

Beata CWALINA^{*}, Stanisław LEDAKOWICZ^{**}, Heike FISCHER^{***}

WPLYW REGULACJI pH UKŁADU ŁUGUJĄCEGO NA PRZEBIEG CHEMICZNEJ I BAKTERYJNEJ EKSTRAKЦИИ NIKLU Z PENTLANDYTU

Badano przebieg chemicznej i biologicznej ekstrakcji niklu z pentlandytu $(\text{Ni,Fe})_9\text{S}_8$ i wykazano istotny wpływ regulacji odczynu pH roztworu ługującego na efektywność tych procesów. Regulacja pH była korzystna w przypadku procesów chemicznych (prowadzonych w warunkach sterylnych), kiedy nie zachodzą biochemiczne procesy utleniania siarki (uwalnianie z minerałów siarczkowych) do kwasu siarkowego, zużywanego w chemicznych procesach roztwarzania siarczków metali. Korekta pH nie jest wskazana dla procesów przebiegających w obecności bakterii *Thiobacillus ferrooxidans*, których aktywność metaboliczna prowadzi do zakwaszania środowiska ługowania.

WPROWADZENIE

Metodę bakteryjnego ługowania stosuje się w wielu krajach do pozyskiwania metali z niskoprocentowych rud i odpadów metalonośnych. Proces bioługowania metali polega na ich ekstrakcji z nierozpuszczalnych związków, np. siarczków lub tlenków, w rezultacie przekształcania minerałów (głównie na drodze utleniania) z udziałem bakterii w formy rozpuszczalne, np. siarczany (Karavaiko i in., 1972). Mikro-

organizmami najczęściej wykorzystywanymi w omawianym procesie są kwasolubne, autotroficzne bakterie siarkowe należące do gatunku *Thiobacillus ferrooxidans*. Bakterie te czerpią energię potrzebną do wzrostu i rozmnażania z procesów utleniania jonu żelazawego i/lub nieorganicznych związków siarki, w tym minerałów siarczkowych. Wykazują wyjątkową tolerancję na wysokie stężenia jonów metali w środowisku oraz na znaczne jego zakwaszenie (Groudev, 1979; Karavaiko, 1985; Cwalina i Dzierżewicz, 1989; 1991). Istotną rolę w przebiegu bioługowania odgrywają dwa mechanizmy: bezpośredni, polegający na biochemicznym utlenianiu siarki ze struktury minerału siarczkowego z udziałem systemu enzymatycznego

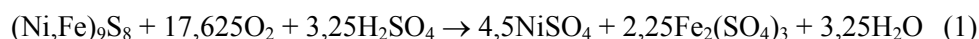
^{*}Katedra Biochemii i Biofizyki ŚAM, Narcyzów 1, 41-200 Sosnowiec.

^{**}Katedra Inżynierii Bioprosesowej, Politechnika Łódzka, Wólczyńska 175, Łódź.

^{***}TU Bergakademie Freiberg, Institut für Technische Chemie, Freiberg, Germany.

bakterii *T. ferrooxidans* oraz pośredni, polegający na chemicznym utlenianiu minerałów siarczkowych przez jony żelazowe wprowadzone do roztworu ługującego lub obecne w nim wskutek wcześniejszego wylugowania z minerałów zawierających żelazo, występujących często w naturalnych surowcach metalonośnych (Karavaiko i in., 1972; Groudev, 1979; Cwalina i in., 1988; Cwalina i Farbiszewska, 1989).

