

CONCLUSIONES

1. Los principales componentes de la solución serán: $\text{NH}_4\text{OH}(\text{NH}_3\text{libre})$, NH_4^+ y HCO_3^- en forma de una sal disociada de bicarbonato de amonio (NH_4HCO_3). La presencia de iones de CO_3^{2-} en forma de carbonato de amonio es insignificante.
2. Para la composición del licor lixiviante de la Empresa "Comandante René Ramos Latour" estos componentes se encuentran en las siguientes correlaciones:

$$\frac{[\text{NH}_4^+]}{[\text{NH}_3]_{\text{lib}}} = \frac{0,796}{3,024} = 0,26$$

$$\frac{[\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} = \frac{K_5}{[\text{NH}_4^+] : [\text{NH}_3]_{\text{lib}}} = \frac{K_5}{0,26}$$

REFERENCIAS

1. BATES, R. G. y G. D. PIRCHING: Journal American Chemistry Society, v. 72, no. 3, p. 1393, 1950.
2. GLASSTONE, S.: Tratado de Química Física. Ed. Revolucionaria, 4ta. ed. p. 901, 1976.
3. HARNED, H. and B. OWEN: Fisicheskaia Jimia Rastvorov Electrolitov. M., Izdaminlit, p. 628, 1952.
4. RABINOVICH, V. A. y YA. JAVIN Z.: Kratki Jimicheski Sprevochnik Izdanie 2^{oe}. L., Izd. Jimia. pp. 235-236, 1978.
5. RAMM V., M.: Absorzia Gazov. M., Jimia, 1966.

Nota aclaratoria sobre abreviaturas.

$[\text{NH}_3]_{\text{lib}}$ - amoniaco "libre"

CDU: 660.048:669.2 (729.1)

RECUPERACION DE COBRE DE LOS MINERALES COMPLEJOS POR LOS METODOS HIDROMETALURGICOS Y BACTERIOLOGICOS

RESUMEN

El artículo se refiere al método hidrometalúrgico y bacteriológico de beneficio de minerales cupríferos: oxidados y mezclados.

Se describe el fundamento químico y biológico de los métodos hidrometalúrgicos y bacteriológicos, la diferencia entre ellos, la aplicación que tienen en la práctica mundial y la experiencia en Bulgaria.

En Bulgaria, a partir de las menas pobres depositadas en escombreras, con contenido no mayor de 0,15-0,20 % de cobre, se obtiene cemento de cobre con una concentración de 75-80 % y una recuperación del cobre de 50-60 %.

Se recomiendan algunas direcciones concretas de la introducción más rápida de los métodos hidrometalúrgicos y bacteriológicos en escala industrial para las menas del yacimiento El Cobre.

REVISTA MINERIA Y GEOLOGIA, 2-84

ВОССТАНОВЛЕНИЕ МЕДИ ИЗ СМЕШАННЫХ МИНЕРАЛОВ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМ И БАКТЕРИОЛОГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Резюме

В данной работе исследованы гидрометаллургический и бактериологический методы обогащения медистых, смешанных и окисленных минералов.

Теоретически обоснованы химические и биологические аспекты гидрометаллургических и бактериологических методов переработки указанных руд и дана их сравнительная оценка. Показано использование этих методов в мировой практике, в частности, в Болгарии.

В этой стране из бедных пород, находящихся в отвалах, с содержанием не более 0,15 - 0,20% меди, получают медный цемент с концентрацией 75-80 % и восстановлением меди из него 50 - 60 %.

Рекомендуются некоторые конкретные направления более эффективного применения гидрометаллургических и бактериологических методов в промышленном масштабе для руд месторождения "Эль Кобре".

RECUPERACION DE COBRE DE LOS MINERALES COMPLEJOS POR LOS METODOS HIDROMETALURGICOS Y BACTERIOLOGICOS

Iván Iliev Mitchev
Ingeniero en Beneficio
Ministerio de Industria Básica

Una de las tendencias más importantes que se observan en la extracción mundial de las menas de cobre es la disminución permanente del contenido de los minerales útiles de cobre.

