

УДК 622.765

DOI 10.17073/0021-3438-2015-2-3-8

ПЕРЕРАБОТКА РУД И ТЕХНОГЕННОГО Cu–Ni-СЫРЬЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ СТРУЙНОЙ ПАРОВОЗДУШНОЙ ФЛОТАЦИИ

© 2015 г. С.И. Евдокимов, В.С. Евдокимов

Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет), г. Владикавказ

ООО «Научно-производственное предприятие ГЕОС», г. Владикавказ

Статья поступила в редакцию 17.07.13 г., доработана и подписана в печать 13.02.15 г.

Исследован способ флотации, при котором в качестве газовой фазы используют смесь воздуха с насыщенным водяным паром. При контакте пара с жидкостью граничный слой пузырька нагревается за счет теплоты конденсации, которая далее расходуется уже на испарение пара – пузырек расширяется и оттесняет «горячий» слой с поверхности в объем, а его место занимает недогретая жидкость, и процесс конденсации возобновляется. Волнообразное повторение процессов конденсация ↔ испарение обуславливает затухающие пульсации поверхности пузырька, что изменяет результат флотации. Способ флотации паровоздушной смесью использован при обогащении медно-никелевого сырья по схеме «в две струи»: из $\frac{1}{2}$ части исходного сырья выделяют черновой концентрат 1-й струи флотации, смешивают его с другой $\frac{1}{2}$ частью руды и с использованием процесса аэрозольной колонной флотации выделяют готовый черновой концентрат 2-й струи флотации. При обогащении руд Печенгского района (Россия) по схеме со струйным движением исходного питания и чернового концентрата с применением в качестве газовой фазы при флотации паровоздушной смеси прирост извлечения никеля составил 2,93 %, меди – 3,22 %. Переход на технологию струйной паровоздушной флотации при обогащении отвальных шлаков МЗ ОАО «ГМК «Норильский никель» привел к повышению извлечения никеля с 45,94 до 47,34 % и меди с 78,27 до 82,77 %.

Ключевые слова: медно-никелевое сырье, флотация, струйная схема, паровоздушная смесь, размер пузырька, колебания пузырька, теплообмен, массообмен.

A method of flotation investigated, for which a mixture of air with saturated water steam is used as a gas phase. When steam contacts with liquid, the boundary layer of the bubble is heated due to heat of condensation, which is further spent for steam evaporation—the bubble is broadened and forces out the «hot» layer from the surface into the bulk, while its place is occupied by underheated liquid, and condensation repeats. The wave-like repetition of condensation ↔ evaporation processes determines the damping pulsations of the bubble surface, which varies the result of flotation. The flotation method by the air-steam mixture is used when concentrating the copper–nickel feedstock by the scheme «in two jets»: the crude concentrate of the first flotation jet is isolated from $\frac{1}{2}$ part of the initial feedstock, it is mixed with another $\frac{1}{2}$ part of ore, and ready crude concentrate of the second flotation jet is isolated using aerosol column flotation. When concentrating the ores of the Pechenga ratio (Russia) by the flow chart with the jet motion of the initial feeding and crude concentrate with the application of the air-steam mixture as the gas phase during the flotation, an increment in recovery of nickel was 2,93 % and copper – 3,22 %. The passage to the technology of jet air-steam flotation when concentrating dump slags of ОАО ММС «Norilsk Nickel» led to an increase in recovery of nickel from 45,94 to 47,34 % and copper from 78,27 to 82,77 %.

Keywords: copper–nickel feedstock, flotation, jet flow chart, air-steam mixture, bubble size, bubble oscillations, heat exchange, mass exchange.

Введение

В России основу минерально-сырьевой базы никелевой промышленности образуют сульфидные медно-никелевые руды Норильского и Печенгского промышленных районов. На их долю приходится не менее

85 % подтвержденных запасов никеля страны и 92–93 % общероссийской добычи никеля и кобальта [1].

Актуальность работ, направленных на повышение показателей обогащения медно-никелевых руд,

Евдокимов С.И. – канд. техн. наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых СКГМИ (362021, г. Владикавказ, РСО-Алания, ул. Николаева, 44, кор. 10). E-mail: eva-ser@mail.ru.

Евдокимов В.С. – бакалавр той же кафедры, технолог ООО «НПП ГЕОС» (362035, г. Владикавказ, РСО-Алания, ул. Леваневского, 253). E-mail: 19-Vadik-93@mail.ru.

