

УДК 544.6.018

ЭЛЕКТРОФЛОТАЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ СМЕСИ ГИДРОКСИДОВ Cu, Ni, Zn ИЗ ВОДНО-АММИАЧНЫХ ЩЕЛОЧНЫХ РАСТВОРОВ

© 2021 г. Академик РАН В. П. Мешалкин^{1,2}, В. А. Колесников^{1,*}, А. В. Перфильева¹, Аунг Пьяе¹, А. В. Колесников¹

Поступило 19.12.2020 г.

После доработки 12.02.2021 г.

Принято к публикации 03.03.2021 г.

Исследован процесс электрофлотационного извлечения смеси гидроксидов меди, цинка и никеля из водно-аммиачных щелочных растворов. Показано, что анионный ПАВ – мыла талловых масел из древесины хвойных пород – оказывает положительное влияние на эффективность процесса электрофлотационного извлечения смеси гидроксидов: сокращение времени процесса в 4–5 раз, расширение области рН и формирование более устойчивого пенного продукта. Предложена схема формирования заряда поверхности, адсорбции ПАВ и лиганда на дисперсной фазе гидроксидов металлов и их влияния на электрофлотационный процесс.

Ключевые слова: электрофлотация, смесь гидроксидов (медь, никель, цинк), водно-аммиачные растворы, анионные ПАВ, катионные ПАВ, заряд и размер частиц

DOI: 10.31857/S2686953521020072

ВВЕДЕНИЕ

В современном гальванохимическом производстве для получения металлических покрытий требуемого качества и заданных характеристик широко применяются комплексные электролиты, в состав которых входят различные лиганды: аммиак, цианид, тартрат-ион, амины и др., – в первую очередь в процессах меднения, цинкования и никелирования, и получения сплавов Zn–Ni, Cu–Ni, Cu–Zn [1, 2]. В сточных водах, содержащих металлы-комплексобразователи Cu^{2+} , Zn^{2+} и Ni^{2+} и различные неорганические лиганды, гидроксидные осадки при рН 8–10, особенно при высоких концентрациях лиганда, не формируются, что снижает эффективность различных способов извлечения дисперсной фазы [3, 4].

Известны различные способы отделения дисперсной фазы – осаждение, фильтрация, флотация и электрофлотация [5–7]. В последние годы в России [8–10] и за рубежом [11–24] широкое распространение для очистки сточных вод сложного состава, в первую очередь для извлечения взвешенных веществ и гидрофильных осадков частиц

малого размера (10–50 мкм), получил метод электрофлотации.

Используя константы устойчивости комплексов металл–лиганд (Me–L) для различных металлов и лигандов, можно определить области формирования осадков, их концентрацию и условия выделения из сточных вод. При этом в присутствии лигандов образующиеся осадки, как правило, мелкодисперсны, размер частиц при низких концентрациях (менее 100 мг л⁻¹) не превышает 10 мкм.

Проведенные исследования процесса электрофлотационного (ЭФ) извлечения ионов цветных металлов из сульфатно-хлоридных щелочных растворов показали, что эффективность процесса снижается в присутствии аммиака. Возможность формирования осадков гидроксидов металлов, гидроксокомплексов, а также аммиачных комплексов Cu, Zn и Ni связано с определением условий для эффективной очистки сточной воды [7]. Ионы никеля в растворе аммиака в области рН 9–10 образуют более слабые комплексы, чем ионы меди и цинка, которые при увеличении значения рН разрушаются, и ионы никеля переходят в гидроксокомплексы или формируют осадки гидроксида.

Целью данной работы было исследование процесса электрофлотационного извлечения смеси ионов меди, никеля и цинка в виде гидроксидных осадков из водно-аммиачных щелочных растворов в условиях комплексообразования. Были поставлены следующие задачи:

¹ Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, 125047 Москва, Россия

² Институт общей и неорганической химии Российской академии наук имени Н.С. Курнакова, 119071 Москва, Россия

*E-mail: artkoles@list.ru

– исследовать влияние ПАВ различной природы на ЭФ извлечение дисперсной фазы осадков гидроксидов Cu, Zn и Ni;

– установить зависимость степени извлечения смеси гидроксидов Cu, Zn и Ni в водных растворах нейтрального электролита Na_2SO_4 и в присутствии лиганда NH_3 от pH раствора, размера частиц и электрокинетического потенциала (ξ -потенциал) дисперсной фазы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования электрофлотационных процессов проводили по методикам [7–10].

