УДК 622.733

Т.А. ОЛІЙНИК, В.І. МУЛЯВКО, доктори техн. наук, проф.,
С.В. МІХНО, здобувач., М.О. ОЛІЙНИК, аспірант, Криворізький національний університет

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СЕПАРАЦІЇ ІЛЬМЕНІТУ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОВЕДІНКИ ЧАСТИНОК МІНЕРАЛІВ В ПОЛІ МІЖ ЕЛЕКТРОДАМИ

Виконано наукове обґрунтування параметрів електросепарації ільменіту при збагаченні титаномагнетитових руд за рахунок зміни умов зарядження частинок і динаміки їх руху. Одержано моделі селективного зарядження часток та динаміки руху частинок в сепараторі, на базі яких визначені оптимальні параметри і технологічні режими ведення процесу електростатичної сепарації ільменіту. Встановлено, що здійснення селективного зарядження в пластинчатому модернізованому трибо-електростатичному сепараторі відбувається завдяки взаємодії та комбінації двох виділених стадій: трибозарядження та стадії індукційного зарядження або фактично перезарядження. Показано, що рух частинок в електричному полі визначається величиною і знаком їх заряду та має складний характер у вигляді стрибків над електродом, а не просте кочення або ковзання. Встановлено, що коронний розряд дозволяє підвищити селективне зарядження частинок провідників і діелектриків в 2-4 рази.

Проблема та її зв'язок з науковим і практичним завданням. Україна входить до п'ятірки найбільших у світі країн-виробників титанвмісних концентратів. Згідно з інформацією відділу геології корисних копалин Інституту геологічних наук НАНУ, в цілому ресурси титанових руд України оцінюються потенційно в 20 %, а затверджені запаси знаходяться в межах 7-12 % від світових запасів. Сумарно запаси і база запасів титанових руд Україна, за їхніми оцінками, перевищують будь яку країну світу.

Підприємств з переробки корінних титанових руд в Україні поки що не існує. Для введення їх в експлуатації необхідно застосування нових технологій збагачення цих руд. При розробці нових технологій збагачення корінних титаномагнетитових руд одним із актуальних питань є підвищення якості ільменітових концентратів.

Це можливо за рахунок зміни умов зарядження поверхонь частинок руди та динаміки їх руху при електростатичній сепарації. У зв'язку з цим наукове обґрунтування технологічних параметрів електростатичної сепарації ільменіту при збагаченні титаномагнетитових руд є актуальним науково-практичним завданням.

Аналіз досліджень і публікацій. Електрична сепарація мінеральної сировини представляє процес розділення мінералів за мінеральним складом, крупністю або формою зерен шляхом силового впливу на них електричного поля і застосовується в основному для двох цілей: електричного збагачення, тобто для розділення частинок сумішей мінералів за мінеральним складом, та електричної класифікації, тобто для розділення часток за крупністю або формою зерен, рис. 1.

Результати теоретичних і практичних досліджень з електричної сепарації найбільш повно представлено в монографіях, доповідях, дисертаціях таких вчених, як В.І. Попков, І.М. Плаксін, В.І. Ревнівцев, Н.Ф. Олофінський, І.П. Верещагін, Л.П. Старчик, Кармазін В.І., В.В. Кармазін, Е.А. Хопунов, А.І. Ангелов, В.С. Морозов, М.М. Пашин, Н.М. Карнаухов, А.І. Месеняшин, П.І. Пілов, В.А. Пикулин, А.В. Дегтяренко, А.І. Урванцев, С.А. Кривов та ін., а також у працях міжнародних конгресів зі збагачення корисних копалин і науково-технічних конференціях щодо застосування електронно-іонної технології в народному господарстві [1-14].