Pentlandyt $(\text{Ni,Fe})_9\text{S}_8$ należy do głównych minerałów niklu. Powstaje wśród skał ultrazasadowych i zasadowych we wczesnym okresie krystalizacji magmy. Zbliżone promienie jonów niklu i żelaza powodują, że na tym etapie krystalizacyjnym tworzą się minerały niklu i żelaza, w których zawartość niklu jest zmienna. W pentlandycie waha się ona w granicach 10–42%, a stosunek zawartości Ni:Fe najczęściej wynosi 1:1 (Chodyncka i Zawisławski, 1987). Domieszką często występującą w pentlandycie jest kobalt, którego zawartość może dochodzić do 25%. Z tego względu minerał ten może być traktowany także jako źródło kobaltu. Stosunek Ni:Co w pentlandycie najczęściej osiąga wartości od 50:1 do 50:2 (Torma, 1988). Podczas biolugowania pentlandytu w środowisku kwaśnym, w obecności bakterii *T. ferrooxidans*, następuje rozwarzanie minerału zgodnie z reakcją (Torma, 1972):



Celem pracy była ocena wpływu regulacji pH roztworu ługującego na przebieg chemicznej i bakteryjnej ekstrakcji niklu z pentlandytu.

MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

W badaniach wykorzystano naturalny pentlandyt wydobyty w Sudbury (Kanada), zawierający 5,21% Ni, 51,10% Fe i 0,25% Co. Stosując metodę dyfrakcyjnej analizy rentgenowskiej stwierdzono, że minerał zawiera także nie w pełni stechiometryczny pirotyt Fe_7S_8 (Fischer, 1997). Badania bioekstrakcji niklu z pentlandytu prowadzono w czasie 59 dni, w kolbach Erlenmeyera (poj. 500 cm³) umieszczonych w termostатовanej (32°C), rotacyjnej wstrząsarce laboratoryjnej. Próbkę minerału o rozdrobnieniu 63–200 µm wprowadzano do układów ługujących w ilości 1 g/100 cm³ roztworu, uzyskując gęstość pulpy 1% wag./obj. Jako roztwór ługujący stosowano wodę destylowaną albo roztwór 9K (9g Fe²⁺/dm³), a także zmodyfikowany roztwór M9K, pozbawiony jonów żelaza. Roztwór 9K, czyli pożywka Silvermana i Lundgren (1959), zawierał w 1dm³: 3 g (NH₄)₂SO₄; 0,5 g KH₂PO₄; 0,5 g MgSO₄ · 7H₂O; 0,5 g H₂SO₄; 0,1 g KCl; 0,02 g Ca(NO₃)₂ · 4H₂O; 44,2 g FeSO₄ · 7H₂O.

Procesy ługowania chemicznego prowadzono w układach sterylnych, do których dodawano 5 cm³ 2% tymolu jako substancji bakteriostatycznej. Ługowanie bakteryjne prowadzono w układach szczepionych bakteriami *Thiobacillus ferrooxidans*, szczep DSM 583 (Braunschweig, Niemcy), do uzyskania ich koncentracji rzędu 10⁷ komórek

w 1 cm³ roztworu. Tak w wariantach sterylnych, jak i bakteryjnych, doświadczenia realizowano z codzienną regulacją odczynu pH roztworu ługującego do wartości 2,5 lub bez regulacji pH.

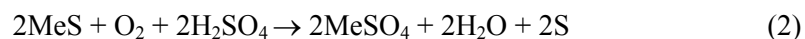
Całkowite stężenia jonów niklu i żelaza w roztworach ługujących oznaczano metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej z zastosowaniem spektrofotometru AAS UNICAM 939, a odczyn pH roztworów badano za pomocą pehametru MV 88 (PRÄCITRONIC, Dresden).

WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

Procesy chemicznego ługowania niklu z pentlandytu prowadzono w wodzie destylowanej lub w roztworze 9K, w warunkach codziennie korygowanego odczynu pH (do wartości 2,5) lub bez jego regulacji. Ługowanie bakteryjne prowadzono z udziałem bakterii *T. ferrooxidans* w zmodyfikowanym, beżelazowym roztworze M9K, także w warunkach regulowanego lub nieregulowanego pH roztworu. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 1 i 2 w postaci dynamiki zmian stężenia niklu w każdym z badanych roztworów podczas trwania ługowania w warunkach regulowanego pH (rys. 1) i bez regulacji pH (rys. 2). Na rys. 3 zilustrowano dynamikę zmian pH w układach ługujących prowadzonych bez regulacji pH roztworu. Dane dotyczące efektywności ekstrakcji niklu i żelaza po 59 dniach trwania procesów chemicznego i bakteryjnego ługowania pentlandytu zamieszczono w tabeli 1, natomiast na rys. 4 przedstawiono efekt wzrostu wydajności ekstrakcji niklu z pentlandytu pod wpływem działania bakterii *T. ferrooxidans*.