Эффективность электрофлотационного процесса оценивали по значению степени извлечения α (%):

$$\alpha = \frac{C_{\text{исх}} - C_{\text{ост}}}{C_{\text{исх}}} \times 100\%, \quad (1)$$

где $C_{\text{исх}}$, $C_{\text{ост}}$ – исходная и конечная концентрации ионов металлов в водной среде (мг л^{-1}) соответственно, которые определяли атомно-адсорбционным методом на приборе КВАНТ-АФА (Россия) по стандартной методике; погрешность измерений $\pm 1.0\%$.

Физико-химические характеристики частиц дисперсной фазы исследовали при помощи лазерного анализатора частиц Analysette NanoТес/МикроТес/ХТ (Германия) и лазерного анализатора характеристик частиц субмикронного и нано-диапазона Malvern Zetasizer Nano (Великобритания); погрешность измерений $\pm 0.5\%$.

Объектами исследования были водные растворы смеси ионов меди, цинка и никеля состава:

– система А (с нейтральным электролитом): $\text{H}_2\text{O} - \Sigma\text{Me}(\text{OH})_2 - \text{Na}_2\text{SO}_4$, где $\text{Me} = \text{Cu}^{2+}$, Zn^{2+} , Ni^{2+} ,

– система Б (с лигандом): $\text{H}_2\text{O} - \Sigma\text{Me}(\text{OH})_2 - \text{NH}_3$, где $\text{Me} = \text{Cu}^{2+}$, Zn^{2+} , Ni^{2+} .

Система А: $c(\text{Cu}^{2+}) = 30 \text{ мг л}^{-1}$, $c(\text{Zn}^{2+}) = 30 \text{ мг л}^{-1}$, $c(\text{Ni}^{2+}) = 30 \text{ мг л}^{-1}$, $c(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 1 \text{ г л}^{-1}$.

Система Б: $c(\text{Cu}^{2+}) = 30 \text{ мг л}^{-1}$, $c(\text{Zn}^{2+}) = 30 \text{ мг л}^{-1}$, $c(\text{Ni}^{2+}) = 30 \text{ мг л}^{-1}$, $c(\text{NH}_4\text{OH}) = 500 \text{ мг л}^{-1}$.

Условия проведения электрофлотационного процесса: время извлечения $\tau = 20$ мин, плотность тока $J_v = 0.4 \text{ А л}^{-1}$.

В работе использовали промышленные ПАВ, широко применяемые при флотации Al_2O_3 . Анионный ПАВ – мыла талловых масел древесины хвойных пород (МТМх) и катионный ПАВ – ацетат первичных аминов (ФЛОН-1).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно, что в процессе напорной флотации эффективно извлекается гидрофобный осадок, а при электрофлотации извлекается дисперсная фаза с гидрофобно-гидрофильными свойствами, например, гидроксиды металлов [6, 7].

Однако, при избытке лиганда, например, аммиака, образуются устойчивые растворимые комплексы металлов, формирующие коллоидно-устойчивые системы с размером частиц менее 1 мкм. Для извлечения таких объектов флотационные методы не подходят, так как флотокомплекс дисперсная фаза–пузырьки H_2 и O_2 не формируется.

