

УДК: 669.112:549.5:622.7

<https://doi.org/10.34185/tpm.1.2019.09>Мяновська Я.В., Камкіна Л.В., Іващенко В.П., Анкудінов Р.В.,
Безшкурєнко О.Г. Дворковий О.І.**Дослідження впливу електрохімічної дії на відновлення гематиту
у складі окислених залізистих кварцитів***Myanovska Ya., Kamkina L., Ivaschenko V., Ankudinov R., Dvorkovyy O.***Investigation of the influence of electrochemical action on the recovery
of hematite in the composition of oxidized ferrous quartzites**

Мета роботи - розробити способи обробки окислених кварцитів, використовуючи методи електрохімічного впливу на зерна гематиту, перетворення його в магнетит для подальшої магнітної сепарації. У лабораторних умовах встановлено основні параметри процесу відновлення гематитової складової окислених кварцитів в водній суспензії до магнетиту з набуттям нею магнітних властивостей. При веденні процесу відновлення гематиту до магнетиту, встановлена можливість заміни високоалкалії електролітів на нейтральні, утворені розчинами солей. Розроблено і проаналізовано вплив конструкційних особливостей експериментальних реакторів на відновлення гематиту до магнетиту; здатність матеріалів мембрани ефективно розділяти анолітний і католітний простори; вплив матеріалів електродів - анод і катод, на процес магнетизації; електричні параметри електро впливу на хід процесу; складу електроліту на процес магнетизації. Встановлено, що кращою здатністю розділяти анолітний і католітний простори показала мембрана зі скловолокна; максимальні ступені магнетизації отримані при використанні електродів з низькоуглецевих сталей; оптимальні значення ступеня відновлення гематиту в лабораторних умовах отримані при 15-25 В і 2,0-4,0 А. Для проведення електролізу високоалкалії електроліти можна замінити електролітами на основі хлоридних і сульфатних солей. Кращі показники отримані при використанні хлористого амонію NH₄Cl. Встановлено, що оборотна вода підприємства є електролітом і має достатній потенціал для проведення процесу відновлення гематиту при електрохімічному впливі без добавок електролітоутворюючих компонентів.

The purpose of the work is to develop methods for the treatment of oxidized quartzite, using methods of electrochemical effects on hematite grains, converting it into magnetite for further magnetic separation. In laboratory conditions, the basic parameters of the process of recovery of hematite component of oxidized quartzite in aqueous suspension to magnetite with its magnetic properties have been established. When conducting the process of recovery of hematite to magnetite, the possibility of replacement of high-alkaline electrolytes with neutral salts formed by solutions has been established. The influence of structural features of experimental reactors on the recovery of hematite to magnetite has been developed and analyzed; the ability of membrane materials to effectively separate the anolytic and catholytic spaces; the influence of electrode materials - anode and cathode, on the magnetization process; electrical parameters of electrical influence on the course of the process; composition of the electrolyte in the process of magnetization. The fiberglass membrane was shown to have a better ability to separate the anolytic and catholyte; maximum degrees of magnetization obtained when using electrodes from low carbon steels; optimal values of the degree of recovery of hematite in laboratory conditions were obtained at 15-25 V and 2.0-4.0 A. The thermodynamic possibility and realization of the processes of reduction of oxidized ores in aqueous solutions of electrolytes at low temperatures with obtaining the magnetic phase are shown. For electrolysis, high alkaline electrolytes can be replaced by electrolytes based on chloride and sulfate salts. The best results are obtained using NH₄Cl ammonium chloride.

За запасами залізних руд Україна знаходиться на третьому місці в світі. Велику кількість руд складають кварцити Криворізького залізорудного басейну, які за вмістом заліза поділяються на багаті руди, в яких вміст заліза більше 46 мас.%, та бідні руди з вмістом заліза менше 46 мас.%. Багаті залізні руди безпосередньо використовуються для одержання заліза, в той час як бідні залізні руди потребують збагачення. За мінеральним складом бідні залізні руди Кривого Рогу поділяються на магнетитові та гематитові кварцити. Магнетитові кварцити легко піддаються збагаченню методом магнітної сепарації.