определяется резервами увеличения полноты извлечения цветных металлов за счет снижения их потерь с отвальными хвостами. В этом случае можно отказаться от наземного складирования хвостов обогащения и использовать их в качестве закладочного материала при горных работах, что снижает экологическую нагрузку на окружающую среду [2, 3].

Цель работы — создание технологии обогащения медно-никелевого сырья, в том числе техногенного происхождения, на основе применения схемы струйной флотации [4, 5] и метода флотации паровоздушной смесью [6, 7], обеспечивающих ведение процесса с максимальным технико-экономическим эффектом.

В частности, рассмотрен способ флотации, отличающийся тем, что во флотомашину, в том числе колонного типа [6], в качестве газовой фазы подают смесь воздуха с горячим водяным паром ($t_{\Gamma} = 104\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_{\Gamma} = 0,12\div 0,15\text{ МПа}$) [7, 8]. Флотацию воздухом и термонагруженными пузырьками ведут в холодной пульпе ($t_{\Pi} = 18\div 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Теоретическая часть

Из результатов численного анализа уравнения [9]

$$\frac{dT_v}{dt} = \frac{3\alpha}{c_v R(T_v) \rho_v(T_v)} (T_v - T_l) \quad (1)$$

(где T_v , T_l — температуры, $^{\circ}\text{C}$ (индексы «v» и «l» относятся к горячему (пар) и холодному (жидкость) теплоносителям); α — коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; R — радиус пузырька, м; c_v — коэффициент теплоемкости, $\text{Дж}/(\text{К}\cdot\text{кг})$; ρ_v — плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; t — время, с), полученного из закона Ньютона—Рихмана:

$$dQ = \alpha(T_v - T_l)Fdt = m_v c_v dT_v, \quad (2)$$

записанного для сферического пузырька в виде

$$R(T_v) = 3 \sqrt{\frac{3V(p_v, T_v)}{4\pi}} \quad (3)$$

(где dQ — количество переданной энергии (Дж) паром массой m_v (кг) за время dt через поверхность теплообмена площадью F (м^2); V — объем пузырька, м^3 ; p_v — давление, Па), следует (рис. 1), что при сильном сжатии пузырька (R_0/R) теплообмен между фазами ухудшается, но время достижения паром температуры насыщения не превышает времени прорыва смачивающих пленок при флотации, что делает их взаимозависимыми.

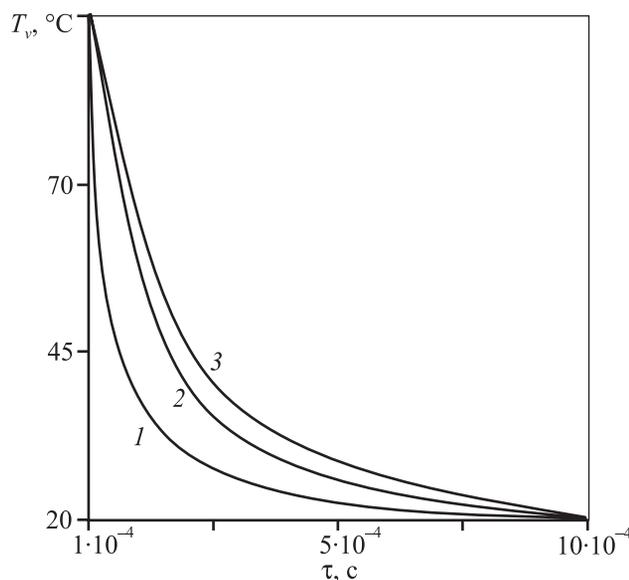


Рис. 1. Кинетика охлаждения пара внутри пузырька
1 — $R_0/R = 30$; 2 — 20; 3 — 5

Экспериментально апробированная зависимость для расчета радиуса (R) пузырька [10], уменьшающегося со временем за счет конденсации пара, выглядит следующим образом:

$$\frac{R(t)}{R} = \left(1 - \frac{6}{\sqrt{\pi}} \text{Ja} \sqrt{\text{Pe Fo}} \right)^{2/3}, \quad (4)$$

где Ja , Pe и Fo — критерии Якоба, Пекле и Фурье:

$$\text{Ja} = \frac{c_{pl} \rho_l \Delta T}{\rho_v r_k}, \quad (5)$$

$$\text{Pe} = \frac{2\omega_l R}{a_l} = \frac{c_{pl} \rho_l \omega_l R}{\lambda_l}, \quad (6)$$

$$\text{Fo} = \frac{a_l t_k}{4R^2}. \quad (7)$$

Здесь c_p — теплоемкость при постоянном давлении, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; ΔT — разность температур горячего и холодного теплоносителей, К ; r_k — удельная теплота конденсации, $\text{Дж}/\text{кг}$; ω_l — скорость, $\text{м}/\text{с}$; λ_l — коэффициент теплопроводности, $\text{кг}\cdot\text{м}/(\text{К}\cdot\text{с}^3)$; a_l — коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