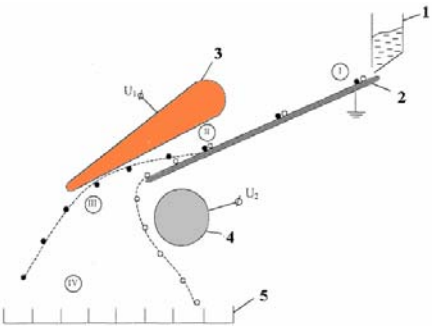

Рис. 1. Схема та зони електросепаратора: **I** - зона трибозарядки, **II** - зона селективної зарядки (індукційної зарядки); **III** - зона розділення; **IV** - зона осадження; *1* - бункер живлення; *2* - заряджувальний електрод; *3* - верхній відхиляючий електрод; *4* - нижній відхиляючий електрод; *5* - приймачі продуктів сепарації

Постановка завдання. Для розробки технології збагачення титаномагнетитових руд України необхідно в процесі електричної сепарації для поліпшення та удосконалення сепараційних характеристик електростатичних

© Олійник Т.А., Мулявко В.І., Міхно С.В., Олійник М.О., 2014

сепараторів використати змінені умови зарядження поверхні частинок і підвищити тим самим ефективність збагачення цих руд.

Викладення матеріалу та результати. Основою електростатичної сепарації є селективне зарядження частинок. Таке зарядження приводить до різного характеру руху частинок в електричному полі з утворенням продуктів розділення. Процеси, що становлять основу селективного зарядження та розділення за провідністю, складні, взаємопов'язані та всі разом в цілому визначають кінцеві результати збагачення руди.

Не знаючи процесів та закономірностей, що лежать в їх основі, їх конкретні прояви в умовах роботи трибоелектростатичного сепаратора, неможливо управляти й раціонально організувати процес розділення. Щоб розуміти і керувати процесом в цілому, необхідно та доцільно розділити його на елементарні стадії, виділити та дослідити окремі процеси, що визначають збагачення руди, їх взаємозв'язок і роль у кінцевому результаті.

Перша стадія - стадія попереднього зарядження. У сепараторі ця стадія реалізується шляхом трибозарядження частинок провідників і непроводників про підкладку з графітопласта на першій ділянці сепаратора, де взаємодія частинок з електродом відбувається без впливу електричного поля і, як наслідок цього, в якості основного механізму зарядження частинок діє тільки трибо електризація (див. рис. 1). Дуже мала величина зарядів на першій стадії робить не можливим і подальшу селективну зарядку за рахунок перезарядки в електричному полі.

Після попереднього зарядження наступає стадія перезарядження. На цій стадії основним механізмом є індукційне зарядження, коли забезпечується селективне зарядження і відрив частинок від електрода. Процес індукційного зарядження частинки при контакті з електродом описується виразом

$$q = q_\infty + (q_o - q_\infty)\exp(-t_k/\tau_k), \qquad (1)$$

де $q\infty$ - граничний заряд частинки, q_o - початковий індукційний заряд (в даному випадку заряд до зіткнення з електродом або заряд, набутий в результаті попереднього контакту з електродом), t_k - час контакту частинки з електродом, $\tau_к$ - константа часу, що визначається властивостями контакту частинки і електрода.

На другій стадії на мінералах, що розділяються, виходять заряди різних знаків і відбувається селективне зарядження частинок. Селективне зарядження є необхідною умовою сепарації частинок, але недостатнім. Частинки повинні розділитися в просторі. Цю умову можна сформулювати: для провідників: $P_{эл}$-mg>0, для непровідників: $P_{эл}$-mg<0, де $P_{эл}$ - електрична сила, що діє на частинку; mg - сила тяжіння, рис. 2.