У зв'язку з активною експлуатацією багатих залізних руд та магнетитових кварцитів, їх запаси зменшуються. Гематитові кварцити непридатні для збагачення методом магнітної сепарації. Вони знаходяться в тісній асоціації з магнетитовими квар-

цитами. При видобутку та збагаченні кварцитів утворюються відходи, які складаються у відвалах кар'єрів і шахт, хвостосховищах збагачувальних фабрик. Вже накопичено понад мільярд тон гематитових покладів, що створює негативний вплив на екологічний стан території. Запаси гематитових кварцитів Криворізького басейну складають більше 10 мас.% від загальних запасів руд. Важливою проблемою мінерально-сировинної бази України є залучення до металургійного процесу бідних залізних руд.

Існують методи збагачення бідних залізних руд, які використовують магнітний, флотаційний, гравітаційний способи та їх комбінації. Способи потребують значних енергетичних затрат та часто є малоефективними. Однак, залізорудна сировина України має досить різноманітний гранулометричний, мінеральний та хімічний склад. Для її пере-

Мяновська Яна Валеріївна – к.т.н., доц. НМетАУ,
Камкіна Людмила Володимирівна – д.т.н., проф. НМетАУ,
Іващенко Валерій Петрович – д.т.н., проф. проректор НМетАУ,
Анкудінов Руслан Володимирович – к.т.н., доц. НМетАУ.
Безшкурєнко Олексій Георгійович – к.т.н., НМетАУ
Дворковий Олег Ігоревич – студент НМетАУ

Myanovska Yana – c.t.s., assistant professor NMetAU
Kamkina Lydmila – d.t.s., prof. NMetAU
Ivaschenko Valery - d.t.s., prof. vice rector NMetAU
Ankudinov Ruslan – c.t.s., assistant professor NMetAU
Bezshkurenko Olexsii – c.t.s., NmetAU
Dvorkovyy Oleg – student NMetAU

робки досить ефективним, а головне універсальним, може бути використання магнетизуючого випалу з подальшою магнітною сепарацією. Магнетизуючий випал – це термічний процес часткового або повного перетворення слабомагнітних оксидів і гідроксидів заліза (гематит, гетит) на сильномагнітний магнетит з метою створення залізородних концентратів за допомогою наступної магнітної сепарації [1]. У результаті роботи збагачувального комбінату було виявлено два основних недоліки технології – це забруднення повітряного басейну пиловими викидами і великі економічні витрати (природний газ, мазут, кокс [2]).

Розвиток нових технологій збагачення ведеться в напрямку підвищення їх селективності. Паралельно розробляються методи попередньої обробки руди з метою зміни фізичних і фізико-хімічних властивостей мінеральних компонентів для підвищення їх контрастності. Тому виникає необхідність в розробці альтернативного процесу, який дозволив би провести магнетизуючу обробку гематиту в процесі збагачення без випалу в печах. Так автори [3] вважають, що проблему утилізації окислених залізистих кварцитів, які зараз зберігаються, можна вирішити застосуванням флотації, яка є найбільш ефективним способом отримання високоякісного залізородного концентрату. В статті авторів [4] увага приділена розгляду питання застосування методу електрокоагуляції, яка відома в процесах очищення води та сточних вод. Метод було адаптовано для вилучення металів, неметаллів, органічних з'єднань та інше. Механізм і представлені реакції об'ємні, вони пов'язані з ЕС, і відповідають діаграмам розчинення і Пурбе. Більш детально електрохімічні процеси розглядаються в роботі [5] та акцентовано увагу на умови утворення магнетиту, що пронується для процесу очищення води та видалення утворених частинок магнетиту шляхом відмагнічування.

При дослідженні [6] розглянуто вплив технологічних факторів на відновлення гідрооксидів заліза до магнетиту при електрохімічній дії. Хімічне відновлення гематиту з використанням крохмалю в газовій фазі при підвищеній температурі при нагріванні вихідної суміші протягом 0,5 і 2 годин при 300°C утворювався магнетит та невелика кількість гематиту, які ідентифіковані за допомогою XRD.

Таким чином, літературні джерела свідчать про реалізацію процесу відновлення гематиту до магнетиту при електрохімічній обробці руди у водних розчинах, що може бути альтернативою магнетизуючого випалу. Розробка такого методу є актуальною.

