

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА РАЗТВОРИ ОТ МЕДЕН СУЛФАТ И ВОДНО СЪГЛАСИЕ ВЪРХУ ЕЛЕКТРОКИНЕТИЧНИЯ ПОТЕНЦИАЛ НА МАГНЕТИТА В ПРИСЪСТВИЕ НА КСАНТОГЕНАТ

Валерия Ковачева-Нинова¹, Александър Стефанов¹

¹Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, E-mail: valia@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Съдържанието на Fe в медния концентрат, получаван при флотацията на медни шлаки е високо и достига 45-48%. Голям относителен процент спрямо желязосъдържащите минерали заема магнетитът. Целта на статията е да изследва повърхностните свойства на магнетита при наличие на Cu^{2+} (съдържащи се в йонния състав на пулпа) и Na_2SiO_3 , без и в присъствие на ксантогенат и установяване на най-подходящите условия за неговата депресия. За целта са направени изследвания на повърхностните явления на магнетита във вода и моделни разтвори от меден сулфат, водно стъкло и ксантогенат в концентрации близки до тези в реалния флотационен пулп. Извършени са замервания на ξ -потенциала на чисти магнетитови минерали в посочените условия, чрез прилагане на измерителния метод- електрофореза. Определени са стойностите и знака на електрокинетичния потенциал на магнетита в изследваните условия в широк диапазон на pH и са направени изводи за състоянието на повърхността му, условията за адсорбция на събирател и образуването на шламови покрития.

Ключови думи: ξ - потенциал, магнетит, медни йони, водно стъкло, ксантогенат.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF SOLUTIONS OF SULPHATE AND WATER-GLASS UPON ELECTROKINETIC POTENTIAL OF MAGNETITE IN PRESENCE OF XANTOGENATE

Valeria Kovacheva-Ninova¹, Alexandar Stefanov¹

¹University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, E-mail: valia@mgu.bg

ABSTRACT. Iron content in copper concentrate obtained during flotation of copper slag is high and reaches 45-48 %. Magnetite has high relative share among iron containing minerals. This work is aimed at investigating magnetite surface properties in presence of Cu^{2+} (in the ionic composition of pulp) and Na_2SiO_3 , without and with presence of xantogenate, as well as finding out the most favourable conditions for its depression. For that purpose, investigation of surface phenomena of magnetite in water and model solutions of copper sulphate, water-glass and xantogenate in concentrations close to those of a real flotation pulp were performed. Measurements of ξ - potential of pure magnetite minerals at the quoted conditions were made by means of electrophoresis method. The values and the sign of the electrokinetic potential of magnetite at the investigated conditions were determined in wide pH range and conclusions were made as to its surface condition, conditions for adsorption of collector and formation of middling slime coverings.

Key words: ξ - potential, magnetite, copper ions, water-glass, xantogenate.

Въведение

При флотацията на медни шлаки, във флотационния пулп голям относителен процент (от 15 до 30 %) спрямо останалите минерали заема магнетитът. Повърхностният слой на магнетитовите частици взаимодейства не само с водата, но и с разтворените в нея компоненти-електролити (специално въведени или образувани в течната фаза на пулпа от частичното разтваряне на минералите) и хетерогенни органични съединения. Това взаимодействие се разглежда като адсорбция на разтворените вещества на граничната повърхност между фазите твърдо-течно. В зависимост от начина на осъществяване, адсорбцията е физическа или химическа. Съществена нейна особеност е образуването на гранична повърхност наречена двоен електрически слой (ДЕС). ДЕС оказва голямо влияние върху омекването на минералната повърхност, тъй като образуването на външния му слой се извършва в зоната на разполагане на хидратните слоеве

(Глембоцкий и др., 1961). Енергетичното състояние на граничните слоеве на ДЕС може да се определя индиректно, чрез измерване на електрокинетичния потенциал (ξ - потенциал) възникващ на границата на слоевете на Щерн и Гуи (Fuerstenau and Healy, 1972).