Из уравнения (4) следует, что условие

$$\frac{9}{2\pi} \frac{1}{R^3} \frac{\rho_l^2}{\rho_v^2} \frac{\omega a t_k}{r^2} (c_{pl} \Delta T)^2 = 1 \quad (8)$$

соответствует полной конденсации пара в пузырьке, которая для пузырьков размером $R = 0,6\cdot 10^{-3}\text{ м}$, всплывающих со скоростью $\omega = 16,7\cdot 10^{-2}\text{ м}/\text{с}$, при

теплофизических и режимных параметрах паровоздушной флотации завершается в течение $t_k = 2,1 \cdot 10^{-2}$ с.

Температуру на межфазной поверхности [11, 12]:

$$T_s = \frac{\lambda_l \text{Nu}_l T_l + \lambda_v \text{Nu}_v T_v - 2Rjl}{\lambda_l \text{Nu}_l + \lambda_v \text{Nu}_v} \quad (9)$$

(где Nu — число Нуссельта; j — плотность потока массы, $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$; l — удельная теплота конденсации, $\text{Дж}/\text{кг}$) можно определить из условия баланса тепла на межфазной поверхности:

$$-q_{vs} + q_{ls} = jl. \quad (10)$$

Здесь первое слагаемое

$$-q_{vs} = \lambda_v \text{Nu}_v \frac{T_v - T_s}{2R} \quad (11)$$

— тепловой поток из пузырька к межфазной поверхности, отнесенный к единице ее площади, $\text{Дж}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, при условии, что

$$\text{Nu}_v = \begin{cases} \sqrt{\text{Pe}} & \text{при } \text{Pe} \geq 100, \\ 10 & \text{при } \text{Pe} \leq 100, \end{cases}$$

а второе слагаемое

$$q_{ls} = \lambda_l \text{Nu}_l \frac{T_v - T_s}{2R} \quad (12)$$

— тепловой поток от поверхности пузырька в жидкость при скорости паровоздушной смеси в пузырьке (v_{vl} , $\text{м}/\text{с}$) и условии

$$\text{Nu}_l = 0,8 \sqrt{\frac{2Rv_{vl}}{a_l}}.$$

За счет теплоты конденсации граничный слой пузырька нагревается, но в результате высокой теплопроводности жидкости тепловой поток интенсивно отводится от межфазной поверхности, которая перегревается на $\Delta T = (T_s - T_l) = 2,5 \div 3,5$ °С, что характерно для течения газожидкостных сред [13—16].

Таким образом, доказана возможность изменения результатов флотации за счет нагрева граничного слоя пузырьков конденсирующимся водяным паром в условиях, моделирующих промышленный пенно-агитационный процесс. Силовым фактором, обеспечивающим изменение устойчивости смачивающих пленок при повышении температуры, являются «не-ДЛФО»-силы [17, 18] (структурные силы гидрофобного притяжения и гидрофильного отталкивания [19—21], входящие в суммарную изотерму расклинивающего давления. Рост дальнего действия сил притяжения связан с выделением на гидрофоб-

ных поверхностях нанопузырьков газа, растворенного в воде, и их коалесценцией с пузырьком пара [22—25].

Экспериментальная часть

Первым объектом исследования являлись вкрапленные Cu-Ni -руды, перерабатываемые на обогатительной фабрике № 1 ОАО «Кольская ГМК». Для этих проб характерно преобладание тонкой, весьма неравномерной вкрапленности рудных минералов размером от нескольких микрометров до 1 см и более. Главные рудные минералы пробы руды представлены пентландитом (12—14 %), никеленосным пирротинном (~ 75 % от общего количества сульфидов), халькопиритом (7—9 %) и магнетитом (до 40 %).

