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, 56(6), 2020, 125-136. DOI: 10.37190/ppmp/127319.
11. A novel process to fully utilize red mud based on low-calcium sintering. **Jiannan Pei, Xiaolin Pan, Yanming Zhang, Haiyan Yu, Ganfeng Tu.** *Jour. of Environmental Chem. Engin.* Vol. 9, Is. 6, December 2021, 106754 <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106754>.
12. **Shrey Agrawal, Veeranjayulu Rayapudi, Nikhil Dhawan.** Extraction of Iron values from Red mud. *Materials Today: Proceedings*. Volume 5, Issue 9, Part 1, 2018, Pages 17064-17072. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.113>.
13. Carbothermal reduction of red mud for iron extraction and sodium removal. **Huaixuan Feng, Xue-feng She, Xiaomin You, Guang-qing Zhang, Jing-song Wang and Qing-guo Xue.** *High Temperature Materials and Processes*. Volume 41 Issue 1. Published by De Gruyter June 28, 2022. <https://doi.org/10.1515/htmp-2022-0005>
14. **Nooshin Navi, Mohammad Karamoozian, Mohammadreza Khani.** Recovery of Iron from Bauxite Red Mud by Reduction Roasting Method. *Journal of Mining and Environment (JME)*, Vol. 14, No. 4, 2023, 1295-1305. DOI: 10.22044/jme.2023.12611.2291
15. An efficient and clean utilization technique for red mud based on fluidized bed carbon monoxide reduction. **Yaxiong An, Jianwen Yu, Nan Hu, Peng Gao, Yanjun Li, Yuexin Han.** *Advanced Powder Technology*, Volume 33, Issue 11, November 2022, 103828. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2022.103828>
16. Efficient improvement for the direct reduction of high-iron red mud by co-reduction with high-manganese iron ore. **Junying Wan, Tiejun Chen, Xianlin Zhou, Yanhong Luo, Wei Liu, Qicai Lu.** *Minerals Engineering*, Volume 174, 1 December 2021, 107024. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.10>
17. **Zahra Karimi & Ahmad Rahbar-Kelisham.** Efficient utilization of red mud waste via stepwise leaching to obtain α -hematite and mesoporous γ -alumina. *Scientific Reports*, volume 13, Article number: 8527 (2023) Cite this article <https://www.nature.com/articles/s41598-023-35753-w>

18. A selective hydrometallurgical method for scandium recovery from a real red mud leachate: A comparative study. **Salman, A.D., Juzsakova, T., Jalhoom, M.G., ... Nadda, A.K., Nguyen, D.D.** Environmental Pollution, Vol. 308, 1 September 2022, 119596. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119596>

19. Valorization of Bayer Red Mud in a Circular Economy Process: Valuable Metals Recovery and Further Brick Manufacture. **Leiva, C., Arroyo-Torralvo, F., Luna-Galiano, Y., ... Vilches, L.F., Fernández Pereira, C.** Processes, 2022, 10, 2367. <https://doi.org/10.3390/pr10112367>

20. Experimental study and mathematical modelling of red mud leaching: application of Bayesian techniques. **Viegas, B.M., Magalhães, E.M., Orlande, H.R.B., Estumano, D.C., Macêdo, E.N.** International Journal of Environmental Science and Technology, 2023, 20 (5), pp. 5533–5546. DOI: 10.3390/pr10112367 <https://www.researchgate.net/publication/365318991>

21. Red mud recycling by Fe and Al recovery through the hydrometallurgy method: a collaborative strategy for aluminum and iron industry. **Liu, X., Zou, Y., Geng, R., Li, B., Zhu, T.** Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30 (15), pp. 43377–43386.

Рукопис подано до редакції 29.03.24

УДК 669.162

Д.О. КАССИМ, д-р техн. наук, проф., Є.В. ЧУПРИНОВ, канд. техн. наук, доц.,
І. А. ЛЯХОВА, канд. техн. наук, доц., М.Г. КОРЕНКО, канд. техн. наук, доц.
Державний університет економіки і технологій

УЗАГАЛЬНЕННЯ МЕТОДИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОВОГО ПОТОКУ В ГОРНІ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ ПРИ ВДУВАННІ КОМБІНОВАНОГО ДУТТЯ

Мета. Головною метою даної роботи є вдосконалення контролю зміни енергетичних параметрів газового потоку в горні доменних печей та розподілу газового потоку за радіусом на підставі адаптації методики визначення комплексних показників оцінки потоків комбінованого дуття та горнового газу, з урахуванням технологічних особливостей доменної плавки при вдуванні комбінованого дуття.

Методи дослідження. У роботі використано сучасні методи дослідження, у тому числі математичне моделювання, методи математичної статистики для дослідження впливу запропонованих комплексних параметрів на перебіг доменної плавки при різних технологічних режимах роботи доменної печі корисним об'ємом 5000 м³.

Наукова новизна. Розроблено методичні рекомендації щодо розрахунку повної енергії потоку горнового газу при вдуванні природного газу та пилувугільного палива в горні доменних печей.

Практична значимість. Отримані авторами даної роботи результати дозволяють контролювати як середні значення потоку горнового газу при вдуванні природного газу та пилувугільного палива в горні доменних печей, так і його значення по окремим фурмам доменної печі, що дає можливість контролювати та регулювати глибину проникнення потоку горнового газу до центру печі від кожної фурми, а, отже, дозволяє покращувати газодинамічні та відновлювальні умови доменної плавки.

Результати. У даній роботі авторами, на підставі аналізу результатів впровадження технології вдування пилувугільного палива на доменній печі корисним об'ємом 5000 м³, були запропоновані напрямки вдосконалення газодинамічних та відновлювальних умов доменної плавки на підставі контролю зміни розмірів зон горіння перед фурмами печі та розподілу газового потоку за радіусом її горна. З цією метою були узагальнені методичні підходи щодо визначення комплексних енергетичних показників оцінки потоків комбінованого дуття і горнового газу при впровадженні технології доменної плавки з вдуванням природного газу та пилувугільного палива.

Ключові слова: доменна плавка, пилувугільне паливо, горновий газ, комбіноване дуття, зона горіння, кінетична енергія, повна енергія, фурма, горн.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-45-50

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Висока ціна природного газу та його дефіцит обумовили перехід металургійних підприємств України від технології роботи з природним газом до технології доменної плавки з використанням альтернативних видів палива, зокрема з вдуванням пилувугільного палива (ПВП). При цьому доменники зіштовхнулися з рядом складних аспектів даної технології, як організаційних (якість та стабільність постачання шихтових матеріалів, технологічних параметрів роботи печей), так і технічних (зменшення ресурсу роботи доменної печі, холодильного обладнання, фурм та іншого допоміжного обладнання), які знижують ефективність застосування технології ПВП в Україні порівняно із зарубіжною практикою. В цих умовах вдосконалення контролю та регулювання газоди-