ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сульфидная флотация руды Наталкинского месторождения, содержащей 0,6—0,7 г/т золота, обеспечивает извлечение Au на уровне 56 %. При увеличении содержания золота в питании до 1,7—1,8 г/т извлечение его в концентрат возрастает до 71 % и более. Степень концентрации при этом находится в пределах 30—35 ед. Качество концентрата основной флотации по содержанию золота составляет 18—23 г/т из бедного питания и 68—74 г/т — из богатого. Снижение содержания природного угля в руде методом предварительной флотации с применением керосина малоэффективно, поскольку потери золота с угольным концентратом превышают 21 %. Экспериментальные данные свидетельствуют о возможности получения концентрата с содержанием золота от 40 до 95 г/т при выходе его в пределах 30—5 %. Извлечение Au при этом составляет 90—35 %.

В укрупненном опыте по флотации руды, содержащей 2,12 г/т золота, при степени концентрации золота на уровне 30 ед., извлечение металла в концентрат составило ~83 %.

На пробах концентрата массовой флотации наиболее высокие показатели выщелачивания наблюдались при измельчении концентрата до 98 % класса –37 мкм. Извлечение золота достигало 96,4 %, что эквивалентно сквозному извлечению 83,2 %. Данный результат не зависит от времени агитации (24—96 ч), содержания в растворе твердой фазы (25—33 %), концентрации угля в пульпе (50—100 г/л) и концентрации раствора цианида.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Конев В.А.* Флотация сульфидов. М.: Недра, 1985.
2. *Шубов Л.Я., Иванков С.И., Щеглова Н.К.* Флотационные реагенты в процессах обогащения минерального сырья: Справочник. В 2 кн. / Под ред. Л.В. Кондратьевой. М.: Недра, 1990.
3. *Абрамов А.А.* Технология обогащения руд цветных и редких металлов. М.: Недра, 1983.
4. *Белицкий О.Н.* // Обогащение руд. 1991. № 6. С. 37.

УДК 669.537.4

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ (НА ПРИМЕРЕ ОЛОВА, ГЕРМАНИЯ И СУРЬМЫ) НА ВЫХОД ПО ТОКУ ЦИНКА

© 2014 г. **В.М. Алкацев, М.И. Алкацев, В.А. Линьков, И.В. Дарчиев**

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

Статья поступила в редакцию 16.07.13 г., доработана 11.02.14 г., подписана в печать 14.02.14 г.

Исследовано влияние олова, германия и сурьмы, а также животного клея на выход по току (η) и удельный расход энергии (*W*) при электролизе цинка. Получены адекватные регрессионные модели зависимостей η и *W* от плотности тока на катоде, концентраций примесей и животного клея в электролите при постоянной температуре. Определены ранги независимых переменных по интенсивности влияния на величину η. Они располагаются в кластере следующим образом (по убыванию воздействия): Ge, Sn, Sb. Экспериментально установлено, что сурьма в диапазоне концентраций 0,001–0,150 мг/л увеличивает выход по току цинка.

Ключевые слова: электролиз цинка, выход по току, удельный расход энергии, математическая статистика.

Алкацев В.М. – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой металлургии цветных металлов СКГМИ (ГТУ) (362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44). Тел.: (8672) 407-329. E-mail: mikchail@list.ru.
Алкацев М.И. – докт. техн. наук, профессор той же кафедры. Тел. и e-mail те же.
Линьков В.А. – канд. техн. наук, профессор той же кафедры. Тел. и e-mail те же.
Дарчиев И.В. – аспирант этой кафедры.

There was investigated influence tin, germanium and antimony, as well as animal glue on the current yield (η) and specific energy consumption during zinc electrolysis. There were received adequate regression models of dependences of η and *W* on cathode current density and animal glue in electrolyte at constant temperature. There were defined ranks of independent variables according with intensity of influence on η value. They are distributed in cluster in the following way (according with decreasing of impact): Ge, Sn, Sb. There was empirically established that antimony in the range of 0,001–0,150 mg/l increases the current efficiency of zinc.