Интерес представляват повърхностните свойства на магнетита в присъствие на Cu^{2+} и водно стъкло- типичен депресор на желязните оксиди (Глембоцкий и Бехтле, 1964), в състава на пулпа при флотация на медни шлаки с ксантогенат. Определянето на знака и стойността на ξ -потенциала на магнетита в моделни разтвори съдържащи Cu^{2+} и водно стъкло дава информация за състоянието на повърхността му, условията на адсорбция на събирател и образуването на шламови покрития. За тази цел е изследван ξ - потенциалът на магнетит (Fe_3O_4) в моделни разтвори от меден сулфат CuSO_4 и Na_2SiO_3 при различни стойности на pH, в и без присъствието на ксантогенат.

Експериментална част

Характеристика на магнетита

Експерименталната работа е извършена с чисти магнетитови октаедрични кристали, поместени в хлоритови шисти от Крумовградско. Отделянето на магнетита е извършено ръчно под бинокулярна лупа. Чистотата на мономинералната проба е дадена в табл. 1.

Таблица 1.

Химичен състав на магнетита.

Показател	Съдържание, %
Fe ₃ O ₄	97,79
Fe	70,76

Примесите Al, Ca, Cr, Mg, Mn, Ti, V в магнетитовите кристали са 2.21 %. Данните показват, че чистотата на магнетита е висока. Съдържанието на Fe по стехиометричната формула на Fe₃O₄ съставлява 72.35 %, а в използваните за изследването кристали е 70.76%.

Необходимата едрина на частиците за измерване на стойностите на ξ -потенциала е под 10 μm . Извършена е подготовка на магнетитовата проба, като тя е стрита в ахатов хапан до едрина 100 % -10+0 μm .

Използвани реагенти и апаратура

За подготовката на моделния разтвор от меден сулфат с подходяща концентрация на медни йони е измерено реалното съдържание на Cu²⁺ и SO₄²⁻ във воден извлек на смяна медна шлака от ОФ "Кумерио-Мед"- гр. Пирдоп. Съдържанието на медните и сулфатните йони е определено, чрез AES по метода ISP и дадено в табл. 2.

Таблица 2.

Съдържание на Cu²⁺ и SO₄²⁻ във воден извлек на смяна медна шлака.

Показатели	Съдържание, mg/l
Cu ²⁺	35.34
SO ₄ ²⁻	264

За изследване стойностите на ξ -потенциала на магнетита в разтвори съдържащи Cu²⁺, Na₂SiO₃ и ксантогенат са използвани следните реагенти:

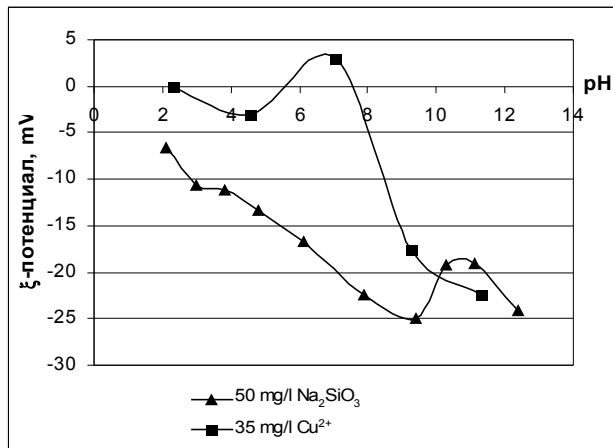
- CuSO₄.5H₂O в концентрация 137.5 mg/l (съдържание на Cu²⁺ 35 mg/l);
- Na₂SiO₃ със силикатен модул 2.9 в концентрации 25, 50, 100, 150 и 200 mg/l;
- калиев изобутилов ксантогенат (C₄H₉OCS₂K) в концентрация 100 mg/l.

Като регулатори на pH на разтворите са използвани сярна киселина (H₂SO₄) и натриева основа (NaOH).

Измерването на ξ -потенциала на магнетита в изследваните моделни разтвори се извършва по метода електрофореза с помощта на Zetasizer-Nano метър PTS 1060 на фирмата Malvern, а на pH на разтворите с pH – метър Jenway 3305.