Przebieg krzywych na rys. 1 wykazuje, że w sterylnym układzie zawierającym zakwaszoną (pH 2,5) wodę destylowaną następował sukcesywny, prawie liniowy wzrost stężenia jonów niklu, podczas gdy w sterylnym roztworze 9K o takim samym odczynie pH nie obserwowano efektu wylugowania niklu aż do 30 dnia trwania procesu. Po tym czasie stężenie niklu w roztworze ługującym szybko rosło dochodząc do ok. 110 mg/l w 59 dniu ługowania.

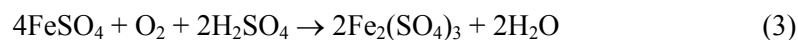
Wyjaśnieniem efektów obserwowanych w układach zawierających zakwaszoną wodę destylowaną lub płyn 9K jako roztwór ługujący może być różny przebieg reakcji zachodzących w obu układach. W zakwaszonej wodzie może przebiegać proces ługowania chemicznego zgodnie z reakcją (Ehrlich i Fox, 1967):



Systematyczne dostarczanie kwasu siarkowego do tego układu ługującego podczas korekty jego pH sprzyja procesowi uwalniania niklu i żelaza z siarczków (rys. 1; tabela).

W przypadku ługowania pentlandytu w roztworze 9K zawierającym Fe²⁺ (9 g/dm³) nie obserwowano ekstrakcji niklu w początkowej fazie procesu, bo w tych

warunkach kwas siarkowy mógł być zużywany w pierwszej kolejności na chemiczne utlenianie jonu żelazowego (Fe^{2+}) do żelazowego (Fe^{3+}) zgodnie z reakcją (Łętowski, 1975):



a dopiero później powstający jon żelazowy mógł działać na minerał siarczkowy jako efektywny utleniacz, powodując jego roztrawianie zgodnie z reakcją:

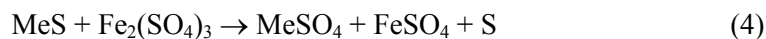
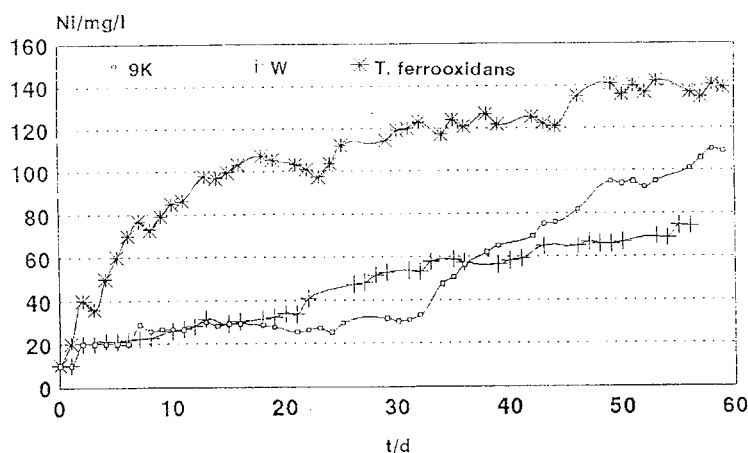


Tabela. Efektywność chemicznego i bakteriynego ługowania metali z pentlandytu
Table. Effectivity of chemical and bacterial leaching of metals from pentlandite

Roztwór ługujący	Regulacja pH	[%] metalu wylugowanego w czasie (dni)				
		Ni (15)	Ni (30)	Ni (45)	Ni (59)	Fe (59)
H ₂ O (steryl.)	+	5,6	10,2	12,5	14,3	11,5
	–	3,6	4,4	5,8	6,4	5,1
9K (steryl.)	+	5,7	5,8	15,1	21,1	9,1
	–	4,2	4,6	5,9	10,3	5,7
M9K+T.f.	+	19,1	22,9	24,6	26,9	7,4
	–	21,1	36,1	46,1	52,9	6,4

+ codzienna regulacja odczynu do pH 2,5; – bez regulacji odczynu pH; (steryl.) – sterylny; T.f. – bakterie *T. ferrooxidans*.