En algunos tipos de menas de cobre con contenido fuera de balance, y en muchas menas almacenadas cerca de los yacimientos de cobre, con contenido de 0,15-0,25 % de cobre, no se puede usar el método clásico de flotación porque es un método de recuperación no rentable.

En las menas oxidadas y beneficiadas de cobre por el método de flotación, se recupera desde un 20 % hasta un 40 % menos que en las menas sulfurosas. Por ello es necesario buscar nuevas tecnologías, formas y métodos más efectivos y más cómodos para recuperar el cobre de las menas pobres fuera de balance y de muy difícil enriquecimiento.

En los últimos 30-40 años, se han aplicado ampliamente con gran éxito en las condiciones industriales dos métodos: el hidrometalúrgico y el bacteriológico.

I. RECUPERACION HIDROMETALURGICA DEL COBRE

Se sabe que la mayor parte de las menas de cobre son mezclas de óxidos y sulfuros.

La recuperación de los minerales de óxidos de cobre es muy difícil. El método de recuperación más difundido es la

flotación y dentro de este, el de sulfidización previa con Na_2S de los minerales oxidados de cobre, pero los resultados obtenidos no son satisfactorios, pues el gasto de este reactivo-sulfidizador (Na_2S) representa un promedio de 1 o 2 kg/t de mena elaborada.

Por otro lado, no todos los minerales se pueden sulfidizar; por ejemplo: la malaquita y la azurita son minerales que se pueden sulfidizar fácilmente, mientras que la crisocola y la cuprita no admiten este proceso.

Algunas veces, para la flotación de la mena oxidada de cobre se utilizan xantogenatos de alcoholes de cadena larga, lo cual implica mayores gastos. Este método aplicado resulta poco efectivo, además de ser caro y no garantizar la selectividad en el proceso de flotación.

Por eso en los últimos años, para recuperar el cobre de menas oxidadas y complejas se aplican los métodos combinados: flotación-hidrometalúrgico-flotación. Se puede decir que fundamentalmente existen dos factores principales que determinan la aplicación de este método:

1. El método de flotación no garantiza una recuperación satisfactoria de la mena de los minerales oxidados de cobre como cuprita, crisocola, malaquita, azurita y aluminosilicatos y óxidos de hierro que contienen cobre en combinación, el cual casi totalmente se pierde en la cola de flotación.
2. Muchos minerales y compuestos de cobre se disuelven bien en una solución débil de ácido sulfúrico.

En principio, el método combinado hidrometalúrgico consiste en la disolución de los minerales de cobre oxidados y complejos finamente molidos en una solución débil de ácido sulfúrico. la cementación del cobre disuelto con

hierro y después flotación del cobre cementado. Este método se llama en la URSS método de Mostovich, y en los EE.UU., proceso LPF (Figura 1).

Para las menas de óxido de cobre y de difícil enriquecimiento, el proceso hidrometalúrgico, en comparación con el proceso de flotación, asegura una recuperación de cobre superior de un 20 % a un 40 % y una mayor calidad del concentrado obtenido de 2-3 veces.

El método de Mostovich incluye tres procesos fundamentales, es decir, lixiviación, precipitación y flotación (Figura 1).

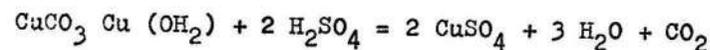
1. Lixiviación

La lixiviación de la mena de 1 al 2 % de cobre se efectúa con una solución de 2 a 4 % de ácido sulfúrico y una relación sólido/líquido = 1:1 o 1:2.

La granulometría de 200 mallas de la mena molida puede ser de 40 al 70 %. La duración del proceso de lixiviación es de 30 a 60 minutos en caso de agitación mecánica de la pulpa.

Los gastos de ácido sulfúrico son de 3 a 6 kg/t y en algunos casos, hasta 15 kg de la mena.

La lixiviación ocurre según la siguiente reacción:



La recuperación de cobre en la solución varía en rasgos considerables amplios de 60 al 98 % y depende del tipo de minerales oxidados de cobre y del carácter de la unión del mismo con los demás componentes de la mena.