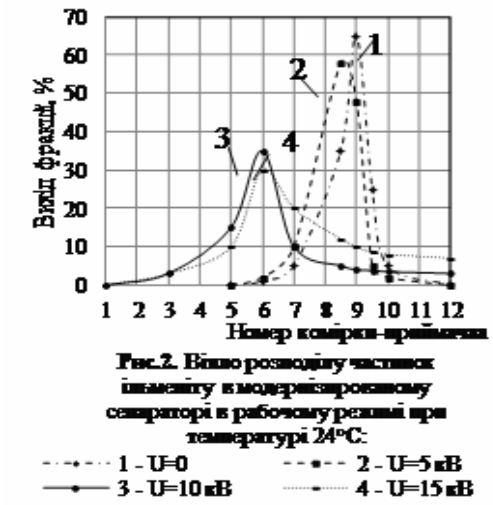

Рис.2. Вихід розподілу частинок піщаніту в модернізованому сепараторі в робочому режимі при температурі 24°С:

Наступною стадією сепарації є власне розділення частинок в електричному полі електродів після сходу часток із зарядного електрода. Рух провідників після відриву від зарядного електрода (це відбувається ще в зоні зарядження) описується рівняннями, м/с^2.

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{E}q + m\vec{g} + \vec{F}_C; \quad \vec{E} = f(x,y); \quad g = 9{,}81 \quad . \qquad (2)$$

де $\vec{v}$ вектор швидкості руху частинок; m - маса частинки, $\vec{g}$ - вектор прискорення вільного падіння; $\vec{E}$ - вектор напруженості електричного поля, що залежить від координат точки знаходження частинки; q - заряд частинки, якого вона досягла в момент відриву від електрода; $\vec{F}_c$ - вектор сили опору середовища руху частинки.

Непровідні частинки, що не мають достатнього для відриву заряду, продовжують зсипатися уздовж поверхні електрода до його кінця. Після осипання з нього їх рух описується також рівняннями (5). Основна вимога для цієї стадії - це максимальна величина напруги на електродах.

Рух частинок в електричному полі визначається величиною і знаком їх заряду.

Аналіз великої кількості траєкторій частинок в базовому пластинчатому трибоелектростатичному сепараторі показує, що рух частинок має складний характер у вигляді стрибків над

електродом, а не просте кочення або ковзання, як відзначалось раніше деякими авторами. У зоні трибозарядження збільшуються розміри стрибків, шар частинок як би розширюється по висоті.

Процес зарядження і, відповідно, рух частинок визначається величиною напруженості цього поля, тобто напругою на електродах.

Нестабільність трибоелектризації та невелика ефективність стадії попереднього зарядження пояснюються малою величиною зарядів мінералів і сильним впливом на процес зарядження зовнішніх умов (швидкості подачі матеріалу, форми зерен матеріалу, температури, наявності тонких частинок і т.ін.), що призводить до значного розкиду в значеннях зарядів і до необхідності зміни величини цієї зони, та встановлення в модернізованому сепараторі коронуючого електроду, як засобу підвищення ефективності процесу попередньої зарядки частинок в сепараторах.

Процес зарядження частинок в електричному полі слід розглядати як другу характерну стадію електросепарації, яка є зоною індукційного зарядження та відриву частинок від зарядного електрода. Цій стадії відповідає певна зона сепаратора (див. рис. 1).

Для ільменіту на цій стадії додавання зарядів при позитивній напруженості поля (це відповідає знаку мінус на верхньому електроді) призводить до того, що вже при незначній напруженості поля (E≅0,5 кВ/см) заряд змінює свій знак.

При подальшому збільшенні напруженості поля відмінність у величинах зарядів частинок провідника і діелектрика все більше зростає.

Причому відбувається це при збереженні відмінності в знаках зарядів, що становить головну мету цієї другої стадії сепарації.

При протилежній полярності на електроді індукційний заряд мінералів є негативним.

Додавання його з трибозарядом не дозволяє отримати селективного зарядження.

Отже, саме звідси випливає одна з основних вимог до організації процесу розділення – знак верхнього електрода повинен забезпечувати індукційне зарядження частинок зарядом, протилежним за знаком заряду трибоелектризації.