Сучасний стан проблеми підготовки та використання залізистих кварцитів в металургійному виробництві

При обробці руд Криворізького басейну застосовують магнітну сепарацію магнетиту, а Fe_2O_3 при цьому залишається в пульпі і не використовується. Для використання Fe_2O_3 , його необхідно попередньо відновити до магнетиту. У зв'язку з

цим виникла задача про можливість електролітичного відновлення Fe_2O_3 у водному розчині (суспензії) до магнетиту. Залізисті кварцити містять дрібноокраплені зерна рудного мінералу і пустої породи, тому вони важко розкриваються і вимагають високого ступеня подрібнення. Основним типом текстури кварцитів є шарувата, обумовлена перерозподілом шарів різного мінерального складу і коливанням розміру зерен і агрегатів мінералів.

На прикладі випал-магнітного збагачення окислених залізистих кварцитів (наприклад, ЦГЗК) доведено, що повна перебудова структури мінералів (гематит-мартит-гетит-магнетит) вимагає великих енергетичних витрат. Тому з економічної точки зору більш перспективно використання дефектів кристалічної решітки, що полягає у виборі такого виду і рівня енергетичних впливів в процесі підготовки мінералів до збагачення, щоб в їх структурі не відбувалося істотних змін, а лише з'явилися деякі відхилення в її періодичності або точніше в різній концентрації дефектів. Виникаючи внаслідок цього зміни у властивостях мінералів, як правило, вже є достатніми для поділу останніх методами збагачення.

Серед різних способів відновлення заліза істотні переваги мають ті, в основу яких покладені процеси металізації залізородної сировини при низьких і помірних температурах (без плавлення) з використанням недефіцитних газоподібних і твердих відновників. Вони служать базою для створення енергозберігаючих технологій, можуть бути організовані з меншими капітальними витратами.

У ряді робіт з метою інтенсифікації відновних процесів використовується опромінення реагуючих компонентів продуктами радіоактивного розпаду, в тому числі γ - випромінюванням. Збільшення швидкості відновлення приблизно на 30% спостерігали при накладенні ультразвукових впливів. Відомі способи, засновані на використанні пульсацій газового потоку з частотою до 1.4 Гц. Позитивний результат обумовлений поліпшенням проникнення газу-відновника в пори щільних рудних матеріалів.

Важливим напрямком в пошуку шляхів інтенсифікації відновлення заліза є застосування хіміко-каталітичних впливів на реакційну систему. Відзначено позитивний вплив ряду солей лужних металів на газо-вуглетермічне відновлення при нормальному тиску. Найбільш перспективними є методи відновлення оксидів заліза за допомогою електрохімічних впливів при відносно низьких температурах і атмосферному тиску.

У зв'язку з цим представляє безперечний інтерес пошук шляхів збагачення окислених кварцитів Криворізького басейну відновленням частини гематиту до магнетиту електролізом водних суспензій і подальшою магнітною сепарацією в умовах діючих ГЗК. Відомо, що магнетит (Fe_3O_4) є найпростішим ферритом зі структурою шпінелі. При кімнатній температурі магнетит має структуру зверненої шпінелі з безладним розподілом іонів

дво- і тривалентного заліза в октаедричних вузлах решітки. Аналіз науково-технічної літератури з питань збагачення руд і інтенсифікації відновлення оксидів заліза показав, що однією з умов підвищення ефективності збагачення окислених залізних руд є перетворення зерен гематиту (або їх частини, достатньою для здійснення магнітної сепарації) в магнетит. Виконання цієї умови дозволить значно зменшити втрати залізорудних матеріалів при збагаченні.

Виходячи з умов технологічного процесу збагачення окислених руд, впливають умови задачі, яку необхідно вирішити в даній роботі: відновлення гематиту (Fe_2O_3) до магнетиту (Fe_3O_4) має відбуватися в умовах діючого технологічного процесу збагачення залізорудних матеріалів; в процесі відновлення необхідно обмежити використання розчинів електролітів, що містять речовини, небажані при подальшій переробці залізорудних матеріалів в металургійних агрегатах. На підставі вище викладеного можна вважати, що найбільш перспективним є спосіб збагачення залізистих кварцитів електрохімічним впливом на частинки гематиту у водному середовищі.