Согласно [25] прочность аммиачных комплексов снижается в ряду: $\text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$. Для гидроксокомплексов наиболее прочные комплексы характерны для ионов Zn^{2+} , в этом случае прочность изменяется в ряду $\text{Zn}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$. Мы установили, что формирование наиболее труднорастворимых осадков для $\text{Cu}(\text{OH})_2$ начинается при pH 8–8.5, для $\text{Zn}(\text{OH})_2$ при pH 9–9.5 и для $\text{Ni}(\text{OH})_2$ при pH 10–10.5. В водной среде растворимость гидроксида никеля выше, чем гидроксида меди. Таким образом, при наличии в исходном растворе смеси ионов металлов Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} в зависимости от значения pH образуются осадки разного состава, часть ионов металлов остается в растворе, и, возможно, образуются растворимые комплексы. В водном растворе Na_2SO_4 при pH 8 после фильтрования было определено, что дисперсная фаза содержала 98% Cu^{2+} , 63% Zn^{2+} , 39% Ni^{2+} от исходного количества каждого из металлов; при pH 9 содержание металлов в дисперсной фазе увеличилось: $\text{Cu}^{2+} - 99\%$, $\text{Zn}^{2+} - 98\%$, $\text{Ni}^{2+} - 93\%$ (табл. 1). В щелочных растворах при pH 10 процентное содержание каждого металла в осадке достигало 99% от исходного, а концентрация свободных ионов, определяемая произведением растворимости, находилась на уровне 0.1–1.0 мг л^{-1} . При pH 11 процентное содержание Zn в дисперсной фазе снизилось до 96%, что связано с повышением растворимости $\text{Zn}(\text{OH})_2$ и формированием ионов ZnO_2^{2-} .

В отличие от водных растворов Na_2SO_4 , в водно-аммиачных растворах количество дисперсной фазы гидроксидов Cu, Zn, Ni, как и ожидалось, понижено (табл. 1). Содержание меди в дисперсной фазе при pH 8 составило 86%, цинка – 48%, никеля – 39% от исходного содержания каждого металла. Остальная часть металлов оставалась в растворе в виде ионов и аммиачных комплексов: $([\text{Cu}(\text{NH}_3)_n]^{2+} + \text{Cu}^{2+})$, $([\text{Zn}(\text{NH}_3)_n]^{2+} + \text{Zn}^{2+})$, $([\text{Ni}(\text{NH}_3)_n]^{2+} + \text{Ni}^{2+})$. При pH 10–11 присутствие аммиака в растворе практически не влияло – 98–99% каждого из металлов находилось в дисперсной фазе.

Возможны случаи, когда метод электрофлотации не эффективен (т.е. степень извлечения достаточно низкая или равна нулю), несмотря на наличие в системе дисперсной фазы, которую можно отделить обычным фильтрованием.

Экспериментальные данные ЭФ процесса извлечения смеси гидроксидов Cu, Zn, Ni из щелочного аммиачного раствора (система Б) в сравнении с водным раствором сульфата натрия (система А) представлены в табл. 1. Для определения максимально возможной степени извлечения дисперсной фазы после электрофлотации дополнительно проведена фильтрация (Ф) растворов.

В сульфатном растворе при pH 8–9 электрофлотационное извлечение протекает неэффективно. Установлено, что степень извлечения сравнительно невысокая: после процесса ЭФ в системе остается еще до 8% дисперсной фазы, которая была отделена фильтрованием. При pH 10 степень извлечения достигает максимальных значений 98–99%. При pH 11 эффективность ЭФ процесса снижается ($\alpha_{\text{эф}} = 78\text{--}85\%$), дополнительное фильтрование повышает степень извлечения α_{max} до 96–99%. При этом степень извлечения цинка ниже, чем меди и никеля, что связано с большей растворимостью $\text{Zn}(\text{OH})_2$ и формированием ионов ZnO_2^{2-} .

В отличие от сульфатных растворов в аммиачном растворе высокие значения $\alpha_{\text{эф}}$ наблюдаются только при pH 11, достигая 97–99%.

Ранее было установлено, что ПАВ различной природы положительно влияют на ЭФ процесс извлечения гидроксидов металлов [7]. В водно-аммиачном растворе при pH 8–9 значение степени извлечения не превышало 85%. При добавлении в раствор анионного ПАВ МТМх степень извлечения существенно возрастала. Рост степени извлечения наблюдался во всем исследованном диапазоне pH 8–11, величины $\alpha_{\text{эф}}$ достигали 97–99% (табл. 2). Указанный факт связан с гидрофобизацией поверхности дисперсной фазы смеси гидроксидов Cu, Zn, Ni. Катионный ПАВ (ФЛОН-1), напротив, не оказал положительного влияния, снижая степень извлечения в слабощелочной области pH на 3–5%.