Для руху частинок після відриву від зарядного електрода характерно розширення і зміщення віяла в порівнянні з гравітаційним зсипанням. З точки зору процесів, що відбуваються з часточками, ця область фактично є зоною розділення часточок в полі відхиляючих електродів.

Рух часток в цій зоні і, відповідно, їх розділення визначається величиною і характером поля і тими зарядами, які частинки придбали на двох попередніх стадіях.

Залежність траєкторій частинок в зоні розділення від напруги на електродах впливає на розподіл мінералів в приймачі продуктів розділення.

Аналіз віял провідникового мінералу зокрема ільменіту (див. рис. 2) показує, що після деякої напруги (15 кВ) подальший зсув віяла вперед припиняється.

Далі відбувається тільки розширення віяла в бік діелектриків з утворенням характерного «хвоста».

Такий рух провідникових частинок, що утворюють хвіст, тобто рух в сторону протилежну основній масі, можливо пояснити тільки наявністю у цих частинок заряду протилежного знака.

Появляються ці заряди і відповідно хвіст віяла лише при великому значенні напруги на електродах, в області близько 15-20 кВ.

Для діелектричного матеріалу (наприклад, олівіну) спостерігаються деякі відмінності в поведінці віял в залежності від напруги (рис. 3).

За відсутності напруги формується вузьке віяло діелектрика. При збільшенні напруги спочатку віяло діелектрика зміщується назад (див. рис. 3).

Таке зміщення говорить про те, що знаки зарядів діелектриків і провідників протилежні.

При значному підвищенні напруги діелектрик також, як і провідник, зміщується вперед у порівнянні з гравітаційним зсипанням.

У цьому випадку частинки діелектрика змінюють знак заряду.

Рис. 3. Віяло розподілу частинок олівіну в модернізованому сепараторі в рабочому режимі при температурі 24 °С

Стрибкоподібний рух частинок складається умовно з двох частин: удару об електрод, відскоку відповідно з властивостями матеріалів частинки в електрода і потім польоту частинки в процесі стрибка до наступного зіткнення з електродом: удар, відскік, стрибок (політ), удар і т.ін.

Рівняння руху частинки в процесі стрибка може бути записано у вигляді

$$m\frac{d\overline{U}}{dt} = \vec{F}_T + \vec{F}_K + \vec{F}_C \qquad (3)$$

де m - маса частинок; U - вектор швидкості частинок; FT-вектор сіли тяжіння; FK - вектор кулонівської сіли; FC - вектор сіли опору середовища. Розписавши складові векторів сил за осями координат отримуємо систему взаємопов'язаних рівнянь

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = V_x; \\ \frac{dy}{dt} = V_y; \\ m\frac{dV_x}{dt} = mg\sin\alpha - F_{cx}; \\ m\frac{dV_y}{dt} = -mg\cos\alpha + F_{эл} - F_{cy}. \end{cases} \qquad (4)$$

де $F_c=6\pi\mu a V_{kc}$ - сила опору середовища руху частинки; $k_c=(1+\mathrm{Re}^{2/3})/6$- коефіцієнт; $V=\sqrt{V_x^2+V_y^2}$ - швидкість частинки; $F_{ел}=\frac{0{,}5\pi bcs_o E_o^2(s_1-1)^2(1-l)}{k^2}$; - електрична сила; a,b,c - осі еліпсоїдної частинки, ε_o,ε_1 - діелектрична проникливість середовища та частинки; $I=\frac{1}{в^2}\left(1-2\frac{1-в^2}{в^2}\ln\frac{b}{a}\right)$ - струм; E_o - напруженість на електроді, - k=1+da(ε_1-1). E - розраховувалась за допомогою програмного продукту для розрахунку за методом еквівалентних зарядів. Початковими умовами є: V_y/t=0=V_{oy}; V_x/t=0=V_{ox}; xt=0=0; yt=0=h_o; qt=0=q_o

Для проведення основної маси розрахунків з метою скорочення часу використовувалися стандартні програмні продукти. Система (7) інтегрувалася із застосуванням стандартної програми вирішення систем диференціальних рівнянь методом Хеммінга.