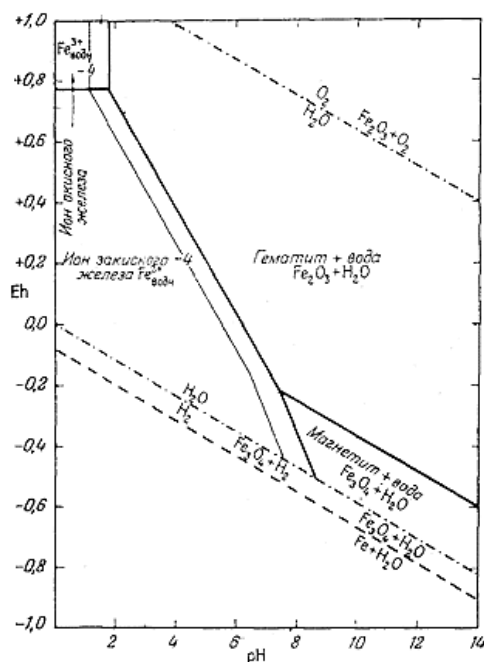


Рисунок 1. Зведена діаграма полів стійкості гематиту і магнетиту у воді при 25°C і 1 атм загального тиску. [7]

На практиці електрохімічні процеси проводять в гальваностатичному режимі (при постійній силі струму), а не в потенціостатичному. Тому при реальному електролізі в водних розчинах в гальваностатичному режимі на катоді неминуче буде розкладатися вода з виділенням водню. Рівноважний потенціал пари $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$ може бути розрахований з термодинамічних даних, наприклад, якщо утвориться гематит по реакції:



$$E_{\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_3\text{O}_4} = 0,24 - 0,059 \text{ pH}$$

Для вирішення поставленої задачі необхідно знати електрохімічні властивості гематиту і магнетиту. В останній час значну увагу привертає використання діаграм Eh - pH при зображенні полів стійкості мінералів. Діаграма Пурбе [7] для системи $\text{Fe}/\text{H}_2\text{O}$ визначає області існування окремих фаз і умов фазових перетворень, з якої виходить, що твердофазне відновлення $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ до Fe_3O_4 можливо в водних розчинах.

В умовах збагачення залізні руди після подрібнення складові знаходяться в пульпі в дисперсному стані, утворюючи суспензії. Тому найбільш вірогідним процесом перетворення гематиту в магнетит, який може бути використаний при розробці технології збагачення залізистих кварцитів, є електровідновлення суспензій що містять гематит в розчині електроліту. Термодинамічні розрахунки показали можливість відновлення гематита до магнетита в умовах низьких температур і атмосферного тиску, при електролізі води. Розрахункові дані були перевірені в лабораторних умовах.

Визначення в лабораторних умовах можливості протікання процесу відновлення заліза в розчинах електроліту.

На першому етапі досліджень виготовили експериментальну комірку, яка працює за принципом стандартного електролізера, призначеного для дисоціації води. Електролітом служив 20% розчин NaOH. Установка складалася з прямокутного реактора, виконаного з плексигласу. Електроди пластини з залізвуглецевого сплаву анодовані нікелем. Між електродами встановлювали мембрану, виконану з щільною склотканини. Гематит (Fe_2O_3) марки ЧДА, фракцією - 0,22 мм розміщували в католітному просторі. В експериментальних дослідженнях при електролізі води отримали матеріал з явно вираженими магнітними властивостями (табл.1). Далі визначали вплив конструкції установки, розташування електродів в реакторі, матеріалів катода і анода, щільності струму, складу електроліту на процес відновлення гематиту в ході електролізу води. Визначали параметри процесу відновлення гематиту до магнетиту в умовах електрохімічного впливу на суспензію у водному розчині електроліту.

У зв'язку з тим, що промислові кварцити мають нестабільний склад для порівнянності результатів досліджень, при проведенні цієї серії експериментів, використовували «залізо окис для феритів» - Fe_2O_3 (ТУ 6-09-563-74 марки "Ч"). В якості електроліту використовували 20% розчин NaOH в воді. Електроди були виконані з низьковуглецевої сталі, а діафрагма з щільною склотканини. Аналіз отриманих даних показав, що відновлення оксиду заліза Fe_2O_3 до Fe_3O_4 має місце при проведенні процесу електролізу води. Однак випробуваний метод має ряд істотних недоліків. Як показали дослідження при тривалості електрохімічного впливу протягом 1 години ступінь відновлення гематиту

недостатня. Використання розчину NaOH в якості електроліту небезпечно для дослідників. Попадання лужних металів в шихтові матеріали для мета-

лургійного виробництва є не бажаним, тому що викликає руйнування футеровки металургійних агрегатів.

Таблиця 1. Результати досліджень відновлення гематиту при електролізі води.