Получени резултати

Интерес представлява поведението на частици, образували се в разтвори на меден сулфат и водно стъкло, при различни стойности на pH. Промените в електрокинетичния им потенциал в разтвори от 137.5 mg/l CuSO₄.5H₂O и 50 mg/l Na₂SiO₃ в зависимост от pH са показани на фиг. 1.



Фиг.1. Електрокинетичен потенциал на частици в разтвори на CuSO₄ и Na₂SiO₃ в зависимост от pH.

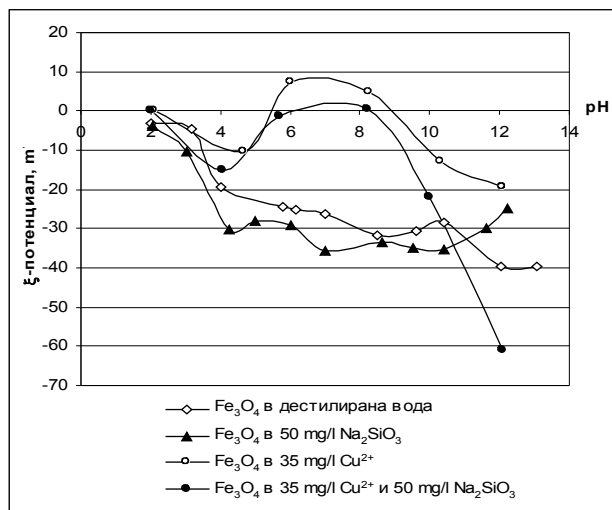
Медта в разтвори от меден сулфат при pH около 2 се намира в йонно състояние. При pH на разтвора над 3.0 започва утаяването ѝ с образуване на основната сол CuSO₄.2Cu(OH)₂. В диапазона на pH от 3.0 до 4.5, частиците имат ниска отрицателна стойност на ξ -потенциала до -3.1mV. При pH от 4.5 до 8.0 медта се утаява под формата на Cu(OH)₂, като при pH 5.5 и 7.5 се наблюдава презареждане на повърхността на образуваните частици с преход през две изоелектрически точки в които ξ -потенциалът е нула. В посочения диапазон на pH се достига положителна стойност на ξ -потенциала от+3.0 mV при pH 7.0. С увеличаване pH на разтвора над 8.0, ξ -потенциалът на частиците Cu(OH)₂ рязко нараства в отрицателните стойности до -22.5 mV при pH=11.5.

Разтворите от водно стъкло представляват сложна смес от лесно хидролизираци се соли на силициевата киселина. Съставът и дисперсността на частиците в тях зависи от концентрацията на разтворите и от pH на средата. Дисперсността на частиците нараства с повишаване pH на разтворите (Абрамов, 1993). При обработка на водното стъкло с киселини се получава т.нар. "активирано водно стъкло", съдържащо значително количество суспендирани във водата частици силициева киселина. В кисела среда, разтворите съдържат хидратирани частици силициева киселина. С увеличаване на pH, молекулите силициева киселина полимеризират и достигат размерите на колоидни частици. В основна среда, силициевата киселина образува отрицателно заредени частици в резултат на високия афинитет на силиция към кислорода (Хан и др., 1986), а при много високи стойности на pH, разтворите могат да съдържат прости йони. Измерената стойност на ξ -потенциала на частиците в 50 mg/l разтвор на Na₂SiO₃ с pH 10.3 е -19.3 mV. В изследвания диапазон на pH на разтвора, ξ -потенциалът е отрицателен и нараства с повишаване на pH на разтвора.

От фиг.1 се вижда, че при pH 2.1 ξ -потенциалът на частиците силициева киселина е -6,7 mV и с повишаване pH на разтвора достига до -25 mV при pH 9.4.

Стойностите на ξ -потенциала на частиците в двата типа разтвори показват, че с нарастване на pH на средата нараства дебелината на дифузната част на ДЕС и на хидратираността на частиците.

Измененията на електрокинетичния потенциал на магнетита в дестилирана вода и в разтвори на CuSO_4 и Na_2SiO_3 , при различни стойности на pH, са дадени на фиг.2.



Фиг.2. Електрокинетичен потенциал на магнетита в дестилирана вода и разтвори на CuSO_4 и Na_2SiO_3 , в зависимост от pH.