Важными для анализа причин роста и снижения степени извлечения дисперсной фазы гидроксидов являются физико-химические характеристики: средний размер частиц, величина и знак ζ -потенциала, определенные в работе для реальных систем. Экспериментальные данные, полученные для системы А без ПАВ и с добавлением анионного и катионного ПАВ при различных значениях pH, представлены в табл. 3.

Установлено, что с увеличением pH растет средний размер частиц смеси гидроксидов металлов в растворе. Причем при pH 8 в дисперсной

Таблица 1. Влияние pH раствора и природы электролита на степень извлечения α дисперсной фазы смеси гидроксидов Cu, Zn, Ni

pH	Me	Система А		Система Б	
		$\alpha_{\text{эф}}, \%$ (ЭФ)	$\alpha_{\text{max}}, \%$ (ЭФ + Ф)	$\alpha_{\text{эф}}, \%$ (ЭФ)	$\alpha_{\text{max}}, \%$ (ЭФ + Ф)
8	Cu	90	98	71	86
	Ni	31	39	52	59
	Zn	52	63	42	48
9	Cu	99	99	88	98
	Ni	86	93	78	93
	Zn	98	99	85	98
10	Cu	96	99	93	99
	Ni	95	99	95	99
	Zn	91	98	96	99
11	Cu	85	99	97	99
	Ni	78	99	99	99
	Zn	79	96	99	99

Таблица 2. Влияние pH и природы ПАВ на степень электрофлотационного извлечения дисперсной фазы смеси гидроксидов Cu, Zn, Ni из водно-аммиачных растворов (система Б)

pH	Me	$\alpha_{\text{эф}}, \%$		
		Система Б	Система Б + МТМх	Система Б + ФЛОН-1
8	Cu	71	96	89
	Ni	52	89	40
	Zn	42	97	60
9	Cu	88	96	92
	Ni	78	98	58
	Zn	85	98	54
10	Cu	93	97	92
	Ni	95	99	90
	Zn	91	97	92
11	Cu	97	97	93
	Ni	99	98	93
	Zn	99	98	98

фазе в основном преобладает гидроксид меди; при pH 9 смесь в основном состоит из $\text{Cu}(\text{OH})_2$ и $\text{Zn}(\text{OH})_2$; при pH 10 смесь содержит $\text{Cu}(\text{OH})_2$, $\text{Zn}(\text{OH})_2$, $\text{Ni}(\text{OH})_2$.

Несмотря на то что оксид цинка обладает хорошей флотационной активностью и высоким отрицательным значением ζ -потенциала, при pH 11 его растворимость увеличивается, поэтому степень извлечения снижается. Высокие отрица-

Таблица 3. Влияние pH раствора, природы ПАВ на величину ξ -потенциала и средний размер частиц смеси гидроксидов Cu, Ni и Zn в водном растворе Na₂SO₄

pH	Система А		Система А + ФЛОН-1		Система А + МТМх	
	d, мкм	ξ , мВ	d, мкм	ξ , мВ	d, мкм	ξ , мВ
8	17	-16	18	-9	13	-4
9	31	-14	21	-8	16	-7
10	40	-10	28	-6	25	-9
11	32	-9	40	-3	34	-12

Таблица 4. Влияние pH раствора, природы ПАВ на величину ξ -потенциала и средний размер частиц смеси гидроксидов Cu, Ni и Zn в водном растворе NH₄OH (система Б)

pH	Система Б		Система Б + ФЛОН-1		Система Б + МТМх	
	d, мкм	ξ , мВ	d, мкм	ξ , мВ	D, мкм	ξ , мВ
8	5	-8	11	-4	12	-1
9	5	-6	13	-5	18	-3
10	5	-5	13	-6	18	-6
11	10	-8	18	-9	34	-8

тельные значения ξ -потенциала дисперсной фазы при pH 8–9 в растворе Na₂SO₄ связаны со специфической адсорбцией ионов SO₄²⁻. В растворах NaNO₃, NaCl при pH 8–9 величина ξ -потенциала близка к нулю, что соответствует изоэлектрической точке гидроксидов.