Номер експерименту	Параметри процесу				Зміна температури, ($\Delta t, ^\circ\text{C}$)	Ступінь відновлення, % відн.
	Сила струму, А	Напруга, В	Щільність струму, А/см ²	Час, хв.		
1	6,05	4,3	0,16	150	11	17
2	4,2	6,2	0,11	50	9	9
3	3,5	7,1	0,09	150	6	7
4	2,7	7,9	0,07	150	5	3
5	2,0	8,2	0,05	150	4	2,5

Для встановлення кінетичних показників процесу в якості матеріалу електродів використовували чавун, нікель, графіт на кінетику протікання реакції. Для збільшення ймовірності контакту частинок досліджуваного матеріалу з поверхнею катода застосували варіант конструкції з горизонтальним розташуванням електродів. При цьому нижнім електродом був катод, верхнім анод. Досліджуваний матеріал розміщували безпосередньо на ка-

тоді, в процесі експерименту встановлювали вплив матеріалу катода на параметри відновлення гематиту до магнетиту. Склад електроліту був таким же, як і в попередніх дослідях. Результати експерименту представлені в таблиці 2. Отримані результати показали, що найбільш ефективним матеріалом для катода виявилася низьковуглецевий сталь.

Таблиця 2. Дослідження впливу матеріалу катода на ступінь відновлення гематиту.

Номер експерименту	Можливо, параметри				Зміна температури, ($\Delta t, ^\circ\text{C}$)	матеріал катода	Ступінь відновлення, % отн.
	Сила струму, А	Напруга, В	Щільність струму, А/см ²	Час, хв			
1	0,5	13	0,01	270	3	графіт	5,2
2	0,6	12,8	0,011	270	4	чавун	8,1
3	0,6	12,8	0,011	270	4	нікель	15,0
4	0,6	12,9	0,011	270	4	низьковугл. сталь	22,6

При порівнянні щільності струму і часу витримки найбільш висока ступінь відновлення досягнута в разі використання низьковуглецевої сталі в якості катода. При змінній концентрації електроліту та дослідженні впливу на ступінь відновлення гематиту з використанням електродів з низьковуглецевої сталі, для цього використовували електроліти: 20%, 15%, 10%, 5% водний розчин NaOH; 10% водний розчин Na₂CO₃

Результати дослідження представлені в таблиці 3. Найбільша ступінь відновлення зафіксована, при використанні 20% NaOH. Розчини кальци-

нованої соди мають низький рН і не сприяють пасивації матеріалу анода.

Аналіз діаграми Пурбе показує, що область існування Fe₃O₄, обмежена водневим показником (рН) і потенціалом на електроді. При цьому процес переходу Fe₂O₃ в Fe₃O₄ можливий і при низьких значеннях рН середовища до 7, але при цьому потенціал зростає до -0,2. Щільність струму на катоді має суттєвий вплив на кінетику процесу. Необхідно збільшити кількість підведеного електрики з мінімальною щільністю струму.

Таблиця 3. Вплив складу електроліту на ступінь відновлення гематиту.

№ п.п.	задані параметри				Зміна температури, ($\Delta t, ^\circ\text{C}$)	Склад електроліту.	Ступінь відновлення, % отн
	Сила струму, А	Напруга, В	Щільність струму, А/см ²	Час, хв			
1	0,75	11,8	0,014	270	2	20% NaOH	21,7
2	0,75	11,8	0,014	270	2	15% NaOH	20,08
3	0,75	11,9	0,014	270	2	10% NaOH	18,1
4	0,75	12,0	0,014	270	3	5% NaOH	12,0
5	0,75	12,0	0,014	270	3	10% Na ₂ CO ₃	10,2

Попередній аналіз літературних даних і результатів проведених досліджень показав, що з можливих механізмів електровідновлення Fe₂O₃ в Fe₃O₄: прямого електролітичного і непрямого (воднем, що виділяється на катоді) - перевага слід віддати першому, оскільки швидкість відновлення Fe₂O₃ молекулярним воднем при кімнатних температурах надзвичайно низька, а кількість активного атомарного водню, здатного відновити оксид залі-

за у водному розчині, незначна. Однак відомо, що деякі елементи такі як Fe, Ni, Co здатні перешкоджати молізації атомарного водню (H⁰) у поверхні катода в ході електролізу.