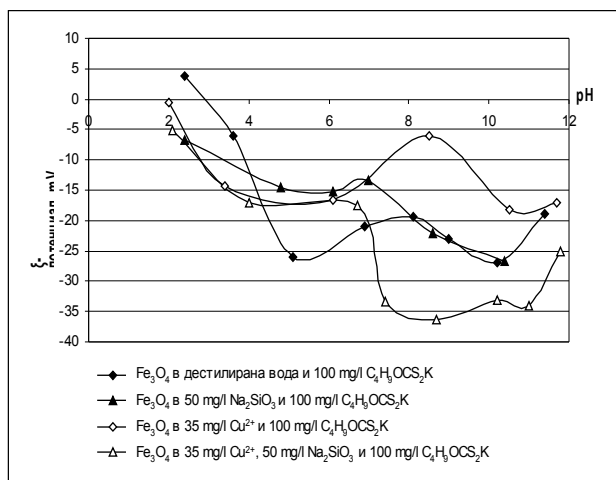
Магнетитовите частици в дестилирана вода с pH=6.0 имат отрицателна стойност на ξ -потенциала, $\xi = -24.5$ mV. Добавянето на H_2SO_4 или NaOH , за достигане на различни стойности на pH на средата, води до значително изменение в стойностите му. Електрокинетичният потенциал на магнетита в дестилирана вода при различно pH, запазва отрицателния си знак и нараства от -3.3 mV при pH 2.0 до -40.0 mV при pH 12.0-13.0. С повишаване на концентрацията на H^+ във водата се увеличава преходът им от дифузния към външния слой на ДЕС, при което отрицателната стойност на ξ -потенциала на магнетита намалява. Добавянето на H_2SO_4 води до намаляване дебелината на дифузния слой на ДЕС на магнетита, при което хидратираността на повърхността му би трябвало да намалява. С повишаване на концентрацията на OH^- във водата се повишава отрицателната стойност на ξ -потенциала на магнетита. Добавянето на NaOH води до увеличаване на дебелината на дифузния слой, при което би трябвало хидратираността му да нараства. Промените в ξ -потенциала на магнетита показват, че потенциалопределящи йони се явяват както H^+ така и OH^- . Отрицателната стойност на електрокинетичния потенциал се определя в зависимост от количественото им съотношение в разтвора. Нарастването на електроотрицателността на ξ -потенциала на магнетита с повишаване на pH на средата указва за засилване на депресията му в алкална среда.

Магнетитът в разтвор от 50 mg/l Na_2SiO_3 с pH 8,6 има отрицателен ξ -потенциал = -33.4 mV. При различно pH на разтвора, ξ -потенциалът на магнетита запазва отрицателната си стойност и нараства от -3.8 mV при pH 2.0 до -35.5 mV при pH 10.5. От фигурата се вижда, че ξ -потенциалът на магнетита в разтвора от водно стъкло е в по-голяма степен отрицателен отколкото в дестилирана вода, в границите на pH от 4.0 до 10.5. Увеличаването на отрицателната стойност на ξ -потенциала с повишаване pH на средата над 4.0 говори за усилване на депресиращото действие на водното стъкло върху магнетита с нарастване на алкалността на средата. Вероятно в слабо киселата област на pH на разтвора, водното стъкло във вид на хидрофилни колоидни частици силициева киселина се закрепва молекулярно върху магнетитовите частици, а в алкалната концентрацията на полийоните и простите силикатни йони нараства и формата на закрепване на водното стъкло върху магнетита е йонна.

Магнетитът в разтвор от 137.5 mg/l $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ с pH 4.6 има отрицателен ξ -потенциал = -10.3 mV. В разтвора се наблюдава съществена промяна в повърхностните свойства на магнетита в изследвания диапазон на pH. В силно кисела среда (pH= 2.1, с добавяне на H_2SO_4) ξ -потенциалът на магнетита е +0.3 mV. С нарастване на pH на разтвора се увеличава отрицателната му стойност до посочената при pH 4.6, след което при pH 5.5 потенциалът преминава през изоелектрическа точка, знакът му се променя и стойността му достига до +7.4 mV при pH 6.0. Наблюдава се второ презареждане на повърхността на магнетитовите частици с преминаване отново през изоелектрическа точка при pH около 9.0 и достигане на отрицателна стойност на ξ -потенциала -19.3 mV при pH 12.1. В диапазона на pH от 5.5 до 9.0, магнетитът има положително заредена повърхност, т.е. знакът на ξ -потенциала се променя и се осъществява химическа адсорбция на Cu^{2+} с магнетитовата повърхност.