Rys. 1. Stężenie niklu w roztworach (9K – sterylny roztwór zawierający Fe^{2+} , 9g/dm^3 ; W – sterylna woda destylowana; *T. ferrooxidans* – roztwór szczepiony bakteriami, bez jonów Fe^{2+}) podczas ługowania pentlandytu w warunkach regulowanego pH

Fig. 1. Concentration of nickel in pH-adjusted solutions (9K – sterile solution containing Fe^{2+} , 9 g/dm³; W – sterile distilled water; *T. ferrooxidans* – solution inoculated with bacteria, without Fe^{2+} ions) during the leaching of pentlandite

Szybkość reakcji (3) jest generalnie niewielka i rośnie istotnie ze wzrostem stężenia Fe^{2+} w roztworze (Pluskota i Żmudziński, 1969; Pesic i in., 1989). Taki efekt mógł się przyczynić do obserwowanego na rys. 1 wzrostu stężenia niklu, wyługowanego z pentlandytu po 30 dniach trwania procesu.

W układzie szczepionym bakteriami *T. ferrooxidans* obserwowano jeszcze szybszy przebieg ekstrakcji niklu z pentlandytu (rys. 1), gdyż w tych warunkach mogły zachodzić wszystkie wymienione reakcje – od (1) do (4). Ponadto bakterie mogły przeprowadzać biochemiczne utlenianie jonu Fe^{2+} i przez to wielokrotnie zwiększać szybkość reakcji (3) (Karavaiko, 1985; Pesic i in., 1989), a także mogły utleniać siarkę elementarną powstającą w reakcjach (2) i (4), powodując zwiększenie puli kwasu siarkowego powstającego w tych warunkach zgodnie z reakcją (Lundgren i Silver, 1980; Karavaiko, 1985):



Roztwarzanie pentlandytu zgodnie z reakcją (1) oraz pirotynu zgodnie z reakcjami (2) i (4), przy równoczesnym przebiegu reakcji (3), prowadziło do wzrostu stężenia jonów żelazowych Fe^{3+} w roztworze. W przyjętych warunkach badań skutkowało to wytrącaniem się wodorotlenków i hydroksysiarczanów żelaza, w tym złożonych jazytów (Fischer, 1997). Mogły one powstawać zgodnie z reakcją (Silberstein, 1984)