Keywords: zinc electrolysis, current efficiency, specific energy consumption, and mathematical statistics.

ВВЕДЕНИЕ

Впервые на цинковых заводах СССР столкнулись с сильным отрицательным влиянием олова на показатели электролиза в 1995 г. Источником «заражения» технологии электролиза цинка оловом явились цинковые концентраты, импортируемые из Боливии и содержащие до 0,5 % Sn. Кроме того, олово попадает в цинковое производство из вторичного сырья, включающего наряду с цинком олово.

Из научных исследований, посвященных роли олова в процессе электролиза цинка, наиболее информативной является работа [1]. В ней приведены результаты однофакторных экспериментов по выяснению влияния концентрации олова в электролите на выход по току цинка, а также на содержание олова в катодных осадках. Вместе с тем следует отметить, что авторы [1] использовали слишком широкий диапазон концентраций олова в электролите (0—50 мг/л), который, по их же данным, ведет к получению катодного цинка с недопустимым содержанием Sn (до 0,33 %), выходящим далеко за пределы, рекомендуемые госстандартом (≤0,001 % для цинка марки ЦВ0). Кроме того, применялись платиновые аноды вместо свинцовых, принятых на цинковых заводах.

В работе [2] нами было изучено влияние олова на выход по току цинка (η) с использованием метода планируемого эксперимента со следующими независимыми переменными: концентрация олова в растворе [Sn] = 0,001÷0,600 мг/л, плотность тока j = = 400÷800 А/м^2, температура электролита t = 25÷ ÷55 °С. Получены адекватные регрессионные модели зависимости величины η от [Sn], j и t. Установлено также, что характерным признаком повышенной концентрации олова в электролите является внешний вид катодных осадков цинка в виде кратеров диаметром 0,1—1,0 мм, равномерно распределенных по всей поверхности катода.

В настоящей статье использован системный подход к исследованию влияния олова, германия, сурьмы и клея на показатели электролиза цинка — а именно планирование эксперимента и математическая обработка данных с получением математических моделей.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Состав электролита. Исследование проводили с применением электролита, приготовленного из химически чистых реактивов, г/л: 60,0 Zn и 60,0 H_2SO_4. Его объем в ванне составлял 0,25 л.

Примеси в электролите. В качестве примесей были использованы олово, германий и сурьма, концентрацию которых варьировали в пределах 0,001—0,200 мг/л.

Электроды. Катод был алюминиевый с площадью рабочей поверхности 7,5 см^2. Анод — свинцовый с содержанием серебра 1,0 % и рабочей поверхностью также 7,5 см^2.

Количество электричества. Во всех опытах Q = = 1,0 А·ч, что позволяло более корректно сравнивать показатели электролиза. В длительных опытах Q ≤ ≤ 5 А·ч.

Плотность тока на катоде варьировали в пределах 400—800 А/м^2.

Температура электролита была постоянной во всех опытах и составляла 35 °С.

Планирование эксперимента. Был использован нелинейный план Бокса B_3 с числом опытов N = 14. Независимыми переменными при электролизе были: концентрация примеси в электролите [Me] = = 0,001÷0,200 мг/л, плотность тока j = 400÷800 А/м^2 и содержание клея в электролите G = 10÷50 мг/л.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Сводная матрица планирования и результаты эксперимента приведены в таблице.