Солите на поливалентните метали влияят върху действието на водното стъкло. В тези случаи, върху повърхността на минералите се сорбират както йони на тежките метали, така и силикатни йони и съединения на поливалентния метал със силиката. В разтвор от 137.5 mg/l $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и 50 mg/l Na_2SiO_3 с pH 5.7 магнетитът има ξ -потенциал = -1.24 mV. В силно кисела среда (pH=2.0) ξ -потенциалът на частиците е +0.015 mV, т.е. състоянието на магнетита в разтвора е почти изоелектрично. С нарастване на pH на разтвора до pH 4.0 се увеличава отрицателната стойност на ξ -потенциал до -15.0 mV, след което стойността му намалява и в диапазона от 6.0 до 8.3 електрокинетичният потенциал е близко до нулата. При pH над 8.3 се наблюдава рязко повишаване на отрицателната стойност на ξ -потенциала на магнетита и при pH 12.0 е -61.5 mV. Високите отрицателни стойности на електрокинетичния потенциал, в силно алкалната област на разтвора (pH>10.5), указват вероятно за засилване на депресиращото действие на водното стъкло в присъствие на Cu^{2+} . Явлението може да бъде обяснено с адсорбцията на Cu^{2+} върху повърхността на магнетита във вид на медни силикати.

Електрокинетичните потенциали на магнетита в дестилирана вода и в разтвори на CuSO_4 и Na_2SiO_3 в присъствие на събирател, при различни стойности на pH, са дадени на фиг.3.



Фиг.3 Електрокинетичен потенциал на магнетита в зависимост от pH на дестилирана вода и разтвори на CuSO_4 и Na_2SiO_3 и в присъствие на ксантогенат.

Магнетитът в разтвор от дестилирана вода и 100 mg/l калиев изобутилов ксантогенат ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OCS}_2\text{K}$) с pH=6.0 има отрицателна стойност на ξ -потенциала, $\xi = -20.9$ mV. Наблюдава се различие между повърхностните свойства на магнетита в дестилирана вода при различно pH, без и в присъствие на ксантогенат, фиг.2 и 3. Известно е, че в кисела среда ксантогенатът хидролизира с образуване на неустойчивата ксантогенатова киселина, а при pH<4 се разлага до съставните си вещества- спирт, основа и серовъглерод и няма събирателни свойства. В силно кисела среда с pH 2.4, ξ -потенциалът на частиците в присъствие на ксантогенат е положителен, със стойност +3.89 mV. При pH~ 3.0, ξ -потенциалът преминава през изоелектрическа точка, а при pH 3.6 заема вече отрицателна стойност от -6.0 mV. С нарастване на pH на разтвора се увеличава и отрицателната стойност на ξ -потенциала, като максимални отрицателни стойности електрокинетичният потенциал има при pH 5.1 и pH 10.2 съответно -26.0 и -27.0 mV. Разбираемо е, че отрицателният заряд на ξ -потенциала не благоприятства за закрепването на анионен събирател какъвто е ксантогенатът. Но, сравнението между кривите на магнетита в дестилирана вода от фиг. 2 и 3 показва, че присъствието на ксантогенат във водата намалява отрицателната стойност на ξ -потенциала, при едни и същи алкални стойности на pH. Например, ξ -потенциалът на магнетита в дестилирана вода при pH 8.4 е -31.6 mV, а в присъствие на ксантогенат при pH 8.2 е -19.3 mV. Очевидно в широк диапазон на pH от ~5.5 до ~11.5 върху повърхността на магнетита се образува железен ксантогенат. При pH близко до неутралните стойности, частичната хемосорбция на изобутиливи ксантогенат вероятно е най-голяма, тъй като стойностите на ξ -потенциала са най-малки от ~ -20.0 mV.