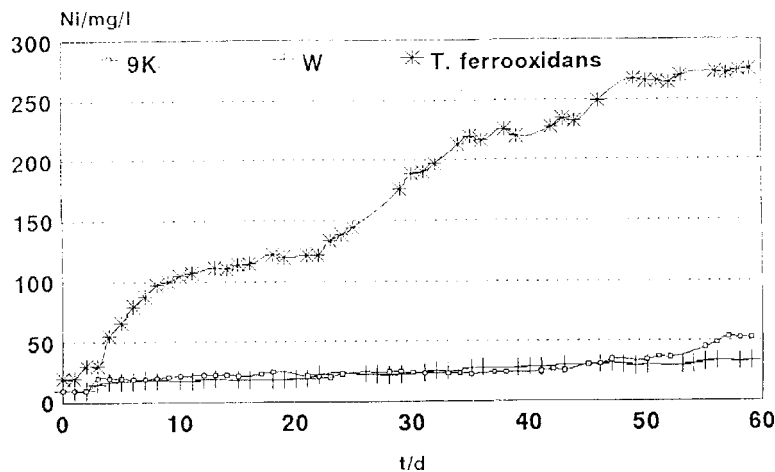


(w ilościach nierównoważnych) i maskować powierzchnię ługowanego siarczku, a przez to powodować zmniejszenie szybkości bioekstrakcji niklu (rys. 1). Z tego względu w obecności bakterii *T. ferrooxidans* nikiel ulegał wyługowaniu z największą szybkością w czasie pierwszych 15 dni trwania procesu, a następnie szybkość procesu malała. W 59 dniu stężenie niklu w roztworze ługującym M9K szczepionym bakteriami *T. ferrooxidans* wynosiło ok. 140 mg/l i było ok. dwukrotnie większe od stężenia tego metalu w układzie ze sterylną, zakwaszoną wodą i niespełna półtorakrotnie większe od stężenia w sterylnym roztworze 9K.

Odmienny przebieg ekstrakcji niklu z pentlandytu obserwowano w procesach ługowania prowadzonych bez regulacji odczynu pH (rys. 2), przy czym początkowa wartość tego parametru procesu wynosiła pH 2,5. Po 59 dniach trwania procesu stwierdzano jedynie nieznaczne wyługowanie niklu zarówno w środowisku sterylnej wody destylowanej, jak i w sterylnym roztworze 9K. Bioługowanie niklu w obecności bakterii *T. ferrooxidans* przebiegało intensywnie od początku procesu do 47 dnia jego trwania. Ilość niklu uwolnionego z pentlandytu po 59 dniach trwania procesu w układzie szczepionym bakteriami *T. ferrooxidans* była przeszło pięciokrotnie większa od ilości niklu wyługowanego w układach bez bakterii (rys. 2). Według danych literaturowych

(Karavaiko, 1985), bioekstrakcja niklu z minerałów siarczkowych (pentlandyt, mileryt) w obecności bakterii *T. ferrooxidans* może być 2–17 razy bardziej efektywna niż procesy ługowania chemicznego.

Wyniki badania pH roztworów ługujących w układach bez regulacji odczynu pH wykazały, że w sterylnej wodzie oraz w sterylnym roztworze 9K w czasie pierwszych

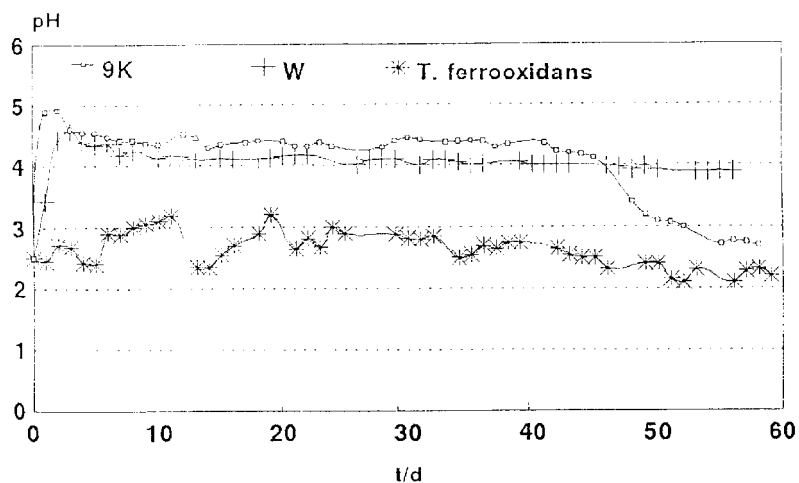


Rys. 2. Stężenie niklu w roztworach (9K – sterylne roztwór zawierający Fe^{2+} , 9 g/dm³;

W – sterylna woda destylowana; *T. ferrooxidans* – roztwór szczepiony bakteriami, bez jonów Fe^{2+}) podczas ługowania pentlandytu bez regulacji pH