Регрессионные модели, связывающие выход по току цинка и удельный расход энергии с концентрацией германия, олова и сурьмы в электролите в размерном масштабе, приведены под таблицей:

Матрица планирования эксперимента и результаты опытов по исследованию влияния примесей (Ge, Sn и Sb раздельно), плотности тока и клея на выход по току цинка и удельный расход энергии

№ опыта	Независимые переменные			Выход по току Zn η, доли ед.			Удельный расход энергии *W*, кВт·ч/т		
	$[Me]_i$, мг/л	*j*, А/м^2	*G*, мг/л	Ge	Sn	Sb	Ge	Sn	Sb
1	0,001	400	10	0,9377	0,9467	0,9328	2771	2745	2786
2	0,200	400	10	0,9230	0,9221	0,9325	2824	2827	2795
3	0,001	800	10	0,9542	0,9484	0,9311	3118	3137	3195
4	0,200	800	10	0,9295	0,9352	0,9451	3219	3199	3166
5	0,001	400	50	0,9001	0,8943	0,9098	2878	2896	2847
6	0,200	400	50	0,8861	0,8844	0,9270	2960	2966	2829
7	0,001	800	50	0,9148	0,9107	0,9197	3297	3312	3280
8	0,200	800	50	0,9066	0,9010	0,9426	3246	3266	3122
9	0,001	600	30	0,9172	0,9410	0,9262	3128	3049	3097
10	0,200	600	30	0,9074	0,9156	0,9443	3053	3026	2934
11	0,100	400	30	0,8926	0,9107	0,9344	2902	2844	2772
12	0,100	800	30	0,9205	0,9180	0,9503	3197	3205	3096
13	0,100	600	10	0,9320	0,9352	0,9560	2990	2980	2915
14	0,100	600	50	0,9002	0,9049	0,9344	3115	3098	3000

$$\eta(\mathrm{Ge}) = 0{,}933 - 0{,}177[\mathrm{Ge}] + 7{,}575\cdot10^{-5} j - 2{,}394\cdot10^{-3} G + 0{,}445[\mathrm{Ge}]^2 - 3{,}453\cdot10^{-8} j^2 + 2{,}017\cdot10^{-5} G^2 - 2{,}735\cdot10^{-5} j[\mathrm{Ge}] + 1{,}086\cdot10^{-3} G[\mathrm{Ge}] + 3{,}844\cdot10^{-7} jG \quad (1)$$
$$(\bar{\varepsilon} = 1{,}2\,\%),$$

$$W(\mathrm{Ge}) = 2{,}096 + 382{,}458[\mathrm{Ge}] + 1{,}775j + 7{,}968G - 1{,}39[\mathrm{Ge}]^2 - 6{,}797j^2 - 0{,}06G^2 - 0{,}532j[\mathrm{Ge}] - 7{,}729G[\mathrm{Ge}] - 1{,}156\cdot10^{-3} jG \quad (2)$$
$$(\bar{\varepsilon} = 3{,}6\,\%),$$

$$\eta(\mathrm{Sn}) = 0{,}889 - 0{,}281[\mathrm{Sn}] + 2{,}454\cdot10^{-4} j - 1{,}061\cdot10^{-3} G + 0{,}5976[\mathrm{Sn}]^2 - 2{,}019\cdot10^{-7} j^2 - 5{,}937\cdot10^{-6} G^2 + 7{,}298\cdot10^{-5} j[\mathrm{Sn}] + 1{,}141\cdot10^{-3} G[\mathrm{Sn}] + 5{,}687\cdot10^{-3} jG \quad (3)$$
$$(\bar{\varepsilon} = 1{,}2\,\%),$$

$$W(\mathrm{Sn}) = 2257 + 707{,}996[\mathrm{Sn}] + 1{,}1787j + 3{,}3689G + 876{,}4784[\mathrm{Sn}]^2 - 1{,}062\cdot10^{-4} j^2 - 0{,}0256G^2 - 0{,}854j[\mathrm{Sn}] - 7{,}534G[\mathrm{Sn}] - 1{,}5\cdot10^{-3} jG \quad (4)$$
$$(\bar{\varepsilon} = 1{,}8\,\%),$$