При введении в раствор катионного ПАВ ФЛОН-1 значение ξ -потенциала повысилось. При этом размер частиц при pH 8–10 не изменялся. При pH 11 за счет адсорбции катионного ПАВ на отрицательно заряженной поверхности осадка гидроксида размер частиц дисперсной фазы увеличился. Анионный ПАВ не оказывал влияния на размер частиц дисперсной фазы, снижая заряд по-

верхности от -4...-7 мВ без ПАВ до -16...-14 мВ при pH 8–9, что связано с вытеснением анионным ПАВ адсорбированных ионов SO₄²⁻ с поверхности.

Для системы Б при pH 8–10 следует обратить особое внимание на небольшие размеры частиц дисперсной фазы: 5–10 мкм (табл. 4). Величина ξ -потенциала отрицательна и составила -5...-8 мВ. Это является причиной снижения степени извлечения в электрофлотационном процессе. При pH 11 в водном растворе происходит частичное разрушение аммиачного комплекса и формирование гидросокомплекса, о чем свидетельствуют рост отрицательных значений ξ -потенциала и увеличение размера частиц до 10 мкм. Это в совокупности обеспечило высокую эффективность электрофлотационного процесса, величина $\alpha_{эф}$ достигла 99%. Присутствие катионного ПАВ ФЛОН-1 не оказывало влияния на величину и знак ξ -потенциала, но привело к увеличению размера частиц в 2 раза. Введение анионного ПАВ МТМх способствовало образованию более крупных частиц (12–18 мкм) при pH 8–10 и до 34 мкм при pH 11. То есть использование ПАВ положительно влияло на процесс электрофлотационного извлечения дисперсной фазы.

На рис. 1–3 схематично представлено формирование заряда поверхности σ для гидроксидов металлов: в водном растворе электролитов NaNO₃ и NaCl (рис. 1); в электролите, где наблюдается специфическая адсорбция ионов SO₄²⁻ (рис. 2); в аммиачном растворе в присутствии лиганда NH₃ для комплексообразователей – ионов Cu²⁺, Zn²⁺, Ni²⁺ (рис. 3).

Исследования показали, что заряд дисперсной фазы (ξ -потенциал) имеет отрицательные значения в растворах Na₂SO₄ и NH₄OH. В этом случае молекулы воды вытесняются с поверхности оксидов за счет адсорбции NH₃ или ионов SO₄²⁻.

Катионные ПАВ на гидроксидах металлов адсорбируются по кислородным группам, тогда как анионные ПАВ – по ионам металла, вытесняя молекулы воды. Адсорбция ПАВ гидрофобизирует поверхность и приводит к росту степени электрофлотационного извлечения. Схематично ад-

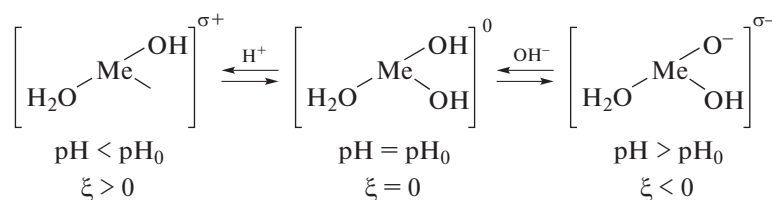


Рис. 1. Механизм формирования заряда поверхности гидроксида в инактивном электролите (концентрация NaCl и NaNO₃ 1 г л⁻¹).

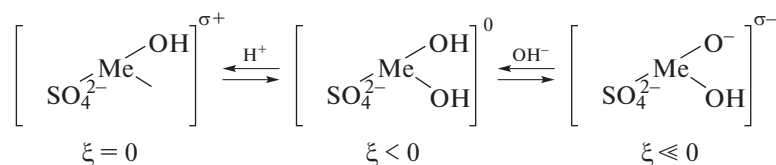


Рис. 2. Механизм формирования заряда поверхности гидроксида в присутствии специфически адсорбирующихся ионов SO_4^{2-} (концентрация Na_2SO_4 1 г л⁻¹).