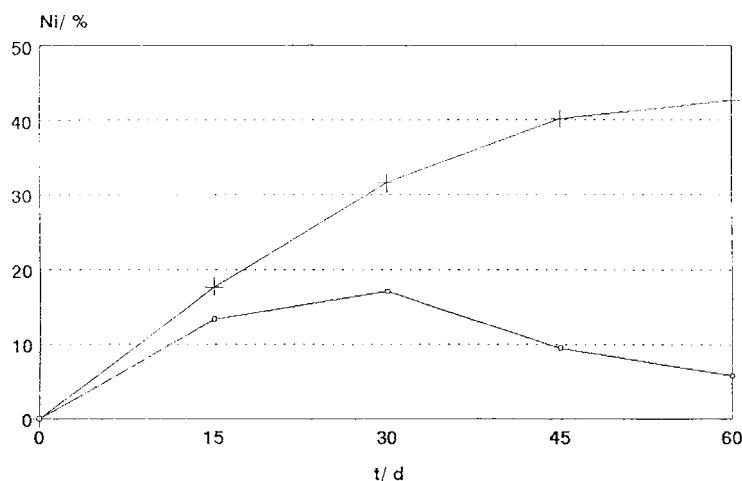
Fig. 2. Concentration of nickel in solutions (9K – sterile solution containing Fe^{2+} , 9 g/dm³;

W – sterile distilled water; *T. ferrooxidans* – solution inoculated with bacteria, without Fe^{2+} ions) during the leaching of pentlandite without pH-adjustment



Rys. 3. Zmiany pH roztworów (9K – sterylny roztwór zawierający Fe^{2+} , 9 g/dm^3 ; W – sterylna woda destylowana; *T. ferrooxidans* – roztwór szczepiony bakteriami, bez jonów Fe^{2+}) podczas ługowania pentlandytu bez regulacji pH

Fig. 3. Changes of pH in solutions (9K – sterile solution containing Fe^{2+} , 9 g/dm^3 ; W – sterile distilled water; *T. ferrooxidans* – solution inoculated with bacteria, without Fe^{2+} ions) during the leaching of pentlandite without pH-adjustment



Rys. 4. Wzrost efektywności ekstrakcji niklu z pentlandytu, związany z aktywnością bakterii *T. ferrooxidans* w układach ługujących prowadzonych z korektą pH (--o--) i bez korekty pH (--+--)

Fig. 4. Increase in efficiency of nickel extraction from pentlandite, connected with activity of bacteria *T. ferrooxidans* in leaching systems with pH-adjustment (--o--) and without pH-adjustment (--+--)

2–3 dni następował wzrost pH od wartości 2,5 do 4,5–5 (rys. 3). W kolejnych 2–3 dniach stwierdzano nieznaczne zmniejszenie pH, a potem odczyn nie ulegał już zmianom aż do końca procesu prowadzonego w układzie z wodą destylowaną oraz do 40 dnia ługowania w sterylnym roztworze 9K, w którym później następował sukcesywny spadek pH do pH $\sim 2,7$ w 59 dniu trwania procesu. W układzie szczepionym bakteriami *T. ferrooxidans* obserwowano wahania pH w zakresie od 2,1 do 3,2. Stwierdzone zmiany odczynu pH w układach ługujących prowadzonych bez regulacji kwasowości roztworu (rys. 3) mogą stanowić przyczynek do wyjaśnienia przebiegu ekstrakcji w tych warunkach niklu z pentlandytu (rys. 2) – przy uwzględnieniu reakcji opisanych równaniami od (1) do (6). Wzrost pH w pierwszych trzech dniach ługowania chemicznego (w wodzie i roztworze 9K) był związany z obecnością w ługowanym materiale domieszek o charakterze alkalicznym. W złożu Suddbury okruszczowane są bowiem różnorodne skały zasadowe (Chodyncka i Zawiślak, 1987). Ich neutralizacja w ługowanym materiale pochodzącym z tego złoża powodowała zużycie dużej ilości jonów H^+ w początkowej fazie procesu. W warunkach niedoboru kwasu nie było możliwe efektywne, chemiczne roztwarzanie