Перемішування забезпечує якісний контакт частинок порошку гематиту з поверхнею катода. В якості електроліту застосували хлористий амоній – NH₄Cl, який є сильним електролітом і не містить речовин шкідливих для металургійних агрегатів.

Серія експериментів за цією методикою, підтвердила теоретичні розрахунки. На 8 - 10 хвилини експериментів колір електроліту з червоно-бурого ставав чорним, а отриманий матеріал набував магнітних властивостей.

Процес відновлення ефективно проходив при використанні анода із вуглецевих сталей. В процесі електролітичного відновлення Fe^{3+} до Fe^{2+} анод частково розчиняється. В експериментах маса розчиненого анода становила 7 - 18% від маси робочої речовини. В експериментах зі сталевим анодом досягнуто збільшення придатного продукту. Встановлено, що процес електролітичного відновлення гематиту до магнетиту в водному розчині відбувається як за рахунок відновлення гематиту на катоді атомарним воднем, так і електровідновленням в об'ємі електроліту, що дозволить зменшити витрати електроенергії на процес переходу гематиту в магнетит.

Дослідження в лабораторних умовах реальних суспензій збагачення окислених залізних руд на НКГОК.

З метою визначення можливості відновлення гематиту реальних окислених руд при електрохімічному впливі використовували окислені кварцити з розкривних порід Новокриворізького гірничо-збагачувального комбінату і оборотну воду збагачення. Отримані результати показали, що у всіх експериментах цієї серії спостерігається збільшення маси продукту на 5-9%.

Проведені дослідження впливу електрохімічних дій на магнетизацію окислених кварцитів. Вихідні окислені кварцити Валявкинського родовища, які представлені НКГОК для досліджень в лабораторних умовах, розділяли на магнітну і немагнітну складові. Магнетизуючу обробку немагнітної складової порівнювали з результатами обробки чистого гематиту марки «Ч».

Аналіз результатів показав, що в представлених окислених кварцитах фази, представлені магнетитом, складають близько двох третин і тільки одна третина припадає на немагнітну складову. В ході експериментів відібрали із загальної маси немагнітну частину і провели магнетизуючу обробку. В результаті отримано біля 77,8% магнетизації немагнітної фази. При зменшенні щільності струму вдвічі ступінь магнетизації впала з 96,6% до 62%.

Збільшення маси окислених кварцитів при незмінній площі катода, знижує ефективність незалежно від збільшення часу експерименту. Це може свідчити про проходження в реакторі процесів, які знижують загальну швидкість відновлення тривалентного заліза до двовалентного: пряме відновлення на катоді атомарним воднем, електровідновлення і поява Fe^{2+} за рахунок розчинення анода. Склад оборотної води НКГОК дозволяє вести процес без введення в електроліт додаткових речовин. Відзначено, що вміст іонів Fe^{2+} знаходиться межах 0,8-1,2% і, що забезпечує утворення магнітного шару, на поверхні частинки окисленого матеріалу, достатнього для проведення магнітної

сепарації. При подрібненні окислених кварцитів не вдалося розкрити мінерали повністю і в магнітній фракції після обробки міститься 10-15% SiO_2 .

Механізм розглянутих процесів омагнічування спрощено можна описати таким чином. В роботі [8] показано, що при взаємодії водних розчинів Fe^{2+} з гетитом спостерігається обмін електронами між іонами заліза в твердій фазі і в розчині. Однак накопичено значні експериментальні та теоретичні дані, які свідчать про те, що реакція водного Fe^{2+} з оксидами Fe^{3+} набагато складніша і складається з сорбції, перенесення електронів, провідності, розчинення, а в деяких випадках і обміну атомів та / або перетворення до вторинних корисних копалин. Була запропонована концептуальна модель, що включає сорбцію Fe^{2+} на поверхні гетиту, перенесення електрона з Fe^{2+} до Fe^{3+} і просування електронів всередину кристала. Ця концептуальна модель передбачає [9], що існує градієнт потенціалу між двома протилежними гранями кристала оксиду заліза, внаслідок чого можливий об'ємне перенесення електронів крізь мінерал. Подібні процеси можуть відбуватися також при взаємодії водних розчинів Fe^{2+} з гематитом. Таким чином, в основі омагнічування оксидів заліза у водному середовищі лежить перенесення електронів від іонів заліза в зарядовим стані Fe^{2+} до іонів заліза в зарядовим стані Fe^{3+} .