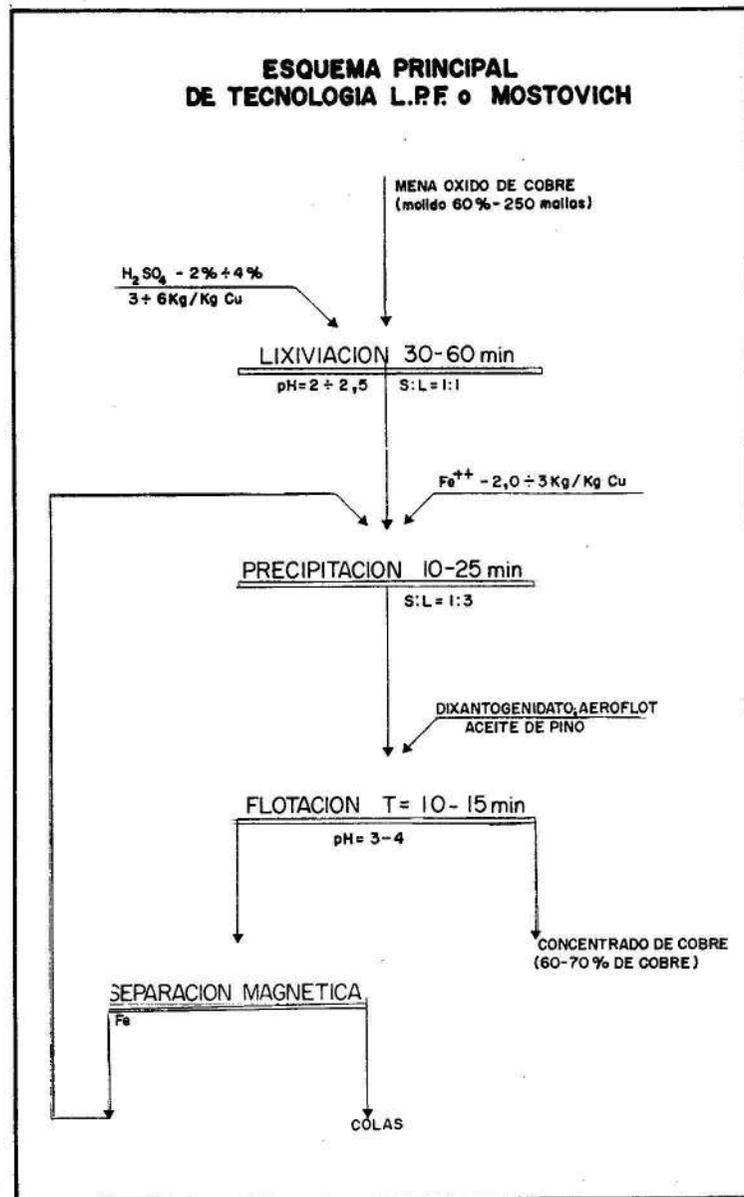
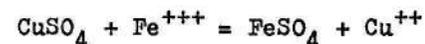


Fig. 1. Esquema principal de tecnología L.P.F. o Mostovich.

2. Precipitación

El segundo proceso fundamental para el método hidrometalúrgico es la precipitación. Para las menas oxidadas de cobre, se utiliza el hierro como cementador. El proceso de precipitación transcurre en un medio ácido, según la siguiente reacción:



En las condiciones industriales, la precipitación de cobre se efectúa por el mezclado intensivo de la pulpa (por S:L = 1:3) como hierro en forma de láminas, virutas, polvo o esponja, con una duración de 10-15 minutos y un pH desde 2 hasta 2,5. Para estas condiciones, el grado de cementación de cobre alcanza de 87-97 % con un gasto de hierro de 2,5-3,5 kg por tonelada de cobre cementado.

3. Flotación

El cobre cementado se recupera por flotación. Este proceso se realiza con un pH de 2-4 y se utilizan colectores diferentes como son: dixatogenatos, aeroflots, los cuales no se disuelven en un medio ácido como otros xantogenatos. El aceite de pino se utiliza como agente espumante.