pentlandytu w środowisku kwaśnym (reakcje 1 i 2). Znalazło to odbicie w przebiegu krzywych W i 9K na rys. 2. W sterylnym roztworze 9K istniały jednak warunki umożliwiające powolny przebieg reakcji 3. Będący jej produktem siarczan żelazowy mógł ulegać hydrolizie zgodnie z reakcją 6. Powstający w tej reakcji kwas siarkowy mógł powodować spadek pH obserwowany po 40 dniach trwania procesu (rys. 3), gdyż w tym czasie w analizowanym układzie ługującym nie występowały czynniki powodujące zużywanie jonów H^+ – nie przebiegały reakcje (1) i (2) i brak było substancji o charakterze alkalicznym. Zakres wahań wartości odczynu pH w układzie szczepionym bakteriami *T. ferrooxidans* potwierdza, że taki układ może być systemem samobuforującym się w warunkach umożliwiających przebieg reakcji (1)–(6) (Karavaiko, 1985).

Wyniki przedstawione w tabeli pokazują, że efektywność chemicznego ługowania niklu i żelaza z pentlandytu była większa w procesach prowadzonych z korektą odczynu pH, natomiast ługowanie biologiczne przebiegało z większą wydajnością w układach, w których nie regulowano kwasowości roztworu.

Bezpośredni wpływ bakterii na ekstrakcję niklu z pentlandytu oceniano na podstawie różnic między efektywnością procesu ługowania biologiczno-chemicznego (w układzie M9K + *T. ferrooxidans*) i chemicznego (w roztworze 9K), prowadzonych w warunkach regulowanego i nieregulowanego odczynu pH (rys. 4). W układach z regulowaną kwasowością obserwowano korzystne działanie bakterii do 30 dnia trwania procesu, a następnie stwierdzano malejący udział bakterii w końcowym efekcie wyługowania niklu. Udział bakterii w uwalnianiu jonów niklu z pentlandytu był istotny w całym przebiegu procesu przebiegającego bez korekty pH. Efekty te mogą być wyjaśnione przebiegiem procesów uprzednio już omówionych, uwzględniających reakcje od (1) do (5). W szczególności, zmniejszanie się różnicy między wydajnością bakteryjnej i chemicznej ekstrakcji niklu z pentlandytu po 30 dniu jego ługowania w warunkach regulowanego pH (rys. 4) było spowodowane wzrostem (w tym samym czasie) efektywności procesu ługowania chemicznego w roztworze 9K (rys. 1).

WNIOSKI

1. Wykazano istotny wpływ korekty odczynu pH roztworu ługującego na efektywność chemicznej i biologicznej ekstrakcji niklu z pentlandytu $(Ni,Fe)_9S_8$.
2. Efektywność chemicznego ługowania niklu była ok. 2 razy większa w procesach prowadzonych z korektą odczynu pH (do pH 2,5) niż w procesach prowadzonych bez regulacji tego parametru.
3. Ługowanie biologiczne w obecności bakterii *Thiobacillus ferrooxidans* przebiegało z dwukrotnie większą wydajnością w układach, w których nie regulowano kwasowości roztworu.
4. Stwierdzono, że regulacja pH może być korzystna dla procesów chemicznych prowadzonych w warunkach sterylnych, gdyż wtedy nie zachodzą procesy

biochemicznego utleniania siarki (uwalnianej z minerałów siarczkowych) do kwasu siarkowego, który jest zużywany w chemicznych procesach roztwarzania siarczków metali.

5. Korekta odczynu pH nie jest wskazana dla procesów ługowania prowadzonych w obecności bakterii *T. ferrooxidans*, których aktywność metaboliczna wywołuje efekt zakwaszania środowiska ługowania.