$$\eta(\mathrm{Sb}) = 0{,}904 + 0{,}174[\mathrm{Sb}] + 1{,}202\cdot10^{-4} j - 5{,}861\cdot10^{-4} G - 1{,}126[\mathrm{Sb}]^2 - 1{,}003\cdot10^{-7} j^2 - 2{,}906\cdot10^{-6} G^2 + 1{,}255\cdot10^{-4} j[\mathrm{Sb}] + 1{,}661\cdot10^{-3} G[\mathrm{Sb}] + 4{,}562\cdot10^{-7} jG \quad (5)$$
$$(\bar{\varepsilon} = 1{,}0\,\%),$$

$$W(\mathrm{Sb}) = 2{,}191\cdot10^{3} - 684{,}223[\mathrm{Sb}] + 1{,}625j + 2{,}315G + 6{,}407\cdot10^{3}[\mathrm{Sb}]^2 - 4{,}563\cdot10^{-4} j^2 + 0{,}013G^2 - 1{,}117j[\mathrm{Sb}] - 9{,}812G[\mathrm{Sb}] - 1{,}688\cdot10^{-3} jG \quad (6)$$
$$(\bar{\varepsilon} = 3{,}1\,\%),$$

где [Ge], [Sn] и [Sb] — концентрации индивидуальных примесей, мг/л; *j* — плотность тока, А/м^2; *G* — концентрация животного клея, мг/л; $\bar{\varepsilon}$ — среднее значение относительной ошибки.

На рис. 1 показана зависимость выхода по току цинка от концентрации отдельных примесей в электролите следующего состава, г/л: Zn — 55, H_2SO_4 — 150, клей — 0,043, при *t* = 35 °С и *j* = 550 А/м^2 [3]. Рис. 1, *а* введен в научный оборот в России авторами [4].

Из рис. 1, *б* следует, что в наибольшей мере выход по току цинка снижают Ge и Sn (по убыванию). Зависимость этого показателя от концентрации

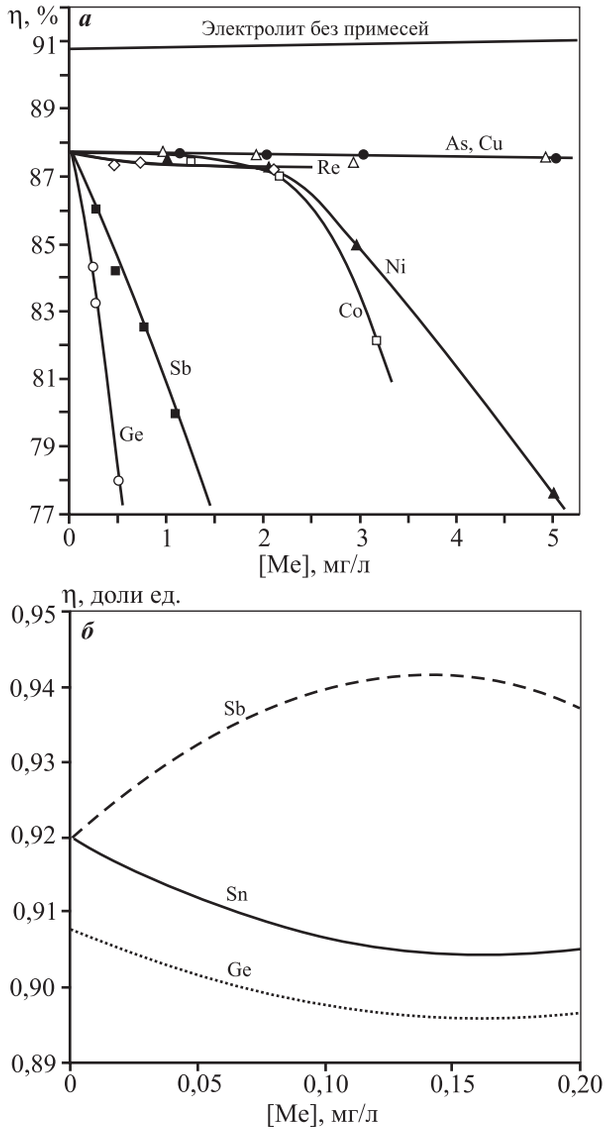

Рис. 1. Зависимости выхода по току цинка от концентрации примесей в электролите

а — по данным [3]; ***б***— на основе регрессионных моделей (1), (3) и (5) при тех же условиях, что и на рис. 1, ***а***