Залежності (рис. 4) дозволяють виявити механізм селективного зарядження частинок в сепараторі.

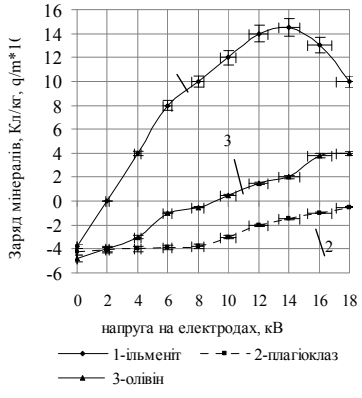

Рис. 4. Залежність заряду мінералів чорнового ільменітового концентрату, який отриманий з титаномагнетитової руди

При нульовій напрузі на електродах сепаратора електричне поле в сепараторі відсутній і заряд частинок є зарядом трибоелектризації. Залежність заряду від напруженості поля має вигляд $q_z=q_{тр}+kE$, де q_z - сумарний середньомасовий заряд частинок; $q_{тр}$ - заряд трибоелектризації, що одержується за відсутністю поля; E - напруженість електричного поля; k - коефіцієнт пропорційності. Подібний вид залежності зберігається не в усьому діапазоні напруженості поля. При збільшенні напруженості поля частинки починають відриватися і вдарятися об верхній електрод. Це приводить до зменшення заряду і лінійна залежність порушується. Інтенсивне зарядження провідників, в даному випадку ільменіту, приводить до швидкої зміни знака його заряду. Матеріали діелектрики, внаслідок їх малої електропровідності, заряджаються значно повільніше. Частинки провідників і діелектриків в результаті такого зарядженння мають заряди різного знака.

З аналізу процесу зарядження можна сформулювати принцип селективного зарядження в трибоелетростатичному сепараторі. По-перше, це придбання частинками початкових зарядів трибоелектризації. По-друге, негативний знак цих зарядів як для провідників, так і для діелектриків обумовлює додаток до електродів напруги певної полярності. А саме, верхній високовольтний електрод повинен мати негативний потенціал. У цьому випадку інтенсивний процес на стадії індукційної зарядки призводить до того, що провідники швидко набувають позитивний індукційний заряд або фактично перезаряджаються, змінюючи знак свого початкового трибозаряду. Діелектрики заряджаються набагато повільніше і не змінюють знак заряду. Наявність у ільменіту і олівіну при напрузі ±5 кВ зарядів різного знака пояснює відмінність в поведінці віял при цій напрузі (див. рис. 2,3).

Здійснення селективного зарядження в пластинчатому модернізованому трибоелектростатичному сепараторі відбувається завдяки взаємодії та комбінації двох виділених вище стадій: трибозарядження та стадії індукційного зарядження або фактично перезарядження. Комплексне дослідження та аналіз зарядження та руху частинок дозволяє виявити явище перезарядження частини частинок провідників при ударі об верхній електрод при підвищеній напрузі. Це і призводить до зменшення сумарного заряду частинок провідників при напрузі U> 15кВ (див. рис.4).

Розрахункові траєкторії частинок ільменіту розміром аср наведені на рис.5. Там же для порівняння наведено експериментальне віяло розподілу мінералу за секціями приймача продуктів. Виміряне середньоквадратичне відхилення частинок від середнього радіусу в концентраті склало σ_a = 0,13 мм. На рис. 5 для порівняння нанесені також розрахункові траєкторії для частинок радіусом $a_{ср} \pm s$ (криві *2*,*3*).