Електрокинетичният потенциал на магнетита в разтвор от 50 mg/l Na_2SiO_3 и 100 mg/l $\text{C}_4\text{H}_9\text{OCS}_2\text{K}$ с pH 10.4 е отрицателен със стойност -26.7 mV. Сравнението на кривите на ξ -потенциала на магнетита в разтвор от водно

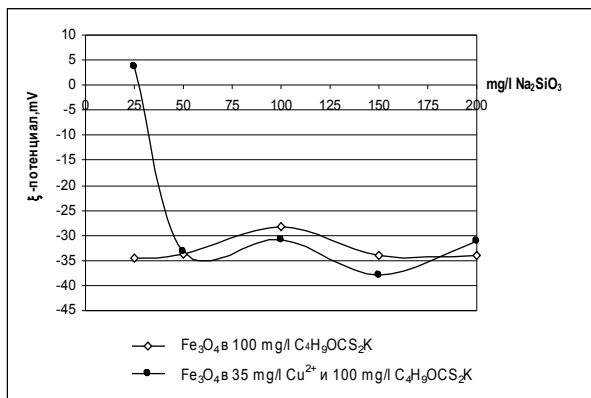
стъкло от фиг. 2 и 3 показва, че ксантогенатът намалява отрицателната му стойност при едни и същи стойности на pH. Диапазонът на pH в който може да се очаква частично колекторно действие на събирателя е от слабокисело до слабо основно pH. Очевидно, при pH от ~4.5 до ~8.0 ξ -потенциалът е най-малко отрицателен, от -13.3 mV до -15.3 mV, при което сорбцията на събирател би трябвало да е най-висока.

Интересно е поведението на магнетита в разтвор от меден сулфат и ксантогенат. Дзета-потенциалът на магнетита в разтвор от 137.5 mg/l $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и 100 mg/l $\text{C}_4\text{H}_9\text{OCS}_2\text{K}$ с pH 6.1 е -16.5 mV. Ионите на двувалентната мед окисляват ксантогената. Във водни разтвори те образуват утайка от меден ксантогенат, която веднага преминава в жълта утайка на едновалентна мед и диксантогенид по реакцията: $2(\text{ROCS}_2)_2\text{Cu} \rightarrow (\text{ROCS}_2)_2 + 2\text{ROCS}_2\text{Cu}$. В слабо кисела среда ксантогенатите образуват със солите на медта комплексни соли, малко разтворими във вода. От фиг.3 се вижда, че в диапазона на pH от 3.5 до 6.0 ξ -потенциалът на магнетита се колебае от -14.2 mV до -16.5 mV. При pH 8.5 стойността на потенциала намалява до -5.9 mV и вероятно се осъществява физическа сорбция на меден ксантогенат и диксантогенид върху повърхността на магнетитовите частици. В този диапазон на pH от слабо алкална до алкална среда е възможно повишаване на флотационната активност на магнетита.

Магнетитът в разтвор от 137.5 mg/l $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 50 mg/l Na_2SiO_3 и 100 mg/l $\text{C}_4\text{H}_9\text{OCS}_2\text{K}$ с pH 10.2 има отрицателна стойност от -33.2 mV. С нарастване на pH на разтвора над ~6.5 рязко се увеличава отрицателната стойност на ξ -потенциала, фиг.3. Високите отрицателни стойности на ξ -потенциала в диапазона на pH от 7.0 до 11.0 говорят, че водното стъкло действа депресиращо върху магнетита и в присъствие на медни йони. Депресията на магнетита вероятно е следствие от изместване на събирателя от водното стъкло и медните силикати и предотвратяване на по-нататъшното му закрепване.

Повърхностните свойства на магнетита в разтвори от ксантогенат и меден сулфат с ксантогенат, при различни концентрации на водно стъкло са показани на фиг.4.