В опыте, проведенном по принципу непрерывного процесса, в коллективный концентрат, выделенный по схеме и реагентному режиму обогатительной фабрики компании и содержащий 8,47 % Ni и 4,00 % Cu , извлечено 72,11 % Ni и 74,75 % Cu . Сам концентрат был получен следующим образом: из руды, измельченной до крупности 80 % класса —74 мкм (в присутствии 3 кг/т Na_2CO_3 и 100 г/т бутилового ксантогената), извлекали минералы Ni и Cu после подачи 60 г/т бутилового аэрофлота и 15 г/т CuSO_4 в 1-ю основную флотацию (10 мин) и 15 г/т CuSO_4 , 35 г/т бутилового ксантогената и 35 г/т бутилового аэрофлота во 2-ю основную флотацию (15 мин); черновой концентрат 2 раза перечищали с подачей карбоксиметилцеллюлозы из расчета 200 г/т.

В опытах, моделирующих замкнутый цикл, исследовали обогатимость пробы руды по схеме струйной флотации, в которой получение чернового концентрата осуществляют в 2 приема: из $1/2$ части исходного сырья выделяют черновой концентрат 1-й струи обогащения, смешивают его с оставшейся половиной руды и выделяют готовый черновой концентрат 2-й струи обогащения, который направляют на перечистку.

Во второй струе флотации для выделения Cu-Ni -«головки» использовали колонную флотомашину ($\varnothing 47$ мм, $H = 1970$ мм) конструкции ООО «НПП ГЕОС», в которую в качестве газовой фазы подавали паровоздушную смесь.

Прирост извлечения никеля в концентрат составил 2,93 %, меди — 3,22 %; содержание никеля в концентрате увеличилось с 8,47 до 10,72 %, меди — с 4,00 до 5,03 % (рис. 2).