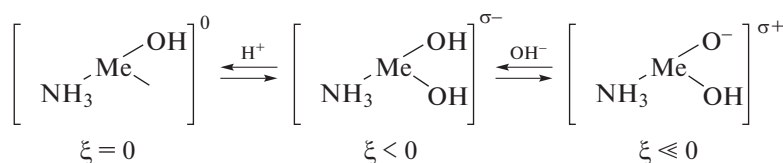


Рис. 3. Механизм формирования заряда поверхности гидроксида в присутствии лиганда (концентрация NH_4OH 1 г л⁻¹).

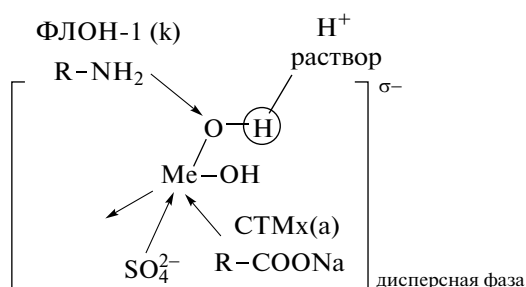


Рис. 4. Механизм адсорбции ПАВ различной природы на гидроксиде (Me = Cu, Zn, Ni) в растворе Na_2SO_4 .

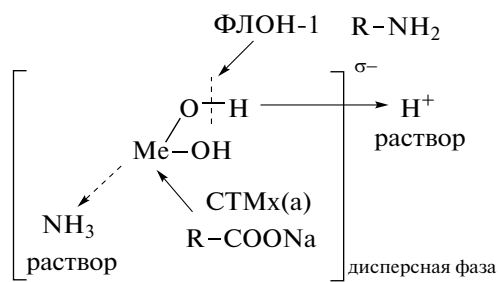


Рис. 5. Механизм адсорбции ПАВ различной природы на гидроксиде (Me = Cu, Zn, Ni) в растворе NH_4OH .

сорбционный процесс представлен на рис. 4 для водного раствора на основе сульфата натрия и на рис. 5 для щелочного аммиачного раствора. Предложенные механизмы позволяют оценить влияние ПАВ на электрофлотационный процесс извлечения дисперсной фазы.

ПАВ оказывает положительное влияние не только на степень извлечения, но и на скорость процесса. На рис. 6 представлены данные по кинетике ЭФ процесса извлечения смеси гидроксидов металлов Cu, Zn, Ni из водно-аммиачного раствора. В присутствии ПАВ степень извлечения достигала 96% в течение 5 мин обработки. Пенный продукт (смесь гидроксидов) устойчив и не разрушался во времени, что связано, в первую очередь, с гидрофобизацией их поверхности. В пользу влияния поверхностных характеристик свидетельствует тот факт, что эффекты проявляются при низких концентрациях ПАВ (5 мг л⁻¹ на 100 мг л⁻¹ гидроксидного осадка). Степень извлечения возрастала в том числе за счет увеличения размера частиц примерно в 3 раза и гидрофобизации поверхности.