Магнетитът в разтвор от 100 mg/l $\text{C}_4\text{H}_9\text{OCS}_2\text{K}$ има ξ -потенциал=-20.9 mV. От фигурата се вижда, че добавянето на водно стъкло дори и при малки разходи понижава ξ -потенциалът на частиците в присъствие на ксантогенат. Дори и при концентрации 25 mg/l, водното стъкло ще депресираща магнетита. Електрокинетичният потенциал на магнетита в разтвор от 137.5 mg/l $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и 100 mg/l $\text{C}_4\text{H}_9\text{OCS}_2\text{K}$ е -16.5 mV. В присъствие на медни йони стойността и знакът на ξ -потенциала на магнетита се променя до +4.0 mV, при ниски разходи от 25 mg/l Na_2SiO_3 . С повишаване концентрацията на Na_2SiO_3 над 50 mg/l рязко нараства електроотрицателността на ξ -потенциала и се колебае от -31.0 до -38.0 mV. Депресиращото действие на водното стъкло би трябвало да се прояви при концентрации над 50 mg/l, в присъствие на Cu^{2+} .



Фиг.4 Електрокинетичен потенциал на магнетита в разтвори от ксантогенат и меден сулфат с ксантогенат, при различни концентрации на водно стъкло.

Заклучение

От направените изследвания на повърхностните свойства на магнетита във вода и моделни разтвори от меден сулфат, водно стъкло и ксантогенат с концентрации близки до тези в реалния флотационен пулп, могат да се направят следните изводи:

- електрокинетичният потенциал на магнетита във вода е отрицателен и стойността му нараства с нарастване алкалността на средата, т.е. се засилва депресията на магнетита;
- водното стъкло увеличава отрицателността на ξ -потенциала на магнетита в широк диапазон на рН и може да се използва, като ефективен депресор. Изследванията показват, че Na_2SiO_3 проявява депресиращото си действие при рН над 4.0;
- намаляването на отрицателността на ξ -потенциала на магнетита в диапазона на рН от 5.5. до 11.5 в присъствие на ксантогенат показва, че върху повърхността на магнетита се образува железен ксантогенат и е възможно осъществяване на флотация на магнетита;
- в присъствие на ксантогенат, наличието на Cu^{2+} в разтвора намалява в още по-голяма степен

отрицателността на ξ -потенциала на магнетита в слабоалкално до алкално рН. В този диапазон на рН е възможно повишаване на флотационната активност на магнетита;

- в неутрално до алкално рН, водното стъкло действа депресиращо върху магнетита в присъствие на ксантогенат и наличие на Cu^{2+} в разтвора. В този диапазон ξ -потенциалът на магнетита е с високи стойности и отрицателен знак;
- в присъствие на ксантогенат, водното стъкло дори и при малки концентрации до 25 mg/l действа депресиращо върху магнетита. При наличие на Cu^{2+} в разтвора, депресиращото действие на Na_2SiO_3 се проявява при по-високи концентрации- над 50 mg/l.

Направените изследвания показват, че Na_2SiO_3 успешно може да бъде използван като депресор на железно-съдържащите минерали, при флотацията на медни шлаки с ксантогенат. Интерес представлява установяването на влиянието и на други поливалентни йони, като Mg^{2+} , Ca^{2+} и Zn^{2+} съдържащи се във флотационния пулп върху депресиращото действие на Na_2SiO_3 . Изследванията трябва да продължат в тази посока, както и потвърждаване на получените резултатите с извършване на флотационни опити с чисти минерали.

Литература

- Глембоцкий, В. А., Г. А. Бехтле. 1964. *Флотация железных руд*. М., Недра, 26-60 с.
- Глембоцкий, В. А., В. И. Классен, И. Н. Плаксин. 1961. *Флотация*, М., Госуд. Научно-техн. изд. литературы по горному делу, 30 с.
- Fuerstenau, D. W., T. W. Healy. 1972. *Adsorptive bubble separation techniques- Principles of mineral flotation*. Academic Press. (Ed. Lemlich R.). New York-London, 91-131 p.
- Хан, Г.А., Л. И. Габриелова, Н. С. Власова. 1986. *Флотационные реагенты и их применение*. М., Недра, 135 с.
- Абрамов, А. А. 1993. *Флотационные методы обогащения*. М., Недра, 187 с.

Препоръчана за публикуване от Катедра "Обогатяване и рециклиране на суровини", МТФ