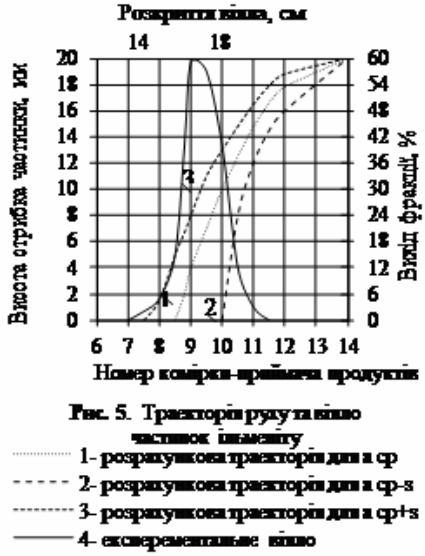

Рис. 5. Траєкторія руху та віяло частинок ільменіту

1- розрахункова траєкторія для а ср

2- розрахункова траєкторія для а ср-s

3- розрахункова траєкторія для а ср+s

4- експериментальне віяло

Залежність заряду трибоелектризації від довжини зарядного електрода при t = 24°С, після відповідної обробки можна представити у вигляді

$$q_{mp}(l) = m\left(\frac{q}{m_{mp\,\text{exp}}\,250\ мм} - g\infty\right)l \qquad (5)$$

Величина заряду частинки в момент зльоту з зарядного електрода в результаті розрахунку за наведеною методикою виходить рівної $q_{розр}$ = 4,76×10-14 Кл. При переході до масового заряду маємо q/т = 7,49×10-6 Кл/кг. Експериментальне значення заряду для цих умов становить 6,2×10-6 Кл/кг.

Порівняння з експериментальними віялами розподілів мінералів по секціях приймача продуктів показує, що похибка не більше 5%, з відзнакою не більше 10 мм від максимуму експериментального віяла.

Висновки та напрямки наукових досліджень. Отже отримано модель руху мінералів всередині трибо-електростатичного сепаратора, яка на відміну від раніше запропонованих, характеризує стрибкоподібний рух частинок, залежний від розміру, швидкості частинки, її механічних, пружних властивостей, питомого заряду частинки, характеристик електрода, та складається, умовно, з двох частин: удару об електрод, відскоку частинки від електрода та потім польоту частинки в процесі стрибка до наступного зіткнення з електродом: удар, відскік, стрибок (політ), удар і так далі, що дозволяє визначити раціональні параметри ведення процесу електросепарації ільменіту титаномагнетитових руд без втрати продуктивності. Підвищення якості ільменітового концентрату на 1,3 % забезпечується селективним зарядженням мінералів за рахунок взаємодії та комбінації двох стадій: стадії попереднього зарядження, що використовує явища трибоелектризації й об'ємного коронного заряду, та стадії основного зарядження частинок зарядом, протилежним заряду трибоелектризації, який створюється знаком верхнього електрода, що призводить до того, що провідники швидко набувають позитивний індукційний заряд і перезаряджаються, змінюючи знак свого початкового заряду, а діелектрики заряджаються негативно без тенденції до індукційного перезарядження,

внаслідок цього виникає істотна відмінність у зміщенні віял провідників і діелектриків при різній напрузі без зниження продуктивності сепаратора.

Список літератури

1. **Попков В. И.** Кинетика зарядки и динамики волокон в электрическом поле / **В.И. Попков, М. И. Глазов**. - М., Наука, 1976.

2. **Плаксин Н.Н.** Сепарация тонковкрапленных железных руд электрическим и сухим магнитным методом / **Н.Н. Плаксин, Н.Ф. Олофинский**. – М.: Наука, 1966, 205 с.

3. **Олофинский Н. Ф.** Трибоадгезионная сепарация / **Н. Ф. Олофинский, Новикова В. А.** М., Наука, 1974.

4. **Олофинский Н. Ф.** Электрические методы обогащения. М., Недра, 1977.