La flotación básica, de control y la flotación de limpieza se realizan en un medio ácido y siempre con bastante exceso de hierro, para evitar la disolución del cobre cementado en la solución.

II. EXTRACCION BACTERIOLOGICA DE COBRE DE LAS MENAS CUPRIFERAS

La tendencia nueva y actual para la recuperación de cobre de las menas pobres mezcladas y de difícil enriquecimiento es la extracción bacteriológica (Figura 2).

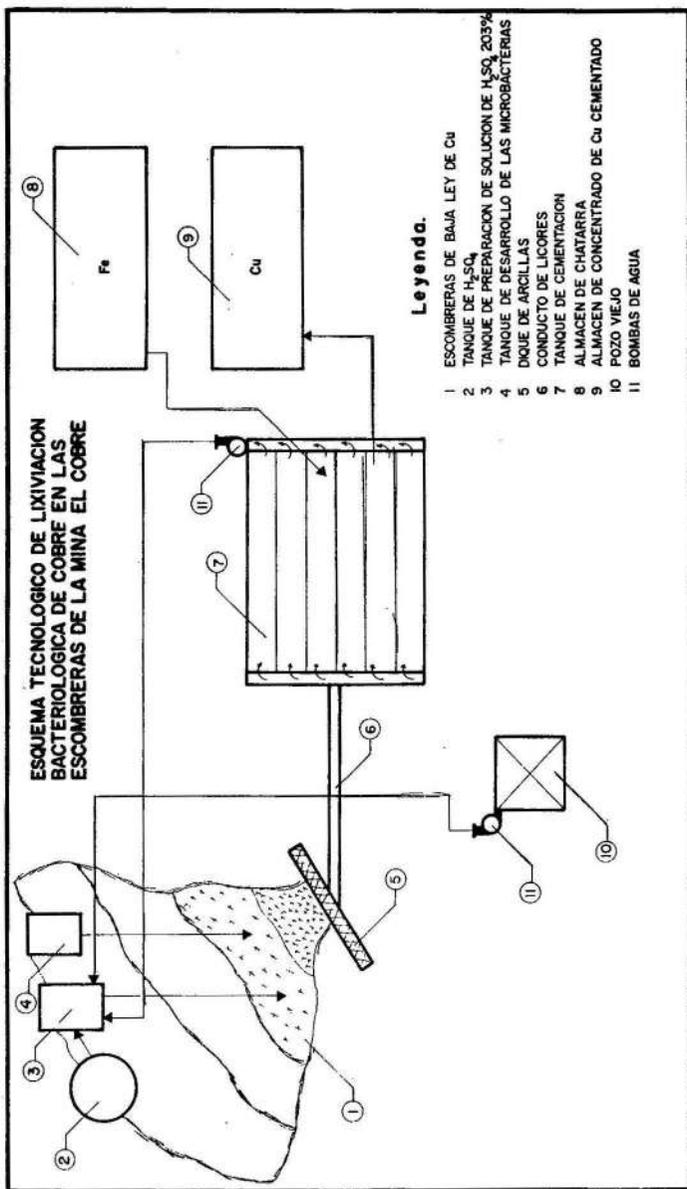


Fig. 2. Esquema tecnológico de lixiviación bacteriológica de cobre en las escombreras de la mina El Cobre.

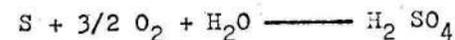
Se sabe que con el método hidrometalúrgico no se pueden recuperar los minerales de cobre sulfurosos, como: calcocita (Cu_2S), covelita (CuS), calpirita (CuFeS_2) y bornita (Cu_3FeS_4), ya que estos minerales se disuelven con dificultad y algunas veces no se disuelven en una solución débil de ácido sulfúrico.

La esencia del método bacteriológico consiste en la aceleración biocatalítica de los procesos de oxidación, gracias a lo cual los sulfuros de cobre difícilmente solubles en medios ácidos se tornan prácticamente solubles. Actualmente se considera que las bacterias "Thiobacillus ferro-oxidadas" llamadas también "ferrobacterias", son fundamentales para la oxidación de los minerales sulfurosos de cobre.