LITERATURA

- CHODYNIECKA L., ZAWIŚLAK L., 1987, *Mineralogia i petrografia kopalin metalicznych i chemicznych*, Politechnika Śląska, Gliwice.
- CWALINA B., DZIERŻEWICZ Z., 1989, *Bioekstrakcja metali z pirytów węglowych w obecności bakterii rodzaju Thiobacillus*, Prz. Gór., 45, 20–24.
- CWALINA B., DZIERŻEWICZ Z., 1991, *Adaptation dependent metabolic activity of bacteria Thiobacillus ferrooxidans*, Acta Biol. Cracov. Bot., 33, 1–11.
- CWALINA B., FARBISZEWSKA T., 1989, *Mechanizmy bakteryjnego ługowania metali z pirytów węglowych*, Fizykochem. Probl. Mineralurgii, 21, 201–210.
- CWALINA B., WĘGLARZ L., DZIERŻEWICZ Z., WILCZOK T., 1988, *Dependence of effectiveness of leaching of metallic sulphides on enzymes involved in inorganic sulphur metabolism in Thiobacillus ferrooxidans*, Appl. Microbiol. Biot., 28, 100–102.
- EHRlich H.L., FOX S.I., 1967, *Environmental effects on bacterial copper extraction from low-grade copper sulphide ores*, Biotechnol. Bioeng., 9, 471–485.
- FISCHER H., 1997, *Untersuchungen zur Adaption von Thiobacillus ferrooxidans an Nickelionen und zur mikrobiellen Laugung von Pentlandit*, Thesis., TU Bergakademie Freiberg, Germany.
- GROUDEV S., 1979, *Mechanism of bacterial oxidation of pyrite*, Mikrobiologija (Beograd), 16, 75–87.
- KARAVAIKO G.I., 1985, *Microbiological processes for the leaching of metals from ores*, (Ed.) Torma A.E., Moscow, UNEP.
- KARAVAIKO G.I., KUZNIECOV S.I., GOŁOMZIK A.E., 1972, *Rola mikroorganizmów w ługowaniu metali z rud* (w jęz. rosyjskim), Moskwa, Izd. Nauka.
- LUNDGREN D.G., SILVER M., 1980, *Ore leaching by bacteria*, Ann. Rev. Microbiol., 34, 263–283.
- ŁĘTOWSKI F., 1975, *Podstawy hydrometalurgii*, Warszawa, WNT.
- PESIC B., OLIVER D.J., WICHLACZ P., 1989, *An electrochemical method of measuring the oxidation rate of ferrous to ferric iron with oxygen in the presence of Thiobacillus ferrooxidans*, Biotechnol. Bioeng., 33, 428–439.
- PLUSKOTA B., ŻMUDZIŃSKI K., 1969, *Ługowanie bakteryjne ubogich rud miedzi*, Rudy Metale, 14, 34–37.
- SILBERSTEIN S., 1984, *Bacterial coal cleaning*. [In:] Proc. Int. Congress, *Prospects and Problems of Coal-Fired Power Plants, Coal Cleaning Techniques and Coal Conversion Technologies*, Lignano Sabbiadoro, Italy, 1–17.
- SILVERMAN M.P., LUNDGREN D.G., 1959, *Studies on the chemoautotrophic iron bacterium Ferrobacillus ferrooxidans. I. An improved medium and a harvesting procedure for securing high cell yields*. J. Bacteriol., 77, 642–647.
- TORMA A.E., 1972, *Biohydrometallurgy of cobalt and nickel*. TMS Paper Select., Metal. Soc. A.I.M.E., Paper No. 72–77.
- TORMA A.E., 1988, *Leaching of metals*, [In:] *Biotechnology*; V. 6b, Special Microbial Processes, (Eds.) Rehm H.J. & Reed G., Weinheim, VCH Verlagsgesellschaft.

Cwalina B., Ledakowicz S., Fischer H., Effect of pH-adjustment in leaching solution on chemical and bacterial extraction of nickel from pentlandite. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 32, 125–133 (in Polish)

The influence of pH-adjustment in leaching solution on chemical and biological extraction of nickel from pentlandite ($(\text{Ni},\text{Fe})_9\text{S}_8$) has been investigated. It was demonstrated that regulation of pH may be favourable for chemical processes carried out in sterile conditions, when biochemical processes of sulphur oxidation to sulphuric acid do not take place. Adjustment of pH in the leaching systems is not recommended in processes carried out in the presence of bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* because bacterial metabolic activity contributes to acidification of leaching environment.