5. **Верещагин И.П.** Основы электрогазодинамики дисперсных систем / И**. П. Верещагин, В. И. Левитов, Г. З. Марзабекян, М. М. Пашин**. – М.: Энергия, 1974. 321 с.

6. **Верещагин И.П.** Динамика дисперсных систем. – М.: Недра, 1977, 305 с.

7. **Ангелов А.И.** Движение заряженных частиц в электрическом поле коронно-электростатическом поле коронно-электростатического барабанного сепаратора / А**.И. Ангелов, В.С. Ершов, С.И. Лосаберидзе.** – Электронная обработка материалов. 1978, № 4, с. 45 – 50.

8. **Ангелов А.И.** Электростатические сепараторы свободного падения / **А.И. Ангелов, Ю.Н. Набиулин.** М., Недра, 1970.

9. **Карнаухов Н. М.** Технология доводки коллективных концентратов с помощью электрической сепарации. М., **Недра, 1966.**

10. **Месеняшин** А. И. Электрическая сепарация в поле короны чередующейся полярности. - Электронная обработка материалов. 1978, № 6 (78) , с. 83 – 85.

11. **Месеняшин А. И.** Электрические силы при электросепарации по проводимости. – Обогащение руд, 1976, № 3, с. 15 – 19.

12. **Ralson O.C.** Electrostatic separation of mixed granular solids. - Amsterdam: Elsevier. – 1961.

13. **Lawer J.E., Derenforth W.P.** Electrostatic separation / Electrostatic and its applications ed A.D.Moore. – New York: Wiley. – 1973. – PP. 221-249.

14. **Knoll F.S., Lawer J.E., Taylor J.E.** Electrostatic separation. / Ullmann′s Encyclopedia of Industrial Chemistry 5th edn.– Weinheim: VCH. – 1988. – Vol. B2. – PP. 20-1-20-11.

Рукопис подано до редакції 24.03.14

УДК 622.7: 622.765.06

М.О. ОЛІЙНИК, аспірант, А.І. МАКАЧОВА, студентка
Криворізький національний університет

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗБАГАЧЕННЯ ГРАФІТОВОЇ СИРОВИНИ ЗАВАЛЛІВСЬКОГО РОДОВИЩА

Статтю присвячено проблемі переробки бідних графітових руд Заваллівського родовища. В статті проведено аналіз розроблених та впроваджених технологій збагачення графітової сировини, за якими виявлені переваги і недоліки розглянутих технологій збагачення графітових руд. В результаті дослідження обрана оптимальна схема збагачення графітових руд. Досліджено мінералогічний та хімічний склад досліджуваної проби графітового гнейсу Заваллівського родовища. Відмічено вплив ступеню подрібнення графітової руди на її флотуємість в умовах реагентного режиму Заваллівського комбінату. Приведено результати досліджень закономірностей зміни показників флотації при зміні витрат реагентів (соди, рідкого скла, керосину та Т-66). Встановлено оптимальний реагентний режим, за яким значно підвищується якість концентрату. Надано результати збагачення графітової руди за обраною схемою та при встановленому реагентному режимі.

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. По запасам графітової сировини Україна займає одне з провідних місць у світі. Сьогодні Україна виробляє графітову продукцію, що достатня як для місцевих потреб, так і для експорту. Графітова товарна продукція є досить дорогою сировиною і в залежності від її чистоти вартість може коливатися від 1,5 до 10 тис. у.о. за одну тону. Отримання більш якісних графітових концентратів, змушує продуцентів модернізувати свої технологічні схеми, шукати можливість їх вдосконалення або введення додаткових способів обробки.

За рахунок того, що запаси багатих графітових руд практично вичерпані, не втрачає актуальності питання залучення в переробку бідних графітових руд. Так, технологія флотаційного збагачення графітової сировини Заваллівського родовища, що включає основну флотацію графіту і три-п'ять перечисток пінного продукту флотації, не дозволяє з бідних руд отримувати

© Олійник М.О., Макачова А.І., 2014