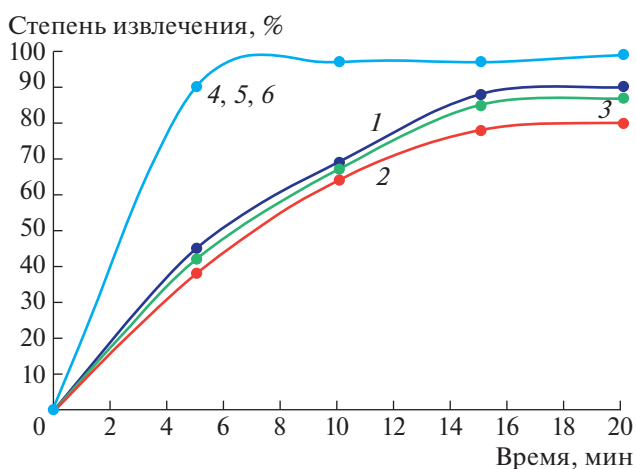


Рис. 6. Влияние ПАВ МТМх на кинетику процесса извлечения смеси гидроксидов меди, цинка и никеля из водных аммиачных растворов: $\text{Cu}(\text{OH})_2$, без ПАВ (кривая 1); $\text{Ni}(\text{OH})_2$, без ПАВ (кривая 2); $\text{Zn}(\text{OH})_2$, без ПАВ (кривая 3); $(\text{Cu}(\text{OH})_2, \text{Zn}(\text{OH})_2, \text{Ni}(\text{OH})_2) + \text{МТМх}$ (кривые 4, 5, 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что дисперсная фаза смеси гидроксидов Cu, Zn, Ni в водно-аммиачном щелочном растворе может быть извлечена с высокими значениями степени извлечения при pH 8–10 в присутствии промышленного анионного ПАВ МТМх. Эффективность влияния анионного ПАВ на степень извлечения связана с увеличением размера флотируемых частиц и гидрофобизацией поверхности дисперсной фазы смеси гидроксидов Cu, Zn, Ni. Найдены оптимальные условия (pH 10, объемная плотность тока $J_v = 0.4 \text{ А л}^{-1}$, время флотации не более 20 мин), при которых величина $\alpha_{\text{эф}}$ достигает 98–99%, пенный продукт устойчив и не разрушается в процессе электролиза при выделении газов H_2 и O_2 .

Установлено, что ПАВ, использованные в работе, за счет адсорбции на гидроксидных осадках и пузырьках электролитических газов при их минимальных концентрациях (5 мг л^{-1} на 100 мг л^{-1} дисперсной фазы) практически не обнаруживаются в растворе после электрофлотации (остаточная концентрация не превышала 0.1 мг л^{-1}).