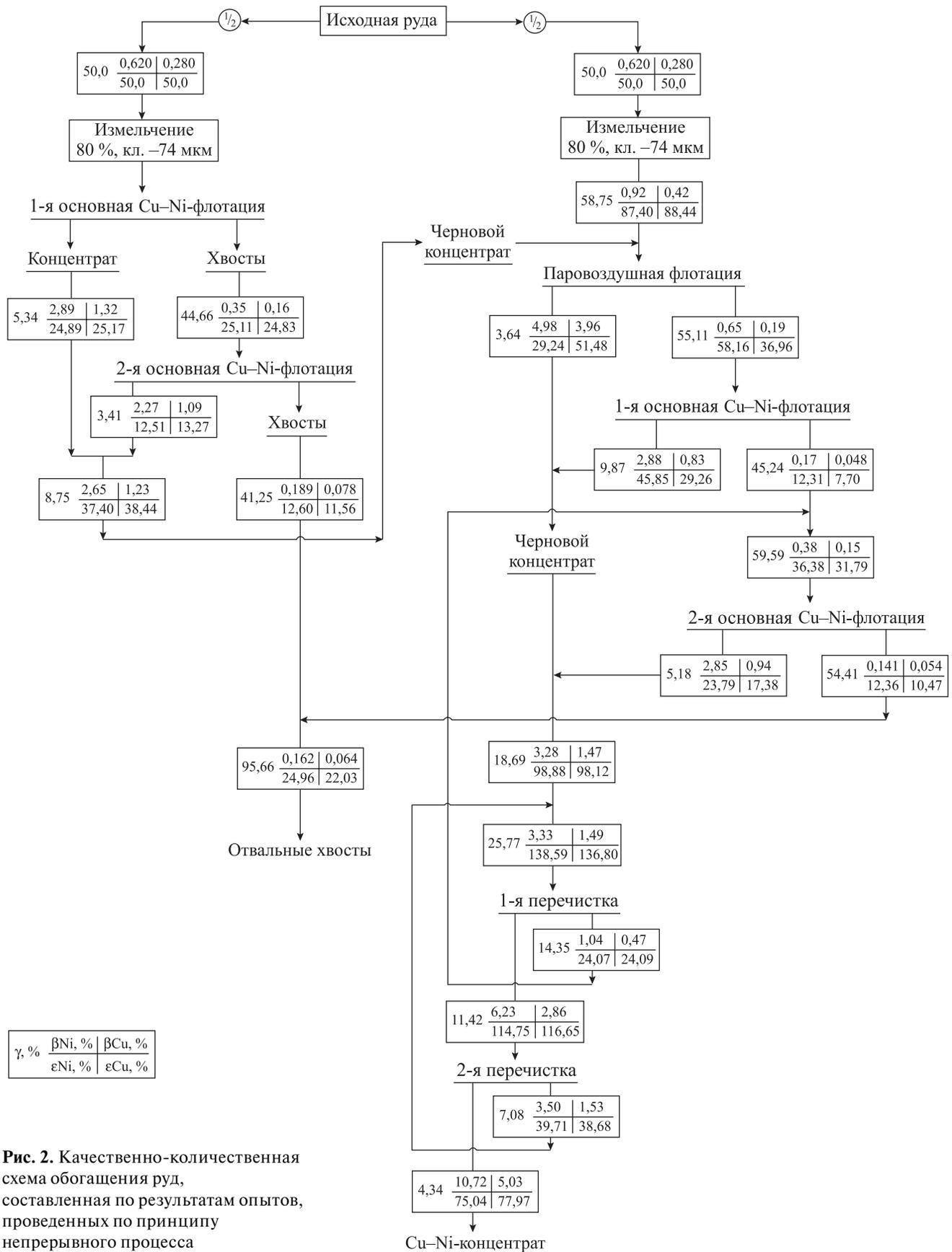


Рис. 2. Качественно-количественная схема обогащения руд, составленная по результатам опытов, проведенных по принципу непрерывного процесса

Вторым объектом исследования были отвальные шлаки, образованные в процессе плавки в отражательных печах и печах Ванюкова и накопленные в количестве 10,2 млн т на промплощадке Медного завода ОАО «ГМК «Норильский никель». В процессе его текущей работы ежегодно образуется порядка 0,85 млн т шлаков. Они неоднородны по химическому составу и содержат: 0,6–2,5 % меди, 0,13–1,52 % никеля, 23,74–24,80 % кремнезема, 47,21–48,93 % железа. Минеральный состав шлаков следующий: халькопирит (0,50–2,50 %), халькозин (1,0–1,8 %), борнит (0,3–0,9 %), пирротин (0,9–2,8 %), пентландит (0,1–1,4 %), медь металлическая (единичные включения), силикаты (77,5–83,7 %), магнетит (9,1–16,5 %).

Проектом предусмотрена схема флотации, включающая измельчение шлаков до крупности 97–99 % класса –74 мкм, операцию основной флотации, 2 перечистки черного концентрата и стадию доизвлечения металлов из хвостов перечисток. Флотация осуществляется при естественном значении

$pH = 7,8$ пульпы смесью бутилового ксантогената (250 г/т) с бутиловым аэрофлотом (70 г/т). В операцию дофлотации подается 100 г/т ксантогената и 50 г/т аэрофлота. С использованием этой технологии проведены опыты по извлечению металлов из исследуемой пробы шлаков. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Отвальные шлаки содержат до 50 % силикатного никеля, поэтому его извлечение в концентрат низкое.

Далее была проведена коллективная флотация шлаков по схеме струйной флотации с применением колонной флотомашин, аэрируемой паровоздушной смесью, во 2-й струе флотации. В результате исследований получены технологические показатели обогащения шлаков (табл. 2), доказывающие преимущества их переработки по предложенной схеме.

Заключение

Показано, что при внезапном контакте паровоздушного пузырька с недогретой жидкостью его поверхность совершает затухающие колебания: при конденсации пара размер пузырька уменьшается, но ухудшающийся теплообмен приводит к его увеличению за счет роста давления испаряющейся перегретой жидкости. То есть совершается волновой процесс, в котором размер пузырька в радиальном направлении изменяется, а конденсация и испарение сменяют друг друга до установления равновесной температуры.

При обогащении медно-никелевого сырья применен способ флотации паровоздушной смесью по схеме «в две струи»: из 1/2 части руды выделяют черновой концентрат 1-й струи флотации, смешивают его с другой 1/2 частью руды и с использованием процесса аэрозольной колонной флотации выделяют готовый черновой концентрат 2-й струи флотации.

При обогащении руд Печенгского района прирост извлечения никеля составил 2,93 %, меди — 3,22 %. Переход на технологию струйной паровоздушной флотации при обогащении отвальных шлаков МЗ ОАО «ГМК «Норильский никель» приводит к повышению извлечения никеля с 45,94 до 47,34 % и меди с 78,27 до 82,77 %.

Сильным фактором, обеспечивающим изменение устойчивости смачивающих пленок при повышении температуры, являются силы структурного происхождения, входящие в суммарную изотерму расклинивающего давления.

Таблица 1

Технологические показатели обогащения пробы шлаков по базовой технологии *

Наименование продукта	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		Ni	Cu	Ni	Cu
Коллективный концентрат	10,88	1,52	12,59	45,94	78,27
Отвальные хвосты	89,12	0,218	0,427	54,06	21,73
Исходные шлаки	100,0	0,36	1,75	100,0	100,0

*Опыты проведены по принципу непрерывного процесса.