сурьмы в электролите (в диапазоне [Sb] = 0,001÷÷0,200 мг/л) является экстремальной с η_{max} = 0,941 при [Sb] = 0,14 мг/л.

Совместное влияние примесей на выход по току цинка

На рис. 2 показаны сравнительные зависимости выхода по току цинка от концентрации примесей при их совместном и одиночном присутствии в электролите. Так, при суммарном содержании примесей в электролите 0,1 мг/л доля каждой из них составляла 1/3, или 0,033 мг/л.

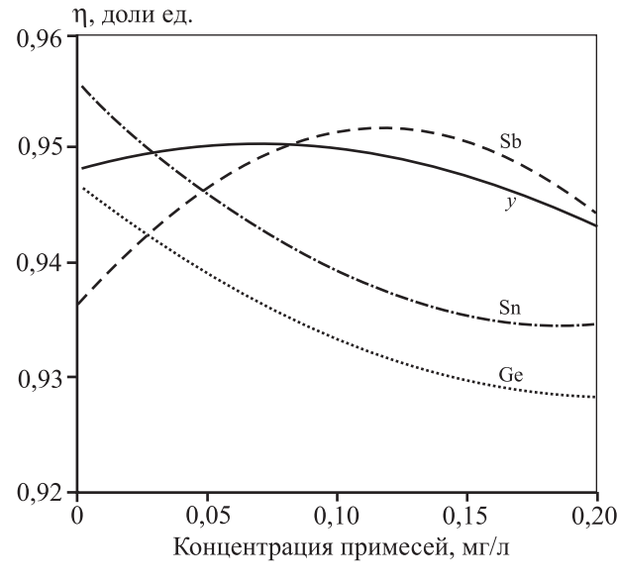

Рис. 2. Зависимости выхода по току цинка от концентрации примесей в электролите

y — при совместном присутствии Ge, Sn и Sb (в равных долях), остальные кривые — при наличии одной примеси в отсутствие других в соответствии с уравнениями (1), (3), (5)
Состав электролита, г/л: Zn — 60, H_2SO_4 — 60, клей — 0,01
j = 600 А/м^2, t = 35 °С, Q = 1,0 А·ч

Установлено (см. рис. 2) , что в условиях принятых ограничений на концентрацию примесей совместное их влияние на выход по току цинка в целом выражается в повышении величины η по сравнению с частным воздействием каждой из примесей.

Оптимальные параметры

В соответствии с моделями (1)—(6) были определены оптимальные параметры электролиза цинка в условиях ограничений как на независимые, так и на зависимые переменные:

$$0{,}001 \le [\text{Me}] \le 0{,}200 \text{ мг/л}, \quad 400 \le j \le 800 \text{ А/м}^2,$$

$$10 \le G \le 20 \text{ мг/л}, \quad \eta \ge 0{,}94, \quad W \le 3000 \text{ кВт·ч/т}.$$

Так, для германия:

$$[\text{Ge}] = 2{,}8\cdot10^{-4} \text{ мг/л}, \quad j = 594{,}7 \text{ А/м}^2,$$

$$G = 13{,}8 \text{ мг/л}, \quad \eta = 0{,}94, \quad W = 3000 \text{ кВт·ч/т};$$

для олова:

$$[\text{Sn}] = 0{,}001 \text{ мг/л}, \quad j = 630{,}2 \text{ А/м}^2,$$

$$G = 15{,}1 \text{ мг/л}, \quad \eta = 0{,}951, \quad W = 3000 \text{ кВт·ч/т};$$