Висновки

Розроблено і проаналізовано вплив конструкційних особливостей експериментальних реакторів на відновлення гематиту до магнетиту; здатність матеріалів мембрани ефективно розділяти анолітного і католітного простору; вплив матеріалів електродів - анод і катод, на процес магнетизації; електричні параметри електровпливу на хід процесу; складу електроліту на процес магнетизації. Встановлено, що кращою здатністю розділяти анолітний і католітний показала мембрана зі скловолокна; максимальні ступені магнетизації отримані при використанні електродів з низьковуглецевих сталей; оптимальні значення ступеня відновлення гематиту в лабораторних умовах отримані при 15-25 В і 2,0-4,0 А.

Показана термодинамічна можливість і реалізація процесів відновлення окислених руд у водних розчинах електролітів при низьких температурах з отриманням магнітної фази. Для проведення електролізу високолужні електроліти можна замінити електролітами на основі хлоридних і сульфатних солей. Кращі показники отримані при використанні хлористого амонію NH_4Cl .

Встановлено, що оборотна вода підприємства електролітом і має достатній потенціал для проведення процесу відновлення гематиту при електрохімічному впливі без добавок електролітоутворюючих компонентів. Показано, що процес магнетизуючого відновлення гематиту відбувається при одночасному протіканні процесів: прямого відновлення іонів Fe^{3+} до Fe^{2+} - атомарним воднем на залізному катоді, електровідновленням і каталітич-

ним дією іонів Fe^{2+} , що утворюються в електроліті при розчинення матеріалу сталевго анода.

Бібліографічний опис

1. Ponomar, V. P., Dudchenko, N. O., & Brik, A. B. (2017c). Thermal stability of micro- and nanoscale magnetite by thermomagnetic analysis data. In Proceedings of the 2017 IEEE 7th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties, NAP 2017 (p.02MFPM03-1-02MFPM03-4). <https://doi.org/10.1109/NAP.2017.8190407>
2. Пономар, В. П., Дудченко, Н. О., & Брик, О. Б. (2016). Термомагнітні властивості гематиту та магнетиту залізистих кварцитів Криворізького басейну. In X Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми теоретичної і прикладної мінералогії. геології. металогенії гірничодобувних регіонів», Кривий Ріг, Україна (pp. 129–135)
3. Utilization of Iron-Containing Waste from Magnetic Concentration of Kursk Magnetic Anomaly's Oxidized Ferruginous Quartzites / I. S. Bersenev, I. S. Vochmyakova, I. G. Bormotova, R. I. Ismagilov, M. N. Naftal, Yu. G. Yaroshenko // Technogen Conference Proceedings : International Conference with Elements of School for Young Scientists on Recycling and Utilization of Technogenic Formations (Ekaterinburg, Russia, 5–8 June 2017).– Dubai : Knowledge E, 2017. – pp. 44-51. DOI: 10.18502/kms.v2i2.945. ISSN: 2519-1438
4. Electrochemical Reactions for Electrocoagulation Using Iron Electrodes. Hector A. Moreno C., David L. Cocke, Jewel A. G. Gomes, Paul Morkovsky, R. Parga, Eric Peterson, Cristina Garcia. Ind. Eng. Chem. Res.20094842275-2282. January 14, 2009. <https://doi.org/10.1021/ie8013007>
5. Kristian L. Dubrawski, Case M. van Genuchten, Caroline Delaire, Susan E. Amrose, Ashok J. Gadgil, and Madjid Mohseni . Production and Transformation of Mixed-Valent Nanoparticles Generated by Fe(0) Electrocoagulation. Environmental Science & Technology 2015, 49 (4) , 2171-2179. DOI: <https://doi.org/10.1021/es505059d>
6. Production and Transformation of Mixed-Valent Nanoparticles Generated by Fe(0) Electrocoagulation. Kristian L. Dubrawski, Case M. van Genuchten, Caroline Delaire, Susan E. Amrose, Ashok J. Gadgil, Madjid Mohseni. Cite this: Environ. Sci. Technol.20154942171-2179. January 21, 2015. <https://doi.org/10.1021/es505059d>
7. Растворы, минералы, равновесия Р. М. Гаррелс, Ч. Л. Крайст Издательство "МИР", МОСКВА 1968перевод с английского И.В.Витовской; под редакцией и с предисловием И.Д.Рябчикова, В.В.Щербины <http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/trenager/garrels/index.htm>
8. Gorski, C. A., & Scherer, M. M. (2011). Fe²⁺ sorption at the Fe oxide-water interface: A revised conceptual framework. In Aquatic Redox Chemistry (pp. 315-343). (ACS Symposium Series; Vol. 1071). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-2011-1071.ch015>
9. Пономаренко О.М. Брик О.Б., Дудченко Н.О., Янишпольський В.В., Юшин О.О. Спосіб омагнічування слабомагнітних окислених залізних руд і залізородних відходів для магнітної сепарації з використанням відновлювальних джерел сировини // Патент на корисну модель №82527.– 2013