El mecanismo de la oxidación bacteriológica directa, donde las ferrobacterias interactúan con los minerales sulfurosos de cobre, tiene un carácter individual.

Algunas bacterias son capaces de interactuar con diferentes sulfuros y otras solamente con determinados minerales, y las terceras no son capaces de oxidar estos minerales directamente.

El fundamento químico de la lixiviación bacteriológica de los minerales sulfurosos de cobre se presenta según las siguientes reacciones:



Sin detenernos en la descripción teórica del método de extracción bacteriológica, trataremos de describir los factores y las condiciones más importantes por las que transcurre este proceso, sobre la base de las experiencias y de algunas investigaciones realizadas en la República Popular de Bulgaria.

La condición más importante para la recuperación bacteriológica de cobre es crear las condiciones óptimas para la acción viva y activa de las bacterias "Thiobacillus ferro-oxidadas". Las últimas se desarrollan bien en las siguientes condiciones:

- pH del medio = 2-2,5
- saturación óptima de la masa minera con oxígeno
- temperatura = 25-30 °C
- es necesario una concentración de las sales de nitrógeno y fósforo en la solución y un buen régimen de riego de la masa mineral.

Para intensificar la recuperación bacteriológica es necesario que a la solución de riego se añadan las bacterias activas de "Thiobacillus ferro-oxidadas". Un papel fundamental para el desarrollo de las ferrobacterias lo desempeña la concentración de hierro trivalente (Fe^{+++}). El mismo se obtiene con resultados de la oxidación bacteriana de la pirita o por la oxidación del hierro ferroso (Fe^{++}) existente. Otros factores son: la velocidad óptima de la circulación del hierro ferroso (Fe^{++}) existente y la velocidad óptima de circulación, que debe ser, aproximadamente, de 40 l/t por 24 horas.

Se recomienda, en las condiciones industriales, el riego periódico de la masa mineral. La velocidad y la recupera-

ción de cobre son funciones de la granulometría de los pedazos minerales. Esta granulometría determina la velocidad de filtración de la solución y la difusión del oxígeno en la profundidad de la masa mineral.

III. APLICACION PRACTICA DE LOS METODOS HIDROMETALURGICOS Y BACTERIOLOGICOS PARA RECUPERAR EL COBRE DE LAS MENAS DE COBRE OXIDADAS, POBRES Y DE DIFICIL ENRIQUECIMIENTO

Actualmente, esos métodos tienen aplicación amplia en todo el mundo. En este momento, más del 20 % de la producción mundial de cobre se obtiene por el método hidrometalúrgico y bacteriológico. Por ejemplo, durante los últimos años el cobre obtenido por estos métodos en EE.UU. representa el 15 % de la producción total de ese país. Estos porcentajes demuestran que los métodos hidrometalúrgicos y bacteriológicos en este momento no tienen un papel excepcional en la recuperación de cobre en comparación con la producción de uranio, pero tienen grandes perspectivas de utilización en los próximos años.

Los métodos hidrometalúrgicos y bacteriológicos se convierten en métodos mundiales muy importantes para obtener los metales de cobre de las menas de baja ley, los cuales no podemos extraer por los métodos clásicos mineros.

Estos métodos prácticamente nos permiten rebajar el límite de calidad de las menas que no podemos extraer económicamente por el método clásico de minado; se puede decir que la lixiviación llega a ser una nueva forma de extracción.

Los métodos hidrometalúrgicos y bacteriológicos para la recuperación de cobre se utilizan en la práctica de beneficio en EE.UU., URSS, Yugoslavia, Checoslovaquia, Bulgaria y otros países.