для сурьмы:

$$[\text{Sb}] = 0{,}026 \text{ мг/л}, \quad j = 616{,}6 \text{ А/м}^2,$$

$$G = 10{,}0 \text{ мг/л}, \quad \eta = 0{,}943, \quad W = 3000 \text{ кВт·ч/т}.$$

ВЫВОДЫ

1. Выполнено исследование по определению сравнительного влияния олова, германия и сурьмы (частного и совместного) на выход по току цинка в процессе электролиза сульфатных растворов. Установлено, что указанные примеси относятся к одному кластеру и располагаются по уровню отрицательного влияния на величину η (по убыванию) следующим образом: германий, олово, сурьма.

2. Экспериментально показано, что в диапазоне концентраций 0,001—0,200 мг/л зависимость выхода по току цинка от концентрации сурьмы в электролите является экстремальной с максимальным значением η = 0,941 (94,1 %). При [Sb] > 0,2 мг/л начинается резкое снижение выхода по току.

3. Получены адекватные регрессионные модели, связывающие катодный выход по току цинка и удельный расход энергии с содержанием германия, олова, сурьмы, животного клея в электролите и плотностью тока на катоде при постоянной температуре.

4. Экспериментально выявлено, что примеси Ge, Sn и Sb совместно (в условиях принятых ограничений) оказывают отрицательное воздействие на выход по току цинка в меньшей мере, чем раздельно.

5. На основе анализа моделей получены оптимальные значения плотности тока, концентрации примесей и клея в электролите.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mackinnon D.J., Fenn P.L.* // J. Appl. Electrochem. 1984. Vol. 14, № 6. P. 401.
2. *Алкацев М.И., Алкацев В.М., Дарчиев И.В.* // Сб. докл. 4-го Междунар. конгр. «Цветные металлы-2012» (Красноярск, 5—7 сент. 2012 г.). Красноярск: Версо, 2012. С. 135.
3. *Liebscher R.* // Neue Hutte. 1969. Bd 14, № 11. S. 651.
4. *Баймаков Ю.В., Журин А.И.* Электролиз в гидрометаллургии. М.: Металлургия, 1977.

УДК 669.713

О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГЛИНОЗЕМНОЙ ШИХТЫ С КРИОЛИТОГЛИНОЗЕМНЫМ РАСПЛАВОМ

© 2014 г. **В.М. Сизяков, В.Ю. Бажин, А.А. Власов, Р.Ю. Фещенко, А.Н. Храпкова**

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург

Статья поступила в редакцию 28.01.13 г., доработана 20.04.13 г., подписана в печать 25.04.13 г.

Исследовали влияние насыпной плотности порошка глинозема на скорость его растворения в криолитоглиноземном расплаве следующего состава, мас.%: 5,5 CaF_2; 1,5 MgF_2; 0,3 Al_2O_3; криолитовое отношение КО = 2,28. Температура расплава составляла 950 °С, скорость растворения определяли визуально и по изменению концентрации оксида алюминия в расплаве. Установлено, что скорость растворения глинозема увеличивается пропорционально повышению его насыпной плотности.

Ключевые слова: электролиз, алюминий, растворение глинозема, насыпная плотность, криолитоглиноземный расплав.

Сизяков В.М. – докт. техн. наук, профессор кафедры металлургии университета «Горный» (199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2). E-mail: kafmetall@mail.ru.

Бажин В.Ю. – докт. техн. наук, профессор той же кафедры, декан химико-металлургичекого факультета. E-mail: bazhin-alfoil@mail.ru.

Власов А.А. – канд. техн. наук, ассистент этой кафедры. E-mail: wlasow87@mail.ru.

Фещенко Р.Ю. – аспирант этой кафедры. E-mail: rfeshka@mail.ru.

Храпкова А.Н. – аспирант этой кафедры. E-mail: KhrapkovaAl@yandex.ru.