References

1. Ponomar, V. P., Dudchenko, N. O., & Brik, A. B. (2017c). Thermal stability of micro- and nanoscale magnetite by thermomagnetic analysis data. In Proceedings of the 2017 IEEE 7th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties, NAP 2017 (p.02MFPM03-1-02MFPM03-4). <https://doi.org/10.1109/NAP.2017.8190407>
2. Ponomar, V. P., Dudchenko, N. O., & Brik, O. B. (2016). Termomagnitni vlastivosti gematitu ta magnetitu zalizistih kvarcitiv Krivorizkogo basejnu. In X Mizhnarodna naukovo-praktichnoa konferenciya «Problemi teoretichnoyi i prikladnoyi mineralogiyi. geologiyi. metalogeniyi gimnichodobuvnih regioniv», Krivij Rig, Ukrayina (pp. 129–135)
3. Utilization of Iron-Containing Waste from Magnetic Concentration of Kursk Magnetic Anomaly's Oxidized Ferruginous Quartzites / I. S. Bersenev, I. S. Vochmyakova, I. G. Bormotova, R. I. Ismagilov, M. N. Naftal, Yu. G. Yaroshenko // Technogen Conference Proceedings : International Conference with Elements of School for Young Scientists on Recycling and Utilization of Technogenic Formations (Ekaterinburg, Russia, 5–8 June 2017).– Dubai : Knowledge E, 2017. – pp. 44-51. DOI: 10.18502/kms.v2i2.945. ISSN: 2519-1438
4. Electrochemical Reactions for Electrocoagulation Using Iron Electrodes. Hector A. Moreno C., David L. Cocke, Jewel A. G. Gomes, Paul Morkovsky, R. Parga, Eric Peterson, Cristina Garcia. Ind. Eng. Chem. Res.20094842275-2282. January 14, 2009. <https://doi.org/10.1021/ie8013007>
5. Kristian L. Dubrawski, Case M. van Genuchten, Caroline Delaire, Susan E. Amrose, Ashok J. Gadgil, and Madjid Mohseni . Production and Transformation of Mixed-Valent Nanoparticles Generated by Fe(0) Electrocoagulation. Environmental Science & Technology 2015, 49 (4) , 2171-2179. DOI: <https://doi.org/10.1021/es505059d>
6. Production and Transformation of Mixed-Valent Nanoparticles Generated by Fe(0) Electrocoagulation. Kristian L. Dubrawski, Case M. van Genuchten, Caroline Delaire, Susan E. Amrose, Ashok J. Gadgil, Madjid Mohseni. Cite this: Environ. Sci. Technol.20154942171-2179. January 21, 2015. <https://doi.org/10.1021/es505059d>
7. Rastvory, mineraly, ravnovesiya R. M. Garrels, Ch. L. Krajst Izdatelstvo "MIR", MOSKVA 1968perevod s anglijskogo I.V.Vitovskoj; pod redakciej i s predisloviem I.D.Ryabchikova, V.V.Sherbiny <http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/trenager/garrels/index.htm>
8. Gorski, C. A., & Scherer, M. M. (2011). Fe²⁺ sorption at the Fe oxide-water interface: A revised conceptual framework. In Aquatic Redox Chemistry (pp. 315-343). (ACS Symposium Series; Vol. 1071). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-2011-1071.ch015>
9. Ponomarenko O.M. Brik O.B., Dudchenko N.O., Yanishpolskij V.V., Yushin O.O. Sposib omagnichu-vannya slabomagnitnih okislenih zaliznih rud i zalizorudnih vidhodiv dlya magnitnoyi separaciyi z vikoristannyam vidnovlyuvalnih dzherel sirovini // Patent na korisnu model №82527.– 2013

Стаття поступила 15.01.2019