En forma breve, vamos a explicar la experiencia de la República Popular de Bulgaria sobre la extracción industrial bacteriológica de cobre de las minas de escombreras de yacimiento "Vlakov Vrij". En la explotación del yacimiento por el método a cielo abierto, en las escombreras se almacenan las menas de cobre pobres y la ganga. La cantidad de la mena almacenada es superior a un millón de toneladas. Para la recuperación bacteriológica se selecciona una zona determinada de la escombrera con contenido de cobre de 0,10 a 0,15 % y a 2 % de azufre. En la mena el cobre se presenta con un 10-20 % en forma de óxidos y 20-30 % en forma de sulfuros secundarios.

La zona determinada se riega con una solución diluida de ácido sulfúrico en el intervalo de 5-6 días. La altura media de la escombrera es de 25 metros. Sobre la superficie de la escombrera, se hacen con bulldozer canales de una profundidad de 0,8 m y un ancho de 10-12 m.

La superficie de la escombrera se riega diariamente con la solución bacterial en una cantidad de 6,0 l/t de mena (600 m³ para 8-10 h). Los licores de cobre se recogen en las tuberías de hormigón de los canales y se vierten en ocho piscinas de hormigón. En ellas, el cobre soluble se sedimenta en láminas de hierro, en un tiempo de 3,5 a 5 horas.

Esta experiencia industrial se realizó durante 12 meses. Los indicadores fundamentales de recuperación bacteriológica tienen valores que se muestran en la Tabla 1. Como se observa, la solución después de la lixiviación de cobre tiene un pH = 2,5 y contiene aproximadamente hasta 2 g/l de cobre. En la misma, el contenido de hierro fundamentalmente se encuentra en forma trivalente (1,5 g/l de iones férricos) y antes de la lixiviación la solución

tenía hasta 1,9 g/l de ferroiones. Esto significa una alternativa correcta del régimen de riego y asegura una buena actividad y supervivencia de las ferrobacterias y buena difusión del aire a través del depósito de las menas.

En la solución obtenida, se tiene poca concentración de ferrobacterias (10⁴), pero eso se explica porque una gran parte de ellas son cementadas en los pozos y sobre la superficie de las partículas de la mena.

En el proceso de cementación se alcanza 91-93 % de recuperación de cobre.

TABLA 1.

No. de indicadores	Medida	Solución para riego	Solución después de la lixiviación	Solución después de la cementación
1	Contenido de Cu	g/l 0,1-0,15	1,8-2,3	0,15-0,20
2	Contenido de Fe ⁺⁺⁺	" 0,15-0,20	1,0-1,50	0,20-0,30
3	Contenido de Fe ⁺⁺	" 1,50-1,90	0,01	2-2,50
4	pH de la solución	- 3,5-4,0	2,50	3,50
5	Cantidad de la célula Th. ferroso "oxidadas" en un mg de solución	- 10 ³	10 ³ -10 ⁴	10 ³
6	Temperatura de la solución:			
	a) Período de verano	°C 16-19	11-13	15-18
	b) Período de invierno	°C 2-7	10-11	6-10

Los gastos de las láminas de hierro son 2,2 t por una tonelada de cobre metálico.

El alto efecto tecnológico de la recuperación bacteriana del cobre en las pilas de "Vlakov Vrij" y los pocos gastos industriales permiten obtener un 300 % de ganancia en el primer año de trabajo de esta instalación industrial.

IV. POSIBILIDAD DE APLICACION DEL METODO

En este momento, la República de Cuba tiene bastantes reservas de menas de cobre, distribuidas en todas partes del país. Están en explotación: Matahambre, El Cobre y Júcaro. Otros yacimientos continúan explorándose y se busca la tecnología para la recuperación de los minerales de cobre.

Las minas de los yacimientos Matahambre y Júcaro son minas sulfuradas. Con el método clásico de explotación en la Planta de Matahambre se alcanzan indicadores tecnológicos bastante altos: 97-98 % (a nivel mundial).

Solamente en la mina El Cobre, se elaboran las menas mezcladas de óxidos y sulfuros de cobre. De la mena, con un contenido de 1,0-1,20 % de cobre, se obtiene un concentrado de Cu de 18 % y se alcanza una recuperación de cobre de 50 a 55 %. Esta recuperación es muy baja en comparación con los indicadores mundiales en este tipo de mena.