Таблица 2

Результаты обогащения * шлаков с использованием во 2-й струе флотации колонной флотомашин, аэрируемой паровоздушной смесью

Наименование продукта	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		Ni	Cu	Ni	Cu
Коллективный концентрат	8,44	2,08	16,97	47,34	82,77
Отвальные хвосты	91,56	0,21	0,33	52,66	17,23
Исходные шлаки	100,0	0,37	1,73	100,0	100,0

*Опыты проведены по принципу непрерывного процесса.

Статья подготовлена по результатам работы, полученным в ходе выполнения Соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0142 от 28.11.2014 г. «Уникальный идентификатор прикладных научных исследований и экспериментальных разработок» (проекта) RFMEFI57714X0142.

Литература

1. Блатов И.А. Обогащение медно-никелевых руд. М.: ИД «Руда и металлы», 1998.
2. Порцевский А.К. Геомеханическое обоснование выбора технологии подземной добычи руды с последующим использованием пустот: Автореферат дис. ... докт. техн. наук. М.: Российский государственный геологоразведочный университет, 2006.
3. Котенко Е.А., Порцевский А.К. // Горный журнал. 2004. № 2. С. 79–82.
4. Паньшин А.М., Евдокимов С.И. // Обогащение руд. 2009. № 5. С. 6–11.
5. Евдокимов С.И., Дациев М.С., Подковыров И.Ю. // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2014. № 2. С. 3–9.
6. Паньшин А.М., Евдокимов С.И., Артемов С.В. // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2012. № 1. С. 3–10.
7. Евдокимов С.И., Дациев М.С., Подковыров И.Ю. // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2014. № 1. С. 3–11.
8. Евдокимов С.И., Паньшин А.М. // Цветные металлы. 2009. № 12. С. 23–26.
9. Ненаездников А.Ю. Повышение эффективности атмосферных деаэрационных установок с барабанными устройствами: Дис. ... канд. техн. наук. Иваново: ИГЭУ, 2014.
10. Королев А.В. // Энергетика: Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. 2009. № 6. С. 31–36.
11. Simpson H.C., Beggs G.C., Isikan O.M. Collapse of steam bubbles in sub-cooled water // European Two-Phase Flow Group Meeting. Session A. Rome, June, 1984. P. 1919–1924.
12. Шагапов В.Ш., Лепихин С.А., Чиглинцев И.А. // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 2. С. 247–260.
13. Петушков В.А., Мельситов А.Н. // Математическое моделирование. 2003. Т. 15, № 10. С. 109–128.
14. Логинов В.С., Озерова И.П. // Изв. Томского технологического университета. 2003. Т. 306, № 6. С. 67–69.
15. Деренок А.Н. Моделирование совместного теплообмена при барботировании парогазовой смеси в жидкость: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: ТГАСУ, 2004.
16. Ястребов А.К. // Тепловые процессы в технике. 2009. Т. 1, № 12. С. 519–522.
17. Бойнович Л.Б. // Успехи химии. 2007. Т. 76, № 5. С. 510–528.
18. Евдокимов С.И., Паньшин А.М. // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2009. № 3. С. 7–11.
19. Чураев Н.В. // Успехи химии. 2004. Т. 73, № 1. С. 26–38.
20. Mishchuk N.A. The model of hydrophobic attraction in the framework of classical DLVO forces // Advances in Colloid and Interface Sci. 2011. Vol. 168, Iss. 1-2. P. 149–166.
21. Pan L., Jung S., Yoon R.-H. Effect of hydrophobicity on the stability of the wetting films of water formed on gold surfaces // J. Colloid and Interface Sci. 2011. Vol. 361, Iss. 1. P. 321–330.
22. Simonsen A.C., Hansen P.L., Klosgen B. Nanobubbles give evidence of incomplete wetting at a hydrophobic interface // J. Colloid and Interface Sci. 2004. Vol. 273. P. 291–299.
23. Hampton M.A., Nguyen A.V. Nanobubbles and the nanobubble bridging capillary force // Advances in Colloid and Interface Sci. 2010. Vol. 154, Iss. 1-2. P. 30–55.
24. Danov K.D., Kralchevsky P.A. Capillary forces between particles at a liquid interface: General theoretical approach and interactions between capillary // Ibid. P. 91–103.
25. Wang J., Yoon R.-H., Morris J. AFM surface measurements conducted between gold surface treated in xanthate solutions // Intern. J. Mineral Process. 2013. Vol. 122. P. 13–21.