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования проведены с использованием оборудования ЦКП РХТУ им. Д.И. Менделеева. Исследуемые в работе ПАВ МТМх и ФЛОН-1 предоставлены проф. Н.А. Шаповаловым (НИУ “БелГУ”, Белгород, Россия).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке РХТУ им. Д.И. Менделеева (проект № 3-2020-004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов С.С.* Экологически безопасное гальваническое производство. 2-е изд. М.: Глобус, 2002. ISBN 5-89021-016-05
2. *Шеханов Р.Ф., Гридчин С.Н., Балмасов А.В.* // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2016. Т. 59. № 1. С. 51–53. <https://doi.org/10.6060/tcct.20165901.5296>
3. *Шеханов Р.Ф., Гридчин С.Н., Балмасов А.В., Румянцева К.Е.* // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2014. Т. 57. № 8. С. 47–51.
4. *Shekhanov R.F., Gridchin S.N., Balmasov A.V.* // Russ. J. Electrochem. 2018. V. 54. № 4. P. 355–362. <https://doi.org/10.1134/S1023193518040079>
5. *Колесников В.А., Меньшутина Н.В., Десятов А.В.* Оборудование, технологии и проектирование систем очистки сточных вод / М.: ДеЛи плюс, 2016.
6. *Ksenofontov B.S.* // Santechnika magazine (Water supply pipes fittings). 2020. № 2. P. 46–51.
7. *Kolesnikov V.A., P'in V.I., Brodskiy V.A., Kolesnikov V.A.* // Theor. Found. Chem. Eng. 2017. V. 51. № 4. P. 361–375. <https://doi.org/10.1134/S0040579517040200>
8. *Kolesnikov A., Milyutina A., Desyatov A., Kolesnikov V.* // Sep. Purif. Technol. 2019. V. 209. P. 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.07.014>
9. *Колесников А.В., Мешалкин В.П., Давыдова Т.В., Колесников В.А.* // ДАН. Химия, науки о материалах. 2020. Т. 494. № 1. С. 55–61. <https://doi.org/10.31857/S2686953520050076>
10. *Мешалкин В.П., Колесников А.В., Савельев Д.С., Колесников В.А., Белозерский А.Ю., Меньшова И.И., Масляникова Д.В., Сычева О.В.* // ДАН. 2019. Т. 486. № 6. С. 680–684. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524866680-684>
11. *Garcia-Segura S., Eiband M.M. S.G., de Melo J.V., Martínez-Huitle C.A., Martínez-Huitle C.A.* // J. Electroanal. Chem. 2017. V. 801. P. 267–299. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.07.047>
12. *Paulista L.O., Presumido P.H., Theodoro J.D.P., Pinheiro A.L.N.* // Environ. Sci. Pollution Res. 2018. V. 25. P. 19790–19800. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-018>
13. *A. Daniel Villalobos-Lara A.D., Pérez T., Uribe A.R., Alfaro-Ayala J.F., de Jesús Ramírez-Minguela J., Minchaca-Mojica J.I.* // J. Electroanal. Chem. 2020. V. 858. 113807. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.113807>
14. *Aoudj S., Khelifa A., Drouiche N.* // Chemosphere. 2016. V. 180. P. 379–387. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1095120>
15. *Kolesnikov V.A., Brodsky V.A., Perfil'eva A.V., Kolesnikov A.V.* // Pure Appl. Chem. 2017. V. 89. № 10. P. 1535–1541. <https://doi.org/10.1515/pac-2016-1113>
16. *Merzouk B., Madani K., Sekki A.* // Desalination. 2010. V. 250. № 2. P. 573–577. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.09.026>
17. *Balla W., Essadki A.H., Gourich B., Dassaa A., Chenik H., Azzi M.* // J. Hazard. Mater. 2010. V. 184. № 1–3. P. 710–716. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.08.097>
18. *Mirshafiee A., Rezaee A., Mamoory R. S.* // J. Cleaner Prod. 2018. V. 198. P. 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.201>
19. *Tchamango S.R., Darchen A.* // J. Environ. Chem. Eng. 2018. V. 6 (4). P. 4546–4554. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.044>
20. *Gamage N.P., Chellam S.* // Environ. Sci. and Technol. 2014. V. 48. № 2. P. 1148–1157. <https://doi.org/10.1021/es405080g>
21. *Ghernaout D., Naceur M.W., Ghernaout B.* // Desalination and Water Treatment. 2011. № 28 (1–3). P. 287–320. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.1493>
22. *Kyzas G., Matis K.* // Processes. 2018. V. 6 (8). № 116. P. 1–16. <https://doi.org/10.3390/pr6080116>
23. *Peleka E.N., Gallios G.P., Matis K.A.* // J. Chem. Technol. Biotechnol. 2018. V. 93. P. 615–623. <https://doi.org/10.1002/jctb.5486>
24. *Sillanpää M., Shestakova M.* Electrochemical Water Treatment Methods: Fundamentals, Methods and Full Scale Applications. Butterworth-Heinemann, 2017. 1–310 p.
25. *Лурье Ю.Ю.* Справочник по аналитической химии. 5-е изд. М.: Химия, 1979. 480 с.

ELECTROFLOTATION EXTRACTION OF A MIXTURE OF Cu, Ni, Zn HYDROXIDES FROM WATER-AMMONIA ALKALINE SOLUTIONS

Academician of the RAS V. P. Meshalkin^{a,b}, V. A. Kolesnikov^a, A. V. Perfilieva^a,
Aung Pyae^a, and A. V. Kolesnikov^{a,#}

^a D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 125047 Moscow, Russian Federation

^b Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences,
119071 Moscow, Russian Federation

[#] E-mail: artkoles@list.ru

The process of electroflotation extraction of a mixture of Cu, Zn, and Ni hydroxides from aqueous-ammonia alkaline solutions was investigated. It is shown that the anionic surfactant coniferous tall oil soaps from coniferous wood has a positive effect on the efficiency of the electroflotation extraction of a mixture of hydroxides by reducing the process time by 4–5 times, expanding the pH range and forming a more stable foam product. A scheme of surface charge formation, surfactant and ligand adsorption on the dispersed phase of metal hydroxides and their influence on the electroflotation process was proposed.

Keywords: electroflotation, a mixture of hydroxides (Cu, Ni, Zn), aqueous ammonia solutions, anionic surfactant, cationic surfactant, charge and particle size