De acuerdo con el informe geológico elaborado por los especialistas soviéticos en el año 1977, en el yacimiento El Cobre se encuentran tres zonas: oxidadas, sulfuradas y mezcladas. En las zonas oxidadas se encuentran el 21,1 % de las menas; en las zonas de menas mezcladas el 45,4 % y en las zonas sulfuradas el 33,5 % de todas las menas.

El cobre en el yacimiento del mismo nombre está representado por los siguientes minerales: pirita, calcopirita, bornita, calcofina, covelina, cuprita, malaquita, azurita y crisocola. La roca estéril está representada fundamentalmente por el cuarzo, el cual constituye el 67-72,5 %.

En los alrededores de la cantera existen depósitos minerales de las menas pobres, oxidadas y mezcladas con un contenido de cobre de 0,30 a 0,50 %. En la planta de beneficio que existe, se recuperan por el método de flotación y sulfurización los minerales sulfurados y oxidados de cobre. Después del proceso de flotación, la cola final contiene de 0,48 a 0,62 % de cobre.

Desde el año 1978, en la Empresa Minera de Santiago de Cuba existe una pequeña instalación experimental para la recuperación hidrometalúrgica de cobre en lote.

Esta pequeña planta a escala experimental hace tres o cuatro años trabaja, alcanzándose resultados positivos.

El método de lixiviación hidrometalúrgica y bacteriológico de cobre puede aplicarse en escala industrial, en tres direcciones, en las condiciones de la mina El Cobre.

- I. Lixiviación del cobre en las escombreras acumuladas cerca de las canteras por el método bacteriológico. De los datos presentados por la Empresa Minera de Santiago de Cuba, todas las escombreras contienen metal de cobre. Si alcanzamos una recuperación de cobre de un 60 %, se pudiera producir un incremento sustancial de la producción industrial.
- II. Introducción del proceso de Mostovich o PPP en el flujo tecnológico de la planta El Cobre con el fin de recuperar el máximo de cobre.

III. Con la introducción del esquema combinado de recuperación de los minerales de cobre y sobre la base de la experiencia de otros países, se espera aumentar la recuperación de cobre hasta el 80 %, que representa un 25 % o más de lo que obtiene la planta actualmente con el método de flotación selectiva.

En conclusión, se puede decir que con la introducción de los métodos hidrometalúrgicos y bacteriológicos para la recuperación de cobre, de las menas y colas en la mina El Cobre, se puede esperar un aumento considerable de la producción industrial, que representa mayor ganancia para la Empresa Minera de Santiago de Cuba.

En resumen, queremos emitir nuestra recomendación sobre la necesidad de la introducción rápida de estos métodos de cobre, con el objeto de acumular experiencia con los mismos, a fin de poderlos utilizar en otros tipos de menas y yacimientos.

La República de Cuba se encuentra en una zona tropical, donde existen todas las condiciones para la oxidación rápida de los minerales, buenas condiciones y temperatura para el desarrollo de las microbacterias y creemos que los métodos hidrometalúrgicos y bacteriológicos seguramente van a encontrar una amplia aplicación y para otros yacimientos de cobre, que en estos momentos están en la etapa de exploración geológica.

CDU: 660.074:543.251 (729.16)

CINETICA DE LA REDUCCION DE LOS MINERALES OXIDADOS DE NIQUEL DE CUBA

RESUMEN

En este trabajo se expone el estudio de la cinética de reducción de los minerales oxidados de níquel.

Los resultados de este estudio demostraron que es posible intensificar el proceso, mediante la utilización de un reductor más efectivo (el petróleo) que el gas pobre. Además, es factible ir a la sustitución del gas pobre producido a partir de la antracita (combustible deficitario) por un gas de bajo contenido de monóxido de carbono, producto de la combustión incompleta del petróleo.

Se determinaron las constantes de velocidad de reacción bajo diferentes condiciones reductoras, así como la energía de activación. También se reportan las condiciones óptimas de reducción de los minerales oxidados de níquel, en las cuales se alcanza alta extracción del níquel y sobre todo de cobalto.